

# Požarna otpornost betona s opekarskim lomom kao agregatom

---

Miličević, Ivana

Doctoral thesis / Disertacija

2014

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:213795>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-22**



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK  
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

*Repository / Repozitorij:*

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)



  
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

## DOKTORSKA DISERTACIJA

# POŽARNA OTPORNOST BETONA S OPEKARSKIM LOMOM KAO AGREGATOM

### PODACI O AUTORU

Ime i prezime: **dr. sc. Ivana Miličević**, dipl.ing.građ.

Mjesto i godina rođenja: Vinkovci, Republika Hrvatska, 1980.

Diplomirala: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2005.,

Zaposlena: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek

### PODACI O DOKTORSKOM RADU:

Znanstveno područje: Tehničke znanosti  
Znanstveno polje: Građevinarstvo

Mentorica: prof. dr. sc. Dubravka Bjegović

### POSTUPAK OCJENE I OBRANA:

Prijava teme: lipanj 2009.

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

doc. dr. sc. Ivanka Netinger, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, predsjednica  
prof. dr. sc. Dubravka Bjegović, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, mentorica  
prof. dr. sc. Dragan Morić, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, član

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

doc. dr. sc. Ivanka Netinger, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, predsjednica  
prof. dr. sc. Dubravka Bjegović, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, mentorica  
prof. dr. sc. Dragan Morić, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, član

Mjesto i datum obrane: Građevinski fakultet Osijek, 17. listopada 2014.

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK**



Ivana Miličević, dipl. ing. građ.

**POŽARNA OTPORNOST BETONA  
S OPEKARSKIM LOMOM KAO AGREGATOM**

***DOKTORSKA DISERTACIJA***

MENTOR:

prof. dr. sc. Dubravka Bjegović, dipl. ing. građ.

OSIJEK, 2014.

**JOSIP JURAJ STROSSMAYER UNIVERSITY OF OSIJEK  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING OSIJEK**



Ivana Miličević, dipl. ing. građ.

**FIRE RESISTANCE OF CONCRETE  
WITH CRUSHED BRICKS AND ROOF TILES**

*DOCTORAL THESIS*

MENTOR:  
prof. dr. sc. Dubravka Bjegović, dipl. ing. građ.

OSIJEK, 2014



*Zahvaljujem svojoj mentorici, prof. dr. sc. Dubravki Bjegović koja je nesebično i strpljivo prenosila na mene svoje znanje, prijateljstvo i mudrost, čije su povjerenje, pomoć, podrška i razumijevanje potpuni i bezrezervni.*

*Zahvaljujem kolegama s Građevinskog fakulteta u Zagrebu na pomoći, potpori i poticaju mojem znanstvenom radu.*

*Mom dragom suprugu i djeci zahvaljujem na ljubavi, bezuvjetnoj podršci i neizmjernoj vjeri u moj uspjeh.*

*Ivana Miličević*

## ***Autorov životopis***

Ivana Miličević rođena je 03. ožujka 1980. godine u Vinkovcima gdje je završila osnovnu školu i opću gimnaziju. Na Građevinskom fakultetu Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku diplomirala je 2005. godine pod mentorstvom prof. dr. sc. Damira Markulaka, dipl. ing. građ.

Od studenog 2004. do svibnja 2005. godine radila je kao suradnik u Odjelu za armiranobetonske konstrukcije tvrtke „Vibrobeton“ u Vinkovcima. Od svibnja 2005. godine do travnja 2007. godine zaposlena je kao suradnik u Odjelu za investicije i izgradnju u Rektoratu Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku. Od svibnja 2007. godine kao asistent radi na Građevinskom fakultetu u Osijeku, Zavodu za materijale i konstrukcije.

Sveučilišni poslijediplomski doktorski studij građevinarstva na Građevinskom fakultetu u Osijeku upisala je 2007. godine smjer konstrukcije.

Bila je voditelj dva interna projekta Građevinskog fakulteta u Osijeku, te kao istraživač sudjelovala na projektima:

- projekt br. 082-0822161-2159, Razvoj novih materijala i sustava zaštite betonskih konstrukcija, voditeljice prof. dr. sc. Dubravke Bjegović, financiran od Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta, od 2008. do 2009. godine,
- Hungary-Croatia IPA Cross-border Co-operation Programme 2007-2013, Air tightness investigation of rooms from the point of view of energy and comfort, voditelja prof. dr. sc. Željka Koškog, od 2011. do 2012. godine,
- projekt br. 082-0822161-2990, Od nano do makrostrukture betona, voditeljice prof. dr. sc. Nine Štirmer, financiranog od Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa, od 2013. godine.

Sudjeluje u održavanju nastave na predmetima Građiva, Građevinski materijali, Poznavanje materijala, Tehnologija betona i Betoni posebnih namjena.

Sudjelovala je u pripremi i prijavi europskih projekata, te je u koautorstvu objavila 7 znanstvenih radova u časopisima A skupine, sudjelovala je i održala izlaganja na niz međunarodnih konferencija.

Aktivni je član:

- International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, RILEM
- Tehničkog odbora HZN/TO 553 Predgotovljeni proizvodi.

Udana je i majka dvoje djece.

## SAŽETAK

Recikliranje drobljenog glinenog crijepa i opeke je ekološki prihvatljiv način njihovog zbrinjavanja. Jedan od načina ponovne upotrebe jest upotreba kroz reciklirani agregat, dobiven drobljenjem glinene opeke i crijepa nastalih kao lom pri njihovoj proizvodnji. Budući da primjena betona s recikliranim opekarskim lomom nije uvelike raširena, potrebno je dodatno istražiti mogućnost primjene u područjima u kojima takav beton pokazuje bolja svojstva od betona s prirodnim agregatom.

Uzimajući u obzir da beton s recikliranim opekarskim lomom, na temelju dosada provedenih istraživanja, ima bolja toplinska svojstva i otpornost na požar od običnog betona s prirodnim agregatom, u radu je istražena mogućnost primjene betona od recikliranog opekarskog loma u području požarne otpornosti za predgotovljene betonske stropne blokove. Prikazan je pregled područja trenutne primjene betona s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom, ciljeva i mogućih ograničenja koja se odnose na istraživanje upotrebe betona s drobljenim opekarskim lomom u novim konstrukcijskim aplikacijama. Prikazani su zahtjevi koje je potrebno zadovoljiti kako bi se osigurala primjena opekarskog loma kao agregata za beton u novim predgotovljenim betonskim stropnim sustavima.

Eksperimentalna ispitivanja imaju značajnu ulogu u području inovativne upotrebe postojećih materijala, poboljšanju i razvoju njihovog proizvodnog procesa. Postavljeni cilj eksperimentalnog ispitivanja može uzrokovati komplicirani postupak provedbe ispitivanja zbog velikog broja varijabli koje mogu utjecati na konačni cilj. Stoga je u radu odabran postupak planiranja eksperimenta kojim su se uzele u obzir najvažnije varijable i time smanjio opseg ispitivanja, a da pri tome nije ugrožena točnost rezultata ispitivanja. U radu su provedena preliminarna eksperimentalna ispitivanja svojstava komponenti betona i samog betona s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom te je opisan plan eksperimentalnog ispitivanja temeljem kojega su ispitivanja provedena. Proveden je odabir prihvatljivih mješavina betona na temelju eksperimenta i na temelju matematičkog modela. Optimalne mješavine odabrane su višekriterijskim odlučivanjem.

Odabrane optimalne mješavine ispitane su na razini materijala u pogledu fizikalno-mehaničkih i trajnosnih svojstava nakon izloženosti temperaturama od 20°C, 200°C, 600°C, 800°C i 1000°C. Na temelju rezultata ispitivanja optimalnih mješavina odabrana je jedna mješavina s najboljim svojstvima u svježem i očvrslom stanju s obzirom na moguću primjenu u stropnim blokovima.

Ispitivanja optimalne mješavine provedena su i na razini elementa konstrukcije – stropnog bloka. Izrađeni su i ispitani stropni blokovi s opekarskim lomom kao agregatom. Ispitana su njihova svojstva na sobnoj temperaturi te rezidualna svojstva nakon izlaganja visokim temperaturama, a sve prema zahtjevima norme HRN EN 15037-2:2009: *Stropni sustavi sastavljeni od nosača i blokova – 2. dio: Betonski blokovi*. Također je proveden dokaz nosivosti stropnih blokova prije i nakon izlaganja visokim temperaturama.

Zaključno je dokazano da je moguća izrada blokova ispune za predgotovljene stropne konstrukcije povećane požarne otpornosti kao rezultata definiranja primjene betona s opekarskim lomom kao agregatom.



## ***ABSTRACT***

Recycling of crushed clay brick and roof tile is an environmentally friendly way of their disposal. During the production and transport a part of produced bricks and roof tiles becomes broken in the factory and it is crushed straight away in the factory. One way to reuse crushed bricks and roof tiles is through their usage as recycled aggregate for concrete. Since the application of concrete with crushed clay bricks and roof tiles is not widespread, it is necessary to investigate the possibility of applying it in areas where such concrete shows better properties than concrete with natural aggregate.

Based on literature review, concrete with crushed clay bricks and roof tiles has better thermal properties and fire resistance than ordinary concrete with natural aggregate. In dissertation is investigated the possibility of usage of crushed bricks and roof tiles in the fire resistant precast concrete roof blocks. The review of the current areas of application of concrete with crushed bricks and roof tiles as aggregate, objectives and possible constraints related to researching the usage of crushed bricks and roof tiles in new construction applications are shown. The requirements to be met in order to ensure the application of crushed clay bricks and roof tiles as concrete aggregate in new precast concrete block and beam floor systems are shown.

Experimental investigations have a significant role in the area of innovative application of existing materials, improvement and development of their production process. Set goal of experimental investigation could be very complicated because of great number of variables that could have a significant impact on the results of experiment. Therefore, in dissertation is chosen a plan of experiment that comprises the most important variables, and in this way the extent of research is decreased without a risk of significant reduction of result accuracy.

A preliminary experimental testing of properties of concrete components was carried out, as well as the testing of the concrete with crushed clay brick and roof tiles. Design of experiment applied to testing has been described.

Selection of acceptable mixtures was carried out using experimental results and mathematical model. Selection of optimal mixture was carried out using multi-criteria optimization.

Selected optimal mixtures were tested at the level of material in terms of physical-mechanical and durability properties after exposure to temperatures of 20° C, 200° C, 600° C, 800° and 1000° C. Based on the results of experimental investigation optimal mixture with the best properties in fresh and hardened state is selected with a view to the possible application in the precast concrete blocks.

Experimental tests were conducted on optimal mixture at the level of structural elements – precast concrete blocks. Precast concrete blocks were made of concrete with crushed clay bricks and roof tiles. Their properties were tested at room temperature and after exposure to high temperature, in accordance with requirements of *HRN EN 15037-2:2009: Precast concrete products – Beam and block floor systems – Part 2: Concrete blocks*. Ultimate limit state verification of blocks was carried out before and after exposure to high temperatures.

It was concluded that it is possible to produce precast concrete blocks made of concrete with crushed bricks and roof tiles as aggregate that are applicable for precast concrete block and beam roof/floor systems with improved resistance to high temperature.

**Keywords:**

crushed bricks, crushed tiles, concrete properties, experiment design, high temperatures, optimization, precast concrete blocks.



## **Sadržaj**

|   |            |
|---|------------|
| <b>Autorov životopis .....</b>  | <b>II</b>  |
| <b>SAŽETAK .....</b>  | <b>III</b> |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>IV</b>  |
| <b>1 Uvod i ciljevi istraživanja .....</b>  | <b>5</b>   |
| <b>1.1. Obrazloženje teme .....</b>   | <b>10</b>  |
| <b>1.2. Metodologija rada .....</b>   | <b>11</b>  |
| <b>1.3. Očekivani znanstveni doprinos.....</b>  | <b>12</b>  |
| <b>2 Pregled literature.....</b>  | <b>13</b>  |
| <b>2.1. Pregled dosadašnjih istraživanja upotrebe recikliranog opekarskog loma kao agregata .....</b> | <b>13</b>  |
| <b>2.1.1. Svojstva reciklirane opeke kao agregata .....</b>   | <b>13</b>  |
| 2.1.1.1. Drobljenje i granulacija reciklirane opeke.....  | 14         |
| 2.1.1.2. Poroznost i apsorpcija reciklirane opeke .....   | 14         |
| 2.1.1.3. Čvrstoća reciklirane opeke kao agregata .....  | 15         |
| 2.1.1.4. Prisutnost štetnih sastojaka u recikliranom agregatu.....                                    | 15         |
| 2.1.1.5. Klasifikacija reciklirane opeke kao agregata .....   | 17         |
| 2.1.1.6. Kontrola kvalitete.....  | 18         |
| 2.1.1.7. Sumarni prikaz ispitivanja svojstava drobljene opeke.....                                    | 19         |
| <b>2.1.2. Projektiranje sastava betonske mješavine .....</b>  | <b>21</b>  |
| <b>2.1.3. Fizikalno-mehanička svojstva betona s recikliranom opekom.....</b>                          | <b>22</b>  |
| 2.1.3.1. Tlačna čvrstoća .....  | 22         |
| 2.1.3.2. Vlačna čvrstoća.....   | 26         |
| 2.1.3.3. Veza između reciklirane opeke i cementne paste .....   | 28         |
| 2.1.3.4. Modul elastičnosti .....   | 28         |
| 2.1.3.5. Skupljanje.....  | 30         |
| 2.1.3.6. Utjecaj polimera na beton s recikliranom opekom .....  | 31         |
| <b>2.1.4. Trajnost betona s recikliranom opekom.....</b>  | <b>32</b>  |
| 2.1.4.1. Apсорpcija vode.....   | 33         |
| 2.1.4.2. Smrzavanje i odmrzavanje .....   | 34         |
| 2.1.4.3. Otpornost na habanje.....  | 35         |
| 2.1.4.4. Toplinska provodljivost.....   | 35         |
| 2.1.4.5. Otpornost na požar .....   | 36         |

|  |     |
|--|-----|
| <b>2.2. Stropne konstrukcije</b> .....   | 37  |
| <b>2.2.1. Armiranobetonski stropovi</b> .....  | 38  |
| <b>2.2.2. Stropovi s gredama od armirane šuplje opeke</b> .....  | 44  |
| <b>2.2.3. Upotreba recikliranog agregata u proizvodnji predgotovljenih betonskih elemenata</b> .....                       | 46  |
| <b>2.3. Predgotovljeni betonski proizvodi: stropni sustavi sastavljeni od nosača i blokova</b> .....                       | 47  |
| <b>2.3.1. Zahtjevi za predgotovljene betonske proizvode prema normi HRN EN 13369:2004</b> .....                            | 47  |
| <b>2.3.2. Zahtjevi za predgotovljene betonske stropne sustave: nosače, prema normi HRN EN 15037-1:2008</b> .....           | 52  |
| <b>2.3.2.1. Proračun graničnog stanja nosivosti i uporabljivosti stropnih sustava</b> .....                                | 62  |
| <b>2.3.3. Zahtjevi za predgotovljene betonske stropne sustave: betonske blokove, prema normi HRN EN 15037-2:2009</b> ..... | 69  |
| <b>2.4. Požarna otpornost</b> .....  | 77  |
| <b>2.4.1. Djelovanje požara na beton</b> .....   | 78  |
| <b>2.4.2. Djelovanje požara na čelik</b> .....   | 83  |
| <b>2.4.3. Djelovanje požara na konstrukcije</b> .....  | 85  |
| <b>2.4.3.1. Proračunska situacija i proračunski požar</b> .....  | 87  |
| <b>2.4.3.2. Temperaturni proračun i toplinska djelovanja</b> .....   | 87  |
| <b>2.4.3.3. Temperaturne krivulje</b> .....  | 88  |
| <b>2.4.3.4. Modeli požara</b> .....  | 89  |
| <b>2.4.3.5. Mehanički proračun konstrukcije i mehanička djelovanja</b> .....   | 89  |
| <b>2.4.3.6. Tablični postupak provjere elemenata na požar</b> .....  | 91  |
| <b>3 Matematički pristup planiranju eksperimentalnog ispitivanja</b> .....   | 95  |
| <b>3.1. Kratki povijesni pregled razvoja plana eksperimenta</b> .....  | 97  |
| <b>3.2. Osnovni principi planiranja eksperimenta</b> .....   | 97  |
| <b>3.3. Metodologija odzivne površine</b> .....  | 100 |
| <b>3.4. Vrste faktorskog plana</b> .....   | 102 |
| <b>3.4.1. Potpuni faktorski plan</b> .....   | 102 |
| <b>3.4.2. Djelomični faktorski plan eksperimenta</b> .....   | 103 |
| <b>3.4.3. Centralno kompozitni plan eksperimenta</b> .....   | 104 |
| <b>3.4.4. Box-Behnkenov plan eksperimenta</b> .....  | 105 |
| <b>3.4.5. Usporedba planova eksperimenta</b> .....   | 106 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4. Preliminarna eksperimentalna ispitivanja</b> .....                                     | <b>107</b> |
| 4.1. Plan eksperimenta za preliminarna ispitivanja betona s drobljenim opekarskim lomom..... | 107        |
| 4.2 Rezultati preliminarnih ispitivanja.....   | 111        |
| 4.2.1. Ispitivanje svojstva agregata.....  | 111        |
| 4.2.1.1. Granulometrijski sastav .....   | 112        |
| 4.2.1.2 Indeks oblika zrna krupnog agregata .....  | 113        |
| 4.2.1.3 Sadržaj sitnih čestica .....   | 113        |
| 4.2.1.4 Nasipna gustoća i šupljine .....   | 114        |
| 4.2.1.5 Gustoća zrna i upijanje vode .....   | 114        |
| 4.2.1.6 Kemijska svojstva agregata .....   | 116        |
| 4.2.1.7 Otpornost na drobljenje – metoda Los Angeles.....                                    | 116        |
| 4.2.1.8 Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje krupnog agregata.....                          | 117        |
| 4.2.2. Svojstva cementa .....  | 118        |
| 4.2.3. Ispitivanje svojstava betonskih mješavina.....  | 118        |
| 4.2.3.1. Projektiranje sastava betonskih mješavina.....                                      | 118        |
| 4.2.3.2. Ispitivanje svojstava svježeg betona.....   | 127        |
| 4.2.3.3. Ispitivanje svojstava očvrslog betona .....   | 128        |
| 4.2.3.4 Korelacija rezultata ispitivanja .....   | 131        |
| 4.3 Odabir prihvatljivih mješavina na temelju eksperimenta.....                              | 136        |
| 4.4 Modeliranje svojstava betona .....   | 137        |
| 4.5 Odabir prihvatljivih mješavina na temelju modela.....                                    | 141        |
| 4.6 Višekriterijsko odlučivanje o optimalnoj mješavini betona.....                           | 143        |
| <b>5. Eksperimentalna ispitivanja optimalnih mješavina</b> .....                             | <b>145</b> |
| 5.1 Komponente sastava optimalnih mješavina betona .....                                     | 145        |
| 5.2. Sastav optimalnih mješavina betona .....  | 147        |
| 5.3 Ispitivanje svojstava optimalnih mješavina betona.....                                   | 149        |
| 5.3.1 Svojstva svježeg betona .....  | 149        |
| 5.3.2 Svojstva betona u očvrsлом stanju.....   | 152        |
| 5.3.2.1 Svojstva betona u očvrsлом stanju pri sobnoj temperaturi.....                        | 152        |
| 5.3.2.2 Svojstva betona u očvrsлом stanju nakon izlaganja visokim temperaturama.....         | 160        |
| <b>6. Betonski stropni blokovi s opekarskim lomom - BlokOL</b> .....                         | <b>169</b> |
| 6.1 Eksperimentalna ispitivanja stropnih blokova.....  | 169        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>6.1.1 Mehanička svojstva BlokOLa pri sobnoj temperaturi.....</b>                                | <b>169</b> |
| <b>6.1.2 Mehanička svojstva BlokOLa nakon izloženosti visokim temperaturama .....</b>              | <b>172</b> |
| <b>6.1.3 Akustična svojstva BlokOLa.....</b>   | <b>175</b> |
| <b>6.1.4 Trajnosna svojstva BlokOLa.....</b>   | <b>176</b> |
| <b>6.1.5 Toplinska svojstva BlokOLa.....</b>   | <b>176</b> |
| <b>6.1.6 Zaključak provedenih ispitivanja BlokOLa.....</b>   | <b>178</b> |
| <b>6.2 Dokaz nosivosti stropnog bloka prema HRN EN 1992-1-3: 2004 .....</b>                        | <b>179</b> |
| <b>6.2.1 Dokaz nosivosti u fazi montaže .....</b>  | <b>179</b> |
| <b>6.2.2 Dokaz nosivosti u fazi uporabe.....</b>   | <b>180</b> |
| <b>6.2.3 Dokaz nosivosti s rezidualnim čvrstoćama nakon izloženosti 200°C, 600°C i 800°C .....</b> | <b>181</b> |
| <b>7. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA .....</b>                                      | <b>182</b> |
| <b>Literatura .....</b>  | <b>186</b> |
| <b>Prilozi.....</b>  | <b>192</b> |
| <b>Prilog P.1: Dijagrami korelacija.....</b>   | <b>192</b> |
| <b>Prilog P.2: Izmjerene vrijednosti temperatura u peći i u uzorcima.....</b>                      | <b>201</b> |
| <b>Popis slika.....</b>  | <b>215</b> |
| <b>Popis tablica.....</b>  | <b>221</b> |

## 1 Uvod i ciljevi istraživanja

Istraživanjem novih netradicionalnih izvora sirovina, te njihovom kombinacijom s tradicionalnim izvorima uz zadovoljavanje načela održivosti, omogućava se stvaranje novih vrijednosti kroz novi materijal. Primjenom inovativnih tehnologija, međusobnim djelovanjem komponenata sustava i razumijevanjem svakog aspekta toga djelovanja tumače se ponašanja novo nastalih materijala.

Graditelji danas u razvijenim europskim zemljama, pa tako i u Hrvatskoj, sve veću pozornost pridaju kvaliteti proizvoda koje koriste u izgradnji. Razlozi za pojačani interes za kvalitetu građevinskih materijala i proizvoda koji se koriste su višestruki. Novi tehnički propisi, stroža primjena važećih građevinskih normi i propisa, energetska učinkovitost objekata, kontinuirani porast cijena energenata, zamjetne klimatske promjene, bolja obaviještenost investitora i kupaca, razlogom su sve većeg interesa za energetske učinkovite i optimalnom gradnjom. Kada se zapitamo koja je korist od energetske efikasne gradnje, doći ćemo do saznanja da smo direktno utjecali na znatne uštede smanjenjem računa za grijanje ali i hlađenje, smanjenje računa za električnu energiju, poboljšali smo kvalitetu i ugodu stanovanja te smo na taj način produžili vijek samog objekta.

U razvijenom je svijetu aktualno iskorištavanje recikliranog agregata, dobivenog ispiranjem otpadnog svježeg betona ili drobljenjem otpadnog očvrnulog betona i ostalih građevinskih materijala (tablica 1.1). Također je potrebno istaknuti da značajnijih inovacijskih tehnologija i nema, nego se radi o poboljšanjima i proširenju područja primjene postojećih. Inovativne tehnologije i primjena odnose se uglavnom na manje-više klasične ili već isprobane nove materijale, ali na inovativan način, koji rezultira poboljšanjem ponašanja u konkretnoj primjeni. Za razliku od inovativnih materijala, inovativna je primjena uglavnom obuhvaćena postojećim normama za materijale. Istraživanja usmjerena tim pravcima rukovode se uglavnom potrebama kvalitete i trajnosti betonskih konstrukcija pri korištenju, ali se sve više mora voditi računa i o dostupnosti izvora pojedinih materijala, ekološkim potrebama, estetskim rješenjima i zaštiti zdravlja ljudi koji žive u takvim konstrukcijama ili uz njih, [1].

Tablica 1. 1: Europski podaci o proizvodnji i primjeni recikliranog agregata

| Država   | Godina | Materijal       | Milijuna [m <sup>3</sup> ] |                |
|----------|--------|-----------------|----------------------------|----------------|
|          |        |                 | proizvedeno                | upotrijebljeno |
| Švedska  | 1999.  | asfaltni beton  | 0,8                        | 0,76           |
| Danska   | 1997.  | rušenja zgrada  | 1,5-2,0                    | malo           |
|          |        | beton           | 1,06                       | 0,9            |
|          |        | asfaltni beton  | 0,82                       | 0,82           |
|          |        | keramika, opeka | 0,48                       | 0,33           |
| Njemačka | 1999.  | beton           | 12,0                       | 6,0            |
|          |        | asfaltni beton  | 10,7                       | 10,7           |
|          |        | rušenja zgrada  | 9,2                        | 9,2            |
|          |        | ostalo          | 23,0                       | 4,0            |

Proizvodnja mineralnih sirovina u zemljama Europske unije je vrlo dinamična jer ovisi o realizaciji i ulaganju u projekte koji su odobreni za određeni vremenski period. Proizvodnja agregata u petnaest



europskih zemalja koje su članice europskog udruženja proizvođača agregata, UEPG, u 2000. godini iznosila je 2 620 milijuna tona pijeska, šljunka i drobljenog kamena, što predstavlja proizvodnju od 6,9 tona po glavi stanovnika. Očito je da ovakva proizvodnja agregata godišnje predstavlja znatan utjecaj na okoliš i na nama je odgovornost da smanjimo potrošnju mineralnih sirovina iz prirodnih resursa, a povećamo potrošnju sekundarnih sirovina odnosno recikliranih materijala. Proizvodnja agregata ima i ekonomsku i socijalnu važnost što je vidljivo iz činjenice da je godišnja vrijednost proizvedenih prirodnih sirovina oko 35 000 milijuna €, a industrija za proizvodnju agregata zapošljava oko 250 000 ljudi.

Procijenjene količine otpadnog materijala nastalog rušenjem u zemljama Europske unije iznose oko 180 milijuna tona godišnje, odnosno oko 1,3 kg dnevno po osobi. Postoje znatne razlike u količini proizvedenog građevinskog otpada unutar Europske unije, primjerice Njemačka i Nizozemska proizvode oko 1,9 kg dnevno po osobi dok Švedska, Grčka i Irska proizvode manje od 0,5 kg dnevno po osobi, [2].

Značenje prirodnih sirovina za razvoj gospodarstva, a i drugih dijelova suvremenog društva može se najjasnije iskazati brojkama, odnosno prikazom godišnje proizvodnje, uvoza, izvoza te, konačno potrošnjom pojedinih sirovina, [3]. Stoga se u nastavku, u tablici 1.2, prikazuju kvantitativne značajke prirodnih sirovina (pijeska, šljunka, drobljenog kamena i gline) za Republiku Hrvatsku u 2006. godini.

Tablica 1. 2: Prikaz proizvodnje, uvoza, izvoza i potrošnje prirodnih sirovina u Republici Hrvatskoj za 2006. godinu, [3]

| Vrsta sirovine                                  | Proizvodnja u RH (t) | Uvoz u RH (t) | Izvoz iz RH (t) | Potrošnja u RH (t) | Proizvodnja u tonama po broju stanovnika |
|---|----------------------|---------------|-----------------|--------------------|--|
| <b>Drobljeni kamen, pijesak, šljunak, glina</b> | 40 265 000           | 650 000       | 1 850 000       | 37 765 000         | 8,39                                     |

U budućnosti je nužno predvidjeti istraživanje i eksploataciju određenih mineralnih sirovina za vlastite potrebe te istražiti i proširiti mogućnosti upotrebe recikliranog agregata, naravno uz bitan pomak u tehnološkom i ekološkom pogledu, što je u konačnici i cilj održivog razvoja (proizvoditi prema potrebi i štedjeti gdje je to moguće).

Kako bismo mogli usporediti proizvodnju kamenih agregata u Republici Hrvatskoj i u zemljama Europske unije u tablici 1.3 prikazana je proizvodnja prirodnog agregata po zemljama Europske unije i u Hrvatskoj.

Usporedbom proizvodnje kamenih agregata u Republici Hrvatskoj s proizvodnjom u zemljama članicama Europske unije, kako je vidljivo iz tablice 1.3, možemo zaključiti da Republika Hrvatska po stanovniku proizvodi više navedenih sirovina od prosjeka i više nego primjerice Belgija, Francuska, Njemačka, Italija, Nizozemska i Ujedinjeno Kraljevstvo. Uspoređivane države Europske unije završile su razdoblje intenzivne gradnje pa se dosegnuta proizvodnja može smatrati stabilnom, a u idućem razdoblju bi trebala imati blagi trend porasta, [3]. Recikliranje građevnog otpada u pojedinim europskim zemljama, kao što su Nizozemska, Belgija i Danska, čini više od 80 % ukupno proizvedenog građevnog otpada, odnosno otpada od rušenja. Na taj način se u tim visoko razvijenim državama istovremeno smanjuje potreba za

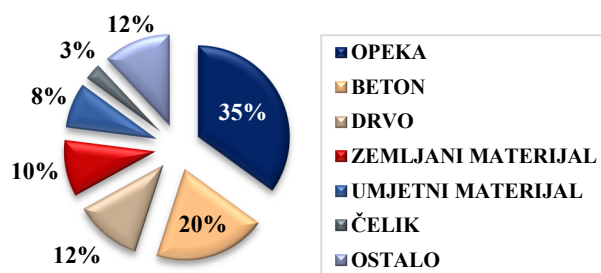
novom eksploatacijom u nenarušenoj prirodi te se rješava problem građevinskog otpada koji inače često završava na divljim deponijima.

Tablica 1. 3: Prikaz proizvodnje kamenih agregata u zemljama Europske unije i Republici Hrvatskoj u 2006. godini, [3]

| Zemlja                 | Broj stanovnika | Pijesak i šljunak (t) | Drobljeni kamen (t) | Reciklirani agregat (t) | Ukupna proizvodnja (t) | Proizvodnja (t/broju stanovnika) |
|------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|
|                        | A               | B                     | C                   | D                       | E=B+C                  | E/A                              |
| Austrija               | 8 174 762       | 66 000 000            | 32 000 000          | 3 500 000               | 98 000 000             | 11,99                            |
| Belgija                | 10 348 276      | 10 070 000            | 55 500 000          | 13 000 000              | 65 570 000             | 6,34                             |
| Danska                 | 5 413 392       | 58 000 000            | 300 000             | -                       | 58 300 000             | 10,77                            |
| Finska                 | 5 214 512       | 54 000 000            | 46 000 000          | 500 000                 | 100 000 000            | 19,18                            |
| Francuska              | 60 424 213      | 167 000 000           | 233 000 000         | 14 000 000              | 400 000 000            | 6,62                             |
| Njemačka               | 82 424 609      | 277 000 000           | 186 500 000         | 48 000 000              | 463 500 000            | 5,62                             |
| Irska                  | 3 969 558       | 54 000 000            | 79 000 000          | 1 000 000               | 133 000 000            | 33,50                            |
| Italija                | 58 057 477      | 210 000 000           | 135 000 000         | 5 500 000               | 345 000 000            | 5,94                             |
| Nizozemska             | 16 318 199      | 44 500 000            | 4 000 000           | 25 000 000              | 48 500 000             | 2,97                             |
| Portugal               | 10 524 145      | 71 000 000            | 97 500 000          | -                       | 97 500 000             | 9,26                             |
| Španjolska             | 40 280 780      | 170 000 000           | 314 000 000         | 1 500 000               | 484 000 000            | 12,02                            |
| Švedska                | 8 986 400       | 23 000 000            | 62 000 000          | 1 800 000               | 85 000 000             | 9,46                             |
| Ujedinjeno Kraljevstvo | 60 270 708      | 68 000 000            | 123 000 000         | 58 000 000              | 191 000 000            | 3,17                             |
| Hrvatska               | 4 496 869       | 8 905 930             | 27 193 949          | -                       | 36 099 879             | 8,0                              |

Budući da je svjetski trend upotreba recikliranih materijala u svim područjima ljudske djelatnosti pa tako i u građevinarstvu, potrebno je i u građevinskoj praksi na području Hrvatske implementirati reciklirani građevinski otpad u proizvodni proces.

Trenutno u Hrvatskoj ne postoji kvalitetna evidencija izvora, količina i tokova građevinskog otpada iako za istu postoji zakonski okvir koji se ne primjenjuje, [4]. Građevinski otpad još uvijek se nekontrolirano odlaže, nije uspostavljena kvalitetna komunikacija između svih sudionika u procesu gospodarenja građevinskim otpadom, te ne postoji razrađen sustav poticanja ugradnje recikliranih materijala. Državno zakonodavstvo, kao važan čimbenik svakog društva, bi također trebalo sudjelovati u potpori upotrebe recikliranih materijala i očuvanju prirodnih resursa te tako djelovati na očuvanje okoliša i osiguranje održivog gospodarenja građevinskim otpadom. Vrste građevinskog otpada razlikuju se ovisno o tome ruši li se postojeća ili se gradi nova građevina. Na slici 1.1 prikazan je sastav građevinskog otpada nastalog pri rušenju stambenih građevina.



Slika 1. 1: Sastav građevinskog otpada, [4]

Uzevši u obzir geografske specifičnosti Hrvatske, u Dalmaciji i Primorju kao građevinski otpad prevladava kamen, u sjeverozapadnom dijelu beton i opeka, a u istočnom opeka, odnosno miješani otpad. Procijenjene količine građevinskog otpada na temelju podataka prikupljenih u okviru CONWAS projekta, podataka Agencije za zaštitu okoliša, regionalnih karakteristika i podataka Državnog zavoda za statistiku (DZS) o broju stanovnika u pripadajućim županijama, su oko 2.345.273 tone godišnje. Na temelju navedenih podataka izračunata je prosječna količina građevinskog otpada po županijama, te očekivani porast količina otpada u sljedećih pet do deset godina. U tablici 1.4 prikazana je procijenjena količina građevinskog otpada u Hrvatskoj. Procjena količina od 2006. do 2015. obuhvatila je i veći dio količina građevinskog otpada koji završava na divljim odlagalištima, [5]. Uzet je u obzir i trend rušenja zastarjelih objekata na cijelom Jadranu koji će se sigurno intenzivirati u sljedećim godinama, i smanjivanje dotoka građevinskog otpada na ratom pogođenim područjima. Količine za razdoblje od 2001. do 2005. godine temelje se na podacima iz upitnika provedenog u sklopu projekta Conwas.

Tablica 1. 4: Procijenjena količina građevinskog otpada u Hrvatskoj, [5]

| Županija               | Procijenjene količine građevinskog otpada 2001. – 2005. (t) | Pretpostavljene količine proizvedenog građevinskog otpada 2006. – 2015. (t) |
|------------------------|---|---|
| Zagrebačka             | 78.992,15   | 111.026,57  |
| Krapinsko-zagorska     | 36.329,21   | 51.062,13   |
| Sisačko-moslavačka     | 47.285,46   | 66.461,57   |
| Karlovačka             | 36.164,69   | 50.830,89   |
| Varaždinska            | 47.127,83   | 66.240,01   |
| Koprivničko-križevačka | 31.746,99   | 44.621,64   |
| Bjelovarsko-bilogorska | 43.956,94   | 45.269,05   |
| Primorsko-goranska     | 113.329,07  | 246.131,96  |
| Ličko-senjska          | 19.911,83   | 43.245,20   |
| Virovitičko-podravska  | 30.845,89   | 31.766,64   |
| Požeško-slavonska      | 28.349,52   | 29.195,76   |
| Brodsko-posavska       | 58.384,54   | 60.127,32   |
| Zadarska               | 48.530,61   | 99.170,77   |
| Osječko-baranjska      | 109.164,38  | 112.422,93  |
| Šibensko-kninska       | 33.809,55   | 69.088,76   |

|                               |                  |                  |
|-------------------------------|------------------|------------------|
| <b>Vukovarsko-srijemska</b>   | 67.633,79        | 69.652,65        |
| <b>Splitsko-dalmatinska</b>   | 138.865,62       | 283.767,52       |
| <b>Istarska</b>               | 76.544,65        | 166.242,30       |
| <b>Dubrovačko-neretvanska</b> | 36.798,15        | 75.195,86        |
| <b>Međimurska</b>             | 30.206,15        | 42.455,93        |
| <b>Grad Zagreb</b>            | 140.175,00       | 581.297,87       |
| <b>UKUPNO</b>                 | <b>1.254.152</b> | <b>2.345.273</b> |

U Hrvatskoj trenutno postoji jedan fiksni pogon namijenjen isključivo preradi građevinskog otpada. Pogon za reciklažu nalazi se u sklopu odlagališta otpada Jakuševac. Osim postrojenja za reciklažu građevinskog otpada na odlagalištu Jakuševac u Zagrebu, građevinske tvrtke i kamenolomi imaju postrojenja u kojima recikliraju dio svoga građevinskog otpada i ponovo ga koriste.

Sakupljanje i prijevoz građevinskog otpada provode tek manjim dijelom ovlašteni sakupljači i komunalna poduzeća. Veći dio organiziraju i provode izvođači radova sa svojim kooperantima. Pritom koriste vlastitu mehanizaciju i opremu. Na mjestu nastanka otpada u većini slučajeva ne dolazi do razdvajanja pojedinih iskoristivih frakcija već se otpad miješa. Slična je situacija s ambalažnim otpadom kao dijelom građevinskog otpada u kojem se nalazi niz vrijednih sekundarnih sirovina. Trenutni stupanj reciklaže građevinskog otpada ne prelazi 7%, a iz građevinskog se otpada izdvoji oko 11% sekundarnih sirovina, [5]. Neovisno o podacima koji se prijavljuju Agenciji za zaštitu okoliša, može se zaključiti da se većina građevinskog otpada odlaže na odlagališta otpada, a najčešće se radi o nekontroliranom odlaganju građevinskog otpada na divlja odlagališta otpada. U pojedinim jedinicama lokalne samouprave više od 80% otpada odloženog na divlja odlagališta čini građevinski otpad.

Iz pregleda količina i trenutnog načina zbrinjavanja građevinskog otpada u Republici Hrvatskoj i mogućnosti njegove ponovne upotrebe u proizvodnom procesu možemo zaključiti da se građevinski otpad još uvijek u nedovoljnoj mjeri reciklira te da treba intenzivnije početi provoditi mjere za realizaciju plana pravilnog gospodarenja otpadom. Praćenjem količina, sastava i tokova građevnog otpada, izbjegavanje i prevencija nastajanja građevinskog otpada, etapno smanjivanje dozvoljenih količina građevnog otpada koji se odlaže na odlagališta i reciklaža građevnog otpada mjere su koje pridonose pravilnom gospodarenju građevinskim otpadom.

Hrvatska kao članica Europske unije treba slijediti pozitivne primjere Europskih zemalja u reciklaži i upotrebi građevinskog otpada kako bi bila spremna zadovoljiti visoke zahtjeve u pogledu zbrinjavanja otpada. Djelovanjem na svijest sudionika u građenju, edukacijom i poticajnim sredstvima potrebno je što prije doći na razinu ostalih Europskih zemalja i osigurati Hrvatskoj put do održivog razvoja.

## **1.1. Obrazloženje teme**

Sve većom industrijalizacijom i urbanizacijom, dolazi do povećanja količina građevinskog otpada te se njegov obujam kontinuirano povećava. Većina građevinskog otpadnog materijala trenutno se upotrebljava kao materijal za nasipavanje terena ili se nekontrolirano odlaže na divljim odlagalištima. Osnovna načela kvalitetnog gospodarenja otpadom jesu smanjenje masovne proizvodnje novog, pronalaženje načina za recikliranje i ponovnu upotrebu postojećeg, te sigurno i ekonomski prihvatljivo odlaganje neupotrebljivog otpada. U razvijenom je svijetu aktualno iskorištavanje recikliranog agregata, dobivenog ispiranjem otpadnoga svježeg betona ili drobljenjem otpadnoga očvrsnulog betona i ostalih građevinskih materijala. Također je potrebno istaknuti da značajnijih inovacijskih tehnologija i nema, nego se radi o poboljšanjima i proširenju područja primjene postojećih. Inovativne tehnologije i primjena odnose se uglavnom na klasične ili već isprobane nove materijale, ali ostvarene na inovativan način, koji rezultira poboljšanjem ponašanja u konkretnoj primjeni. Za razliku od inovativnih materijala, inovativna je primjena uglavnom obuhvaćena postojećim normama za materijale. Istraživanja usmjerena tim pravcima rukovode se uglavnom potrebama kvalitete i trajnosti betonskih konstrukcija pri korištenju, ali se sve više mora voditi računa i o dostupnosti izvora pojedinih materijala, ekološkim potrebama, estetskim rješenjima i zaštiti zdravlja ljudi koji žive u takvim konstrukcijama ili uz njih. Recikliranje drobljenog glinenog crijepa i opeke<sup>1</sup> je ekološki prihvatljiv način njihovog zbrinjavanja. Jedan od načina ponovne upotrebe jest upotreba kroz reciklirani agregat, dobiven drobljenjem glinene opeke i crijepa nastalih rušenjem zidanih građevina ili kao lom pri njihovoj proizvodnji. Tako dobiveni reciklirani agregat može se upotrijebiti u proizvodnji novih mješavina morta i betona. Upotreba recikliranog opekarskog loma kao agregata za proizvodnju morta i betona, osim ekološkog, može imati pozitivan učinak i s ekonomskog stajališta. Naime, očuvanje prirodnih materijala je značajno za ekološki odgovorno i održivo građenje koje bi bilo ujedno i financijski prihvatljivo. Ovakav način gradnje implicira upotrebu jeftinih materijala koji mogu biti upotrijebljeni bez negativnog utjecaja na okoliš.

Trenutna primjena betona s recikliranim drobljenim opekarskim lomom nije raširena u mjeri u kojoj je ona moguća s obzirom na njegova fizikalno-mehanička i trajnosna svojstva. Prema dosadašnjim istraživanjima provedenim na betonima i mortovima s recikliranim drobljenim opekarskim lomom proizvode se sljedeći konstrukcijski elementi: gotovi betonski elementi za horizontalne i vertikalne serklaže, montažne zidne ploče i opločnjaci, [6]. Budući da primjena betona s recikliranim opekarskim lomom nije uvelike raširena, potrebno je dodatno istražiti mogućnost primjene u područjima u kojima takav beton pokazuje znatno bolja svojstva od betona s prirodnim agregatom. Uzimajući u obzir da mort i beton s recikliranim opekarskim lomom, na temelju dosada provedenih istraživanja, imaju bolja toplinska svojstva i otpornost na požar od običnog morta i betona s prirodnim agregatom, u radu će biti dodatno istražena mogućnost primjene betona od recikliranog opekarskog loma u području požarne otpornosti za gotove betonske elemente u građevinarstvu.

---

<sup>1</sup>U nastavku teksta reciklirani drobljeni glineni crijep i opeka nazivat će se reciklirani opekarski lom

### **Radne hipoteze istraživanja:**

- moguće je definirati modele drugog reda koji opisuju svojstva betona s opekarskim lomom kao agregatom u ovisnosti o komponentama betona,
- moguće je odrediti kriterije za upotrebu opekarskog loma u betonskim mješavinama poboljšane reakcije na požar,
- moguće je na temelju dobivenih modela definirati mješavine betona optimalne za stropne betonske blokove,
- moguće je izraditi predgotovljene stropne blokove povećane požarne otpornosti kao rezultat definiranja primjene betona s opekarskim lomom kao agregatom.

### ***1.2. Metodologija rada***

U radu će se primijeniti uobičajena metodologija istraživačkog rada. Pri istraživanju će se provjeriti poznate teorijske i eksperimentalne metode kojima će se pokušati prihvatiti ili odbaciti postavljene hipoteze. Proučit će se sva dostupna literatura. Istraživanje karakteristika opekarskog loma kao agregata te njegova utjecaja na svojstva betona provodit će se prema usvojenim postupcima i metodama ispitivanja, a sve u skladu s Tehničkim propisom za betonske konstrukcije, važećim normama za beton i komponente betona. Ako se utvrdi da postoji potreba za modificiranjem usvojenih postupaka i metoda ispitivanja za primjenu opekarskog loma kao agregata, isti će se prikazati u obliku preporuka koje će se izraditi temeljem provedenog istraživanja.

Istraživanje će biti podijeljeno na sljedeće cjeline:

1. Uvod i ciljevi istraživanja
2. Pregled literature
3. Matematički pristup planiranju eksperimentalnog ispitivanja
4. Preliminarna eksperimentalna ispitivanja
5. Eksperimentalna ispitivanja optimalnih mješavina
6. Eksperimentalna ispitivanja stropnih blokova s opekarskim lomom
7. Zaključci i preporuke

### **1.3. Očekivani znanstveni doprinos**

U procesu rješavanja postavljenog znanstvenog problema istraživanja i prihvaćanju ili odbacivanju postavljenih hipoteza očekuje se znanstveni doprinos u:

- definiranju modela drugog reda koji opisuju svojstva betona s opekarskim lomom kao agregatom u ovisnosti o komponentama betona,
- procjeni točnosti matematičkih modela,
- određivanju kriterija za upotrebu opekarskog loma u betonskim mješavinama povećane požarne otpornosti,
- u upotrebi opekarskog loma kao agregata za stropne betonske blokove temeljenoj na rezultatima eksperimentalnih istraživanja,
- u izradi predgotovljenih stropnih blokova ispune sa 50%-tnom ili većom zamjenom prirodnog agregata s opekarskim lomom, za predgotovljene stropne konstrukcije povećane požarne otpornosti kao rezultatu definiranja primjene ovakvog betona u elementima ispune polumontažne stropne konstrukcije.

## ***2 Pregled literature***

*U ovom poglavlju prikazan je pregled područja trenutne primjene betona s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom, ciljeva i mogućih ograničenja koja se odnose na istraživanje upotrebe betona s drobljenim opekarskim lomom u novim konstrukcijskim aplikacijam. U nastavku će biti također prikazani zahtjevi koje je potrebno zadovoljiti kako bi se osigurala primjena opekarskog loma kao agregata za beton u novim predgotovljenim betonskim stropnim sustavima.*

### ***2.1. Pregled dosadašnjih istraživanja upotrebe recikliranog opekarskog loma kao agregata***

#### ***2.1.1. Svojstva reciklirane opeke kao agregata***

Konstrukcije napravljene s betonom od drobljene opeke poznate su nam još iz antičkih vremena, [7]. Neki od primjera takvih građevina su katedrala Sv. Sofije u Istanbulu, sagrađena 537. godine te betonski akvadukt Eifel u Njemačkoj sagrađen u doba Rimskog Carstva. Prva zabilježena proizvodnja betonskih produkata s mješavinom drobljene opeke i portland cementa je u Njemačkoj 1860. godine, [8]. Sustavno provođenje istraživanja upotrebe betona s drobljenom opekam započelo je 1928. godine, [9]. Istraživanja su provedena u pogledu udjela cementa i vode u betonu, granulometrijskog sastava drobljene opeke za beton itd. U Njemačkoj se nakon drugog svjetskog rata pojavio problem kako zadovoljiti golemu potražnju za građevinskim materijalom i pri tome ukloniti građevinski otpad iz uništenih gradova. Količina građevinskog otpada je tada procijenjena na oko 400-600 milijuna m<sup>3</sup>. Upotrebom otpadnog materijala osim što je moguće smanjiti troškove njegovog uklanjanja također se zadovoljava potreba za građevinskim materijalom. Kako bi bilo omogućeno ponovno korištenje otpadnog materijala u deset Saveznih Republika u Njemačkoj postavljeni su posebni pogoni za reciklažu. Ovi pogoni su do kraja 1955. godine proizveli oko 11,5 milijuna m<sup>3</sup> drobljenog agregata od glinene opeke, s kojima je izgrađeno 175 000 stambenih objekata. Krajem 1956. godine statistike pokazuju da je oko 85% građevinskog otpada Savezne Republike Njemačke bilo uklonjeno na prije navedeni način. Iz toga je vidljivo da više nije postojala takva potreba za recikliranjem srušenog materijala [8]. U Ujedinjenom Kraljevstvu se nakon drugog svjetskog rata također pojavila značajna potražnja agregata. Na ovaj zahtjev znatno je utjecao ubrzani rast na tržištu stambenih zgrada, kao i državna politika poticanja izgradnje cesta. Utrošak drobljenog prirodnog agregata 1992. godine iznosio je 240 milijuna tona. Na izgradnju i održavanje cesta otpada trećina ukupnog zahtjeva za potrebnom količinom agregata tijekom godine, a na nove samostojeće građevine otpada ukupno 25% ukupnog zahtjeva. Stečena iskustva tijekom poslijeratnih godina iznimno su korisna i zanimljiva posebice u upotrebi recikliranog otpadnog materijala nastalog rušenjem zidanih konstrukcija kao agregata za proizvodnju novog betona.



### *2.1.1.1. Drobljenje i granulacija reciklirane opeke*

Kako bismo postigli željenu granulometrijsku krivulju agregata za beton, potrebno je koristiti serije uzastopnih sita, s povratom svakog prekomjernog zrna na odgovarajuće sito. Najbolji granulometrijski sastav postiže se primarnim i sekundarnim drobljenjem recikliranog agregata [8]. S ekonomskog stajališta je najisplativije koristiti samo primarno drobljenje. Primarnim drobljenjem se materijal može usitniti na čestice veličine 50 mm. Putem do sekundarnog drobljenja uz pomoć elektromagneta moguće je ukloniti sve primjese metala u materijalu. Sekundarno drobljenje se zatim koristi kako bi se materijal mogao nadalje usitniti na potrebnu veličinu zrna. Pri drobljenju glinenih opeka treba uzeti u obzir da nastaje puno više sitnih čestica tijekom drobljenja nego tijekom drobljenja betona ili prirodnog agregata. Takve sitne čestice nisu poželjne u betonu jer smanjuju gustoću i kao posljedica smanjene gustoće dolazi do smanjenja čvrstoće betona. Ovi pogoni za drobljenje mogu biti smješteni na centralne lokacije kako bi prihvaćali materijal iz područja koja ga okružuju.

Puno ekonomičnije je korištenje pokretnih pogona za drobljenje koji se postavljaju na fiksna odlagališna mjesta gdje se akumulira dovoljna količina otpadnog materijala namijenjenog za reciklažu odnosno drobljenje. Pokretni pogoni za drobljenje su rijetko kad dovoljno sofisticirani da bi mogli ukloniti sve nečistoće, pa se tako zdrobljen materijal najčešće koristi kao nasipni sloj ili kao gornji sloj poljskih putova.

Granulometrijski sastav agregata je dobar ukoliko je zadovoljen uvjet za minimalnim udjelom šupljina u mješavini betona, a time i zahtjev za minimalnom količinom cementne paste. Zaobljene čestice okružene cementnom pastom se pakiraju puno uspješnije, i stoga nastaje beton s manjim udjelom šupljina. Kako agregat od drobljene opeke ima oštiji oblik zrna u usporedbi s agregatom kao što je prirodni riječni ili drobljeni agregat neće biti pakiran uspješno kao prirodni agregat.

### *2.1.1.2. Poroznost i apsorpcija reciklirane opeke*

Poroznost agregata i njegova apsorpcija su vrlo bitni parametri koji utječu na svojstva agregata, a prema tome i na materijal koji je od njega sačinjen. Neka od svojstava na koja utječe poroznost i apsorpcija su specifična težina, veze između čestica agregata i cementne paste, otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje, njegova kemijska stabilnost i otpornost na habanje.

Pore sadržane unutar agregata variraju po svojoj veličini u širokom opsegu. Velike pore uobičajeno se mogu vidjeti pod mikroskopom ili čak golim okom. Najmanje pore najčešće su veće od veličine gel pora sadržanih u cementnoj pasti. Neke od pora u agregatu u potpunosti su sadržane unutar čvrste tvari; ostale su otvorene na površini čestica agregata. Cementna pasta ne može prodrijeti unutar zrna agregata zbog svoje viskoznosti. Za razliku od cementne paste voda lako prodire u pore, a količina i brzina prodiranja vode ovisi o veličini pora, njihovom kontinuitetu odnosno povezanosti i ukupnom volumenu pora. Stoga je poroznost potrebno dobro proučiti jer ima znatan utjecaj na količinu vode potrebnu za pripremu betonske mješavine. Poroznost većine, uobičajenih u primjeni, prirodnih agregata kao što je riječni agregat i drobljeni dolomit, je

dosad gotovo u potpunosti istražena. Vrlo malo podataka je dostupno o drobljenoj opeci kao agregatu za beton osim podatka da je poroznost relativno velika.

Problem pri korištenju reciklirane opeke kao agregata za beton jest velika poroznost i apsorpcija agregata što može utjecati na obradivost betona u svježem stanju. Prema [8], drobljena opeka mora biti potpuno zasićena prije upotrebe za proizvodnju betona. Apсорpcija drobljene opeke procjenjuje se na vrijednost između 22 i 25% po masi materijala u suhom stanju. Rezultati testova [8] pokazuju da drobljena opeka postaje potpuno zasićena vodom nakon što bude potopljena u vodi 30 min. Potapanjem za daljnja 24 sata dovodi do povećanja apsorpcije od samo 2%. Velika apsorpcija vode, karakteristična za drobljenu opeku, utječe na obradljivost morta i betona s drobljenom opekom kao agregatom. Primjerice 10%, 20% i 30% zamjenom riječnog agregata s drobljenom opekom dolazi do redukcije obradljivosti morta za 11%, 23% i 32% u odnosu na mort s riječnim agregatom, [9].

#### *2.1.1.3. Čvrstoća reciklirane opeke kao agregata*

Pri proizvodnji je betona namjera imati što veći udio agregata u ukupnom volumenu betona jer je agregat kao jedna od sastavnih komponenti betona znatno jeftiniji od cementnog veziva. Uobičajeno je da agregat zauzima 70% - 80% ukupnog volumena u betonu stoga je čvrstoća agregata važan parametar koji utječe na konačnu čvrstoću samog betona.

Tlačna čvrstoća betona ne može dostići čvrstoću najjačeg zrna agregata sadržanog u njemu. Pojednostavljeno bi mogli reći da se čvrstoća određuje na temelju prijašnjih iskustava upotrebe određene vrste agregata u betonu ili eksperimentalnim ispitivanjem upotrebe novog agregata u mješavini betona, gdje nam je za tu mješavinu poznata čvrstoća s prethodno dokazanim agregatom. Ukoliko agregat nakon ispitivanja dovodi u konačnici do manje konačne čvrstoće betona i posebice ako brojna zrna agregata budu slomljena nakon ispitivanja betona tada je agregat slabiji od agregata za koji je mješavina bila projektirana. U takvom slučaju, agregat koji je testiran može biti korišten samo za potrebe izrade betona manje čvrstoće.

Hansen, [8], je napravio eksperimentalna ispitivanja čvrstoće zrna opeka koje su bile različitih čvrstoća prije drobljenja. Nakon ispitivanja zaključio je da postoji veza između čvrstoće zrna agregata opeke i konačne tlačne čvrstoće betona u kojem je drobljena opeka kao agregat upotrijebljena.

#### *2.1.1.4. Prisutnost štetnih sastojaka u recikliranom agregatu*

Jedan od ograničavajućih faktora u širenju ponovne upotrebe i reciklaže građevinskog otpada nastalog rušenjem zidanih i betonskih konstrukcija je potreba za predvidljivim i dosljednim svojstvima konačnog produkta. Jedan od problema koji se javlja pri upotrebi recikliranog agregata u proizvodnji novog betona je mogućnost da štetni sastojci zajedno s recikliranim materijalom budu sastavni dio novog betona i u njemu uzrokuju štetan utjecaj na čvrstoće i trajnost. Neki od štetnih sastojaka mogu biti npr. bitumen, mort, gips, organske tvari, kloridi i sulfati, zemlja, glina i sl.

Prisutnost asfalta znatno smanjuje čvrstoću betona. Dodatak od 30% asfalta po volumenu recikliranog agregata smanjuje tlačnu čvrstoću betona za otprilike 30% [8]. Iz provedenih istraživanja [8] je pokazano da nema očitih razloga zbog čega bi se postavila stroga ograničenja oko dozvoljenog udjela čestica s bitumenom iako je redukcija čvrstoće očigledna.

Prema [10] upotreba materijala nastalog rušenjem zidanih konstrukcija ovisna je o tipu opeke kojom je konstrukcija građena i vrsti upotrijebljenog morta pri njezinom zidanju. Vapneni mort se lako uklanja s površine opeke i to često dovodi do ponovne upotrebe cijelih opeka u zidanju. Cementni mort je puno teže ukloniti s površine opeke tako da se takve opeke najčešće drobe kako bi se od njih dobio agregat. Stoga je potrebno uzeti u obzir, kod agregata nastalog drobljenjem opeke kao otpadnog materijala pri rušenju zidanih konstrukcija, udio morta koji je ostao na opekama.

Hansen, [8], je dao pregled nekoliko istraživanja provedenih o štetnom utjecaju gipsanih žbuka u recikliranom agregatu od betona tijekom sulfatne ekspanzije. Iz ovih istraživanja zaključeno je da bi dozvoljene granice udjela gipsa trebale biti definirane u standardnim specifikacijama za reciklirani agregat. Također se sugerira da bi sulfatno otporni portland cement trebao biti upotrijebljen pri proizvodnji betona u kojem se koristi reciklirani agregat koji bi mogao biti onečišćen s gipsom.

Organske tvari kao što su: papir, drvo, tekstilni proizvodi i drugi polimerni materijali su nestabilni u betonu ukoliko su izloženi sušenju i vlaženju ili smrzavanju i odmrzavanju. Drugi tipovi organskih tvari npr. boja može uvući veliku količinu zraka u beton. Trebalo bi uzeti u obzir da su organski sastojci lagani te djeluju na povećanje ukupnog volumena betona čiji su sastavni dio.

Prisutnost klorida, sulfata i drugih soli u recikliranom agregatu ima mali utjecaj na svojstva ne armiranog betona, ali kod armiranog betona njihova prisutnost može biti razlogom korozije armature. Ukoliko su sulfati prisutni u dovoljnoj količini oni mogu reagirati s cementnom mješavinom kada je beton proizveden. Ta reakcija može izazvati naglo širenje, te degradaciju očvrstulog betona u vlažnim uvjetima. Iz prethodnih iskustava postoje saznanja da reciklirani agregat od zidanih konstrukcija ima manji udio klorida i sulfata od drobljenog betonskog agregata [8].

Građevinski otpad od betonskih i zidanih konstrukcija često je onečišćen zemljom ili glinom. Glinu koja se jednom povezala s betonom ili opekom vrlo je teško ukloniti, a minerali gline mogu štetno djelovati na beton u kojeg su ugrađeni. Uobičajene preporuke za čišćenje mogu se primijeniti u na ovom slučaju, tj. otpadni materijal potrebno je isprati s vodom preko sita.

Staklo s prozorskih okana uslijed nepažnje također može biti sastavni dio građevinskog otpada nastalog rušenjem. Za sada ne postoje granične vrijednosti koje bi ograničile dozvoljeni udio stakla u recikliranom agregatu. Obzirom da je gustoća poliranog stakla slična gustoći betona ili agregata njegovu separaciju je vrlo teško izvršiti. To može biti potencijalno opasno jer staklo sudjeluje u alkalno-silikatnim reakcijama.

Specifikacijama RILEM (1994) se sugerira maksimalna dopuštena vrijednost udjela štetnih sastojaka u recikliranom agregatu. Ove vrijednosti prikazane su u tablici 2.1, [11]. Vrsta agregata je u tablici označena oznakama Tip 1, 2, 3. Pod oznakom Tip 1 je agregat s 100% udjelom reciklirane opeke, Tip 2 je 100% reciklirani beton, a Tip 3 je mješavina prirodnog i recikliranog agregata.

Tablica 2. 1: Maksimalne dozvoljene vrijednosti udjela štetnih sastojaka u recikliranom agregatu, [11]

| Zahtjevi  | Tip agregata |       |       |
|---|--------------|-------|-------|
|   | Tip 1        | Tip 2 | Tip 3 |
| Minimalna gustoća suhog agregata (kg/m <sup>3</sup> )               | 1500         | 2000  | 2400  |
| Maksimalna apsorpcija vode (%)                                      | 20           | 10    | 3,0   |
| Maksimalni udio materijala s $\rho_{zps} < 2200 \text{ kg/m}^3$ (%) | -            | 10    | 10    |
| Maksimalni udio materijala s $\rho_{zps} < 1800 \text{ kg/m}^3$ (%) | 1,0          | 1,0   | 1,0   |
| Maksimalni udio materijala s $\rho_{zps} < 1000 \text{ kg/m}^3$ (%) | 1,0          | 0,5   | 0,5   |
| Maksimalni udio štetnih sastojaka: staklo, bitumen                  | 5,0          | 1,0   | 1,0   |
| Maksimalni udio metala (%)  | 1,0          | 1,0   | 1,0   |
| Maksimalni udio organskih materijala (%)                            | 1,0          | 0,5   | 0,5   |
| Maksimalni udio sitnih čestica (< 0,063 mm) (%)                     | 3,0          | 2,0   | 2,0   |
| Maksimalni udio pijeska (< 4mm) (%)                                 | 5,0          | 5,0   | 5,0   |
| Maksimalni udio sulfata (%)   | 1,0          | 1,0   | 1,0   |

$\rho_{zps}$  = gustoća zasićenog površinski suhog materijala

#### 2.1.1.5. Klasifikacija reciklirane opeke kao agregata

Prirodni agregat koji se uobičajeno primjenjuje u proizvodnji betona dobiva se eksploatacijom prirodnih resursa ili specijalnom proizvodnjom namijenjen upotrebi u betonu. Kako bismo očuvali prirodne resurse i osigurali održivo gospodarenje građevinskim otpadom potrebno je iskoristiti mogućnost upotrebe recikliranih materijala kao zamjene za prirodni materijal. Širu primjenu betona s recikliranom opekom možemo osigurati samo ukoliko osim njegovih mehaničkih i fizikalnih svojstava dokažemo i trajnosna svojstva betona s recikliranom opekom.

Uobičajena praksa je grupirati agregate s obzirom na njihovu gustoću ili specifičnu težinu. Velik broj različitih tipova prirodnih materijala uključeno je u proizvodnju betona. Primjerice to su stijene vulkanskog podrijetla kao bazalt i granit, te sedimentne stijene kao vapnenac i pješčenjak. Mineralni sastojci nisu od veće važnosti sve dok je stijena dovoljno cjelovita i čvrsta za upotrebu u betonu. Sve ove stijene imaju specifičnu težinu od 2,55 do 2,75 kg/dm<sup>3</sup>, a s njima se proizvode betoni s jednakim gustoćama, uobičajeno između 2250 i 2450 kg/m<sup>3</sup>, ovisno o razmjerima sastojaka u mješavini. U posebnim primjenama gdje se traži što veća volumna masa betona npr. kao zaštita od radioaktivnog zračenja u industrijskoj radiografiji, medicinskim instalacijama, u nuklearnom reaktoru potrebno je koristiti teške agregate kao što su barit ili čelični obluci. Upotrebom takvih agregata može se izraditi beton gustoće iznad 2600 kg/m<sup>3</sup>.

Lagani agregat najčešće se koristi u proizvodnji betona malih gustoća, što je prednost sa strane smanjenja vlastite težine i postizanja boljih termoizolacijskih svojstava u odnosu na beton normalne težine. Smanjenje specifične težine postiže se većim udjelom zraka unutar zrna agregata. Cijena koju plaćamo upotrebom lakog agregata je smanjenje čvrstoće betona. Gustoća betona s laganim agregatom je manja od 2000 kg/m<sup>3</sup>. Gustoća reciklirane drobljene opeke je između 1,90 kg/dm<sup>3</sup> do 2,45 kg/dm<sup>3</sup> ovisno o vrsti originalne opeke. Beton s recikliranom opekom kao agregatom ima gustoću između 1850 kg/m<sup>3</sup> i 2200 kg/m<sup>3</sup>, [11]; [12]. To znači da beton s recikliranom opekom ne može biti klasificiran kao beton normalne težine niti kao

lakoagregatni beton jer se njegove vrijednosti nalaze negdje između vrijednosti normalnog i lakoagregatnog betona.

#### *2.1.1.6. Kontrola kvalitete*

Za materijal koji je nastao reciklažom građevinskog otpada potrebno je provesti strogu kontrolu kako bi se spriječile negativne pojave koje bi ugrozile mogućnost njegove daljnje upotrebe. Građevinski otpad kao materijal koji dolazi do postrojenja za reciklažu često je s različitih ne dokumentiranih lokacija, pa je iznimno važno pažljivo provođenje kontrole i učestala testiranja produkata reciklaže.

Kada materijal s mjesta na kojem je nastao rušenjem dođe na postrojenje za reciklažu vizualni pregled materijala je osnovna, a ponekad i jedina metoda kontrole kvalitete. Vizualna inspekcija može varirati ovisno o tome vrši li se pregled tereta dok je u kamionskoj prikolici, pri njegovom istovaru ili pak pretovaru ako nije zadovoljavajući. Prije otpreme materijala na mjesto ugradnje bilo bi dobro izvršiti pregled dokumentacije o porijeklu materijala i pregled materijala direktno na mjestu srušenog objekta odnosno odlagališta otpadnog materijala.

Kako bi se dobio kvalitetan reciklirani agregat od ruševina betonskih i zidanih građevina, štetni sastojci bi trebali biti uklonjeni prije nego se materijal drobi. Ovo je najbolje učiniti na samoj konstrukciji uklanjajući s nje drveni nepokretni inventar, sanitarne instalacije i prozore. Nakon drobljenja, ostale štetne sastojke kao primjerice drvo, metal, plastiku potrebno je ručno izbaciti ili ukoliko postoji mogućnost s magnetskim separatorom. U konačnici materijal treba isprati kako bi se uklonila prašina i sitne čestice s agregata.

U bivšoj Saveznoj Republici Njemačkoj je 1985. godine utemeljeno udruženje za kontrolu kvalitete recikliranog građevinskog materijala "Association for Quality Control of Recycled Building Materials". Ovo udruženje omogućavalo je proizvođačima recikliranog građevinskog materijala pravo korištenja vlastitog pečata kvalitete kao dokaz da je njihov materijal unutar prihvatljivog standarda. U tom trenutku postojao je samo standard za materijal koji će biti korišten u izgradnji cesta, no s vremenom bi to moglo biti prošireno za širu primjenu [8].

Odredbe HRN EN 12620-1 (agregati za beton) norme određuju svojstva agregata i punila dobivenih preradom prirodnih, industrijski proizvedenih ili recikliranih materijala i mješavina tih agregata za primjenu u betonu. Ona također obuhvaća reciklirani agregat s gustoćama između  $1,50 \text{ Mg/m}^3$  ( $1500 \text{ kg/m}^3$ ) i  $2,00 \text{ Mg/m}^3$  ( $2000 \text{ kg/m}^3$ ) s odgovarajućim upozorenjima i reciklirani sitni agregat (4 mm) s odgovarajućim upozorenjima. Ona također određuje sustav kontrole kvalitete koji se upotrebljava u tvorničkoj kontroli proizvodnje i omogućuje vrednovanje sukladnosti proizvoda s ovom europskom normom. Agregati koji se upotrebljavaju u građenju trebaju biti sukladni sa svim zahtjevima ove europske norme. Osim uobičajenih i tradicionalnih prirodnih i industrijski proizvedenih agregata Nalog M/125 "Agregati" uključuje i reciklirane agregate i neke materijale iz novih ili neuobičajenih izvora. Reciklirani agregati su uključeni u norme, a nove ispitne metode za njih su u naprednom stupnju pripreme. Ipak, za neuobičajene materijale iz

sekundarnih izvora, rad na normizaciji tek je nedavno započeo i bit će potrebno više vremena da se jasno definiira podrijetlo, te značajke tih materijala. U međuvremenu, ako se takvi neuobičajeni materijali stavljaju na tržište, oni moraju u potpunosti zadovoljiti ovu normu i nacionalne propise za opasne tvari ovisno o njihovoj primjeni. Za pojedini slučaj mogu se odrediti dodatne značajke i zahtjevi, ovisno o iskustvu s primjenom proizvoda i definirati ih u posebnim ugovornim dokumentima.

Zahtjevi krajnjeg korisnika za materijal su: da je materijal u skladu sa danim specifikacijama, da služi namjeni za koju je predviđen, da je dosljedan u pogledu svih svojih fizikalnih i mehaničkih svojstava i da ima prihvatljivu cijenu. Za reciklirani agregat ovi zahtjevi mogu biti zadovoljeni kroz kvalitetnu shemu organizacije, jasnu strukturu kontrole i kroz testiranje gotovih produkata za certifikaciju. Bez ovakvog tipa kontrole kvalitete proizvođači će teško pronaći tržište za reciklirane proizvode po profitabilnoj cijeni. Kontrola kvalitete sama po sebi povećava troškove upotrebe recikliranog agregata, jer kvaliteta kontrole proizvođača kod recikliranog materijala treba biti intenzivnija nego kontrola koja se radi kod prirodnog agregata.

#### *2.1.1.7. Sumarni prikaz ispitivanja svojstava drobljene opeke*

Mogućnost korištenja drobljene opeke kao agregata ovisi o stanju materijala tj. o ispunjavanju osnovnih svojstava kao agregata ali i o zahtjevima za konačni betonski proizvod ili građevinu u kojoj će biti upotrebljen. Svojstva drobljene opeke kao agregata koja se razlikuju od svojstava agregata iz prirodnih nalazišta su gustoća, upijanje vode i onečišćenost. Mogućnost upotrebe recikliranog agregata za beton u Hrvatskoj su deklarativno omogućene kroz zakonsku regulativu, kako je prikazano u tablici 2.2, [13].

Tablica 2. 2: Upotreba recikliranog agregata za beton prema regulativi u RH

| <b>Vrsta materijala</b>  | <b>Podrijetlo</b>                           | <b>Primjena</b>   | <b>Regulativa</b>  |
|--|---|---|--|
| <b>Čisti lom opeke</b>   | Proizvodnja opeke                           | Dodatni materijal za proizvodnju zidnih elemenata, betona, laganog betona                         | Tehnički propis za betonske konstrukcije; Tehnički propis za zidane konstrukcije; HRN EN 12620; HRN EN 13055-1 |
| <b>Miješani lom od rušenja u visokogradnji s lomom od opeke (šuta miješana s opekam)</b> | Stambena gradnja, visokogradnja             | Dodatni materijal za proizvodnju zidnih elemenata, betona, laganog betona, završni slojevi podova | Tehnički propis za betonske konstrukcije; Tehnički propis za zidane konstrukcije; HRN EN 12620; HRN EN 13055-1 |
| <b>Betonski lom</b>  | Cestogradnja, izgradnja mostova, industrija | Dodatni materijali za proizvodnju betona  | Tehnički propis za betonske konstrukcije; HRN EN 12620   |

Agregati dobiveni recikliranjem građevnog otpada u europskoj regulativi čine jednu podgrupu agregata (materijala) iz sporednih izvora. Hrvatska je preuzela cijeli niz europskih normi iz područja agregata. Norme specifikacija, na koje upućuju pojedini tehnički propisi, utvrđuju specifičirana svojstva i način potvrđivanja sukladnosti agregata za pojedinu namjenu, a time i recikliranog agregata, [13]. U tablici 2.3 prikazana je zakonska regulativa za reciklirani agregat uključujući i agregate iz sporednih izvora.

Tablica 2. 3: Zakonska regulativa za reciklirani agregat

| Popis važećih tehničkih propisa i normi   | Dodatni zahtjevi  |  |
|---|---|--|
|   | Opći  | Specifični   |
| <b>HRN EN 12620: Agregati za beton</b>  | - gubitak žarenjem<br>- term. provodljivost   | - postojanost i fizikalni sastav pepela iz spalionica (B1) |
| <b>HRN EN 13055-1: Lagani agregati – 1. dio: Lagani agregati za beton, mort i mort za zalijevanje</b> | - gubitak žarenjem  | -  |
| <b>HRN EN 206-1: Beton – 1. dio: Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost</b>                | - agregat obnovljen iz vode za ispiranje betona može se upotrebljavati za izradu betona<br>- nerazdvojeni obnovljeni agregat ne treba dodavati u količinama većim od 5% ukupne mase agregata<br>- kada su količine obnovljenog agregata veće od 5% ukupne količine agregata, moraju biti istog tipa kao primarni agregat i moraju biti razdvojene u odvojene krupne i sitne frakcije i zadovoljavati HRN EN 12620 |  |

U tablici 2.4 dan je sumarni prikaz svojstava recikliranog agregata, zahtijevanih prema Tehničkom propisu za betonske konstrukcije (TPBK) i HRN EN 12620, ispitanih u sklopu projekta LIFE05 TCY/CRO/000114 CONWAS, [4]. Također je određen i granulometrijski sastav u skladu s normom HRN EN 933-1 te je zaključeno kako je neophodna korekcija granulometrijskih krivulja, a to se posebno odnosi na sadržaj sitnih čestica, [13].

Tablica 2. 4: Rezultati ispitivanja svojstava recikliranog agregata, [13]

| Svojstvo                                       | Ispitna metoda HRN EN | Jedinica mjere    | Rezultat<br>(Razred prema HRN EN 12620) |                                     |                           |                               | Zahtjev TPBK-Dodatak D               |
|--|-----------------------|-------------------|---|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
|  |                       |                   | Frakcija (mm)                           | Rec.beton                           | Rec.opeka                 | Rec. šuta                     |                                      |
| <b>Oblik zrna indeks oblika SI</b>             | 933-4                 | (%)               | 4/16                                    | 11<br>(SI <sub>15</sub> )           | 17<br>(SI <sub>20</sub> ) | 8<br>(SI <sub>15</sub> )      | SI <sub>20</sub>                     |
|  |                       |                   | 16/32                                   | 13<br>(SI <sub>15</sub> )           | 8<br>(SI <sub>15</sub> )  | 25<br>(SI <sub>40</sub> )     | SI <sub>40</sub>                     |
| <b>Otpornost na drobljenje Los Angeles LA</b>  | 1097-2                | koef.             | 4/16                                    | 27<br>(LA <sub>30</sub> )           | -                         | -                             | LA <sub>30</sub><br>LA <sub>35</sub> |
| <b>Sadržaj sulfata topivog u kiselini AS</b>   | 1744-1 cl.12.         | (%)               | mješavina                               | 0,05 (AS <sub>0,2</sub> )           | 0,19 (AS <sub>0,2</sub> ) | 0,23*<br>(AS <sub>0,2</sub> ) | AS <sub>0,2</sub>                    |
| <b>Sadržaj ukupnog sumpora</b>                 | 1744-1 cl.11.         | (%)               | mješavina                               | 0,03                                | 0,02                      | 0,04                          | ≤ 1%                                 |
| <b>Sadržaj klorida Cl</b>                      | 1744-1 cl.7.          | (%)               | mješavina                               | 0,00                                | 0,01                      | 0,00                          | ≤ 0,15%<br>≤ 0,06%<br>≤ 0,03%        |
| <b>Nasipna gustoća ρ<sub>sr</sub></b>          | 1097-3                | (%)               | 0/4                                     | 1,24                                | 1,20                      | 1,39                          | -                                    |
|  |                       |                   | 4/16                                    | 1,32                                | 0,95                      | 1,11                          |                                      |
|  |                       |                   | 16/32                                   | 1,35                                | 0,98                      | 1,10                          |                                      |
| <b>Gustoća zrna ρ</b>                          | 1097-6                | Mg/m <sup>3</sup> | 0/4                                     | 2,67                                | 2,62                      | 2,73                          | -                                    |
|  |                       |                   | 4/16                                    | 2,68                                | 2,56                      | 2,63                          |                                      |
|  |                       |                   | 16/32                                   | 2,65                                | 2,40                      | 2,52                          |                                      |
| <b>Upijanje vode U<sub>24</sub></b>            | 1097-6                | (%)               | 0/4                                     | 3,2                                 | 14,9                      | 6,2                           | -                                    |
|  |                       |                   | 4/16                                    | 2,9                                 | 18,4                      | 11,9                          |                                      |
|  |                       |                   | 16/32                                   | 3,2                                 | 14,9                      | 10,0                          |                                      |
| <b>Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje F</b> | 1367-1                | (%)               | 4/16                                    | 9,8*<br>(F <sub>Deklarirani</sub> ) | 1,6<br>(F <sub>2</sub> )  | 3,1*<br>(F <sub>4</sub> )     | F <sub>1</sub><br>F <sub>2</sub>     |

|                                      |        |     |      |                        |                                  |                         |                                      |
|--------------------------------------|--------|-----|------|------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Ispitivanje magnezijevim sulfatom MS | 1367-2 | (%) | 4/16 | 16 (MS <sub>18</sub> ) | 64* (MS <sub>Deklarirani</sub> ) | 26* (MS <sub>35</sub> ) | MS <sub>18</sub><br>MS <sub>25</sub> |
|--------------------------------------|--------|-----|------|------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|

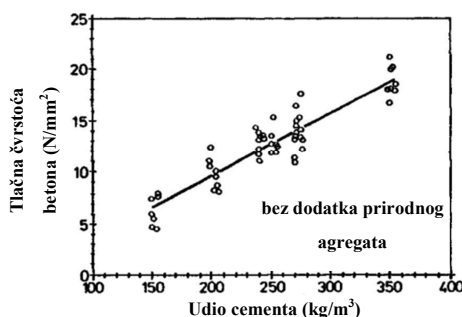
\*ne zadovoljava zahtjev TPBK

### 2.1.2. Projektiranje sastava betonske mješavine

Pri upotrebi reciklirane opeke kao agregata za proizvodnju betona, sastav betona moguće je projektirati na jednak način kao i sastav betona s prirodnim agregatom uobičajenim u praksi, [14].

Khaloo, [15], je dao preporuke za korištenje reciklirane opeke i crijeva kao agregata za beton. Preporuča se obavezno potapanje reciklirane opeke i crijeva prije njihove upotrebe. Prije dodavanja vode u mješavinu preporuča se miješanje sitnog i krupnog agregata s cementom tijekom 1-2 min. Zatim se preporuča dodavanje vode u periodu od 2 min uzimajući u obzir da je ranije dodana voda potrebna za apsorpciju, te se miješaju svi sastojci zajedno još 3 min. Prethodno vlaženje vodom ili potapanje reciklirane opeke u vodi može se izbjeći projektiranjem sastava betonske mješavine s velikim stupnjem obradivosti svježeg betona ili s dodavanjem superplastifikatora u mješavinu [16]. Budući da djelovanje superplastifikatora na poboljšanu obradivost traje oko 15-30 minuta, nakon tog vremena beton postaje slabo obradiv i teško se ugrađuje u oplatu. Prema tome, za porozne agregate kao što je reciklirana opeka preporučuje se prethodno vlaženje ili potapanje agregata, [11], [16]. Općenito se može reći da se u betonu s recikliranom opekom, pravilnim projektiranjem sastava mješavine betona, može postići bilo koji od zahtijevanih razreda konzistencije. Pri tome je potrebno uzeti u obzir apsorpciju agregata.

Udio cementa u betonu s recikliranom opekom može biti i do 20% veći nego kod običnog betona s prirodnim agregatom, a ovisan je o tipu i sastavu drobljene reciklirane opeke kao agregata. Upotrebom sitne i krupne frakcije reciklirane opeke kao agregata potrebni udio cementa u sastavu betonske mješavine može biti i veći od prethodno spomenutog udjela od 20%, slika 2.1, [8].



Slika 2. 1: Tlačna čvrstoća betona s drobljenom opekom kao funkcija udjela cementa, [8]

Pri upotrebi reciklirane opeke, potrebno je uzeti u obzir i udio prašinih čestica koji također može uzrokovati smanjenje obradivosti svježeg betonske mješavine. U slučajevima velikog udjela prašinih čestica u recikliranoj opeci potrebna je dodatna količina vode kako bi se poboljšala obradivost, a time se istovremeno uzrokuje i manja konačna čvrstoća betona. Ako je dozvoljeno smanjenje čvrstoće ograničeno na oko 5%, udio prašinih čestica također treba biti ograničen: 5% na ukupnu količinu agregata za malu

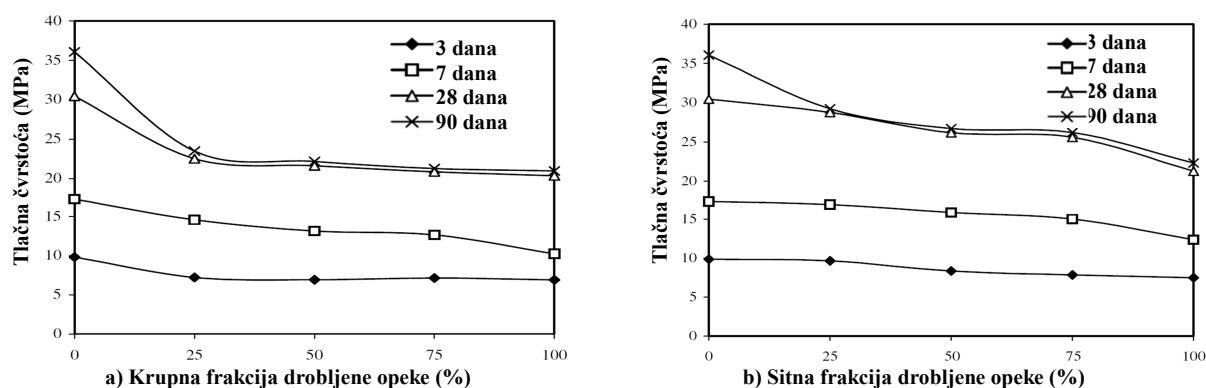


obradivost betonske mješavine s krupnim agregatom ( $> 4$  mm), 10% za malu obradivost betonske mješavine sa sitnim agregatom (0-4 mm) i na 20% za veliku obradivost ako su korištene samo sitna zrna agregata [11].

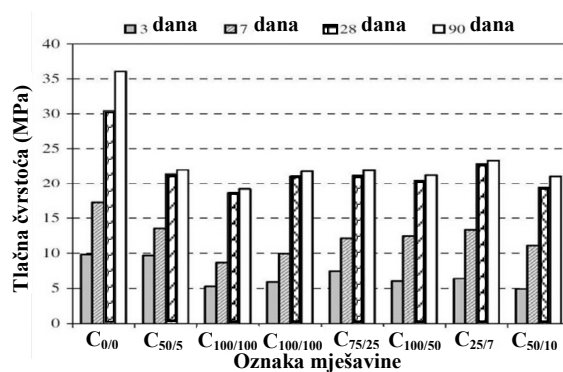
### 2.1.3. Fizikalno-mehanička svojstva betona s recikliranom opekom

#### 2.1.3.1. Tlačna čvrstoća

Općenito je prihvaćeno da beton s recikliranom opekom ima relativno manju tlačnu čvrstoću od betona s prirodnim agregatom, [17]. Ova karakteristika može se pripisati većoj apsorpciji reciklirane opeke u odnosu na apsorpciju prirodnog agregata. Povećanje postotka zamjene prirodnog agregata s recikliranim dovodi do smanjenja čvrstoća betona, slike 2.2a i 2.2b. Pri starosti od 28 dana, smanjenje tlačne čvrstoće betona s krupnom recikliranom opekom iznosi 10% do 35% u odnosu na beton s prirodnim agregatom, a za beton sa sitnom recikliranom opekom oko 30% do 40%, slika 2.3, [18].



Slika 2. 2: Razvoj tlačne čvrstoće u ovisnosti o postotku zamjene prirodnog agregata s drobljenom opekom, [18]

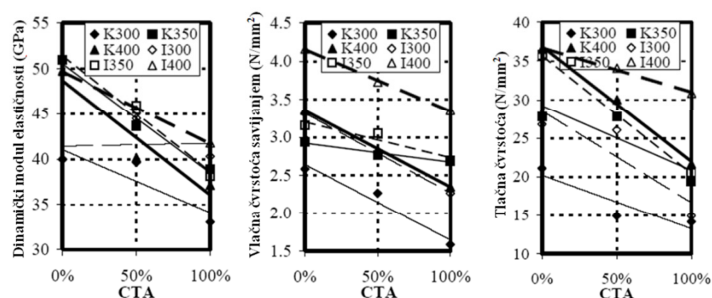


Slika 2. 3: Tlačne čvrstoće betona, [18]

Tablica 2. 5: Tlačna čvrstoća betona s prirodnim agregatom, drobljenom i recikliranom opekam

| Oznaka                                  | Tip betona                | Tip agregata                         | v/c  | PK (%) | RK (%) | PS (%) | RS (%) | Tlačna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> ) |       |
|---|---------------------------|--------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------|-------|
| <b>[18], Debieb &amp; Kenai, 2008</b>   |                           |                                      |      |        |        |        |        |                                      |       |
| C <sub>0/0</sub>                        | Normalne čvrstoće         | Vapnenački agregat                   | 0,61 | 100    | 0      | 100    | 0      | Slike 2.2 i 2.3                      |       |
| C <sub>0/25</sub>                       |                           | Reciklirana opeka i vapnenac         | 0,69 | 100    | 0      | 75     | 25     |                                      |       |
| C <sub>0/50</sub>                       |                           |                                      | 0,77 | 100    | 0      | 50     | 50     |                                      |       |
| C <sub>0/75</sub>                       |                           |                                      | 0,85 | 100    | 0      | 25     | 75     |                                      |       |
| C <sub>0/100</sub>                      |                           |                                      | 0,93 | 100    | 0      | 0      | 100    |                                      |       |
| C <sub>50/50</sub>                      |                           |                                      | 0,75 | 50     | 50     | 50     | 50     |                                      |       |
| C <sub>100/100</sub>                    |                           | Reciklirana opeka                    | 0,89 | 0      | 100    | 0      | 100    |                                      |       |
| C <sub>100/100</sub> <sup>+</sup>       | S dodatkom plastifikatora | Reciklirana opeka                    | 0,86 | 0      | 100    | 0      | 100    |                                      |       |
| C <sub>75/25</sub>                      | Normalne čvrstoće         | Reciklirana opeka i vapnenac         | 0,66 | 25     | 75     | 75     | 25     |                                      |       |
| C <sub>100/50</sub>                     |                           |                                      | 0,72 | 0      | 100    | 50     | 50     |                                      |       |
| C <sub>25/75</sub>                      |                           |                                      | 0,85 | 75     | 25     | 25     | 75     |                                      |       |
| C <sub>50/100</sub>                     |                           |                                      | 1,08 | 0      | 100    | 50     | 50     |                                      |       |
| <b>[11], Khalaf &amp; DeVenny, 2004</b> |                           |                                      |      |        |        |        |        |                                      |       |
| M1 G                                    | Normalne čvrstoće         | Granit                               | 0,55 | 100    | 0      | 100    | 0      |                                      | 45,70 |
| M1 O                                    |                           | Drobljena puna opeka                 | 0,55 | 0      | 100    | 100    | 0      | 37,6                                 |       |
| M1 O <sup>+</sup>                       |                           | Drobljena šuplja opeka               | 0,55 | 0      | 100    | 100    | 0      | 46,70                                |       |
| M2 G                                    | Visoke čvrstoće           | Granit                               | 0,40 | 100    | 0      | 100    | 0      | 66,80                                |       |
| M2 O                                    |                           | Drobljena puna opeka i granit        | 0,40 | 0      | 100    | 100    | 0      | 53,80                                |       |
| M2 O <sup>+</sup>                       |                           | Drobljena šuplja opeka i granit      | 0,40 | 0      | 100    | 100    | 0      | 66,70                                |       |
| M3 G                                    | S dodatkom aeranta        | Granit                               | 0,43 | 100    | 0      | 100    | 0      | 42,70                                |       |
| M3 O                                    |                           | Drobljena puna opeka i granit        | 0,43 | 0      | 100    | 100    | 0      | 38,80                                |       |
| M3 O <sup>+</sup>                       |                           | Drobljena šuplja opeka i granit      | 0,43 | 0      | 100    | 100    | 0      | 44,20                                |       |
| <b>[19], Rühl &amp; Atkinson, 1999</b>  |                           |                                      |      |        |        |        |        |                                      |       |
| NZ                                      | Normalne čvrstoće         | Prirodni agregat                     | 0,55 | 100    | 0      | 100    | 0      | 35,39                                |       |
| ZI                                      |                           | Reciklirana opeka                    | 0,55 | 0      | 100    | 100    | 0      | 32,99                                |       |
| <b>[20], Khatib, 2005</b>               |                           |                                      |      |        |        |        |        |                                      |       |
| Contr.                                  | Normalne čvrstoće         | Prirodni agregat                     | 0,50 | 100    | 0      | 100    | 0      | 46,70                                |       |
| CB 25                                   |                           | Reciklirana opeka i prirodni agregat | 0,50 | 100    | 0      | 75     | 25     | 39,20                                |       |
| CB 50                                   |                           | Reciklirana opeka i prirodni agregat | 0,50 | 100    | 0      | 50     | 50     | 37,70                                |       |
| CB 75                                   |                           | Reciklirana opeka i prirodni agregat | 0,50 | 100    | 0      | 25     | 75     | 36,10                                |       |
| CB 100                                  |                           | Reciklirana opeka i prirodni agregat | 0,50 | 100    | 0      | 0      | 100    | 33,20                                |       |
| <b>[21], Cachim, 2009</b>               |                           |                                      |      |        |        |        |        |                                      |       |
| NN 45                                   | Normalne čvrstoće         | Prirodni agregat                     | 0,45 | 100    | 0      | 100    | 0      | 36,2                                 |       |
| NA 45                                   |                           | Rec. opeka i prirodni agregat        | 0,45 | 85     | 15     | 100    | 0      | 32,1                                 |       |
| NB 45                                   |                           |                                      | 0,45 | 85     | 15     | 100    | 0      | 38,5                                 |       |
| AA 45                                   |                           | Reciklirana opeka                    | 0,45 | 70     | 30     | 100    | 0      | 27,6                                 |       |
| BB 45                                   |                           |                                      | 0,45 | 70     | 30     | 100    | 0      | 32,3                                 |       |
| NN 50                                   | Normalne čvrstoće         | Prirodni agregat                     | 0,50 | 100    | 0      | 100    | 0      | 30,5                                 |       |
| NA 50                                   |                           | Rec. opeka i prirodni                | 0,50 | 85     | 15     | 100    | 0      | 29,4                                 |       |

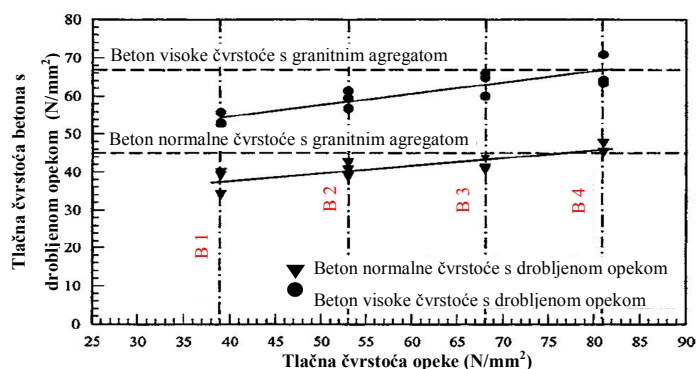
|  |   |  |      |     |     |     |     |           |
|--|---|--|------|-----|-----|-----|-----|-----------|
| <b>NB 50</b>   |   | agregat  | 0,50 | 85  | 15  | 100 | 0   | 32,3      |
| <b>AA 50</b>   |   | Reciklirana opeka  | 0,50 | 70  | 30  | 100 | 0   | 24,5      |
| <b>BB 50</b>   |   |  | 0,50 | 70  | 30  | 100 | 0   | 29,0      |
| <b>[22], Poon et al., 2007-I</b>   |   |  |      |     |     |     |     |           |
| <b>Mix 1</b>   | Normalne čvrstoće                             | Granit   | 0,55 | 100 | 0   | 100 | 0   | 53,8      |
| <b>Mix 2</b>   |   | Reciklirana opeka  | 0,55 | 100 | 0   | 80  | 20  | 47,2      |
| <b>Mix 3</b>   |   | Reciklirani crijep                                       | 0,55 | 100 | 0   | 80  | 20  | 45,5      |
| <b>[23], Poon et al., 2007-II</b>  |   |  |      |     |     |     |     |           |
| <b>Control</b>   | Normalne čvrstoće                             | Reciklirani beton  | 0,41 | 0   | 100 | 0   | 100 | 80,5      |
| <b>10 T</b>  |   | Reciklirani crijep i beton                               | 0,49 | 90  | 10  | 90  | 10  | 65,6      |
| <b>5T5B</b>  |   | Reciklirani crijep(5%), opeka (5%) i beton               | 0,49 | 90  | 10  | 90  | 10  | 62,4      |
| <b>4B4G2T</b>  |   | Reciklirani crijep (2%), opeka (4%), staklo (4%) i beton | 0,49 | 90  | 10  | 90  | 10  | 66,2      |
| <b>[24], Suzuki et al., 2009</b>   |   |  |      |     |     |     |     |           |
| <b>PC0</b>   | Norm. čvrstoće s dodatkom superplastifikatora | Prirodni agregat   | 0,15 | 100 | 0   | 100 | 0   | 36,1      |
| <b>PC10</b>  |   | Reciklirana opeka i prirodni agregat                     | 0,15 | 90  | 10  | 100 | 0   | 40,8      |
| <b>PC20</b>  |   |  | 0,15 | 80  | 20  | 100 | 0   | 41,5      |
| <b>PC30</b>  |   |  | 0,15 | 70  | 30  | 100 | 0   | 43,4      |
| <b>PC40</b>  |   |  | 0,15 | 60  | 40  | 100 | 0   | 54,5      |
| <b>[25], Jones, N., Soutsos, M.N., Millard, S.G., Bungey, J.H., Tickell, R.G., 2005</b>  |   |  |      |     |     |     |     |           |
| <b>1</b>   | Normalne čvrstoće                             | Reciklirana opeka  | 0,41 | 0   | 100 | 0   | 100 | 5,3       |
| <b>2</b>   |   |  | 0,28 | 0   | 100 | 0   | 100 | 8,0       |
| <b>3</b>   |   |  | 0,22 | 0   | 100 | 0   | 100 | 9,3       |
| <b>4</b>   |   |  | 0,17 | 0   | 100 | 0   | 100 | 10,9      |
| <b>5</b>   |   |  | 0,18 | 0   | 100 | 0   | 100 | 13,4      |
| <b>[26], Topcu &amp; Canbaz, 2007</b>  |   |  |      |     |     |     |     |           |
| <b>K300</b>  | Normalne čvrstoće                             | Prirodni agregat   | 0,63 | 100 | 0   | 100 | 0   | Slika 2.4 |
|  |   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      | 0,63 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|  | 0,63  |  | 0    | 100 | 0   | 100 |     |           |
| <b>K350</b>  | Normalne čvrstoće                             | Prirodni agregat   | 0,54 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|  |   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      | 0,54 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|  | 0,54  |  | 0    | 100 | 0   | 100 |     |           |
| <b>K400</b>  | Normalne čvrstoće                             | Prirodni agregat   | 0,48 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|  |   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      | 0,48 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|  | 0,48  |  | 0    | 100 | 0   | 100 |     |           |
| <b>I300</b>  | Normalne čvrstoće                             | Prirodni agregat   | 0,63 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|  |   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      | 0,63 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|  | 0,63  |  | 0    | 100 | 0   | 100 |     |           |
| <b>I350</b>  | Normalne čvrstoće                             | Prirodni agregat   | 0,54 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|  |   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      | 0,54 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|  | 0,54  |  | 0    | 100 | 0   | 100 |     |           |
| <b>I400</b>  | Normalne čvrstoće                             | Prirodni agregat   | 0,48 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|  |   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      | 0,48 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|  | 0,48  |  | 0    | 100 | 0   | 100 |     |           |
| Oznake: postotak udjela krupnog (K) i sitnog (S) agregata; PK-prirodni agregat-krupna frakcija; PS-prirodni agregat-sitna frakcija; RK- opeka-krupna frakcija; RS- opeka-sitna frakcija. |   |  |      |     |     |     |     |           |



Slika 2. 4: Dinamički modul elastičnosti, vlačna i tlačna čvrstoća betona s drobljenim crijepom, [26]

Iz provedenih istraživanja vidljivo je da se tlačna čvrstoća betona pri starosti od 28 dana kreće unutar granica 20 do 40 N/mm<sup>2</sup>, tablica 2.5. Pritom treba uzeti u obzir da tlačna čvrstoća betona s recikliranom opekom ovisi prvenstveno o čvrstoći opeke upotrijebljene za recikliranje. Primjerice, upotrebom recikliranog agregata dobivenog od opeke s većom početnom čvrstoćom (68 N/mm<sup>2</sup>) može se postići tlačna čvrstoća jednaka onoj koju dostiže beton s granitnim agregatom, tablica 2.5, [11], [16].

U tablici 2.6 prikazane su karakteristike opeka korištenih u ispitivanju veze između čvrstoća opeke i betona spravljenog s tim drobljenim opekama. Veza između tlačne čvrstoće betona spravljenog s drobljenom opekom i tlačne čvrstoće originalne opeke upotrijebljene za proizvodnju agregata za beton prikazana je na slici 2.5, [16].



Slika 2. 5: Ovisnost tlačne čvrstoće betona s drobljenom opekom i tlačne čvrstoće opeke, [16]

Iz slike 2.5 je vidljivo da postoji ovisnost između čvrstoće zrna agregata opeke i konačne tlačne čvrstoće betona u kojem je drobljena opeka kao agregat upotrijebljena. Što je veća početna čvrstoća originalne opeke to je veća konačna tlačna čvrstoća betona spravljenog s tom opekom kao agregatom.

Tablica 2. 6: Tipovi i tlačne čvrstoće opeka upotrijebljenih u proizvodnji betona, [16]

| Oznaka uzorka opeke | Tip opeke   | Gustoća drobljene opeke (kg/m <sup>3</sup> ) | Tlačna čvrstoća opeke (N/mm <sup>2</sup> ) | Koeficijent varijacije (%) |
|---------------------|-------------|--|--|----------------------------|
| B 1                 | Puna        | 1,97   | 39   | 6,6                        |
| B 2                 | 5 šupljina  | 2,22   | 53   | 5,8                        |
| B 3                 | 3 šupljine  | 2,20   | 68   | 5,2                        |
| B 4                 | 10 šupljina | 2,25   | 81   | 5,3                        |

Upotrebom reciklirane opeke kao agregata uz dodatak aeranta može se uspješno proizvesti i aerirani beton. Primjer ispitanih svojstava betona s dodatkom aeranta dan je u tablici 2.7, [16]. Iz tablice je vidljivo da je upotrebom čvršće opeke moguće postići tlačnu čvrstoću betona jednaku tlačnoj čvrstoći aeriranog betona s granitnim agregatom. Također je iz prikazanih rezultata moguće zaključiti da više ne postoji veza između početne čvrstoće originalne opeke i konačne čvrstoće betona s drobljenom opekom. Za sva tri tipa opeke, različitih početnih čvrstoća, korištene u ovom ispitivanju dobiveni su aerirani betoni približno jednakih tlačnih čvrstoća.

Tablica 2. 7: Rezultati ispitivanja betona s drobljenom opekom i s dodatkom aeranta, [16]

| Oznaka             | Tip betona        | Tip agregata | Gustoća betona (kg/m <sup>3</sup> ) | Tlačna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> ) | Koeficijent varijacije (%) | Slijeganje (mm) | Vebe (S) | Udio zraka (%) |
|--------------------|-------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------|----------|----------------|
| M3 O               | Normalne čvrstoće | B1 i granit* | 2,125                               | 52,5                                 | 2,5                        | 10              | 9        | 5,8            |
| M3 O <sup>+</sup>  | Normalne čvrstoće | B3 i granit* | 2,214                               | 58,4                                 | 5,3                        | 15              | 8        | 5,8            |
| M3 O <sup>++</sup> | Normalne čvrstoće | B4 i granit* | 2,225                               | 61,3                                 | 1,1                        | 15              | 8        | 5,6            |
| M3 G               | Normalne čvrstoće | Granit       | 2,482                               | 60,0                                 | 4,1                        | 12              | 11       | 5,1            |

\*granit se dodaje kao zamjena za sitnu frakciju opeke. Oznake B1, B3 i B4 označavaju opeku koja je korištena pri drobljenju, a njihova svojstva su prikazana u tablici 2.6. Sve mješavine spravljene su s dodatkom aeranta.

### 2.1.3.2. Vlačna čvrstoća

Oštar oblik i hrapava površina drobljene opeke općenito su povoljni za ostvarenje dobre veze između agregata i cementne paste, što bi trebalo utjecati i na povećanje vlačne čvrstoće savijanjem. Unatoč toj pretpostavci, čvrstoća pri savijanju betona s recikliranom opekom je oko 8% do 15% manja od iste kod običnog betona s prirodnim agregatom, [11]. U tablici 2.8 prikazani su rezultati ispitivanja betona s različitim udjelima drobljene opeke i prirodnog agregata koji potvrđuju da je čvrstoća savijanjem betona s drobljenom opekmanja od čvrstoće savijanjem betona s prirodnim agregatom. Tijekom provedenih istraživanja korelacije čvrstoće savijanjem i tlačne čvrstoće betona s recikliranom opekman, uočeno je da su tlačna čvrstoća i čvrstoća savijanjem proporcionalne, [8].

Tablica 2. 8: Čvrstoća betona pri savijanju s različitim udjelima drobljene opeke i prirodnog agregata

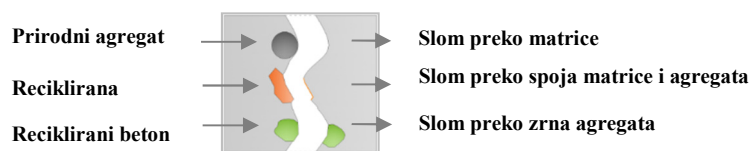
| Oznaka mješavine                      | Tip agregata                 | Čvrstoća savijanjem (N/mm <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------------|------------------------------|--|
| <b>[18], Debieb &amp; Kenai, 2008</b> |                              |  |
| C <sub>0/0</sub>                      | Vapnenački agregat           | 2,99                                     |
| C <sub>50/50</sub>                    | Reciklirana opeka i vapnenac | 2,30                                     |
| C <sub>100/100</sub>                  | Reciklirana opeka            | 1,62                                     |
| C <sub>100/100</sub> <sup>+</sup>     | Reciklirana opeka            | 2,87                                     |
| C <sub>75/25</sub>                    | Reciklirana opeka i vapnenac | 2,11                                     |
| C <sub>100/50</sub>                   | Reciklirana opeka i vapnenac | 2,04                                     |
| C <sub>25/75</sub>                    | Reciklirana opeka i vapnenac | 2,91                                     |
| C <sub>50/100</sub>                   | Reciklirana opeka i vapnenac | 1,81                                     |

| <b>[11], Khalaf &amp; DeVenny, 2004</b>                        |  |           |
|--|--|-----------|
| <b>M1 G</b>  | Granit   | 5,2       |
| <b>M1 O<sup>+</sup></b>  | Drobljena šuplja opeka                                   | 4,3       |
| <b>[21], Cachim, 2009</b>                                      |  |           |
| <b>NN 45</b>   | Prirodni agregat   | 2,97      |
| <b>NA 45</b>   | Reciklirana opeka i prirodni agregat                     | 2,72      |
| <b>NB 45</b>   | Reciklirana opeka i prirodni agregat                     | 2,97      |
| <b>AA 45</b>   | Reciklirana opeka  | 2,38      |
| <b>BB 45</b>   | Reciklirana opeka  | 2,67      |
| <b>NN 50</b>   | Prirodni agregat   | 2,34      |
| <b>NA 50</b>   | Reciklirana opeka i prirodni agregat                     | 2,25      |
| <b>NB 50</b>   | Reciklirana opeka i prirodni agregat                     | 2,72      |
| <b>AA 50</b>   | Reciklirana opeka  | 2,44      |
| <b>BB 50</b>   | Reciklirana opeka  | 2,38      |
| <b>[23], Poon et al., 2007-II - Vlačna čvrstoća cijepanjem</b> |  |           |
| <b>Control</b>   | Reciklirani beton  | 3,75      |
| <b>10 T</b>  | Reciklirani crijep i beton                               | 4,09      |
| <b>5T5B</b>  | Reciklirani crijep(5%), opeka (5%) i beton               | 3,82      |
| <b>4B4G2T</b>  | Reciklirani crijep (2%), opeka (4%), staklo (4%) i beton | 3,71      |
| <b>[26], Topcu &amp; Canbaz, 2007</b>                          |  |           |
| <b>K300 - 0</b>  | Prirodni agregat   | Slika 2.4 |
| <b>K300 - 50</b>   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      |           |
| <b>K300 - 100</b>  |  |           |
| <b>K350 - 0</b>  | Prirodni agregat   |           |
| <b>K350 - 50</b>   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      |           |
| <b>K350 - 100</b>  |  |           |
| <b>K400 - 0</b>  | Prirodni agregat   |           |
| <b>K400 - 50</b>   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      |           |
| <b>K400 - 100</b>  |  |           |
| <b>I300 - 0</b>  | Prirodni agregat   |           |
| <b>I300 - 50</b>   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      |           |
| <b>I300 - 100</b>  |  |           |
| <b>I350 - 0</b>  | Prirodni agregat   |           |
| <b>I350 - 50</b>   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      |           |
| <b>I350 - 100</b>  |  |           |
| <b>I400 - 0</b>  | Prirodni agregat   |           |
| <b>I400 - 50</b>   | Drobljeni crijep i prirodni agregat                      |           |
| <b>I400 - 100</b>  |  |           |

Napomena: postotak udjela krupnog i sitnog agregata određenog tipa agregata kao u tablici 2.5.

### 2.1.3.3. Veza između reciklirane opeke i cementne paste

Veza između agregata i cementne paste je važan faktor koji utječe na čvrstoću betona. Veza može biti definirana kao spoj agregata i cementne paste uslijed hrapavosti agregata. Hrapava površina, kao što je slučaj kod zrna drobljenog agregata, rezultira boljom vezom nego kod zrna čija je površina glatka. Prilikom upotrebe recikliranog agregata potrebno je voditi računa da udio prašinih čestica ne bude prevelik jer to može imati utjecaj na vezu između agregata i cementne paste. Voda apsorbirana u recikliranoj opeci prilikom miješanja betona postaje s vremenom dostupna za hidrataciju nehidratiziranih ostataka cementa, [11]. Ova dodatna hidratacija osigurava bolje povezivanje između agregata i cementne paste, što ojačava vezu između agregata i cementne matrice. Određivanje kvalitete veze između hidratizirane matrice betona i krupnog agregata je vrlo teško i ne postoji prihvaćena metoda kojom bi se to točno utvrdilo. Općenito možemo reći da ukoliko je veza dobra, zdrobljeni beton u presjeku u kojem promatramo slom nakon ispitivanja tlačne čvrstoće treba sadržavati manji broj zrna agregata koja su se zdrobila u odnosu na veći broj zrna koja su iščupana iz svojih položaja u očvrslom betonu tj. ostala čitava nakon drobljenja.



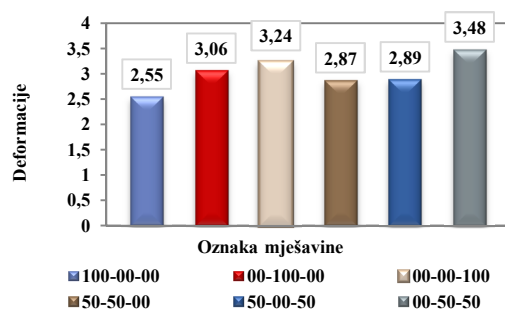
Slika 2. 6: Shema površina loma za različite agregate, [27]

Na slici 2.6 prikazan je shematski prikaz površine loma za različite agregate. Beton s prirodnim agregatom puca po površini matrice betona, beton sa recikliranim agregatom od opeke najčešće puca preko spoja matrice betona i zrna agregata, a beton s recikliranim betonom kao agregatom puca preko površine zrna agregata iz razloga što je otprilike jednake čvrstoće reciklirani beton i betonska matrica, [27].

### 2.1.3.4. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti betona s recikliranom opekam je oko 30% do 40% manji od modula elastičnosti betona s prirodnim agregatom, kao što je prikazano u tablici 2.9, [19, 28, 29].

Iz tablice 2.9 možemo vidjeti da se s povećanjem postotka zamjene prirodnog agregata s recikliranom opekam, modul elastičnosti smanjuje. Također je uočeno da je modul elastičnosti betona, spravljenog sa sitnim zrnima reciklirane opeke kao agregata te sa sitnim i krupnim zrnima iste, manji do 50% u usporedbi s običnim betonom s prirodnim agregatom, [18]. Pri upotrebi reciklirane opeke kao agregata za beton treba uzeti u obzir povećanje deformacija očvrslulog betona. Stopostotnom zamjenom frakcije 4/8 i 8/16 prirodnog agregata s recikliranom opekam deformacije se povećavaju za oko 30%, slika 2.7, [19].



Slika 2. 7: Deformacije betona pod maksimalnim naprezanjem, [19]

Iz slike 2.7 također je vidljivo da se s povećanjem postotka zamjene prirodnog agregata s recikliranom opekom ili recikliranim betonom deformacije povećavaju s povećanjem postotka zamjene. U konstrukcijama, u kojima deformacije imaju važnu ulogu, manji modul elastičnosti betona, uzrokovan upotrebom reciklirane opeke kao agregata, treba uzeti u obzir kao važan parametar pri njihovom projektiranju.

Tablica 2. 9: Modul elastičnosti betona s recikliranom opekom i prirodnim agregatom

| Oznaka   | Udio agregata po frakcijama (%) |     |      |                        |        |        |                        |   |      | Modul elastičnosti (GPa) |
|--|---------------------------------|-----|------|------------------------|--------|--------|------------------------|---|------|--------------------------|
|  | Prirodni agregat (PA)           |     |      | Reciklirani beton (RA) |        |        | Reciklirana opeka (RO) |   |      |                          |
|  | 0/4                             | 4/8 | 8/16 | 0/4                    | 4/8    | 8/16   | 0/4                    | 4/8                                     | 8/16 |                          |
| <b>[19, 28, 29], Rühl &amp; Atkinson, 1999; Grübl et al., 1999; Bretschneider &amp; Rühl, 1998</b> |                                 |     |      |                        |        |        |                        |   |      |                          |
| 100-00-00  | 100                             | 100 | 100  | 0                      | 0      | 0      | 0                      | 0                                       | 0    | 27,70                    |
| 75-25-00   | 100                             | 75  | 75   | 0                      | 25     | 25     | 0                      | 0                                       | 0    | 29,40                    |
| 50-50-00   | 100                             | 50  | 50   | 0                      | 50     | 50     | 0                      | 0                                       | 0    | 26,10                    |
| 25-75-00   | 100                             | 25  | 25   | 0                      | 75     | 75     | 0                      | 0                                       | 0    | 26,60                    |
| 00-100-00  | 100                             | 0   | 0    | 0                      | 100    | 100    | 0                      | 0                                       | 0    | 24,40                    |
| 75-00-25   | 100                             | 75  | 75   | 0                      | 0      | 0      | 0                      | 25                                      | 25   | 26,70                    |
| 50-00-50   | 100                             | 50  | 50   | 0                      | 0      | 0      | 0                      | 50                                      | 50   | 23,90                    |
| 25-00-75   | 100                             | 25  | 25   | 0                      | 0      | 0      | 0                      | 75                                      | 75   | 21,80                    |
| 00-00-100  | 100                             | 0   | 0    | 0                      | 0      | 0      | 0                      | 100                                     | 100  | 18,00                    |
| 00-75-25   | 100                             | 0   | 0    | 0                      | 75     | 75     | 0                      | 25                                      | 25   | 23,50                    |
| 00-50-50   | 100                             | 0   | 0    | 0                      | 50     | 50     | 0                      | 50                                      | 50   | 23,30                    |
| 00-25-75   | 100                             | 0   | 0    | 0                      | 25     | 25     | 0                      | 75                                      | 75   | 21,80                    |
| Oznaka   | Tip agregata                    |     | v/c  | PK (%)                 | RK (%) | PS (%) | RS (%)                 | Modul elastičnosti (N/mm <sup>2</sup> ) |      |                          |
| <b>[21], Cachim, 2009</b>  |                                 |     |      |                        |        |        |                        |   |      |                          |
| NN 45  | Prirodni agregat                |     | 0,45 | 100                    | 0      | 100    | 0                      | 35,2                                    |      |                          |
| NA 45  | Rec. opeka i prirodni agregat   |     | 0,45 | 85                     | 15     | 100    | 0                      | 33,7                                    |      |                          |
| NB 45  | Rec. opeka i prirodni agregat   |     | 0,45 | 85                     | 15     | 100    | 0                      | 34,7                                    |      |                          |
| AA 45  | Rec. opeka                      |     | 0,45 | 70                     | 30     | 100    | 0                      | 31,4                                    |      |                          |
| BB 45  | Reciklirana opeka               |     | 0,45 | 70                     | 30     | 100    | 0                      | 32,6                                    |      |                          |
| NN 50  | Prirodni agregat                |     | 0,50 | 100                    | 0      | 100    | 0                      | 32,9                                    |      |                          |
| NA 50  | Rec. opeka i prirodni agregat   |     | 0,50 | 85                     | 15     | 100    | 0                      | 35,6                                    |      |                          |
| NB 50  | Rec. opeka i prirodni agregat   |     | 0,50 | 85                     | 15     | 100    | 0                      | 32,4                                    |      |                          |
| AA 50  | Reciklirana opeka               |     | 0,50 | 70                     | 30     | 100    | 0                      | 28,5                                    |      |                          |

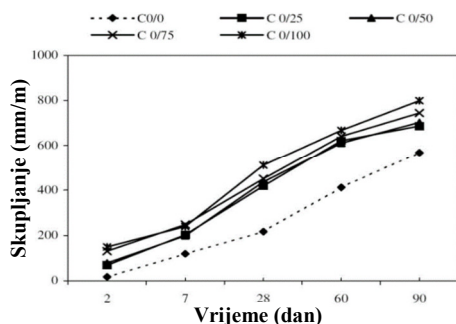


|                                       |                                   |      |     |     |     |     |           |
|---------------------------------------|-----------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----------|
| <b>BB 50</b>                          | Reciklirana opeka                 | 0,50 | 70  | 30  | 100 | 0   | 35,9      |
| <b>[22], Poon et al., 2007</b>        |                                   |      |     |     |     |     |           |
| <b>Mix 1</b>                          | Granit                            | 0,55 | 100 | 0   | 100 | 0   | 29,5      |
| <b>Mix 2</b>                          | Reciklirana opeka                 | 0,55 | 100 | 0   | 80  | 20  | 27,1      |
| <b>Mix 3</b>                          | Reciklirani crijep                | 0,55 | 100 | 0   | 80  | 20  | 26,8      |
| <b>[26], Topcu &amp; Canbaz, 2007</b> |                                   |      |     |     |     |     |           |
| <b>K300</b>                           | Prirodni agregat                  | 0,63 | 100 | 0   | 100 | 0   | Slika 2.4 |
|                                       | Droblj. crijep i prirodni agregat | 0,63 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|                                       |                                   | 0,63 | 0   | 100 | 0   | 100 |           |
| <b>K350</b>                           | Prirodni agregat                  | 0,54 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|                                       | Droblj. crijep i prirodni agregat | 0,54 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|                                       |                                   | 0,54 | 0   | 100 | 0   | 100 |           |
| <b>K400</b>                           | Prirodni agregat                  | 0,48 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|                                       | Droblj. crijep i prirodni agregat | 0,48 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|                                       |                                   | 0,48 | 0   | 100 | 0   | 100 |           |
| <b>I300</b>                           | Prirodni agregat                  | 0,63 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|                                       | Droblj. crijep i prirodni agregat | 0,63 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|                                       |                                   | 0,63 | 0   | 100 | 0   | 100 |           |
| <b>I350</b>                           | Prirodni agregat                  | 0,54 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|                                       | Droblj. crijep i prirodni agregat | 0,54 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|                                       |                                   | 0,54 | 0   | 100 | 0   | 100 |           |
| <b>I400</b>                           | Prirodni agregat                  | 0,48 | 100 | 0   | 100 | 0   |           |
|                                       | Droblj. crijep i prirodni agregat | 0,48 | 50  | 50  | 50  | 50  |           |
|                                       |                                   | 0,48 | 0   | 100 | 0   | 100 |           |

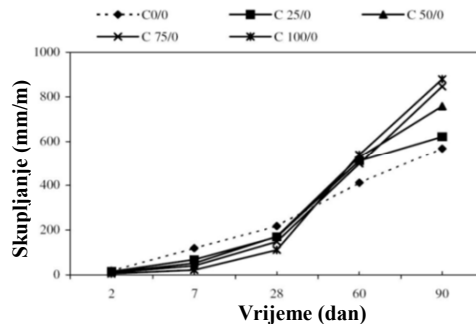
### 2.1.3.5. Skupljanje

Skupljanje betona s recikliranom opekom uslijed sušenja veće je nego skupljanje običnog betona s prirodnim agregatom, [11]. Skupljanje je u korelaciji s veličinom zrna agregata upotrijebljenog u proizvodnji betona. Ako se koriste samo sitna zrna reciklirane opeke u spravljanju betonske mješavine, skupljanje u ranoj starosti je gotovo šest puta veće nego kod betona s prirodnim agregatom i nastavlja se jednakom brzinom povećavati sve do devedesetog dana, slika 2.8 i 2.9, [18, 20].

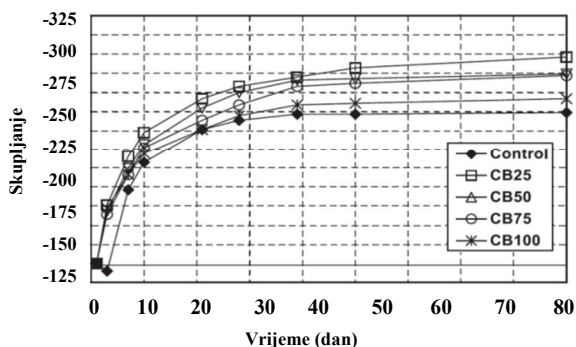
Iz primjera prikazanog na slici 2.10 može se uočiti da je skupljanje betona s krupnom frakcijom reciklirane opeke do 28 dana starosti manje nego kod običnog betona, [18]. Nakon 28 dana dolazi do naglog porasta skupljanja i to za oko 80% u devedesetom danu. Ako se koriste i sitna i krupna zrna reciklirane opeke kao agregat, skupljanje se stabilizira u ranoj starosti i postaje približno jednako skupljanju običnog betona. Pri kasnoj starosti, skupljanje betona sa sitnim i krupnim recikliranim agregatom veće je nego kod običnog betona s prirodnim agregatom, slika 2.11, [18].



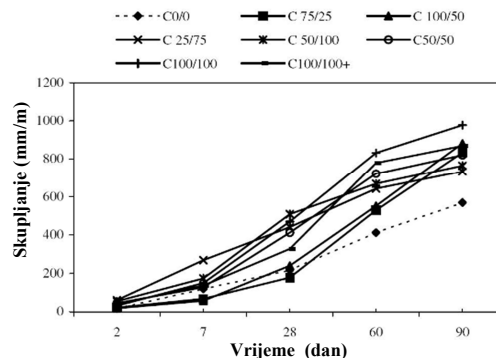
Slika 2. 8: Skupljanje betona sa sitnom frakcijom reciklirane opeke, [18]



Slika 2. 9: Skupljanje betona s krupnom frakcijom reciklirane opeke, [18]



Slika 2. 10: Skupljanje betona sa sitnom frakcijom reciklirane opeke, [20]



Slika 2. 11: Skupljanje betona sa sitnom i krupnom frakcijom reciklirane opeke, [18]

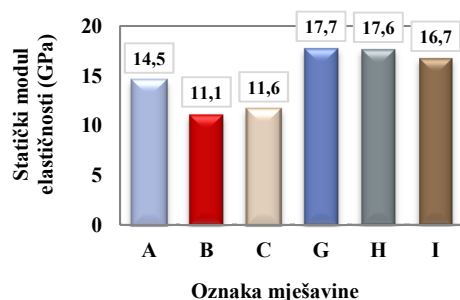
### 2.1.3.6. Utjecaj polimera na beton s recikliranom opekom

Provedena su istraživanja utjecaja dodatka 0, 4 i 8% polimera po težini cementa na svojstva betona s recikliranom opekom kao agregatom, [30]. Iz rezultata istraživanja prikazanih u tablici 2.10 i slici 2.12 može se vidjeti da polimerom modificirani beton s drobljenom opekom ima manju tlačnu čvrstoću, približno jednaku čvrstoću pri savijanju, manje skupljanje, manji modul elastičnosti, i malo veće puzanje nego beton bez dodatka polimera. Također se može uočiti da se zamjenom sitne frakcije (0/4 mm) reciklirane opeke s riječnim agregatom postižu bolja fizikalno-mehanička svojstva polimerom modificiranih betona.

Tablica 2. 10: Svojstva betona s recikliranom opekom kao agregatom i s dodatkom polimera, [30]

| Tip agregata                                 | Oznaka | Dodatak polimera* | v/c  | Tlačna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> ) | Čvrstoća na savijanje (N/mm <sup>2</sup> ) | Skupljanje (mm/m) | Puzanje (mm/m) |
|--|--------|-------------------|------|--------------------------------------|--|-------------------|----------------|
| Reciklirana opeka                            | A      | 0 %               | 0,86 | 28,4                                 | 1,9  | 1,187             | 0,94           |
| Reciklirana opeka                            | B      | 4 %               | 0,77 | 20,9                                 | 2,2  | 1,153             | 0,94           |
| Reciklirana opeka                            | C      | 8 %               | 0,73 | 23,0                                 | 2,0  | 1,132             | 0,98           |
| Reciklirana opeka i riječni agregat (0/4 mm) | G      | 0 %               | 1,12 | 24,5                                 | 3,4  | 0,834             | ----           |
| Reciklirana opeka i riječni agregat (0/4 mm) | H      | 4 %               | 1,08 | 27,0                                 | 3,1  | 0,792             | ----           |
| Reciklirana opeka i riječni agregat (0/4 mm) | I      | 8 %               | 1,04 | 24,3                                 | 3,6  | 0,547             | ----           |

\*Napomena: dodatak polimera u % u odnosu na količinu cementa koja je u svim mješavinama 350kg/m<sup>3</sup>



Slika 2. 12: Statički modul elastičnosti betona s recikliranom opekom i riječnim agregatom uz dodatak polimera, [30]

#### 2.1.4. Trajnost betona s recikliranom opekom

Trajnosti betona se posvećuje sve više pozornosti jer se kod nas kao i u svijetu utvrđuje da agresivna okolina potiče odnosno pospješuje propadanje betona, [31]. Iz tog razloga se već pri projektiranju koristi koncept po kojemu konstrukcija treba iskazivati odgovarajuću sigurnost, uporabljivost i nosivost tijekom svog životnog vijeka. Trajnost betona možemo predvidjeti poznajemo li okolinu kojoj je objekt izložen te mehanizme mogućih procesa propadanja. Ako su granični uvjeti poznati i dobro određeni, možemo očekivati da će i projektiranje trajnosti betona biti uspješno.

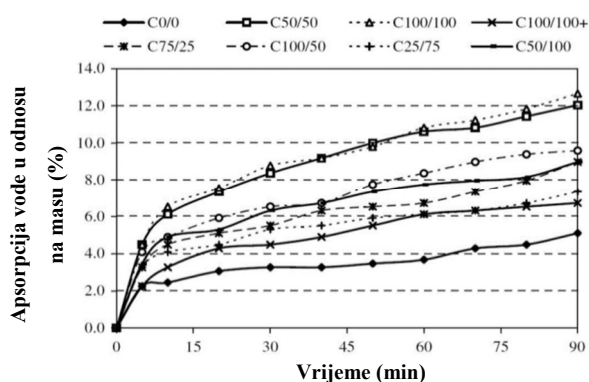
Trajnost materijala definirana je kao njegova sposobnost da se suprotstavi različitim djelovanjima iz okoliša kojem je sam taj materijal izložen, [31]. Prilikom projektiranja betonske konstrukcije potrebno je uzeti u obzir očekivane utjecaje okoliša kako bi njezina sigurnost i uporabljivost tijekom projektiranog uporabnog vijeka bila osigurana uz minimalne troškove održavanja i popravaka. Životni vijek konstruktivnih i nekonstruktivnih materijala ovisi o njihovoj izdržljivosti u uvjetima u kojima su izloženi različitim kemijskim, mehaničkim, fizičkim i biološkim procesima razaranja. Trajne građevine konačni su cilj projekatana i izvođača. O uspješnim primjerima takvih građevina svjedoče egipatske piramide, rimski koloseumi, džamije i srednjovjekovne katedrale. Zbog sve većeg zagađenja okoliša i sve većih zahtjeva koji se postavljaju za izgradnju građevina, u za to nepovoljnim uvjetima, trajnost je postala jedna od najvažnijih problema s kojima se suočavamo u graditeljstvu. Budući da trajnost ovisi o više parametara kao što su sastav i struktura materijala s jedne strane i utjecajima okoliša kojima je izložen s druge strane, nije ga moguće kvantificirati i kao takvog staviti u proračun. Osim sastava i strukture važni parametri koji utječu na trajnost materijala, u slučaju betona, su i svojstva poroznosti, apsorpcije, te propusnosti za fluide i plinove. Pod utjecajem procesa razaranja iz okoliša kojem je materijal ili građevni element ili pak čitava građevina izložena, dolazi do njihovog oštećenja te se više ne ponašaju kako je predviđeno projektom. Takva oštećenja mogu djelovati površinski ili biti raspoređena po čitavom volumenu, a možemo ih uočiti kroz: promjenu u boji, mrvljenje materijala, povećanje propusnosti, izluživanje materijala, bubrenje ili skupljanje, razmekšavanje i sl. Neki od procesa oštećenja praćeni su ovakvim pojavama koje su tipične i mogu se lako uočiti. Često do pojave ovako uočljivih oštećenja dolazi tek nakon što je proces degradacije jako uznapredovao, te je iz tog razloga važno pravovremeno i točno identificiranje mehanizma degradacije kako bismo sačuvali nosivost i uporabljivost materijala pa tako i konstrukcije.

Trajnost se ostvaruje pravilnim projektiranjem konstrukcije, odabirom materijala, izvođenjem i održavanjem. Zadovoljavajući navedene parametre koji utječu na ponašanje materijala izloženog utjecajima okoliša i ugrađenog u konstrukcijski element, a tako i čitave konstrukcije, možemo biti sigurni da će konstrukcija uz redovnu kontrolu i održavanje uz minimalne troškove zadovoljiti uvijete sigurnosti, uporabljivosti i nosivosti tijekom projektiranog joj životnog vijeka.

#### 2.1.4.1. Apsorpcija vode

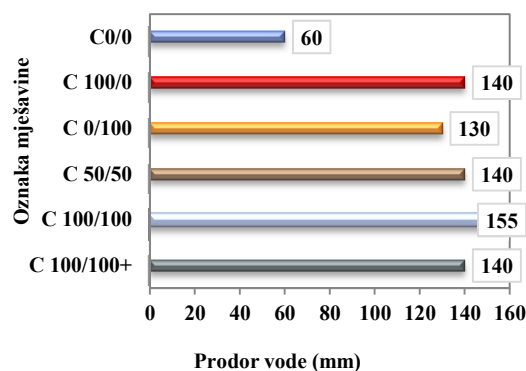
Jedan od glavnih čimbenika koji utječu na propadanje betona je prisutnost i kretanje vode u samom materijalu. Određivanje apsorpcije i transporta vode kapilarnim djelovanjem, čini važan dio procjene trajnosti betona. Voda je neophodna za pojavu korozije armature, kao i za protok klorida i sulfata kroz beton.

Kapilarno upijanje vode betona s recikliranom opekom veće je od kapilarnog upijanja vode običnog betona. Minimalna apsorpcija za beton s recikliranom opekom uočena je pri 75% i 25% zamjeni krupne i sitne frakcije reciklirane opeke, što je i prikazano na slici 2.13, [18]. Prisutnost vode u betonu može uzrokovati oštećenja u betonu pri izlaganju betona ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Površina betona je prva izložena djelovanju agresivnih tvari, stoga posebnu pozornost treba posvetiti ispitivanjima betona u površinskoj zoni. Budući da apsorpcija vode znatno raste s porastom udjela reciklirane opeke u ukupnom volumenu betonske mješavine, time smanjena trajnost betona s recikliranom opekom može biti značajan nedostatak za širu primjenu, kao vanjski elementi zgrade.



Slika 2. 13: Apsorpcija vode betona za različite mješavine betona s recikliranom opekom\*, [18]

\*Napomena: sastav mješavina betona i oznake dane u tablici 2.5.



Slika 2. 14: Vodopropusnost za različite mješavine betona\*, [18]

Iz slike 2.13 također je vidljivo da upotreba plastifikatora u sastavu betonskih mješavina ima pozitivan učinak na smanjenje apsorpcije vode betona s recikliranom opekom. Kako je prikazano na slici 2.14 vodopropusnost betona s recikliranom opekom je gotovo dvostruko veća u odnosu na obični beton, te se dodatkom plastifikatora vodopropusnost može smanjiti za oko 11%, [18].

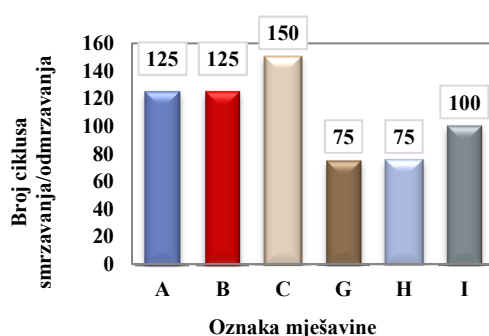
#### 2.1.4.2. Smrzavanje i odmrzavanje

Oštećenja materijala pri izloženosti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja nastaju uslijed širenja vode u porama ispunjenim vodom. Pri prelasku vode iz tekućeg stanja u kruto njezin volumen se povećava za približno 9%. Istovremeno se radi hlađenja okolni materijal skuplja te se u materijalu javljaju vlačna naprezanja, [32]. Ispitivanje otpornosti materijala na djelovanje niskih temperatura se provodi naizmjeničnim djelovanjem ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Beton s recikliranom opekom kao agregatom ima slabiju otpornost prema djelovanju smrzavanja i odmrzavanja od običnog betona. Kod betona s recikliranom opekom u kojem je korištena sitna frakcija od reciklirane opeke do oštećenja uslijed smrzavanja i odmrzavanja dolazi puno brže nego pri korištenju sitne frakcije od prirodnog agregata. Prema nekim istraživanjima nakon izlaganja betona s recikliranom opekom ciklusima smrzavanja i odmrzavanja (25 ciklusa) on u odnosu na obični beton upije dva puta više vode, [8]. Već nakon 35 ciklusa izlaganja smrzavanju i odmrzavanju betona s recikliranom opekom uočeno je značajno smanjenje fizikalno-mehaničkih svojstava, [30].

Tablica 2. 11: Smanjenje čvrstoće uzoraka izloženih smrzavanju, [30]

| Oznaka mješavine | A  | B  | C |
|------------------|----|----|---|
| Pad čvrstoće (%) | 25 | 20 | 5 |

\*Napomena: oznake mješavina dane u tablici 2.10.



Slika 2. 15: Broj ciklusa smrzavanja/odmrzavanja koje su izdržali uzorci betona s recikliranom opekom, [30]

Na slici 2.15 i u tablici 2.11 prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na smrzavanje betona s recikliranom opekom sa 0%, 4% i 8% dodatka polimera. Upravo zbog velike apsorpcije vode korištenje betona s recikliranom opekom preporuča se za unutarnje zidove, a ukoliko se koristi za izradu vanjskih zidova potrebno je osigurati dobru izolaciju.

#### 2.1.4.3. Otpornost na habanje

Habanje kao jedan od načina mehaničkog trošenja betona vrlo je važno pri procjeni trajnosti betona. Ova je pojava posebice izražena na prometnim površinama, pješačkim stazama i aerodromskim pistama, te pri projektiranju takvih konstrukcija posebnu pažnju treba posvetiti upravo ovoj pojavi. Prema nekim istraživanjima beton s recikliranom opekom pokazuje dobru otpornost na habanje, čak i bolju od betona s vapnenim agregatom, [33, 34]. To se može objasniti boljom prionjivosti cementne paste i reciklirane opeke, uzrokovane njezinom većom poroznosti u usporedbi s vapnenim agregatom, [33]. Budući da se upotreba vapnenca ne preporuča u uvjetima u kojima je bitna otpornost na habanje iz navedenih rezultata ispitivanja nije moguće donijeti konačan zaključak o otpornosti na habanje betona s recikliranom opekom. Ipak, može se zaključiti da se reciklirana opeka ne preporuča u sastavu betona koji mora biti otporan na habanje.

#### 2.1.4.4. Toplinska provodljivost

Termička svojstva betona mogu se iskazati preko toplinske provodljivosti. Beton s recikliranom opekom ima manji koeficijent toplinske provodljivosti od betona s prirodnim agregatom. Provedena su istraživanja, [12], pokazala da koeficijent toplinske provodljivosti betona s recikliranom opekom iznosi od 0,5 W/mK do 0,75 W/mK, a za beton s prirodnim agregatom iznosi oko 1,75 W/mK. Rezultati ispitivanja koeficijenta toplinske provodljivosti prikazani su u tablici 2.12, [30].

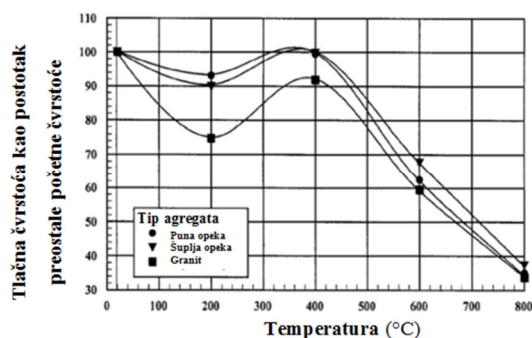
Tablica 2. 12: Vrijednosti laboratorijskog i računskog koeficijenta toplinske provodljivosti betona od drobljene opeke sa i bez dodatka polimera, [30]

| Oznaka mješavine<br>(tablica 2.10) | Volumna gustoća (kg/m <sup>3</sup> ) | $\lambda_L$<br>(W/mK) | $\lambda_R$<br>(W/mK) |
|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| A                                  | 1792                                 | 0,556                 | 0,778                 |
| C                                  | 1798                                 | 0,544                 | 0,762                 |
| H                                  | 1981                                 | 0,652                 | 0,913                 |

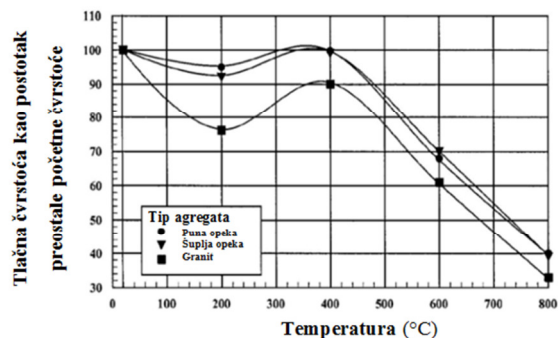
Iz istraživanja termičke provodljivosti betona s recikliranom opekom, [12, 35], može se uočiti da udio cementa i polimera u betonu ima značajan utjecaj na njegovu toplinsku provodljivost. Primjerice, s manjim udjelom cementa ili s većim udjelom polimera u ukupnom volumenu betona dolazi do smanjenja toplinskog koeficijenta provodljivosti betona s recikliranom opekom. Mali toplinski koeficijent provodljivosti betona s recikliranom opekom pruža mogućnost takvom betonu da bude upotrijebljen u situacijama gdje su potrebna dobra izolacijska svojstva betona. Daljnja istraživanja na području upotrebe reciklirane opeke kao agregata trebalo bi usmjeriti upravo u pravcu određivanja termičkih svojstava betona. Time bi osim održivog zbrinjavanja građevinskog otpada osigurali i uštedu energije dobrim izolacijskim svojstvima materijala.

#### 2.1.4.5. Otpornost na požar

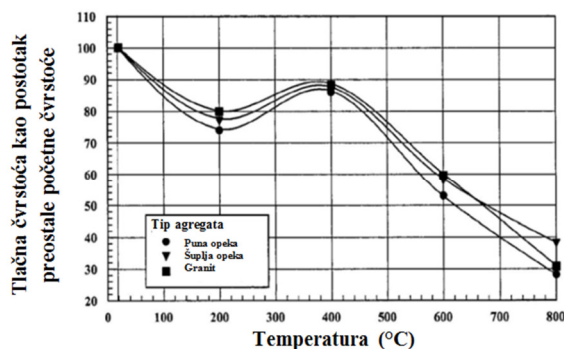
Betonski elementi ne proizvode dim niti emitiraju bilo kakve štetne plinove u okolinu tijekom požara, a osim toga sprječavaju zagrijavanje susjednih soba i prostorija. Beton, zajedno sa svojim komponentama, prema normi HRN EN 13501-1, spada u najviši razred otpornosti prema djelovanju požara – A1, [36]. Čelik ima slabiju otpornost na požar te se beton često koristi za njegovu zaštitu. Pri tipičnom požaru, temperature dosežu oko 500°C unutar 10 minuta, i 950°C za 1 sat pa beton mora imati dovoljnu otpornost kako bi podnio nagli porast temperature kao i najveću temperaturu kojoj je izložen, [11]. Brz porast temperature tijekom požara uzrokuje porast tlaka energije u porama betona i može uzrokovati eksplozivno ljuštenje betonske površine. Do te pojave dolazi najčešće tijekom prvih 30 minuta izlaganja visokoj temperaturi. Beton nastavlja s degradacijom formacijom kontinuiranih pukotina. Tijekom požara pri uobičajenim temperaturama od oko 900°C samo vanjski slojevi betonskih elemenata postaju drastično vrući dok unutarnji slojevi ostaju hladniji i tako štite armaturu.



Slika 2. 16: Redukcija tlačne čvrstoće betona normalne početne čvrstoće pri izlaganju visokim temperaturama, [37]



Slika 2. 17: Redukcija tlačne čvrstoće betona visoke početne čvrstoće pri izlaganju visokim temperaturama, [37]



Slika 2. 18: Redukcija tlačne čvrstoće betona s dodatkom aeranta pri izlaganju visokim temperaturama, [37]

Reciklirana drobljena opeka pokazala se kao agregat za beton s dobrim svojstvima u uvjetima izloženosti požaru. U takvim uvjetima izloženosti, beton s recikliranom opekam pokazao je znatno bolje reakcije na visoke temperature od betona s prirodnim riječnim ili drobljenim agregatom (granit, dolomit), slike 2.16, 2.17, 2.18, [37-40]. Agregat nastao drobljenjem opeke termički je stabilan te je moguće da je upravo to

svojstvo razlog dobrog ponašanja kao agregata u betonu izloženom visokim temperaturama. Mali koeficijent toplinske provodljivosti betona s recikliranom opekom također ukazuje na njegovu vatrootpornost. Zbog manjeg koeficijenta toplinske provodljivosti, armirani beton je puno bolje zaštićen od ranog zagrijavanja pri upotrebi betona s recikliranom opekom nego pri upotrebi betona s prirodnim agregatom.

## **2.2. Stropne konstrukcije**

Stropne konstrukcije preuzimaju opterećenja svih elemenata i sadržaja građevine, izuzev vertikalne konstrukcije, te ih dalje predaju vertikalnoj konstrukciji, [41, 42]. Prema načinu izvedbe stropne konstrukcije mogu biti u cijelosti izvedene na gradilištu, polumontažne i montažne izvedbe. Stropovi koji se u cijelosti izvode na gradilištu obično su armiranobetonske ploče koje nose u jednom ili u dva smjera, [41]. Suvremeni uvjeti građenja traže što jednostavnije i brže tehnološke postupke uz optimalno zadovoljenje svih zahtjeva građevina u smislu funkcionalnosti i stabilnosti, [42]. Za izvedbu manjih stambenih građevina, obiteljskih kuća i manjih višestambenih zgrada, razvili su se različiti polumontažni stropni sustavi. Jednostavni su za izvedbu, zahtijevaju malo dodatne opreme (oplata, skela) i nije potrebna specijalizirana radna snaga. Uvjeti fizike zgrade; toplinska i zvučna izolacija te uvjeti vibracija, zadovoljeni su odabirom odgovarajućih gradiva i prikladnim oblikovanjem konstrukcije.

Prema tipu osnovnih elemenata konstrukcije i gradiva, stropne konstrukcije mogu biti:

- ploče,
- mješovite,
- rebričaste,
- štapni elementi sa sekundarnom ispunom.

Ploče imaju homogenu strukturu koju čini beton kao osnovno gradivo prožet šipkama armature. Mješovite strukture čine ploče i grede u kombinaciji, kad su obje skupine različite u svojoj funkciji i krutosti. Kod ovih konstrukcija, obje se skupine elemenata zajednički izrađuju. Grede čine elastično popustljivi ležaj za ploče, a ploče su dio T-presjeka greda. Rebričaste stropne konstrukcije se sastoje od linijskih štapnih elemenata i tankih pločastih elemenata. Štapne strukture sa sekundarnom ispunom imaju ispunu kao sekundarnu strukturu.

Masivni su stropovi konstruktivni elementi zgrada koji zatvaraju prostore na njihovim gornjim stranama jednako kako ih zidovi zatvaraju na bočnim stranama, [43]. S obzirom na materijal od kojega je strop izrađen postoji nekoliko osnovnih vrsta stropova:

- armiranobetonski stropovi
- stropovi s gredama od armirane šuplje opeke
- stropovi s čeličnim nositeljima
- drveni stropovi.

Kao što je navedeno u hipotezama istraživanja, pretpostavlja se da je moguće izraditi predgotovljeni stropni sustav sastavljen od betonskih nosača i blokova kao rezultat definiranja primjene betona s



opekarskim lomom kao agregatom. Takvi stropni sustavi se mogu smatrati vrstom armiranobetonskih stropova, te su stoga u sljedećem potpoglavlju armiranobetonski stropovi detaljnije opisani.

Nadalje, zamjena prirodnog agregata opekarskim lomom utječe na svojstva predgotovljenih stropnih sustava sastavljenih od betonskih nosača i blokova s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom. Pretpostavka je da će time stropni sustavi imati neka od svojstava stropova s gredama od armirane šuplje opeke. Stoga su i ti stropovi detaljnije opisani, i to u potpoglavlju 2.2.2.

U potpoglavlju 2.2.3. opisana je dosadašnja upotreba recikliranog agregata u proizvodnji predgotovljenih betonskih elemenata.

### **2.2.1. Armiranobetonski stropovi**

Primjena armiranobetonskih stropova započela je nakon prvog svjetskog rata 1918. godine, [43]. Način izvedbe neprestano se usavršavao te su se iznalazili različiti sustavi za pojedine primjene. Armiranobetonski stropovi su gotovo u potpunosti istisnuli i drvene i sve tradicionalne masivne stropove (svodove), a na prvom su mjestu po masovnosti primjene na gotovo svim vrstama zgrada.

Armiranobetonski stropovi su horizontalne konstrukcije pa bez posebnih dodataka omogućuju izvedbu ravnih podova i stropova. Oni su razmjerno niske konstrukcije, a to im je i u praktičnom i u ekonomskom smislu velika prednost, koja se osobito očituje na višekatnim zgradama. Armiranobetonski stropovi bolje od drugih vrsta stropova povezuju vertikalne konstruktivne elemente zgrada, pa u svim etažama ukružuju zgrade u horizontalnom smjeru. Nisu zapaljivi, a otporni su i na visoke temperature. Uz spomenute prednosti treba spomenuti i glavne nedostatke betonskih stropova. To su: velika težina, opsežna izrada skela i oplata za pojedine vrste stropova, te loša toplinska i zvučna izolacija betonskih elemenata. Težinu je moguće smanjiti malim dimenzijama presjeka ili upotrebom lakih agregata za beton, skele i oplata opadaju upotrebom predgotovljenih stropnih elemenata, a toplinska i zvučna izolacija popravljaju se upotrebom dodatnih materijala ili poboljšanjem svojstava betona u pogledu toplinskih i zvučnih svojstava.

Glavne vrste armiranobetonskih stropova razlikuju se uglavnom po načinu izrade stropova i po njihovom statičkom djelovanju, odnosno statičkom proračunavanju. Prema načinu izrade razlikuju se monolitni, polumontažni i montažni stropovi. Prema statičkoj funkciji razlikuju se stropovi poput ravnih ploča, ploča s rebrima, sa sitnim rebrima između kojih su ili prazni zračni prostori ili neki konstruktivni i izolacijski ulošci.

Monolitne armiranobetonske konstrukcije susreću se kod građevina koje je teško raščlaniti na više dijelova i kod kojih nemaju standardne elemente, primjerice silosi, tornjevi, tvornički dimnjaci i prostorne tanke konstrukcije (ljuske i složence), [44].

Nedostatak monolitnih konstrukcija je veliki utrošak snage i drvene građe za skelu i oplatu. Danas je to ublaženo industrijalizacijom oplata, armature i izvođenja betonskih radova. Tako su u upotrebi: pokretne, klizne i prijenosne oplata, zavarene mreže i zavareni koševi armature, moderna tehnologija proizvodnje betona u centralnim tvornicama betona, prijevoz auto-miješalicama, transport na gradilišnim kranovima, liftovima i betonskim crpkama, ugradba vibratorima i dr.

Prilikom proračuna predgotovljenih stropnih armiranobetonskih elemenata potrebno je provesti proračun nosivosti i uporabljivosti predgotovljenog betonskog elementa pri odizanju iz kalupa. Položaji točaka za podizanje nosača trebaju biti točno određeni zbog ograničenja vlačnih naprezanja nastalih zbog djelovanja vlastite težine nosača pomnožene s dinamičkim koeficijentom.

Montažne armiranobetonske konstrukcije znatno su pogodnije za industrijalizaciju nego monolitne. Izvođenje građevine pretvara se u njezino montiranje od predgotovljenih elemenata. Rad je moguć zimi, a objekti se završavaju u kraćem roku, što je velika prednost montažnog građenja. Postiže se ušteda u materijalu i u radnoj snazi. Montažnim armiranobetonskim elementima izvode se mnoge zgrade i objekti, i u industrijskoj i u stambenoj izgradnji.

Montažni elementi su:

- ploče (pune, šuplje i rebraste),
- grede (I-presjeci, T-presjeci, grede kranskih staza, rešetkaste grede krovnih konstrukcija),
- stupovi (I-presjeka, rešetkasti, šuplji).

Mase pojedinih elemenata dosežu stotine tona. Zbog toga projektanti nastoje smanjiti visinu elementa, što može izazvati smanjenje krutosti i povećati progib. U slučajevima kada je potrebno premostiti velike raspone preporuča se upotreba prednapetog betona, gdje se uz manju visinu može premostiti veliki raspon.

U projektiranju montažnih armiranobetonskih konstrukcija bitna su dva čimbenika i to način izrade elemenata i način montaže elemenata. U tvorničkoj izradi montažnih elemenata treba težiti što bržem skidanju oplata za proizvodnju, a to se postiže malim vodo-cementnim faktorom, dodatcima za ubrzano očvršćavanje betona i zagrijavanjem bez tlaka i pod tlakom. Također treba nastojati da bude što manji broj različitih elemenata. Za izradu montažnih elemenata treba upotrijebiti što kvalitetniji beton radi smanjivanja težine. Ne preporučuju se betoni razreda ispod C16/20. Beton za zalijevanje spojeva mora imati kakvoću barem jednaku onoj betona ugrađenoga u elemente koji se spajaju. Statički proračun osim standardnog proračuna mora sadržavati i dodatne kontrole svojstvene tim konstrukcijama, kao što je:

- provjera nosivosti konstrukcijskih spojeva elemenata, koji mogu biti kruti (kontinuirani) ili zglobovi,
- provjera nosivosti konstrukcije u cjelini i po elementima kad se uzmu u obzir netočnosti izvedbe pojedinih elemenata i montaže,
- provjera nosivosti konstrukcije prema adaptiranom stanju naprezanja izazvanoga skupljanjem i puzanjem betona različite starosti.

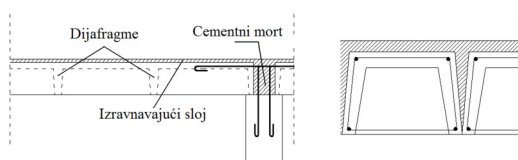
Veza između elemenata (spojnice) moraju biti ispitane s obzirom na nosivost i deformabilnost, pri čemu se vrlo često koristi eksperimentima. Spojnice se projektiraju tako da mogu prihvatiti aksijalne sile tlaka, momente savijanja i poprečne sile. Djelovanje tih sila može biti pojedinačno ili simultano, na što treba pripaziti prilikom odabira i proračuna spojnica. Veze izložene tlaku ostvaruju se preko:

- suhe spojnice kad je izvedba precizna, a naponi umjereni,
- spojnice s materijalom između elemenata za raspodjelu opterećenja (elastomeri za ravne površine, cementni mort, beton),
- spojnice s metalnim okovima.

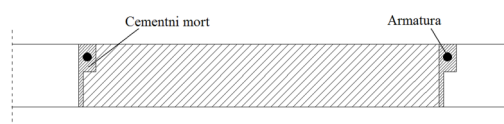
Kad se upotrebljava cementni mort ili beton kao materijal za vezu, potrebno je osigurati mirovanje konstrukcije dok spojno sredstvo postigne potrebnu čvrstoću. Da bi se smanjio utjecaj skupljanja cementnog morta, odnosno betona koji se ugrađuje naknadno, te zbog lakše ugradbe, predlaže se upotreba betona krute konzistencije s naknadnim injektiranjem. Veze izložene savijanju i vlaku ostvaruju se zavarivanjem ili preklapanjem armature, metalnim sredstvima i prednapinjanjem. Veze izložene posmiku ostvaruju se trenjem (velika normalna sila), zupcima, poprečnom armaturom, moždanicima, trnovima i sličnim metalnim sredstvima.

Montažno-monolitne konstrukcije povoljna su kombinacija montažnih armiranobetonskih elemenata i monolitnog betona na mjestu izvedbe radova. Česte su montažno-monolitne konstrukcije s montažnim prednapetim elementima, pri čemu montažni elementi zamjenjuju skelu potrebnu za monolitni dio konstrukcije. Zajednički rad susjednih elemenata osigurava se betonskim zupcima, armaturom i cementnim mortom ili betonom u spojnici i metalnim sredstvima, [44].

Strop u obliku korita ojačan dijafragmama upotrebljava se najčešće za prekrivanje industrijskih hala, slika 2.19. Prostor između elemenata i nad ležajem armira se i zalije mortom. Spone se stavljaju u dijafragme.



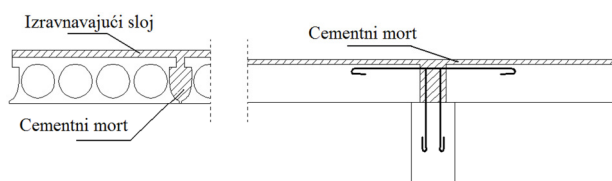
Slika 2. 19: Strop u obliku obrnutog korita ojačan dijafragmama



Slika 2. 20: Međusobno povezivanje susjednih ploča

Krovne i međuetazne ploče od durisola i siporeksa armirane su za opterećenje od  $1,25 \text{ kN/m}^2$  do  $4,00 \text{ kN/m}^2$ , slika 2.20. U uzdužnom smjeru ploče se međusobno spajaju zalijevanjem žlijeba dimenzije  $2/4 \text{ cm}$  cementnim mortom u koji se umeće armatura za usidrenje ploče na ležaju u nosač ili zid.

Strop od šupljih prednapetih ploča, slika 2.21, ima široku primjenu. Šupljine su okrugle ili ovalne. Visina ploče u pravilu može biti 10, 15 i 20 cm. Ova vrsta stropova radi se do 10 m raspona. Oslanjanje ploča na podvlaku prikazano je na slici 2.21. U gredama se ostavljaju sidra za koja se vežu šipke armature iz oba smjera, a spoj se zalije mortom. Svi prikazani, a i drugi montažni stropovi koji nisu ovdje opisani moraju biti okruženi serklažom izvedenim na objektu koji može prihvatiti silu od 30 kN. Armaturu smještenu u spojnici treba povezati s armaturom greda i serklaža. Tako izvedeni montažni stropovi služe i kao kruti horizontalni nosači za prijenos horizontalnih sila na vertikalna ukrućenja.



Slika 2. 21: Strop u obliku obrnutog korita ojačan dijafragmama

Armirano betonski monolitni stropovi izrađuju se na mjestu gdje će trajno ostati. Izvan tog mjesta pripravlja se skela i oplata, te složi i poveže armatura, onda se priređuje betonska mješavina, transportira i na licu mjesta ugrađuje. Monolitni se stropovi izrađuju kao razne vrste ravnih ploča, konzolne ploče, ploče s gredama te nekoliko vrsta rebrastih stropova bez uložaka ili s ulošcima između rebara. Svaka spomenuta vrsta stropova može se raditi samo prema izrađenom i odobrenom statičkom proračunu, nacrtima savijanja armature i nacrtima oplata, a u svemu po važećim tehničkim propisima. Za gotovo sve vrste monolitnih stropova potrebne su čvrste skele i oplata. Njihova izrada na licu mjesta zahtjeva povoljne vremenske uvjete i vremenske rokove za uklanjanje skela i oplata. Sve to usporava dovršenje građevine i poskupljuje građenje.

Polumontažni sustavi stropnih konstrukcija sastoje se od: gredica, blokova ispune, poprečnih rebara, monolitne ploče i tipskih elemenata, [45]. Osnovne karakteristike polumontažnih stropnih konstrukcija su:

- izražena nosivost samo u uzdužnom smjeru (u smjeru gredica),
- ostala mehanička svojstva u poprečnom smjeru se postižu:
  - izvedbom tlačne ploče,
  - progušćenjem poprečnih rebara,
- brža izvedba.

Primjena polumontažnih stropnih konstrukcija:

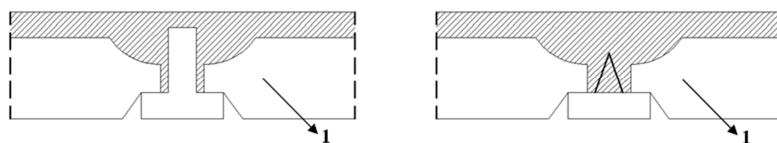
- međukatne i krovne ravne ploče,
- kose krovne ploče,
- nadstrešnice,
- industrijski objekti.

Polumontažni stropovi su jeftiniji i brže se izrađuju od monolitnih stropova. Grede ili rebra za polumontažne stropove izrađuju se unaprijed u tvornici ili pogonu neovisno o vremenskim prilikama, a kad ustreba, transportiraju se na gradilište i na licu mjesta montiraju. Posebno se predgotove šuplji betonski blokovi od normalnog ili lakog betona koji se stavljaju kao ulošci između svaka dva susjedna nosača. Blokovi se najčešće oblikuju s otupljenim gornjim uzdužnim bridovima, pa se betoniranjem ploče površ blokova i nosača dobivaju pojačanja betonske površine u tlačnoj zoni stropa.

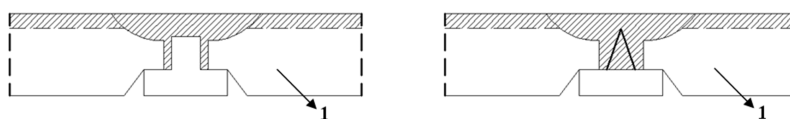
Stropovi s ispunama proizvode se po raznim sustavima, koji ovise o proizvodnim mogućnostima tvornica. Ispune mogu biti šuplja tijela koja pak mogu biti betonska ili opekarska, a mogu biti i puni blokovi od laganog, plino ili pjeno betona, npr. siporexa ili ytonga. Stropovi s ispunama se proračunavaju ne uzimajući u obzir utjecaj tijela ispune. Izuzetak su neki sustavi gdje je eksperimentalno dokazano sudjelovanje ispune u nosivosti. Ovi stropovi se, u pravilu, izvode s krutom armiranobetonskom pločom, kojoj je zadatak preuzimanje tlačnog naprezanja i povezivanje nosivih nosača u jednu cjelinu. Ako se izvode bez ploče, tada se moraju izvesti gušći poprečni nosači za ukrotu koja će povezati montažne nosače, omogućiti raspodjelu opterećenja na više nosača kada djeluje koncentrirano ili nesimetrično opterećenje i općenito pridonijeti većoj krutosti stropa.

Prema normi HRN EN 15037-1:2008 stropni sustavi sastavljeni od blokova i nosača mogu biti polumontažni sastavljeni od nosača i blokova ispune s in-situ ugrađenim gornjim slojem betona, s

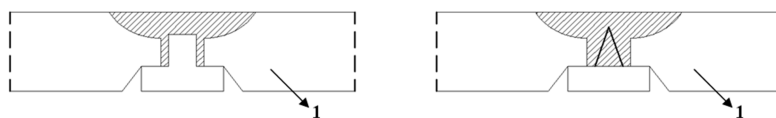
kompozitnim gornjim slojem betona, s djelomičnom ugradnjom gornjeg sloja betona i montažni sastavljeni od nosača i blokova ispune. Vrste stropnih sustava sastavljeni od nosača i blokova ispune prema normi HRN EN 15037-1:2008 prikazani su na slikama 2.22 do 2.25.



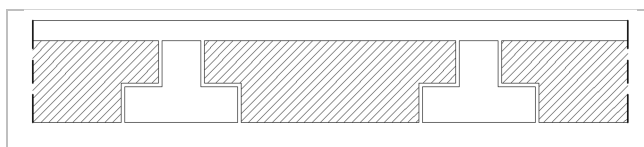
Slika 2. 22: Stropni sustavi s in-situ ugrađenim gornjim betonskim slojem i s nenosivim ili polunosivim blokovima ispune (1), [46]



Slika 2. 23: Stropni sustavi s kompozitnim gornjim slojem betona i s nosivim blokovima s injektiranim slojem betona (1), [46]

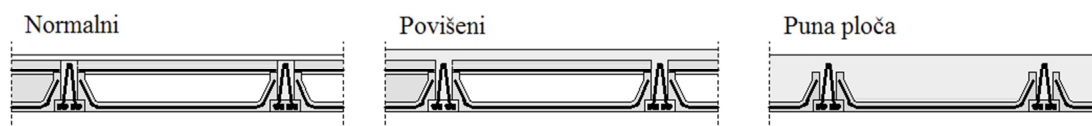


Slika 2. 24: Stropni sustavi s djelomičnom ugradnjom gornjeg sloja betona između nosača i blokova ispune (1), [46]



Slika 2. 25: Montažni stropni sustavi sastavljeni od nosača i blokova, [46]

Jedan od primjera polumontažnih stropova je i sivi strop prikazan na slici 2.26. Sivi strop je armiranobetonska ploča debljine 15 cm sa šupljinama, roštiljnog tipa nosivosti. Izvođenje započinje postavljanjem nosača (na razmaku 68 ili 20 cm) i jednim redom blokova na svakom kraju. Nosači su nadvišeni, a po potrebi se mogu dodatno nadvisiti podupiranjem, koje se izvodi na rasponima većim od 3.0 m. Potom se postavlja jedna po jedna kadica (donji dio bloka) te na nju poklopnica (gornji dio bloka). Poprečni nosači se izvode na razmaku cjelobrojnih blokova 4-6, širina bloka 25 cm. Oplatu s donje strane čine mu ležajnice, a bočno dvije bočnice. Poprečno rebro se armira sa 2Ø8 ili 2Ø10 RA na licu mjesta, po jedna šipka u gornju i donju zonu. Nakon postavljanja vijenaca, pristupa se monolitizaciji sitnozrnim betonom u gredice i poprečna rebra. Spojevi blokova (i po želji površina bloka) preliju se cementnim mlijekom uz dodatak kamene prašine. Dovoljno je zaravnavanje metlom. Dimenzioniranje sivog stropa je praktički isto kao i fert tj. bijelog stropa.

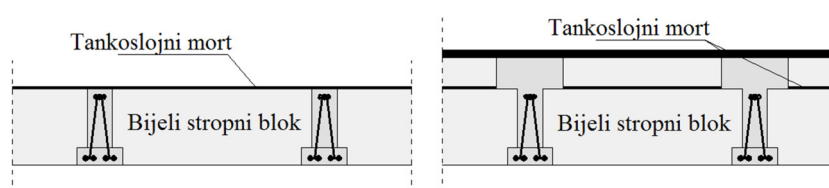


Slika 2. 26: Sivi strop – osnovni tipovi

Bijeli strop služi za gradnju međukatnih konstrukcija, ravnih i kosih krovnih ploča, stubišta, nadstrešnice te sličnih konstrukcija. Osnovne prednosti bijelog stropa jesu:

- dobra nosivost,
- mala težina konstrukcije:  $150 \text{ kg/m}^2$
- konstrukciju nije potrebno podupirati (kod raspona većih od 3 m podupire se samo sredina raspona),
- mogućnost izrade površina različitih oblika,
- gredice se proizvode po mjeri prilagođenoj konkretnom projektu,
- gredice se mogu ugrađivati već nakon 24 sata od trenutka betoniranja,
- lagana, a nosiva konstrukcija jednostavna za ugradnju,
- odlična toplinska izolacija, otpornost na požar,
- vrijeme ugradnje smanjeno na minimum.

Bijeli strop se sastoji od gredice, ležajnica, stropnog bloka, poprečnih rebara i tankoslojnog morta, slika 2.27, [47]. Izvodi se u debljini od 15 cm, a rasponi na koje se mogu postaviti gredice sežu do 6,5 m na stropu i do 7,00 m na kosim krovovima. Stropni blok izrađen je od lakoga porastoga betona obujamske mase od  $550 \text{ kg/m}^3$ , tlačne čvrstoće  $4 \text{ N/mm}^2$ . Gredice su tako proizvedene da se strop gradi bez ikakve oplata, bez ili s malim podupiranjem. Nakon postavljanja gređica, ležajnica ispune i armature poprečnih rebara, mikrobetonom (frakcija agregata 0-4mm) se popunjavaju uzdužna i poprečna rebra (približno  $12 \text{ l/m}^2$  stropa). Potom se cijela površina stropa zalije rijetkim tankoslojnim mortom kako bi se ispunile sljubnice među blokovima.



Slika 2. 27: Poprečni presjek bijelog stropa, [47]

Strop je djelomično nosiv odmah nakon završetka monolitizacije (oko  $0,5 \text{ kN/m}^2$  korisnog tereta), poslije 24 sata nosivost je 70 posto konačne, a ukupna se nosivost ostvaruje nakon sedam dana. Ako se upotrebljava podupiranje, u nedostatku samonosivih gređica, podupire se samo u sredini raspona. Potpore se mogu ukloniti 24 sata nakon monolitizacije stropa.

Montažni se stropovi razlikuju od polumontažnih uglavnom time što im se svi nosivi elementi predgotove, pa je građenje brže, jeftinije i manje ovisno o vremenskim uvjetima.

Jedna od vrsta montažnih stropova posve slična polumontažnim rebrastim stropovima, ali su im predgotovljena ne samo rebra, već i ploče. Druga se vrsta pak sastoji od samih rebara ili greda, koje se slažu jedna do druge, pa tako natkrivaju prostor svojim širinama bez ploča, ili uz dodatka ploča samo na gornjoj ili donjoj strani. Treća su vrsta stropovi od montažnih ploča koje bez greda preuzimaju terete i pokrivaju prostore. Četvrta su vrsta pokrovi od krovnih ploča, koje se na nekim zgradama stavljaju iznad prostorija najviše etaže.

Predgotovljeni betonski stropovi nude ekonomično i višestruko rješenje za stropove u bilo kojem tipu konstrukcije. Na svjetskom tržištu gotovo polovicu stropova upotrijebljenih u komercijalnim i privatnim zgradama čine predgotovljeni betonskih stropovi, [48]. Oni nude projektne i cjenovne prednosti u odnosu na tradicionalne metode kao što su betonski in-situ stropovi, čelično-betonski kompoziti i drveni stropovi. Trenutno postoji veliki raspon različitih tipova predgotovljenih elemenata za betonske stropove koji daju najekonomičnije rješenje za različita opterećenja i raspone. Predgotovljeni stropovi osiguravaju odlična konstrukcijska svojstva uz minimalne težine, a mogu biti upotrijebljeni sa ili bez konstruktivnog i ne konstruktivnog završnog sloja. Predgotovljeni betonski stropovi imaju višestruku prednost:

- proizvodnja stropnih elemenata je jednostavna i ekonomična,
- proizvedeni predgotovljeni elementi u kontroliranim uvjetima proizvodnje mogu zadovoljiti kriterije visoke čvrstoće i trajnosti,
- brza i sigurna montaža stropnih elemenata velikih raspona u konstrukciju,
- ugradnja armature i svježeg betona in situ svodi se na minimum.

Navedene prednosti mogu biti ovisne o pristupu lokaciji na kojoj se građevina gradi, projektним zahtjevima za konstrukciju, raspoloživosti laboratorija, zahtjeva za uslugom itd., te je sve te faktore potrebno uzeti u obzir pri odabiru vrste konstrukcije koja će biti izgrađena s predgotovljenim stropnim elementima konstrukcije.

### **2.2.2. Stropovi s gredama od armirane šuplje opeke**

Stropovi s gredama od armirane šuplje opeke mogu se svrstati u specijalnu vrstu polumontažnih stropova. Glavni su im nosivi elementi grede složene od komada tankostjene šuplje opeke, odnosno od opekarskih blokova s horizontalnim šupljinama. Glavna se armatura stavlja u utore na donjim stranama greda. Grede su na donjoj strani šire, a na gornjoj strani uže, pa kad se slože jedna uz drugu ostaju među njima kanali koji se ispunjavaju betonskom mješavinom i dodatnom armaturom. Tako između greda od opeke nastaju i rebra od armiranog betona. Gornja površina cijelog stropa prekriva se tankim slojem betona, koji kao ploča pojačava tlačnu zonu greda i rebara, pa svi ti sastavni dijelovi skupa čine čvrstu stropnu konstrukciju osobito pogodnu za stambene, uredske i slične zgrade, te druge zgrade s manjim rasponima i opterećenjima.

Najpoznatiji i najčešći u primjeni su stropovi sustava fert. Po statičkom sustavu najčešće se koriste fert-stropovi koji djeluju kao proste grede. Za veće raspone treba koristiti statički kontinuitet stropa iznad

ležajeva. U tom slučaju, na ležajevima treba odrediti potrebnu armaturu u gornjoj zoni, provjeriti tlačne napone u donjoj zoni gredica, te po potrebi djelomično izvaditi blokove ispune za poboljšanje strukture tlačne zone betona.

U projektnoj obradi stropnih fert-stropova treba izvršiti propisane proračune:

- računsku provjeru graničnih stanja nosivosti. U toj računskoj provjeri, projektanti za veće raspone zanemaruju ispitivanje glavnih vlačnih napona (posmika).
- računsku provjeru graničnih stanja uporabljivosti, što se svodi na kontrolu progiba. Pokazuje se da je kod stropova većih raspona teško zadovoljiti kriterije graničnog stanja uporabljivosti.

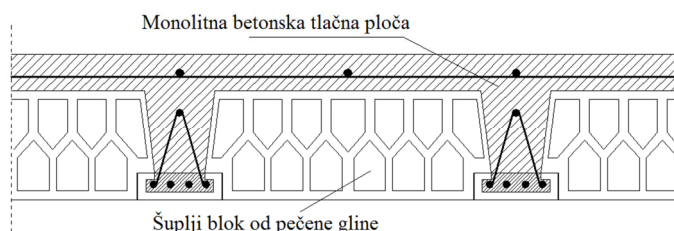
Probleme progiba stropa moguće je razriješiti na jedan od sljedećih načina:

- nadvišenjem stropa u fazi izvedbe,
- povećanjem visine stropa,
- povećanjem količine armature,
- ostvarivanjem djelomične ili pune upetosti (kontinuiteta) na ležajima,
- smanjenjem koeficijenta puzanja, kasnijim otpuštanjem skele.

Izbor fert-gredica prema dijagramima nosivosti proizvođača je nepouzdan, jer su dijagrami izrađeni samo prema kriteriju nosivosti, a zanemaren je kriterij progiba. Dijagrami nosivosti vrijede samo za kraće raspone. Opterećenja fert-stropova treba uzeti prema stvarnoj strukturi stropa u cjelini, sadržajima građevine te prema propisima.

Montažni sustav fert stropa ima također obilježje dobrog zvučnog i toplinskog izolatora. Sastoji se od nosivih gredica i ispune od šuplje opeke, slika 2.28. Opečni uložak s armaturom i betonom unutar opekarskog elementa čine montažni dio nosivih gredica. Primjena fert stropa može biti za:

- međukatne i krovne ravne ploče
- kose krovne ploče
- nadstrešnice
- industrijske objekte.



Slika 2. 28: Poprečni presjek fert stropa

Gredice treba podupirati na razmaku do 1,5 m posredno preko podvlake. Podupore trebaju nalijegati na čvrstu i nepopustljivu podlogu, te biti horizontalno ukrućene. Ako se gredica izravno oslanja na zid, dužina nalijeganja opekarskog uložka treba iznositi najmanje 5,0 cm. U tom slučaju zid/gredu treba prethodno



izravnati. Ako se gredica izravno ne oslanja na zid ili gredu, potrebno je i na krajevima izvesti podupore. U svakom slučaju, armatura na ležaju treba biti usidrena u dužini od najmanje 15 cm.

Izvedba monolitnog dijela stropa može započeti nakon što stručna osoba utvrdi da su podupore ispravno izvedene. Za izradu monolitnog dijela obično se koristi beton C25/30, koji treba biti ispravno ugrađen, nabijen i njegovan. Prije ugradnje betona postaviti svu potrebnu armaturu (zavarena armaturna mreža okomito na grede, armatura rebra za ukrutu, te armatura konzolnih ploča i serklaža), koja treba biti nepomična za vrijeme betoniranja. Okomito na pravac pružanja gredica, 1 cm ispod vrha stropa, treba postaviti zavarene armaturne mreže R-139 po čitavoj površini stropa. Rebro za ukrutu armirati sa po 2Ø8 u gornjoj i donjoj zoni (vilice Ø6/50 cm). Prije betoniranja podlogu treba očistiti i dobro zasititi vodom. Otpuštanje podupora gredica u uobičajenim uvjetima nakon 7 do 10 dana, odnosno kad monolitni beton postigne najmanje 70% računске čvrstoće.

### **2.2.3. Upotreba recikliranog agregata u proizvodnji predgotovljenih betonskih elemenata**

Pretpostavka je da su prednosti predgotovljenih stropnih sustava sastavljenih od betonskih nosača i blokova s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom u usporedbi s armiranobetonskim stropovima i stropovima sastavljenih od nosača armirane šuplje glinene opeke i glinenih blokova sljedeće:

- manja gustoća, bolja termička svojstva i veća požarna otpornost od armiranobetonskih stropnih sustava,
- manja cijena od lako agregatnih blokova koji se trenutno proizvode,
- smanjenje upotrebe prirodnih sirovina za proizvodnju nosača i blokova (glina i prirodni agregati),
- odlaganje otpadnog materijala nastalog pri proizvodnji glinenih blokova, opeke i crijepa osigurano na ekološki i ekonomski najprihvatljiviji način.

Upotreba recikliranih materijala kao agregata za proizvodnju predgotovljenih betonskih elemenata još uvijek je nedovoljno istraženo područje. Jedan od ranijih pokušaja primjene recikliranog agregata u predgotovljenim betonskim proizvodima je upotreba recikliranog agregata za proizvodnju predgotovljenih betonskih blokova i greda za stropne konstrukcije, [49]. Blokovi su bili dimenzija 400 mm x 215 mm x 100 mm. Reciklirani agregat je upotrijebljen za 25% do 75% zamjenu prirodnog sitnog i krupnog agregata s recikliranim agregatom. Blokovi s recikliranim agregatom spravljeni su sa 75% zamjenom prirodnog agregata s recikliranim agregatom pri čemu je postignuta tlačna čvrstoća bloka od 6,75 MPa.

Visoki postotak zamjene prirodnog agregata s recikliranim ima nepovoljan utjecaj na mehanička svojstva bloka, ali se ciljana čvrstoća može postići upotrebom manjeg postotka zamjene prirodnog agregata s recikliranim uz zadržavanje ekonomski prihvatljivog udjela cementa. Kako bi se osigurala upotreba recikliranog agregata za proizvodnju ekološki prihvatljivih betonskih blokova dobre kvalitete, preporuča se 100%-tna zamjena prirodnog agregata s recikliranim agregatom te omjer agregata i cementa jednak 4 ili niži, [50].

### **2.3. Predgotovljeni betonski proizvodi: stropni sustavi sastavljeni od nosača i blokova**

Predgotovljeni betonski proizvod je proizvod od betona ili betona i armature izrađen ili proizveden na mjestu različitom od konačnog mjesta u građevini, na gradilištu ili u pogonu za proizvodnju predgotovljenih betonskih elemenata, [51]. Prednosti gradnje predgotovljenim betonskim proizvodima u odnosu na monolitne očituju se u skraćenom vremenu gradnje, uštedi na izradi skele i oplata, proizvodnji elemenata u zatvorenom prostoru gdje nema utjecaja atmosferskih djelovanja te većoj kvaliteti i trajnosti proizvedenih elemenata kao posljedice industrijskog načina proizvodnje u kontroliranim uvjetima. Glavni nedostaci predgotovljenih betonskih elemenata jesu povećanje troškova zbog skladištenja elemenata, njihovog transporta do gradilišta i montaže. Isto tako, za početak proizvodnje nekog predgotovljenog betonskog proizvoda potrebne su veće početne investicije u opremu za proizvodnju.

#### **2.3.1. Zahtjevi za predgotovljene betonske proizvode prema normi HRN EN 13369:2004**

Predgotovljeni betonski proizvodi izrađuju se za:

- konstrukcijsku upotrebu (elementi djelomično predgotovljene konstrukcije, elementi predgotovljene betonske konstrukcije ili zasebna građevina)
- nekonstrukcijsku upotrebu (npr. rubnjak, cijev za dovod i odvod tekućina, kanal, opločnik, okno i slično).

Predgotovljeni betonski proizvodi projektiraju se u skladu s odredbama Tehničkog propisa za betonske konstrukcije, [52]. U projektu predgotovljenih betonskih proizvoda moraju se dokazati tehnička svojstva i ponašanje za sve faze predviđenog vijeka uporabe proizvoda, tj. za fazu izrade, dizanja iz kalupa, prijenosa, odlaganja na odlagalištu, prijevoza do gradilišta, ugradnju, uporabu, održavanje i razgradnju.

Tehnička svojstva predgotovljenih betonskih proizvoda moraju ispunjavati opće i posebne zahtjeve bitne za krajnju primjenu u građevini i moraju biti specificirana prema odgovarajućoj tehničkoj specifikaciji, odnosno prema normi HRN EN 13369:2004 i prema odredbama TPBK, Dodatak G.

Norma HRN EN 13369:2004 "Opća pravila za predgotovljene betonske proizvode" propisuje opće zahtjeve za predgotovljene betonske proizvode. Ako za pojedini predgotovljeni betonski proizvod postoji hrvatska norma koja se odnosi isključivo na taj predgotovljeni proizvod, tada ona ima prednost u odnosu na opću normu HRN EN 13369. Norma HRN EN 13369:2004 postavlja zahtjeve u pogledu:

- sastava materijala predgotovljenoga betonskog proizvoda,
- proizvodnje predgotovljenih elemenata,
- svojstava proizvedenih predgotovljenih betonskih elemenata.

Svojstva komponenti betona, čelika za armiranje, čelika za prednapinjanje i spojnih sredstava koja se rabe kod predgotovljenih betonskih proizvoda trebaju zadovoljiti zahtjeve koji su specificirani za tu vrstu građevinskih proizvoda prema TPBK i odgovarajućim hrvatskim normama. Zahtjevi pri proizvodnji predgotovljenih betonskih elemenata odnose se na:

- proizvodnju betona,
- svojstva betona u očvrslom stanju,
- armaturu.

Njegu betona treba provoditi sve do dostizanja minimalnog razreda tlačne čvrstoće ili do dostizanja određenog postotka tlačne čvrstoće nakon 28 dana, koja se određuje na uzorku njegovanom na identičan način kao i predgotovljeni betonski proizvod. Minimalni razredi tlačne čvrstoće betona ovise o razredu izloženosti okolišu i prikazani su u tablici 2.13, [53].

Tablica 2. 13: Minimalne vrijednosti tlačne čvrstoće betona na kraju procesa njege u ovisnosti o razredu izloženosti okolišu u kojemu će se predgotovljeni betonski proizvod nalaziti, [53]

| Razred izloženosti okolišu prema normi HRN EN 206-1:2002 | Tlačna čvrstoća u odnosu na vrijednosti nakon 28 dana (%) | Razred tlačne čvrstoće (N/mm <sup>2</sup> ) |
|--|---|---|
| X0, XC1  | -   | 12/15                                       |
| XC2, XD2, XC3, XF1                                       | 40  | 16/20                                       |
| Ostali razredi izloženosti okolišu                       | 60  | 25/30                                       |

Kod proizvodnje predgotovljenih betonskih elemenata često je potrebno ubrzati proces hidratacije cementa i očvršćivanja betona s ciljem što bržeg oslobađanja kalupa za novi ciklus betoniranja. Jedan od često upotrijebljenih postupaka jest zagrijavanje betona s pomoću zasićene vodene pare. Prethodnim ispitivanjima potrebno je dokazati da se primjenom ovog postupka ubrzanog očvršćivanja betona postižu željene vrijednosti čvrstoća u očvrslom stanju. Da bi se usred zagrijavanja betona izbjegla pojava mikropukotina i drugih defekata koji mogu štetno djelovati na trajnost predgotovljenih betonskih proizvoda, potrebno je osigurati sljedeće:

- postupno zagrijavanje (predgrijavanje) kada srednja vrijednost maksimalne temperature zagrijavanja prelazi 40°C,
- razlika temperatura u susjednim predgotovljenim betonskim proizvodima prilikom predgrijavanja i hlađenja ne smije biti viša od 20°C ako srednja vrijednost maksimalne temperature zagrijavanja prelazi 40°C.

Način i trajanje postupka zagrijavanja betona s ciljem njegova ubrzanog očvršćivanja trebaju biti dokumentirani. U tablici 2.14. prikazane su srednje vrijednosti maksimalne temperature zagrijavanja betona u ovisnosti o okolišu u kojemu će se predgotovljeni betonski proizvod nalaziti.

Tablica 2. 14: Ovisnost maksimalne temperature zagrijavanja betona o okolišu u kojem će se nalaziti predgotovljeni betonski proizvod, [53]

| Okoliš u kojem se nalazi predgotovljeni betonski proizvod  | Maksimalna srednja vrijednost temperature unutar betona, $\bar{T}$ |
|--|--|
| Suha ili umjereno vlažna   | $\bar{T} \leq 85^\circ\text{C}$                                    |
| Vlažna ili izmjenično vlažna   | $\bar{T} \leq 65^\circ\text{C}$                                    |
| Kada je $70^\circ\text{C} \leq \bar{T} \leq 85^\circ\text{C}$ , potrebno je prethodnim ispitivanjima dokazati da se postiže zahtijevana čvrstoća nakon 90 dana starosti. |  |

Minimalni razred tlačne čvrstoće za armirane predgotovljene betonske proizvode iznosi C20/25, a za prednapete predgotovljene betonske proizvode je C30/37. Zahtjevi na proizvedene predgotovljene betonske proizvode odnose se na:

- geometrijska svojstva,
- površinski izgled,
- mehaničku otpornost,
- otpornost na požar,
- akustička svojstva,
- toplinska svojstva,
- trajnost i druge zahtjeve.

Dopušteno odstupanje izmjera poprečnog presjeka predgotovljenog betonskog proizvoda, te položaja armature unutar poprečnog presjeka dani su u tablici 2.15. Za vrijednosti koje se nalaze između onih danih u tablici 2.15 potrebno je napraviti linearnu interpolaciju. Navedene vrijednosti podložne su promjeni ako norme za pojedini predgotovljeni betonski proizvod zahtijevaju drugačije.

Tablica 2. 15: Dopušteno odstupanje izmjera poprečnog presjeka predgotovljenoga betonskog proizvoda te položaja nenapete i napete armature unutar poprečnog presjeka, [53]

| <b>Dimenzija poprečnog presjeka predgotovljenoga betonskog proizvoda (mm)</b> | <b>Dopušteno odstupanje izmjera poprečnog presjeka predgotovljenog betonskog proizvoda <math>\Delta L</math> (mm)</b> | <b>Dopušteno odstupanje položaja nenapete ili napete armature <math>\Delta c</math> (mm)</b> |
|---|---|--|
| $\leq 150$ mm   | + 10, - 5   | $\pm 5$  |
| 400 mm  | $\pm 15$  | + 15, - 10   |
| $\geq 2500$ mm  | $\pm 30$  | - 30, - 10   |

Mehanička otpornost predgotovljenih betonskih elemenata dokazuje se proračunom temeljenim na matematičkom modelu, proračunom podržanim eksperimentalnim ispitivanjima na modelima u pravoj veličini (prototipovima) ili isključivo eksperimentalnim ispitivanjima na modelima u pravoj veličini. Eksperimentalna ispitivanja na modelima u pravoj veličini s ciljem dokazivanja mehaničke otpornosti dopuštena su ako postoji nesigurnost postupka i rezultata proračuna ili ako nema odgovarajuće metode proračuna. Posebnost proračuna predgotovljenih betonskih elemenata jest u tome da je za pojedine vrste elemenata potrebno uzeti u obzir i njihovo ponašanje tijekom dizanja iz kalupa, prijenosa i prijevoza do gradilišta, ugradnje i sličnih aktivnosti.

Otpornost na požar za predgotovljene betonske proizvode definirana je s obzirom na vrstu (tip) predgotovljenog proizvoda. Otpornost na požar najčešće se opisuje razredima. Za provjeru standardne požarne otpornosti može se odabrati jedan od ponuđenih postupaka:

- klasifikacija ispitivanjem, definirana normom HRN EN 13501-2:2008, Razredba građevnih proizvoda i građevnih elemenata prema ponašanju u požaru - 2. dio: Razredba prema rezultatima ispitivanja otpornosti na požar, isključujući ventilaciju,

- klasifikacija prema tabličnim podacima, definirana normom HRN ENV 1992-1-2, Eurokod 2: projektiranje betonskih konstrukcija -1-2. dio: opća pravila - proračun konstrukcija na požarno djelovanje,
- klasifikacija proračunom, također definirana normom HRN ENV 1992-1-2.

Zvučna svojstva trebaju biti dana s obzirom na vrstu predgotovljenog proizvoda. Zvučna svojstva koja je potrebno provjeriti za predgotovljene betonske proizvode su zračna i udarna zvučna izolacijska svojstva. Zvučna zračna izolacijska svojstva određuju se prema normama HRN EN ISO 140-3 i HRN EN ISO 717-1, a udarna prema normama HRN EN ISO 140-6 i HRN EN ISO 717-2.

Toplinska svojstva predgotovljenih betonskih elemenata trebaju biti izražena preko jedne od sljedećih grupa parametara:

- toplinska provodljivost materijala zajedno s geometrijom proizvoda,
- toplinski otpor cijelog proizvoda.

Ako je potrebno, može biti dan i specifični toplinski kapacitet proizvoda. Toplinska provodljivost materijala može biti određena ispitivanjem prema normi HRN EN 12664. Određivanje nazivnih i toplinskih vrijednosti za proizvod u suhom stanju provodi se prema HRN EN ISO 10456. HRN EN ISO 10456 također propisuje i postupak pretvaranja nazivnih toplinskih vrijednosti u projektne toplinske vrijednosti. Projektne toplinske provodljivost i specifični toplinski kapacitet mogu se očitati iz tablice dane u HRN EN 12524 ili HRN EN 1745. U tablici 2.16 prikazan je koeficijent toplinske provodljivosti u suhom stanju pri temperaturi od 10°C. Budući da su vrijednosti u tablici 2.16 dane za suhe uvjete okoliša, potrebno ih je pretvoriti u projektne koeficijent toplinske provodljivosti ovisno o stvarnom stanju vlažnosti i o primjeni predgotovljenog betonskog proizvoda. Projektne toplinske provodljivost i specifični koeficijent prolaza topline komponenti betona određuju se prema HRN EN ISO 6946 ili mjerenjem u vrućoj komori prema HRN EN ISO 8990.

Tablica 2. 16: Koeficijent toplinske provodljivosti za proizvod u suhom stanju pri temperaturi 10°C, [53]

| Gustoća materijala<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\Lambda_{10,dry}$<br>[W/(mK)] |                 | Koeficijent difuzije<br>vodene pare<br>$\mu$ | Specifična toplina<br>C [kJ/(kgK)] |
|--|--------------------------------|-----------------|--|------------------------------------|
|  | p=50% (fraktil)                | p=90% (fraktil) |  |                                    |
| 1600                                       | 0,69                           | 0,88            | 5/15   | 1,0                                |
| 1700                                       | 0,75                           | 0,93            | 5/15   | 1,0                                |
| 1800                                       | 0,82                           | 1,01            | 5/15   | 1,0                                |
| 1900                                       | 0,90                           | 1,09            | 5/15   | 1,0                                |
| 2000                                       | 1,00                           | 1,19            | 5/15   | 1,0                                |
| 2100                                       | 1,11                           | 1,30            | 5/15   | 1,0                                |
| 2200                                       | 1,24                           | 1,42            | 30/100                                       | 1,0                                |
| 2300                                       | 1,37                           | 1,56            | 50/150                                       | 1,0                                |
| 2400                                       | 1,52                           | 1,72            | 50/150                                       | 1,0                                |

$f_{\psi} = 4 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (koeficijent konverzije vlažnosti)

Parametri važni za trajnost predgotovljenoga betonskoga betonskog proizvoda jesu:

- minimalni udio cementa,
- maksimalni vodocementni omjer,

- maksimalni sadržaj klorida i alkalija u betonu,
- način zaštite betonskih elemenata od isušivanja,
- primjena postupka toplinskog zaptivanja za ubrzanje hidratacije i očvršćavanja betona,
- minimalni razred čvrstoće betona,
- minimalna dimenzija i kvaliteta zaštitnog sloja betona,
- sveukupnost uporabnih svojstava koje ima predgotovljeni element.

Kemijska stabilnost treba biti osigurana pravilnim izborom materijala, koji trebaju zadovoljiti zahtjeve koji su specificirani za tu vrstu građevinskih proizvoda prema TPBK i odgovarajućim hrvatskim normama.

S ciljem poboljšanja otpornosti na koroziju armature, a koja je ujedno i najčešći tip oštećenja armiranobetonskih konstrukcija, u normi HRN EN 13369:2004, Dodatak A, dani su zahtjevi o zaštitnom sloju betona predgotovljenih betonskih elemenata. Pritom je napravljena razredba agresivnosti okoliša za predgotovljene betonske proizvode u ovisnosti o oznaci razreda izloženosti djelovanju okoliša prema HRN EN 206-1, tablica 2.17.

Tablica 2. 17: Razredba uvjeta okoliša za predgotovljene betonske proizvode, [53]

| Uvjeti okoliša | Stupanj agresivnosti | Razred izloženosti prema normi HRN EN 206-1 |
|----------------|----------------------|---|
| A              | Neznatan             | X0  |
| B              | Maleni               | XC1   |
| C              | Umjereni             | XC2, XC3                                    |
| D              | Uobičajen            | XC4   |
| E              | Visok                | XD1, XS1                                    |
| F              | Vrlo visok           | XD2, XS2                                    |
| G              | Ekstreman            | XD3, XS3                                    |

U tablici 2.18 prikazane su minimalne vrijednosti zaštitnog sloja za predgotovljene betonske proizvode u ovisnosti o razredu tlačne čvrstoće betona i uvjetima okoliša. U navedenoj tablici se pod konstrukcijskim elementima tipa ploče podrazumijeva slučaj kada je samo jedna površina konstrukcijskog elementa izložena agresivnom okolišu. Oznaka  $C_{min}$  odnosi se na minimalni razred tlačne čvrstoće betona koji se zahtijeva za određene uvjete okoliša, a  $C_0$  je oznaka za beton čiji je razred tlačne čvrstoće za dva reda veći od  $C_{min}$ .

Tablica 2. 18: Minimalni zaštitni sloj (mm) za predgotovljene betonske proizvode, [53]

| $C_{min}$ | $C_0$  | Uvjeti okoliša | Nenapeta armatura za ploče |         | Nenapeta armatura za druge konstrukcijske elemente |         | Napeta armatura za ploče |         | Napeta armatura za druge konstrukcijske elemente |         |
|-----------|--------|----------------|----------------------------|---------|--|---------|--------------------------|---------|--|---------|
|           |        |                | $\geq C_0$                 | $< C_0$ | $\geq C_0$   | $< C_0$ | $\geq C_0$               | $< C_0$ | $\geq C_0$                                       | $< C_0$ |
| C20/25    | C30/37 | A              | 10                         | 10      | 10   | 10      | 10                       | 10      | 10   | 10      |
| C20/25    | C30/37 | B              | 10                         | 10      | 10   | 10      | 15                       | 15      | 15   | 15      |
| C25/30    | C35/45 | C              | 10                         | 15      | 15   | 20      | 20                       | 25      | 25   | 30      |
| C30/37    | C40/50 | D              | 15                         | 20      | 20   | 25      | 25                       | 30      | 30   | 35      |
| C30/37    | C40/50 | E              | 20                         | 25      | 25   | 30      | 30                       | 35      | 35   | 40      |
| C30/37    | C40/50 | F              | 25                         | 30      | 30   | 35      | 35                       | 40      | 40   | 45      |
| C35/45    | C45/55 | G              | 30                         | 35      | 35   | 40      | 40                       | 45      | 45   | 50      |

Navedene minimalne vrijednosti zaštitnog sloja betona kod predgotovljenih betonskih elemenata mogu se u posebnim uvjetima i umanjiti, ali uz uvjet da zaštitni sloj nikada ne bude manji od 10 mm.

Ako predgotovljene proizvode proračunavamo kao spregnute elemente s pločom betona koji se izvodi na mjestu ugradnje stropa, debljina ploče mora biti najmanje 50 mm. Poprečna armatura može biti smještena i u predgotovljenom elementu ili u dijelu ploče izvedenom na mjestu ugradnje.

Kod ploča izvedenih u dva smjera za preuzimanje momenta savijanja u smjeru okomitom na sljubnicu postavlja se neprekinuta armatura ili se izvodi nastavljanje armature kraćom šipkom.

Povoljno djelovanje krutosti na torziju kod određenih reznih sila smije se uzeti u obzir samo kad se u području djelovanja torzije na udaljenosti  $0,3 \cdot l$  od čvora ne nalazi sljubnica predgotovljenih ploča ili kad je sljubnica osigurana armaturom za sprezanje na najvećem razmaku 100 mm od ruba sljubnice. Preuzimanja momenta torzije potrebno je dokazati. Takav dokaz nije potreban kad je ploča kruto vezana s rubnom gredom ili susjednim pločama.

Kod rubnih ležaja bez izvedenog zida iznad ploče potrebno je ugraditi dodatnu armaturu najmanje  $6 \text{ cm}^2/\text{m}$  za osiguranje sprezanja duž linije ležaja. Dodatna armatura se raspoređuje na širini 0,75 m.

Dokazivanje uporabljivosti predgotovljenoga betonskog proizvoda prema projektu betonske konstrukcije provodi se prema tom projektu te prema odredbama TPBK, [52], i uključuje zahtjeve za:

- izvođačevom kontrolom izrade i ispitivanja tipa predgotovljenog betonskog elementa,
- nadzorom proizvodnog pogona i nadzorom izvođačeve kontrole izrade predgotovljenog betonskog proizvoda,

na način primjeren postizanju tehničkih svojstava betonske konstrukcije u skladu s TPBK.

Potvrđivanje sukladnosti predgotovljenog betonskog proizvoda proizvedenog prema tehničkoj specifikaciji provodi se prema odredbama te specifikacije te prema odredbama TPBK.

Norma HRN EN 13369:2004 posebno propisuje postupke i uloge u postupku potvrđivanja sukladnosti predgotovljenih betonskih proizvoda. Postupci kontrole opreme za proizvodnju predgotovljenih betonskih proizvoda, sastavnih materijala, proizvodnje i gotovih predgotovljenih betonskih elemenata dani su u Dodatku D norme HRN EN 13369:2004.

### ***2.3.2. Zahtjevi za predgotovljene betonske stropne sustave: nosače, prema normi HRN EN 15037-1:2008***

Tehnička svojstva predgotovljenih betonskih nosača moraju ispunjavati opće i posebne zahtjeve bitne za krajnju primjenu u građevini i moraju biti specificirana prema odgovarajućoj tehničkoj specifikaciji, odnosno prema normi HRN EN 13369:2004 i prema odredbama TPBK, Dodatak G, [52, 53].

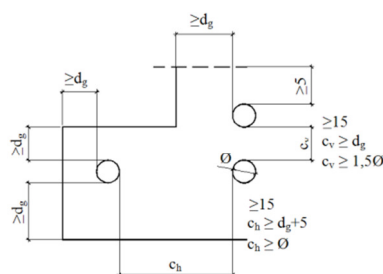
Svojstva komponenti betona, čelika za armiranje, čelika za prednapinjanje i spojnih sredstava koja se rabe kod predgotovljenih betonskih nosača trebaju zadovoljiti zahtjeve koji su specificirani za tu vrstu građevinskih proizvoda prema TPBK i odgovarajućim hrvatskim normama. Zahtjevi pri proizvodnji predgotovljenih betonskih nosača odnose se na:

- proizvodnju betona,

- svojstva betona u očvrslom stanju,
- armaturu.

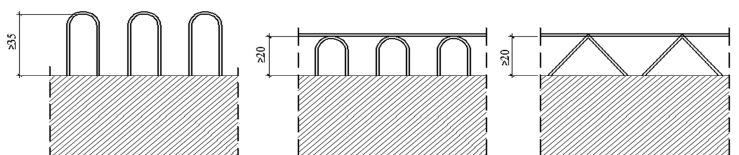
Njegu betona treba provoditi sve do dostizanja minimalnog razreda tlačne čvrstoće ili do dostizanja određenog postotka tlačne čvrstoće nakon 28 dana, koja se određuje na uzorku njegovanom na identičan način kao i predgotovljeni betonski proizvod. Minimalni razredi tlačne čvrstoće betona ovise o razredu izloženosti okolišu i prikazani su u tablici 2.13, [53]. Također je je normom HRN EN 15037-1:2008, [46] propisano da minimalna tlačna čvrstoća betona u trenutku isporuke proizvoda ne smije biti manja od 20MPa za armirane nosače i 25 MPa za prednapete nosače. Razred betona ne smije biti manji od C25/30 za armirane nosače i C30/37 za prednapete nosače.

Ako nije drugačije definirano, nazivna vrijednost razmaka između šipki armature trebala bi biti kako je prikazano na slici 2.29, gdje je  $d_g$  najveća dimenzija najvećeg zrna agregata u betonu.



Slika 2. 29: Nazivne vrijednosti razmaka šipki armature potrebnih za pravilnu ugradnju betona i zbijanje, [46]

Kako bi se osigurala pravilna ugradnja armaturnih petlji za podizanje predgotovljenih nosača u beton, razmak između gornje površine nosača i unutarnjeg dijela armaturne petlje ne smije biti veći od 35 mm. Ako je na vrhu petlje smještena uzdužna šipka razmak ne bi trebao biti smanjen na manje do 20 mm, slika 2.30.



Slika 2. 30: Pozicioniranje armaturnih petlji i rešetkastog čeličnog nosača s obzirom na osiguranje pravilne ugradnje i zbijanja betona, [46]

Pri upotrebi armaturnih petlji potrebno je zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- krakovi ili dijagonale armaturnih petlji trebaju biti od glatkog ili rebrastog armaturnog čelika,
- nazivni promjer kraka ili dijagonale armaturne petlje treba biti između 4 mm i 8 mm,
- proizvođač treba deklarirati vlačnu silu čupanja u predgotovljenom betonskom proizvodu na temelju proračuna ili „pull out“ testa,
- čvrstoća zavora mora biti zagarantirana



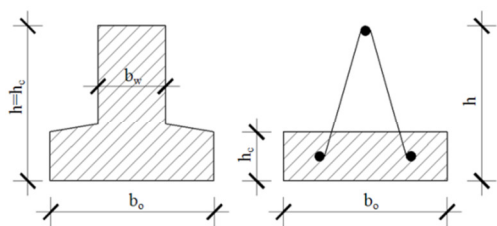
- armaturne petlje mogu biti povezane također s prednapetim žicama s ograničenjem vlačne čvrstoće na 500 MPa.

Pritom je dopušteno odstupanje izmjera poprečnog presjeka predgotovljene betonskih nosača:

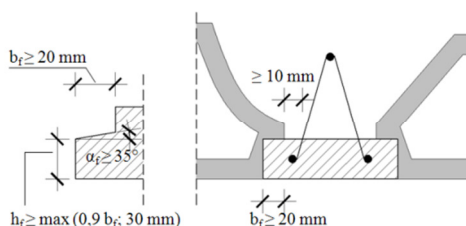
- nazivna duljina:  $\pm 25$  mm,
- nazivna visina  $h$ :
  - (-5; +10) mm ako je  $h \leq 100$  mm ,
  - (-5 $h$ /100; +10) mm ako je  $100 \leq h \leq 200$  mm,
  - (-10; +10) mm ako je  $200 \leq h \leq 500$  mm,
- širina vrha:  $\pm 5$  mm,
- ostale poprečne dimenzije:
  - nosivi i nenosivi nosači bez prepusta: (-5;+10) mm,
  - nenosivi nosači s prepustom: (-5; +5) mm.

Tolerancije pri pozicioniranju armature su sljedeće:

- za uzdužnu armaturu:
  - u vertikalnom položaju:  $\pm 5$  mm za pojedinu šipku armature,
  - u horizontalnom položaju:  $\pm 15$  mm,
  - duljina nastavka armature: (- 20 mm; + 50 mm),
- za napetu armaturu:
  - u poprečnom položaju:
    - vertikalno:  $\pm \min (5\% h_c; 10$  mm) za pojedinu šipku napete armature;  $\pm \max (h_c/40; 3$  mm) u težištu napete armature, gdje je  $h_c$  visina nosača isključujući rešetkasti čelični nosač, slika 2.31,
    - horizontalno:  $\pm 10$  mm za pojedinu šipku napete armature,
  - duljina nastavka armature: (- 20 mm; + 50 mm),
- za poprečnu armaturu:
  - u vertikalnom položaju:
    - vertikalno:  $\pm 10$  mm,
    - horizontalno:  $\pm 10$  mm za pojedinu šipku armature,
  - u horizontalnom položaju:  $\pm 30$  mm.



Slika 2. 31: Definicije dimenzija nosača, [46]



Slika 2. 32: Dimenzije stope pojasnice, [46]

Projektiranu čvrstoću i sidrenje dijagonala armature koja povezuje predgotovljeni betonski nosač i in-situ ugrađeni beton potrebno je provjeriti prema zahtjevima danim u Dodatcima C i D norme HRN EN 15037-1:2008.

Pritom su minimalne dimenzije:

- visina:
  - nosivi nosači:  $100\text{ mm} \leq h \leq 500\text{ mm}$ ,
  - nenosivi nosači:  $70\text{ mm} \leq h \leq 500\text{ mm}$ ,
  - nenosivi nosači bez rešetkastog čeličnog nosača i bez hrpta:  
 $h \geq 60\text{ mm}$ ,
- širina:
  - širina na dnu:  $b_o \geq 85\text{ mm}$ ,
  - širina hrpta:  $b_w \geq 40\text{ mm}$ ,
- dimenzije stope pojasnice t-presjeka nosača (prikazane na slici 2.32):
  - duljina površine oslanjanja:  $b_f \geq 20\text{ mm}$ ,
  - debljina:  $h_f \geq \max(0,9b_f; 30\text{ mm})$ ,
  - kut:  $\alpha_f \geq 35^\circ$ .

Karakteristike površine su sljedeće:

- nosive površine nosača na koju se oslanjaju blokovi ispune trebaju biti ravne.
- gornja površina i bočne strane:
  - kako bi se uzela u obzir veza između nosača i betona ugrađenog in-situ pri provjeri pravilne monolitizacije kompozitnog stropnog sustava sastavljenog od nenosivih nosača (Dodatak A), karakteristike i veza površine sučelja nosača s betonom ugrađenim in-situ trebaju biti definirane i zajamčene,
  - navedena površina treba biti čista i bez ikakvih nečistoća koje bi bile štetne za vezu betona i nosača. U posebnim zahtjevima (hrapavost i oblici nosača) propisuje se pravilna monolitizacija između nosača i betona ugrađenog in-situ, a ovi zahtjevi trebali bi biti podvrgnuti prikladnoj provjeri:
    - vizualna inspekcija hrapavosti površine u odnosu na referentni uzorak,
    - provjera dimenzija oblika nosača,
  - normom HRN EN 15037-1:2008 propisane su projektirane vrijednosti posmičnog naprezanja na sučelju nosača za granično stanje nosivosti  $k_1 \nu_{Rdi}$  i vrijednost koeficijenta trenja  $k_2 \mu$ , gdje su prepostavljene preporučene vrijednosti  $k_1 = k_2 = 1,0$ , s obzirom na površinske uvjete za prednapete nosače koji se trenutno koriste u praksi.

Mehanička otpornost predgotovljenih betonskih nosača definirana je normom HRN EN 13369:2004, te su opći zahtjevi mehaničke otpornosti prema normi HRN EN 15037-1:2008 koji se postavljaju za nosače jednaki zahtjevima propisanim normom HRN EN 13369:2004 za predgotovljene betonske proizvode kako

je opisano u poglavlju „2.3.1. Zahtjevi za predgotovljene betonske proizvode“. Za prolazne situacije, proračunski model upotrijebljen za proračun nosivosti armiranih ili prednapetih nosača treba biti najprije potvrđen ispitivanjem. Za potvrđivanje proračunskog modela, metoda ispitivanja dana je u Dodatku H norme HRN EN 13369:2004. Nakon potvrđivanja proračunskog modela potrebno je provesti monitoring jednakim postupkom kako su provedena i inicijalna ispitivanja. Nosači trebaju biti proračunati prema hipotezama H.2 danim u Dodatku H norme HRN EN 13369:2004. Za nosače čija je visina poprečnog presjeka veća od 150 mm monitoring može biti izbjegnut ako proračunski model upotrijebljen pri proračunu uključuje geometrijska odstupanja izmjera betonskog nosača i armature.

U tablicama 2.19 i 2.20 prema Dodatku E, norme HRN EN 13369:2004, prikazani su parcijalni faktori sigurnosti materijala koji se upotrebljavaju pri proračunu uzimajući u obzir specifične uvjete dane tablicom.

Tablica 2. 19: Parcijalni koeficijenti sigurnosti za beton  $\gamma_c$ , [53, 54]

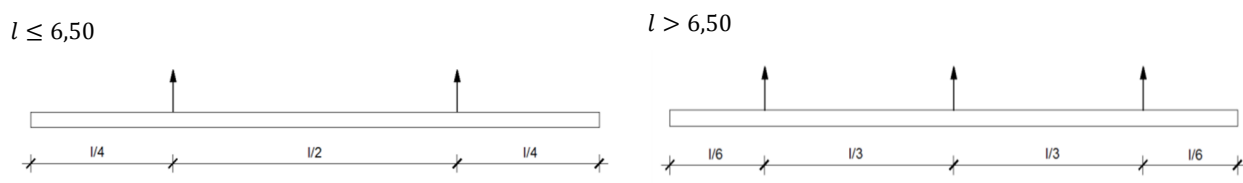
| $\gamma_c$  | Specifični uvjeti  |
|---|--|
| $\gamma_c = \gamma_{co} \cdot 1$<br>( $\gamma_c \geq 1,50$ )    | - dopušteno odstupanje izmjera poprečnog presjeka predgotovljenog betonskog proizvoda prema tablici 2.15;<br>- minimalni razred tlačne čvrstoće za armirane predgotovljene betonske proizvode iznosi C20/25, a za prednapete predgotovljene betonske proizvode je C30/37.  |
| $\gamma_c = \gamma_{co} \cdot 0,93$<br>( $\gamma_c \geq 1,40$ ) | - dopušteno odstupanje izmjera poprečnog presjeka predgotovljenog betonskog proizvoda dano je prema tablici 2.15, a stvarni poprečni presjek ne odstupa više od 4% od radnih izmjera presjeka ili stvarnih odstupanja koja su uzeta u obzir pri proračunu;<br>- minimalni razred tlačne čvrstoće za armirane predgotovljene betonske proizvode iznosi C20/25, a za prednapete predgotovljene betonske proizvode je C30/37. U oba slučaja koeficijent varijacije je $\leq 0,10$ ;<br>- potvrđivanje sukladnosti primjenjuje se na oba zahtjeva i utvrđuje se od treće strane. |
| $\gamma_c = \gamma_{co} \cdot 0,87$<br>( $\gamma_c \geq 1,30$ ) | - dopušteno odstupanje izmjera poprečnog presjeka predgotovljenog betonskog proizvoda dano je prema tablici 2.15, a stvarni poprečni presjek ne odstupa više od 4% od radnih izmjera presjeka ili stvarnih odstupanja koja su uzeta u obzir pri proračunu;<br>- minimalni razred tlačne čvrstoće za armirane predgotovljene betonske proizvode iznosi C20/25, a za prednapete predgotovljene betonske proizvode je C30/37. U oba slučaja koeficijent varijacije je $\leq 0,15$ ;<br>- potvrđivanje sukladnosti primjenjuje se na oba zahtjeva i utvrđuje se od treće strane. |

Tablica 2. 20: Parcijalni koeficijenti sigurnosti za armaturu  $\gamma_s$ , [53, 54]

| $\gamma_s$  | Specifični uvjeti   |
|---|---|
| $\gamma_s = \gamma_{so} \cdot 1$<br>( $\gamma_s \geq 1,15$ )    | - dopušteno odstupanje položaja nenapete ili napete armature dano je u tablici 2.15, točka 4.3.1.1 u normi HRN EN 13369:2004  |
| $\gamma_s = \gamma_{so} \cdot 0,96$<br>( $\gamma_s \geq 1,10$ ) | - dopušteno odstupanje položaja nenapete ili napete armature dano je u tablici 2.15, točka 4.3.1.1 u normi HRN EN 13369:2004, a stvarne izmjere ne odstupaju više od 4% od radnih izmjera<br>- potvrđivanje sukladnosti primjenjuje se na oba zahtjeva i utvrđuje se od treće strane. |
| $\gamma_s = \gamma_{so} \cdot 0,91$<br>( $\gamma_s \geq 1,05$ ) | - isto kao i za $\gamma_s = 1,15 \cdot 0,96 \geq 1,10$ ;<br>- dopušteno odstupanje uzima se u obzir pri proračunu smanjivanjem svih kritičnih izmjera podrazumijevajući najnepovoljniji utjecaj geometrijskih odstupanja.   |

Čvrstoća i svojstva betonskih nosača specificirana od proizvođača u vrijeme dostave uzimaju se u obzir u prolaznim situacijama. Pri određivanju efektivne duljine oslanjanja, udaljenosti između ležaja oslonca i privremenog oslonca, npr. podupirača, uzima se u obzir zajedno s opterećenjem i treba biti deklarirana. Tehnička dokumentacija treba sadržavati preporuke za montažu u obliku crteža.

Metode skladištenja, transporta i položaj ležajnih točaka trebaju biti propisani u dokumentaciji. Položaji točaka za podizanje nosača trebaju biti točno određeni zbog ograničenja vlačnih naprezanja nastalih zbog djelovanja vlastite težine nosača pomnožene s dinamičkim koeficijentom. Proizvođač treba navesti položaje točaka za podizanje nosača (primjeri dani na slici 2.33).



Slika 2. 33: Primjeri položaja točaka za podizanje nosača, [46]

Otpornost na požar s obzirom na nosivost predgotovljenih betonskih nosača za sustav stropnih konstrukcija izražava se razredima, a treba biti specificirana u skladu s točkama 4.3.4.1 i 4.3.4.3 norme EN 13369:2004. Za testiranje standardne požarne otpornosti stropnih sustava primjenjuje se Dodatku K norme EN 1365-2. Predgotovljeni betonski proizvodi s cementnim vezivom pripadaju razredu A.1 bez potrebe za dodatnim ispitivanjem.

Požarna otpornost stropnih sustava nosača i blokova treba biti određena ispitivanjem ili tabličnim postupkom provjere elemenata na požar. Kontrolu treba provoditi ispitivanjem, proračunom ili istovremeno objema metodama. Požarna otpornost može biti dokazana uzimajući u obzir rezultate prethodnih ispitivanja stropnih sustava sličnih ili jednakih sustavu koji je predložen prema EN 1365-2. Ukoliko to nije moguće (novi sustavi ili sustavi čije su karakteristike bitno različite od sustava koji su ranije ispitivani), trebaju biti provedena dva ispitivanja za svaki očekivani način otkazivanja (posmični slom i slom pri savijanju). Ako je, za danu vrstu ispitivanja, zabilježeno kraće vrijeme otpornosti na požar manje od 0,8 puta zabilježeno duže vrijeme, treba biti provedeno i treće ispitivanje. Otpornost na požar je minimalno zabilježeno vrijeme u kojemu se konstrukcija može oduprijeti požaru osim u slučaju kada niski rezultati ispitivanja otpornosti na požar mogu biti objašnjeni. Za dane tipove stropnih sustava, dobiveni rezultati trebaju biti ekstrapolirani uzimajući u obzir različite raspone i slučajeve opterećenja, uz pretpostavku da je takva ekstrapolacija potkrijepljena s prikladnom metodom proračuna. Ukoliko je rezultat ispitivanja barem 20% viši od zahtijevanog vremena otpornosti na požar, jedno ispitivanje po tipu sloma bit će dovoljno.

Požarna otpornost određena proračunom treba biti provedena u skladu s normom EN 1992-1-2:2004. Dokaz posmične otpornosti nije potreban. U slučaju upotrebe armaturnih mreža u stropu potrebno je provesti kontrolu kriterija cjelovitosti.

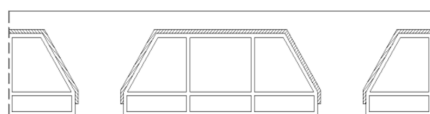
Za 15 minutni razred požarne otpornosti, stropni sustavi se izjednačavaju s punom pločom. Za 30 minutni i 60 minutni razred požarne otpornosti proračun temperature u donjem dijelu nosača dijeli se na dva koraka i razlikuje se s obzirom na različite visine:

- blok < 15 cm visine, pretpostavlja se da donji ligament ostaje neoštećen tijekom 15 minuta. Prvih 15 minuta proračunava se na način da se blok promatra kao puna ploča, a nakon 15 minuta pri

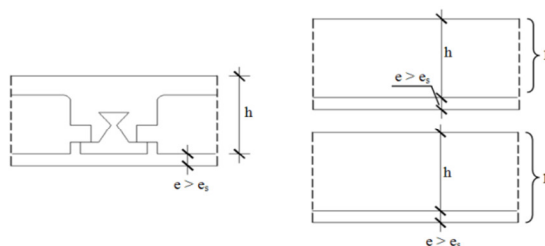
proračunu uzimamo u obzir preostali profil uključujući ligamente bloka koji su u kontaktu s in-situ ugrađenim gornjim slojem betona (slika 2.34).

- blok  $\geq 15$  cm visine, pretpostavlja se da donji ligament ostaje neoštećen tijekom 30 minuta. Prvih 30 minuta proračunavaju se na način da se blok promatra kao šuplja ploča, a nakon 30 minuta proračun podrazumijeva preostali profil kako je prikazano na slici 2.34.

Stropni sustavi sastavljeni od nosača i blokova sa zaštitnim slojem dovoljne debljine na unutarnjoj strani,  $e_s$ , trebaju biti obrađivani kao pune ploče debljine jednake ukupnoj debljini stropnog sustava (upotrebljavajući stvarnu težinu za proračun sila i momenata), uključujući debljinu premaza s njegovim termičkim svojstvima ili ekvivalentnom debljinom betona (slika 2.35).



Slika 2. 34: Zadržani preostali profil, [46]



Slika 2. 35: Ekvivalentna debljina betona, [46]

Zahtijevanu požarnu otpornost moguće je postići dodavanjem zaštitnih materijala koji su na prikladan način povezani sa strukturom koju štite. Zaštitni materijali koji dodatno štite stropni sustav od požara također trebaju biti ispitani na za to prikladan način. Takvi materijali se dijele s obzirom na ekvivalentnu debljinu betona. Pri izostanku ispitivanja na zaštitnim materijalima moguće je usvojiti sljedeće vrijednosti:

- 1 cm cementnog morta: 0,67 cm betona,
- 1 cm vermikulita: 2,5 cm betona,
- 1 cm kamene vune: 2,5 cm betona,
- 1 cm uobičajenog gipsanog morta. 2,5 cm betona.

U tablici 2.21 prikazani su minimalni razredi otpornosti na požar za različite tipove stropnih sustava danih u Dodatku B norme HRN EN 15037-1:2008. Ovi rezultati dobiveni su iz rezultata ispitivanja provedenih na gotovim stropnim sustavima pod stalnim opterećenjem.

Razredi požarne otpornosti za različite stropne sustave prikazani su u tablici 2.21, a definirani su s obzirom na sljedeće kriterije:

- mehanička čvrstoća,

- termo-izolacija (srednja i maksimalna temperatura dostignuta na licu nosača koje nije izloženo požaru vrijednosti od 140°C do 180°C),
- cjelovitost nosača i izostanak ispuštanja zapaljivih plinova iz lica nosača izloženog požaru.

Tablica 2. 21: Razredi požarne otpornosti za različite stropne sustave (bez gipsanog morta s donje strane), [46]

| Tip stropnog sustava   | Razred požarne otpornosti (u minutama) |
|--|--|
| Stropni sustavi s in-situ ugrađenim gornjim nosivim betonskim slojem:  |  |
| - s blokovima od polistirena <sup>a</sup>  | 30                                     |
| - sa šupljim betonskim ili glinenim blokovima  | 30                                     |
| - s punim betonskim ili glinenim blokovima   | 60                                     |
| Stropni sustav s kompozitnim gornjim slojem betona   |  |
| Stropni sustav s djelomičnim gornjim slojem betona (npr. plutajući sloj betona)  | 30                                     |
| Stropni sustav s nosivim betonskim nosačima:   | 30                                     |
| - s blokovima od polistirena   | 15                                     |
| - s polunosivim blokovima  | 30                                     |
| <sup>a</sup> U svjetlu sadašnjih saznanja o ponašanju ovakvih stropnih sustava uslijed djelovanja požara, trebalo bi ih upotrebljavati isključivo kao stropove iznad zračnih prostora. Viši razred požarne otpornosti može biti postignut upotrebom gipsanog morta kao sloja koji štiti stropni sustav s donje strane. |  |

Zahtjevi trajnosti za predgotovljene betonske proizvode propisani normom HRN EN 13369:2004 primjenjuju se i na predgotovljene nosače stropnih sustava. S obzirom na razred izloženosti, minimalna udaljenost između površine armature i izloženog lica nosača u nosivom dijelu stropa može se uzeti iz tablice 2.18 u kojoj su prikazani zaštitni slojevi predgotovljenih betonskih proizvoda. Minimalna udaljenost između površine armature i lica stropne konstrukcije koje nije izloženo uzima se kao razred izloženosti B, prema Dodatku A norme HRN EN 13369:2004. Za stropni sustav s nosačima u spoju s betonskim ili glinenim blokovima minimalni zaštitni sloj treba se smanjiti za 5 mm.

Norma HRN EN 15037-1:2008 propisuje postupke i uloge u postupku potvrđivanja sukladnosti predgotovljenih betonskih nosača namijenjenih za ugradnju u stropne sustave. Postupci kontrole proizvodnje predgotovljenih betonskih elemenata dani su u Dodatku A norme HRN EN 15037-1:2008, a prikazani su u tablicama 2.22 i 2.23.

Tablica 2. 22: Nadzor proizvodnog postupka, [46]

|  | Predmet nadzora                | Metoda                                     | Svrha <sup>a</sup>                                     | Učestalost <sup>a</sup>   |
|--|--------------------------------|--|--|---|
| <b>Beton</b>   |                                |  |  |   |
| 1  | Tlačna čvrstoća betona         | Ispitivanje čvrstoće na uzorcima betona    | Čvrstoća pri dostavi nosača na mjesto njegove ugradnje | Dnevno trebaju biti izrađena po 3 uzorka:<br>- 3 uzorka za svaku proizvodnu jedinicu i svaki tip betona ako nije toplinski tretiran<br>- 3 uzorka za svaku proizvodnu liniju i tip betona ako je toplinski tretiran.<br>Za nosače s rešetkastim čeličnim nosačem učestalost nadzora smanjena je na 1 puta tjedno. |
| <b>Ostali predmeti proizvodnje</b>   |                                |  |  |   |
| 2  | Inicijalna sila prednapinjanja | Direktno mjerenje sile i izduljenja natege | Sukladnost s propisanim vrijednostima                  | Svakodnevno na jednom kabelu za prednapinjanje po jednoj proizvodnoj jedinici.  |
| <sup>a</sup> Navedena ispitivanja i učestalosti mogu se prilagoditi ili čak ukinuti ako se iz proizvoda izravno ili neizravno dobivaju istovjetni podatci. |                                |  |  |   |

Tablica 2. 23: Nadzor završenog proizvoda, [46]

|   | Predmet nadzora  | Metoda  | Svrha <sup>a</sup>  | Učestalost <sup>a</sup>   |
|---|--|---|---|---|
| <b>Ispitivanje proizvoda</b>  |  |   |   |   |
| 1   | Prokliznuće natege   | Mjerenje prokliznuća za dijelove koji se ne vide. Vizualna inspekcija vidljivih elemenata i njihovo mjerenje. | Sukladnost sa zahtjevima iz norme HRN EN 15037-1:2008.  | Svakodnevno, tri mjerenja po proizvodnoj liniji. Vizualna inspekcija elemenata i ako nema nikakvih sumnji u vizualnoj inspekciji preporučaju se mjerenja tri natege po danu. Ako se pojavi sumnja tijekom vizualnog pregleda potrebno je izvršiti mjerenja na svim zabrinjavajućim nategama.  |
| 2   | Dimenzije: duljina, visina, poprečni presjek, čvrstoća rubova, zaštitni sloj armature, izbočenje armature.     | Mjerenja prema normi HRN EN 15037-1:2008.   | Sukladnost s propisanim i specificiranim dozvoljenim odstupanjima.                                | Svaki peti dan, a minimalno jednom tjedno, na jednom nosaču slučajno odabranom, svaki puta na drugom tipu nosača.   |
| 3   | Krajevi nosača.  | Vizualna inspekcija.  | Pojava pukotina.  | Svaki vidljivi kraj nosača.   |
| 4   | Površinske karakteristike.   | Vizualna inspekcija.  | Hrapavost za monolitizaciju.  | Za svaku proizvodnu liniju.   |
| 5   | Nosivost predgotovljenih betonskih nosača <sup>c</sup> uslijed djelovanja privremenih situacija <sup>b</sup> . | Kako je opisano u Dodatku H norme HRN EN 15037-1:2008.  | Sukladnost s propisanim zahtjevima i objavljenim vrijednostima za proizvod.                       | Na svakom tipu nosača <sup>c</sup> , pri prvoj proizvodnji tog tipa nosača ili ako dolazi do znatnih promjena u tipu rešetkastog nosača, ili metode proizvodnje. Tijekom proizvodnje, za nosače <sup>c</sup> bez rešetkastog nosača, jedan svakih 20 dana proizvodnje, te za svaku visinu nosača posebno, svaki puta nosač s različitim tipom armature. |
| <sup>a</sup> Navedena ispitivanja i učestalosti mogu se prilagoditi ili čak ukinuti ako se iz proizvoda izravno ili neizravno dobivaju istovjetni podatci.<br><br><sup>b</sup> Prethodna ispitivanja provedena prije datuma kada je norma HRN EN 15037-1:2008 stupila na snagu mogu se prihvatiti ako su u skladu sa zahtjevima ove norme. Rezultati ispitivanja mogu biti i rezultati dani od proizvođača rešetkastog čeličnog nosača. |  |   | <sup>c</sup> Nije primjenjivo na nosače projektirane prema točki 4.3.3.2 norme HRN EN 13369:2004. |   |

Nosači proizvedeni u tvornici mogu biti proizvedeni u kalupima, kliznim postupkom ili ekstrudiranjem. Predgotovljeni betonski nosači mogu se grupirati s obzirom na čvrstoću stropa u koji će biti ugrađeni, pa prema tome možemo razlikovati sljedeće vrste stropnih sustava:

- stropni sustav s in-situ ugrađenim gornjim slojem betona,
- stropni sustavi s nenosivim blokovima,
- stropni sustavi s polunosivim blokovima,
- stropni sustavi s kompozitnim gornjim slojem betona,
- stropni sustavi s djelomičnim gornjim slojem betona,
- stropni sustavi s nosivim betonskim nosačima.

Stropni sustavi s in-situ ugrađenim gornjim slojem betona, prikazani na slici 2.22, sastavljeni su od betonskih nosača i nenosivih ili polunosivih blokova, kako je to definirano normama HRN EN 15037-2:2009, prEN 15037-3, prEN 15037-4, prEN 15037-5 i s in-situ ugrađenim gornjim slojem betona.

Za stropni sustav s nenosivim blokovima nominalna debljina gornjeg sloja betona ugrađenog in-situ iznad nosača,  $e_1$ , i iznad nenosivog bloka,  $e_2$ , treba biti:

- $e_1 \geq 30 \text{ mm}$  i  $e_2 \geq 40 \text{ mm}$  ako je udaljenost do središta nosača  $\leq 700 \text{ mm}$ ,
- $e_1 \geq 30 \text{ mm}$  i  $e_2 \geq 50 \text{ mm}$  ako je udaljenost do središta nosača  $> 700 \text{ mm}$ .

Ako je nanoseno opterećenje veće od  $2,5 \text{ kN/m}^2$  i udaljenost do središta nosača manja od  $700 \text{ mm}$ , armatura gornjeg sloja in-situ ugrađenog betona treba biti sačinjena od zavarene armaturne mreže s površinom poprečnog presjeka okomitom na raspon nosača od  $0,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ . Ako nanoseno opterećenje nije veće od  $2,5 \text{ kN/m}^2$  i raspon stropa nije veći od  $6,0 \text{ m}$  i kada nema pojave negativnog momenta, armaturna mreža može biti zamijenjena s armaturnim vlaknima, kao što su primjerice polipropilenska vlakna.

Nominalne vrijednosti debljina gornjih slojeva betona ugrađenog in-situ,  $e_1$  i  $e_2$ , u slučaju upotrebe polunosivih blokova iznose:

- ako je udaljenost do središta nosača  $\leq 700 \text{ mm}$ :
  - $e_1 \geq 30 \text{ mm}$
  - $e_2 \geq 40 \text{ mm}$ , ako je otpornost bloka na djelovanje koncentrirane sile veća ili jednaka  $2,0 \text{ kN}$ ,
  - $e_2 \geq 30 \text{ mm}$ , ako je otpornost bloka na djelovanje koncentrirane sile veća ili jednaka  $2,5 \text{ kN}$ ,
- ako je udaljenost do središta nosača  $> 700 \text{ mm}$ :
  - $e_1 \geq 30 \text{ mm}$
  - $e_2 \geq 50 \text{ mm}$ , ako je otpornost bloka na djelovanje koncentrirane sile veća ili jednaka  $2,0 \text{ kN}$ ,
  - $e_2 \geq 40 \text{ mm}$ , ako je otpornost bloka na djelovanje koncentrirane sile veća ili jednaka  $2,5 \text{ kN}$ .

Ako nanoseno opterećenje nije veće od  $2,5 \text{ kN/m}^2$  i raspon stropa nije veći od  $6,0 \text{ m}$  i kada nema pojave negativnog momenta, armaturna mreža može biti zamijenjena s armaturnim vlaknima, kao što su primjerice polipropilenska vlakna. Ako je nanoseno opterećenje veće od  $2,5 \text{ kN/m}^2$  i udaljenost do središta nosača manja od  $700 \text{ mm}$ , armatura gornjeg sloja in-situ ugrađenog betona treba biti postavljena poprečno ili u obliku zavarene mreže ili armaturnih šipki u poprečnim rebrima.

U slučaju stropnih sustava s kompozitnim gornjim slojem betona, slika 2.23, gornji sloj sastavljen je djelomice od betona ugrađenog između nosača i blokova, a djelomice od gornjih dijelova samih nosača i blokova. Nominalna vrijednost debljine in-situ ugrađenog betona iznad nosača,  $e_1$ , treba biti veća od  $30 \text{ mm}$ . Otpornost bloka na djelovanje koncentrirane sile treba biti veća ili jednaka  $2,5 \text{ kN}$ , te zadovoljeni kriteriji tlačne čvrstoće u horizontalnom smjeru propisane normom HRN EN 15037-2:2009. Kada je nanoseno opterećenje manje od  $2,5 \text{ kN/m}^2$  i raspon stropa manji od  $6,0 \text{ m}$ , u posebnim slučajevima, tj. kada nema djelovanja sloja betona kao dijafragme i kada nema poprečne raspodjele opterećenja, nije potrebna ugradnja poprečnih rebara.

Stropni sustavi s djelomičnom ugradnjom gornjeg sloja betona između nosača i blokova ispune, slika 2.24, sastavljeni su od polunosivih blokova ili nosivih blokova i nosača. Nominalna vrijednost debljine sloja

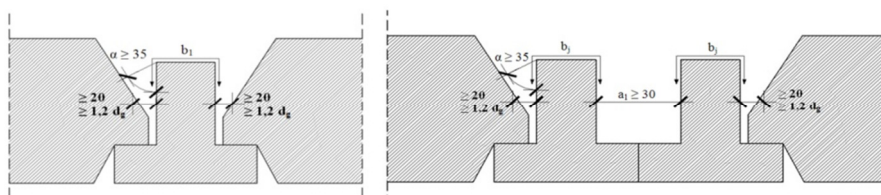


betona ugrađenog in-situ iznad nosača,  $e_1$ , treba biti veća od 30 mm. Kada je nanoseno opterećenje manje od  $2,5 \text{ kN/m}^2$  i raspon stropa manji od 5,0 m, u posebnim slučajevima, tj. kada nema djelovanja sloja betona kao dijafragme i kada nema poprečne raspodjele opterećenja, nije potrebna ugradnja poprečnih rebara. Ako je ugradnja poprečnih rebara pak potrebna ona trebaju biti smještena u centrima i ne dulja od 2,5 m.

U stropnim sustavima s nosivim betonskim nosačima, slika 2.25, nosači sami osiguravaju čvrstoću gotovog stropnog sustava. Upotrebljavaju se polunosivi ili nosivi blokovi, a završni sloj stropa čini drveni pod ili plivajući sloj direktno postavljen na nosače i blokove.

Pri provođenju monolitizacije kompozitnih stropnih sustava potrebno je zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- proračunska vrijednost posmičnog naprezanja na spojnim površinama treba zadovoljavati zahtjeve propisane točkom 6.2.5. norme EN 1992-1-1:2004 za sva opterećenja nanosena na strop,
- proračunata posmična čvrstoća kompozitnog stropnog sustava ne bi trebala biti veća od posmične čvrstoće monolitne ploče s istim karakteristikama i ne veća od  $0,03f_{ck}$ ,
- ako je blok kojeg upotrebljavamo u skladu s zahtjevima prikazanim slikom 2.36 i ako je površina nosača kako je zahtijevano točkom 4.3.2.2 tada nije potrebno ugrađivati veznu armaturu,
- ako je potrebno ugrađivati veznu armaturu, potrebno ju je smjestiti u zadnju trećinu nosača.



Slika 2. 36: Definicija efektivnih bridova,  $b_j$ , na spojnim površinama, [46]

### 2.3.2.1. Proračun graničnog stanja nosivosti i uporabljivosti stropnih sustava

Proračun stropnih sustava sastavljenih od nosača i blokova propisan je normom EN 1992-1-1:2004, te je pri proračunu potrebno uzeti u obzir i sljedeće zahtjeve:

- sudjelujuću širinu presjeka,
- svojstva materijala nosača specificiranim od strane proizvođača,
- parcijalni koeficijent sigurnosti za nosač specificiran od strane proizvođača (Dodatak C norme HRN EN 13369:2004)
- parcijalni faktori sigurnosti dani u normi EN 1992-1-1:2004 za proračun gotovih stropnih sustava,
- razred in-situ ugrađenog betona, koji bi trebao biti najmanje razreda C20/25,
- kontinuitet preko ležajeva ukoliko ga je moguće postići,
- minimalni efektivni raspon uzima se kao  $(L + 5\text{cm})$  gdje je L udaljenost između unutarnjih strana lica ležaja.

Čvrstoća i karakteristike betona za nosače su one propisane od proizvođača i pri starosti betona od 28 dana. Sudjelujuća širina ( $b_{eff}$ ) poprečnog presjeka stropnog sustava, ovisno o tome radi li se o stropnim

sustavima s in-situ ugrađenim gornjim slojem betona, stropnom sustavu s kompozitnim gornjim slojem betona ili montažnom stropnom sustavu, opisana je u Dodatku E, norme HRN EN 15037-1:2008.

Proračun stropnih sustava sastavljenih od nosača i blokova provodi se prema Dodatcima E i F, norme HRN EN 15037-1:2008. U nastavku će biti prikazan postupak proračuna betonskih nosača namijenjenih ugradnji u stropne sustave. Proračun stropnih sustava s nosivim betonskim nosačima uključuje provjeru čvrstoće nosača uzimajući u obzir kombinacije opterećenja za granična stanja uporabivosti i nosivosti za stalne i izvanredne situacije.

Proračunska vrijednost momenta savijanja za granično stanje nosivosti,  $M_{Rd}$ , određuje se prema točki 6.1. EN 1992-1-1:2004 uzimajući u obzir svojstva materijala, parcijalne koeficijente sigurnosti i odstupanja dimenzija nosača od propisanih vrijednosti. U slučaju otkazivanja glavne armature, proračunska vrijednost momenta savijanja,  $M_{Rd}$ , može biti određena upotrebom sljedećeg izraza:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_R} F_A \cdot \left( d - \frac{1}{2} \frac{F_A}{b_{eff} f_{cd}} \right) \quad (1)$$

$$F_A = (n_p F_{pk} + F_{rk}) \quad (2)$$

gdje je:

$\gamma_R$  - globalni koeficijent sigurnosti za granični moment ( $\gamma_R = 1,1$ ),

$d$  - udaljenost između težišta sile  $F_A$  i tlačnog ruba,

$b_{eff}$  - efektivna širina sudjelujućeg tlačnog dijela presjeka definiranog u točki E.2 Dodatka E, norme HRN EN 15037-1:2008,

$f_{cd}$  - proračunska tlačna čvrstoća najslabijeg materijala ugrađenog u tlačni kompozitni dio presjeka za granično stanje nosivosti, u MPa,

$n_p$  - broj aktivnih prednapetih natega u gredi,

$F_{pk}$  - sila sloma za svaku prednapetu nategu, u N,

$F_{rk} = A_s f_{yk}$  - sila za armaturni čelik poprečnog presjeka  $A_s$ , u N,

$F_{rk} = n'_p A_p f_{p0,1k}$  - sila za prednapeti čelik gdje je  $n'_p$  broj kablova upotrijebljenih kao pasivna armatura, u N.

Pri dimenzioniranju konstrukcija i elemenata od armiranog betona prema graničnom stanju nosivosti, potrebno je dokazati kako su naprezanja, širine pukotina i deformiranje takvih konstrukcija i elemenata za računsko opterećenje manja od maksimalnih graničnih vrijednosti, odnosno potrebno je proračunati granična stanja uporabljivosti, [44]. Veličine graničnih napona i širina pukotina te graničnog deformiranja konstrukcija i elemenata od armiranog betona, dane propisima, određene su ovisno o uporabnim, estetskim i fizikalnim uvjetima. Granično stanje naprezanja sastoji se u ograničenju napona za računsko opterećenje kako prekomjerno plastično deformiranje i raspucavanje izazvano visokim naponima ne bi ugrozilo trajnost i uporabljivost armiranobetonskih konstrukcija. Granično stanje širina pukotina ima za cilj osiguranje

armiranobetonskih konstrukcija od propadanja, prvenstveno korozijom čelika, te u nekim primjerima od propuštanja tekućine ili plina. Granično stanje deformiranja sadržava ograničenje deformacija, progiba, zakrivljenosti, pomaka, uvrtnja i promjene nagiba armiranobetonskih konstrukcija. Granično stanje naprezanja i granično stanje pukotina za stropne sustave sastavljene od nosača i blokova propisani su normom EN 1992-1-1:2004.

Deformiranje armiranobetonskih elemenata i konstrukcija dopušta se pod uvjetom da ono ne izazove oštećenja samog sustava i drugih nenosivih elemenata te da ne bude ugrožena uporabljivost konstrukcije. Deformiranje je općeniti naziv za deformaciju, progib, zakrivljenost, izduženje i skraćenje, uvrtnje i promjenu nagiba. Prognoziranje progiba vrlo je kompleksan zadatak zbog utjecaja velikog broja čimbenika koji se mijenjaju uzduž osi elementa i u vremenu. Zbog toga nije moguće dobiti jedan točan algoritam za proračun progiba, već se upotrebljavaju približni postupci. Dokazivanje graničnog stanja deformiranja stropnih sustava sastavljenih od nosača i blokova uključuje ograničavanje progiba kako bi se spriječio mogući utjecaj na elemente koji su poduprti stropnim sustavom.

Do pojave progiba dolazi uslijed:

- djelovanja dijela stalnog opterećenja nanesenog na gotovi stropni sustav prije nego što je izgrađena poduprta konstrukcija, za koju je dokaz bio proveden, kao rezultata dugotrajnih deformacija uslijed skupljanja, smatrajući ga dugotrajnim djelovanjem,
- stalnog opterećenja nanesenog nakon izgradnje poduprte konstrukcije, za koju je proveden dokaz graničnog stanja deformiranja, smatrajući ga dugotrajnim djelovanjem,
- promjenjivog opterećenja nanesenog nakon izgradnje poduprte konstrukcije, za koju je proveden dokaz stanja deformiranja, smatrajući ga kratkotrajnim djelovanjem,
- diferencijalnog skupljanja između betonskog nosača i betona ugrađenog in-situ koji nastupa nakon izgradnje poduprte konstrukcije, smatrajući ga dugotrajnim djelovanjem,
- neposrednog djelovanja sile prednapinjanja kod prednapetih nosača, smatrajući ga dugotrajnim djelovanjem.

Granična vrijednost progiba ovisi o tipu konstrukcije poduprte stropnim sustavom (krstost pregradnih zidova, završnih slojeva, itd.). Granične vrijednosti progiba:

- za zidane pregradne zidove i/ili krhke završne slojeve stropa:  $L/500$ ,
- za ostale pregradne zidove i/ili krute završne slojeve stropa:  $L/350$ ,
- za stropne elemente:  $L/250$ ,

gdje je  $L$  raspon stropa.

Upotreba pojednostavljenih metoda, danih u nastavku, moguća je za jednoliko raspodijeljeno opterećenje u slučaju kada je potrebno ograničiti progibe stropnog sustava obzirom na elemente koji su njime poduprti.

Omjer,  $\alpha$ , između dodatnog opterećenja i ukupnog opterećenja (dodatno i stalno opterećenje) jednak je:

$$\alpha = \frac{g_q + q}{g_1 + g_2 + g_v + g_a + g_p + g_q + q} \quad (3)$$

gdje je:

- $g_1$  - vlastita težina nosača po uzdužnom metru nosača, u kN/m,
- $g_2$  - vlastita težina stropnog sustava, manje vlastita težina nosača, po metru dužnom nosača, u kN/m,
- $g_a$  - stalno opterećenje koje odgovara poduprtim elementima (pregradnim zidovima, završnim slojevima stropa, itd.) ovisno o tome koji progib provjeravamo, po metru dužnom nosača, u kN/m,
- $g_v$  - stalno opterećenje nanoseno na strop prije nanošenja opterećenja  $g_a$ , po metru dužnom nosača, u kN/m,
- $g_p$  - stalno opterećenje nanoseno na strop nakon što je nanoseno opterećenje  $g_a$ , po metru dužnom nosača, u kN/m,
- $g_q$  - stalni dio dodatnog opterećenja (ako ono postoji) nanosenog na strop, po metru dužnom nosača, u kN/m,
- $q$  - promjenjivi dio dodatnog opterećenja nanosenog na strop, po metru dužnom nosača, u kN/m.

Omjer momenta savijanja iznad lijevog i desnog ležaja (u apsolutnoj vrijednosti) u odnosu na moment savijanja u sredini raspona jednak je:

$$\delta_w = \frac{M_w}{M_o} \quad (4)$$

$$\delta_e = \frac{M_e}{M_o} \quad (5)$$

gdje je:

- $\delta_w$  - omjer momenta savijanja iznad lijevog ležaja i momenta savijanja u sredini raspona,
- $M_w$  - moment savijanja iznad lijevog ležaja,
- $M_o$  - moment savijanja u sredini raspona,
- $\delta_e$  - omjer momenta savijanja iznad desnog ležaja i momenta savijanja u sredini raspona,
- $M_e$  - moment savijanja iznad desnog ležaja.

Koeficijent koji uzima u obzir smanjenje progiba uslijed kontinuiteta nosača,  $a$ :

$$a = 1 - 1,2 \left( \frac{\delta_w + \delta_e}{2} - 0,3a \right) \quad (6)$$

$a = 1,0$  ; ako imamo slučaj proste grede, odnosno ako nemamo kontinuiteta.

Ako je nadvišenje stropa izvedeno tijekom izvedbe, moguće je odrediti progib,  $f_a$  u mm, uslijed jednoliko raspodijeljenog opterećenja prema sljedećem izrazu:

$$f_a = w_t - w_a \quad (7)$$

gdje je:

- $w_t$  - ukupni progib,
- $w_a$  - progib koji je određen odmah nakon izvođenja nadvišenja.

Ukupni progib jednak je:

$$w_t = \frac{L^2}{8k_a E_{c,eff}} \left[ \frac{(1 - \zeta_t)}{I_{uc}} + \frac{\zeta_t}{I_{fc}} \right] \left[ \left( g_1 + g_2 + g_v + g_a + g_p + g_q + \frac{1}{3}q \right) \frac{aL^2}{9,6} \right] + \frac{\varepsilon_{cs} L^2}{8d} \quad (8)$$

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_o)}, i \varphi(\infty, t_o) = 2,0 \quad (9)$$

gdje je:

$L$  - raspon nosača, u mm,

$k_a$  - koeficijent koji uzima u obzir povećanje krutosti uslijed djelovanja blokova ispune, pri čemu se njegova vrijednost kreće između 1,0 (za nenosive blokove) i 1,2 (za nosive blokove).

$E_{c,eff}$  - efektivni modul elastičnosti betona, u MPa,

$\zeta_t$  - koeficijent raspodjele naprezanja u armaturi uzduž elementa,

$I_{uc}$  - moment tromosti za neraspucano stanje, u mm<sup>4</sup>,

$I_{fc}$  - moment tromosti za raspucano stanje, u mm<sup>4</sup>,

$\varepsilon_{cs}$  - ukupna deformacija skupljanja prema normi EN 1992-1-1:2004, u normalnim uvjetima izloženosti jednak je  $\varepsilon_{cs} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ ,

$d$  - efektivna visina poprečnog presjeka, u mm,

$E_{cm}$  - tangenti modul elastičnosti betona ugrađenog in-situ, prema tablici 3.1. norme EN 1992-1-1:2004,

$\varphi(\infty, t_o)$  - trajni koeficijent pužanja prema normi EN 1992-1-1:2004,

- efektivni omjer modula elastičnosti čelika i betona u ovom slučaju jednak je 15,

- efektivni omjer modula elastičnosti za predgotovljeni in-situ ugrađeni beton jednak je 1,0 u slučaju neraspucanog presjeka.

$M_{cr}$  - moment nastanka prve pukotine u betonu uslijed djelovanja vlačnog naprezanju  $f_{ctm}$  za homogenizirani presjek.

$$\zeta_t = 0 \text{ ako je } M_o \leq M_{cr} \quad (10)$$

$$\zeta_t = 1 - \sqrt{\frac{M_{cr}}{M_o}} \text{ ako je } M_o > M_{cr} \quad (11)$$

$$M_o = (g_1 + g_2 + g_v + g_a + g_p + g_q + q) \frac{L^2}{8} \quad (12)$$

Progib,  $w_a$ , koji se računa u periodu,  $t$ , tj. u trenutku izvođenja nadvišenja jednak je:

$$w_a = w_1 + \psi(w_2 - w_1) \quad (13)$$

gdje je:

$\psi$  - koeficijent interpolacije u rasponu od 0 do 0,5. Pojednostavljeno se uzima da je jednak:

$$\psi = 0,50 \cdot \frac{t}{90} \quad \text{za } t \leq 90 \text{ dana (pri čemu je } t \text{ u danima)} \quad (14)$$

$$\psi = 0,50 \text{ za } t > 90 \text{ dana.} \quad (15)$$

- ako se nadvisivanje pojavilo odmah nakon micanja potpora:

$$w_1 = \frac{L^2}{8k_a E_{c,m}} \left[ \frac{(1-\zeta)}{I_{uc}} + \frac{\zeta}{I_{fc}} \right] \left[ (g_1 + g_2 + g_v + g_a) \frac{aL^2}{9,6} \right] + \frac{2 \varepsilon_{cs} L^2}{5 \cdot 8d} \quad (16)$$

- ako se nadvisivanje pojavilo nakon dugog vremena proteklog od micanja potpora:

$$w_2 = \frac{L^2}{8k_a E_{c,eff}} \left[ \frac{(1-\zeta)}{I_{uc}} + \frac{\zeta}{I_{fc}} \right] \left[ \left( g_1 + g_2 + g_v + \frac{1}{3} g_a \right) \frac{aL^2}{9,6} \right] + \frac{\varepsilon_{cs} L^2}{8d} \quad (17)$$

gdje je:

$$\zeta = 0 \text{ ako je } M_{Gv+Ga} \leq M_{cr} \quad (18)$$

$$\zeta = 1 - \sqrt{\frac{M_{cr}}{M_{Gv+Ga}}} \text{ ako je } M_{Gv+Ga} > M_{cr} \quad (19)$$

$$M_{Gv+Ga} = (g_1 + g_2 + g_v + g_a) \frac{L^2}{8} \quad (20)$$

Za betonske nosače koji imaju ugrađen rešetkasti čelični nosač u beton, ovaj progib uzima se u obzir na način da se on pri proračunu smanji s pripadajućim koeficijentom (ne manjim od 0,85). Koeficijent može biti dokazan ispitivanjem na dva identična nosača (napravljeni od istog betona, istih dimenzija itd.), s jedinom razlikom u odsutnosti dijagonalne čelične rešetke (armature). Progib nosača je uspoređen u svrhu dokazivanja pozitivnog učinka rešetkastog čeličnog nosača ugrađenog u betonski nosač.

Prema zahtjevima norme HRN EN 15037-1:2008 armiranje posmičnom armaturom nije potrebno u slučaju kompozitnih stropnih sustava s in-situ ugrađenim gornjim slojem betona (prikazanih u Dodatku B norme HRN EN 15037-1:2008), i stropnih sustava s kompozitnim gornjim slojem betona čija je struktura dovoljno kruta da može prenijeti točkasto ili linijsko opterećenje preko nekoliko nosača.

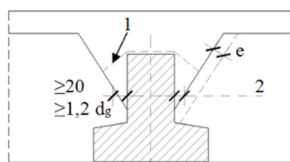
Za stropne sustave u kontinuitetu, povećanje posmičnog opterećenja može biti zanemareno pod pretpostavkom da razlika između momenata savijanja u točkama iznad ležajeva ne dostiže 50% vrijednosti momenta savijanja promatranog raspona.

Debljina bočne stjenke bloka ispune,  $e$ , treba biti uzeta u obzir pri proračunu sudjelujuće širine na sljedeći način:

- polunosivi, nosivi blokovi ispune (šuplji betonski ili glineni blokovi):  $e = 1,0 \text{ cm}$ ,
- puni betonski blokovi ispune:  $e = 3,0 \text{ cm}$ ,
- ostali slučajevi (npr. plastični blokovi, polistirenski blokovi itd.):  $e = 0 \text{ cm}$ .

Posmična čvrstoća kompozitnih stropnih sustava sastavljenih od nosača i blokova ispune provjerava se:

- ispod razina aa' gdje je slobodni prostor između nosača i bloka jednak ili veći od 20 mm i  $1,2d_g$ , na način da se uzima u obzir da samo sudjelovanje betona od nosača, pri čemu je razina aa' na slici 2.37 označen s brojem 2,
- uzduž linije manje čvrstoće, koja odgovara gornjem rubu nosača i kraćoj udaljenosti od gornjeg ruba nosača do bloka ispune, posmična čvrstoća određuje se uzimajući u obzir beton ugrađen in-situ (v. sliku 2.37 na kojoj je ova razina označena brojem 1).



Slika 2. 37: Definicija razine provjere za armirane i prearmirane nosače

Posmična armatura treba biti uzeta u obzir ako je proračunska posmična čvrstoća,  $\tau_{sd}$ , takva da je:

$$\tau_{sd} = \frac{V_{sd}}{b \cdot z} \leq 0,03f_{ck} \text{ gdje je } \tau_{sd} \text{ proračunska posmična čvrstoća u MPa} \quad (21)$$

gdje je:

- $b$  - visina poprečnog presjeka nosača na razini na kojoj promatramo presjek ili na dužini linije manje otpornosti, u mm,
- $z$  - krak unutarnjih sila,  $z = 0,9d$ , za armirane nosače, u mm,
- $d$  - efektivna visina, u mm,
- $f_{ck}$  - karakteristična tlačna čvrstoća betona (beton od kojeg je nosač sačinjen ili beton koji je ugrađen in-situ) na razini na kojoj promatramo presjek, u MPa.

Ako je  $\tau_{sd} > 0,03f_{ck}$ , posmična armatura trebala bi biti postavljena iznad visine područja otpornosti presjeka. Postotak posmične armature određuje se prema točki 6.2.3. norme EN 1992-1-1:2004.

Stropni sustavi sastavljeni od betonskih blokova i greda s in-situ ugrađenim gornjim slojem betona mogu djelovati kao dijafragme za prenošenje bočnih sila na oslonce vertikalnih dijelova konstrukcije. Kako bi se pravilno uzelo u obzir djelovanje dijafragme u normalnim uvjetima uporabe, područje armiranja treba biti minimalno jednako području koje je trenutno u potrebi.

U seizmičkim područjima potrebno je zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- minimalna debljina gornjeg sloja betona ugrađenog in-situ treba biti najmanje jednaka debljini definiranoj u Dodatku B norme HRN EN 15037-1:2008,
- gornji sloj betona ugrađen in-situ treba biti armiran kontinuiranom zavarenom armaturnom mrežom, potpuno usidrenom na krajevima oslonaca. Površina poprečnog presjeka armature postavljena okomito na raspon nosača,  $A_1$ , i površina poprečnog presjeka armature paralelne s rasponom nosača,  $A_2$ , treba biti minimalno:

- u zonama niskog i srednjeg potresnog intenziteta prema normi EN 1998:  $A_1 \geq 1,0 \text{ cm}^2/\text{m}$  i  $A_2 \geq 0,5 \text{ cm}^2/\text{m}$
- u zoni visokog potresnog intenziteta prema normi EN 1998:  $A_1 \geq 1,4 \text{ cm}^2/\text{m}$  i  $A_2 \geq 0,7 \text{ cm}^2/\text{m}$ .

Za određivanje debljine gornjeg sloja betona koji se ugrađuje in-situ,  $h_o$ , i površine poprečnog presjeka armature,  $A_s$ , (za 1 m visine stropa) potrebno je zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

$$V_{sd} \leq V_{rd1} + V_{rd3} \text{ i } V_{sd} \leq V_{rd2} \quad (22)$$

$$V_{rd1} = 0,23 f_{ctk,0,05} h_{ef} \quad (23)$$

$$V_{rd2} = 0,20 f_{ck} h_{ef} \quad (24)$$

$$V_{rd3} = 0,72 A_s f_{yk} \quad (25)$$

gdje je:

$V_{sd}$  - horizontalna posmična sila po 1 m duljine za potresno djelovanje, u kN/m,

$f_{ck}$  - karakteristična tlačna čvrstoća valjka in-situ ugrađenog betona pri starosti od 28 dana, u MPa (u slučaju nedostatka podataka može se uzeti da je  $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ )

$f_{ctk,0,05}$  - karakteristična vlačna čvrstoća in-situ ugrađenog betona, u MPa,

$f_{yk}$  - granica popuštanja čelika, u MPa,

$h_{ef} = h_o + 10$  za betonske i glinene blokove, a u ostalim slučajevima  $h_{ef} = h_o$ , u mm.

Kada je djelovanje in-situ ugrađenog gornjeg sloja betona koji ima funkciju dijafragme malo, kao što imamo u slučaju niskih zgrada, taj sloj može biti i izostavljen prilagodbom određenih pravila, u zonama niskog i srednjeg potresa:

- bokovi su nosivi betonski ili glineni blokovi i spojeni su,
- sustav horizontalnih čvorova siguran je s rebrima (minimalnog presjeka  $160 \text{ cm}^2$ ) postavljenim okomito na raspon nosača s minimalnim razmakom od 2 m. Površina poprečnog presjeka armature rebra je najmanje  $2 \text{ cm}^2$ ,
- armatura se postavlja iznad oslonaca i paralelno s nosačima, s poprečnim presjekom najmanje jednakim  $1 \text{ cm}^2/\text{m}$  (za 1 m visine stropa) i dužine na obje strane oslonca jednake duljini preklapanja povećanoj za visinu nosača.

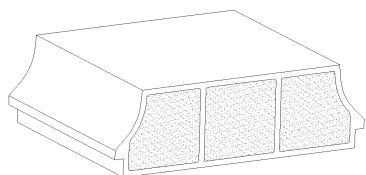
### **2.3.3. Zahtjevi za predgotovljene betonske stropne sustave: betonske blokove, prema normi HRN EN 15037-2:2009**

Prema normi HRN EN 15037-2:2009 može se razlikovati:

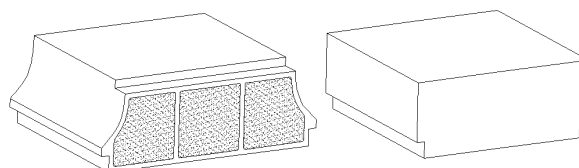
- nenosive blokove, tj. blokove koji nemaju mehaničku funkciju u stropnom sustavu i uvijek se na njih in-situ ugrađuje gornji sloj betona stropnog sustava,
- polunosive blokove, prikazani na slici 2.38, koji sudjeluju u prijenosu opterećenja na nosače, također u kombinaciji s in-situ ugrađenim slojem betona doprinose konačnoj čvrstoći stropnog sustava,



- nosivi blokovi, prikazani slikom 2.39, imaju istu funkciju kao i polunosivi blokovi ali za razliku od polunosivih blokova njihovi gornji rubovi pod određenim okolnostima mogu preuzeti ulogu tlačne ploče u konačnom stropnom sustavu.

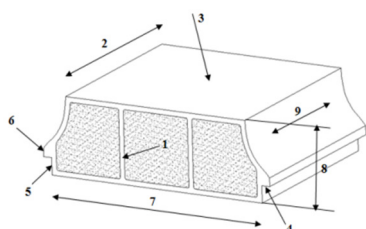


Slika 2. 38: Primjer polunosivog bloka, [55]



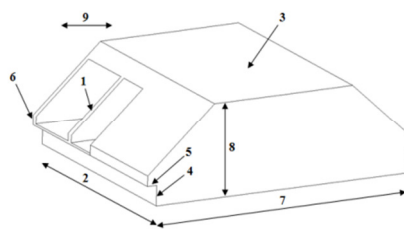
Slika 2. 39: Primjeri nosivih blokova, [55]

Blokove je također potrebno razlikovati i prema tome u kojem smjeru se pružaju šupljine unutar bloka. Pa tako postoje blokovi s horizontalnim šupljinama unutar bloka koje su položene u smjeru paralelnom s predgotovljenim betonskim nosačima i blokovi s poprečnim šupljinama unutar bloka koje su položene okomito na smjer predgotovljenog betonskog nosača. Primjeri blokova s horizontalnim i vertikalnim šupljinama prikazani su na slici 2.40. Blokovi mogu biti i tzv. otvoreni, koje čine polunosivi ili nosivi blokovi bez gornje plohe bloka.



Oznake:  
1 rebro  
2 dužina bloka  
3 gornja ploha bloka  
4 širina zuba  
5 visina zuba  
6 dubina zuba  
7 ukupna dužina bloka  
8 ukupna visina bloka  
9 smjer nosača

a) blok s horizontalnim šupljinama



Oznake:  
1 rebro  
2 dužina bloka  
3 gornja ploha bloka  
4 širina zuba  
5 visina zuba  
6 dubina zuba  
7 ukupna dužina bloka  
8 ukupna visina bloka  
9 smjer nosača

b) blok s vertikalnim šupljinama

Slika 2. 40: Primjer blokova s horizontalnim i vertikalnim šupljinama, [55]

Svojstva materijala od kojih se izrađuju blokovi za stropne sustave moraju biti u skladu sa zahtjevima propisanim normom HRN EN 13369:2004. Normalni i lakoagregatni betonski blokovi mogu biti izrađeni kao nenasivi, polunosivi i nosivi blokovi (s minimalnim razredom čvrstoće i gustoćom za lakoagregatne betone). Za nosivi blok od lakoagregatnog betona, beton bi trebao biti razreda minimalno LC 12/13, s minimalnom gustoćom od  $800 \text{ kg/m}^3$  prema normi EN 1992-1-1:2004.

Proizvođač blokova prilikom njihove proizvodnje treba definirati razred tolerancije dimenzija betonskih blokova:

- općenito za sve razrede:
  - $\pm 10 \text{ mm}$  za duljinu  $L$ , širinu  $l$  i visinu  $h$ , prikazano na slici 2.41,
  - $\pm 3 \text{ mm}$  za širinu zuba,
- razred T1:

- $\pm 5 \text{ mm}$  za sve ostale dimenzije,
- razred T2:
  - duljina  $L$ :  $\pm 5 \text{ mm}$ ,
  - širina  $l$  i visina  $h$ :  $(0; +5) \text{ mm}$ .

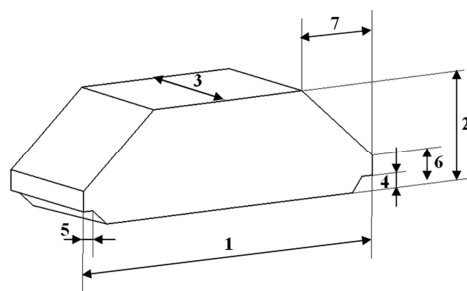
Sukladno točki 4.3.1.2 norme HRN EN 13369:2004 potrebno je ispuniti zahtjeve koji se postavljaju vezano za dimenzije betonskih blokova. Efektivna širina zuba betonskog bloka treba biti veća od:

- minimalne dimenzije razreda N1:  $20 \text{ mm}$ ,
- minimalne dimenzije razreda N2:  $25 \text{ mm}$ .

Gornja ploha nosivog betonskog bloka trebala bi biti minimalno:

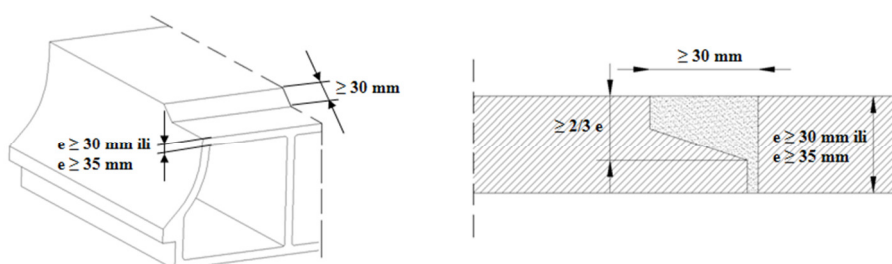
- gornja ploha razreda TF1:  $30 \text{ mm}$  debljine,
- gornja ploha razreda TF2:  $35 \text{ mm}$  debljine.

Nadalje, jedan od krajeva gornje plohe treba imati zub minimalnih dimenzija prikazanih na slici 2.42, kako bi se osigurala veza između susjednih blokova.



Oznake:  
1 širina ( $l$ )      3 duljina ( $L$ )      5 širina zuba      7 horizontalna dimenzija nagiba  
2 visina ( $h$ )      4 visina zuba      6 dubina zuba

Slika 2. 41: Prikaz oznaka i dimenzija betonskih blokova, [55]



Slika 2. 42: Minimalne debljine gornje plohe nosivih betonskih blokova, [55]

Mehanička otpornost predgotovljenih betonskih blokova definirana je normom HRN EN 13369:2004. Proizvođač bi trebao za svaki predgotovljeni blok propisati njegov razred mehaničke otpornosti koji prema normi HRN EN 15037-2:2009 može biti razreda R1 ili R2.

Za blokove razreda R1 potrebno je dokazati:

- otpornost bloka na djelovanje koncentriranog opterećenja, za svaki tip betonskog bloka (vidjeti pod a)),
- karakterističnu tlačnu čvrstoću u horizontalnom smjeru, za nosive i polunosive betonske blokove (vidjeti pod b)).

a) *Otpornost na djelovanje koncentriranog opterećenja*

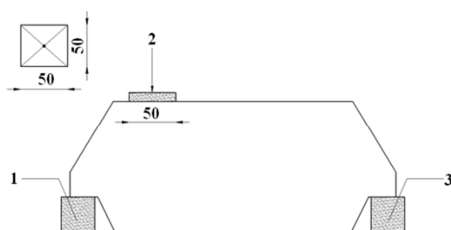
Blokovi su podijeljeni u razrede prema karakterističnom tipu sloma uslijed djelovanja koncentriranog opterećenja. U tablici 2.24 prikazane su minimalne karakteristične vrijednosti otpornosti (5% fraktil) betonskih blokova na djelovanje koncentriranog opterećenja.

Tablica 2. 24: Tipovi betonskih blokova, [55]

| Tip bloka       | Minimalna karakteristična otpornost na koncentrirano opterećenje (5% fraktil) u kN |
|-----------------|--|
| Nenosivi (NR)   | 1,5  |
| Polunosivi (SR) | 2,0  |
| Nosivi (RR)     | 2,5  |

Za nosive i polunosive blokove upotrijebljene u kombinaciji s nosivim betonskim nosačima, bez ugradnje gornjeg sloja in-situ betona, ispitivanje otpornosti na koncentrirano opterećenje može biti zamijenjeno s ispitivanjem na djelovanje vertikalnog opterećenja.

Ispitivanje betonskih blokova na djelovanje koncentriranog opterećenja provodi se na bloku koji se postavi na dva nepomična oslonca, a opterećujemo ga koncentriranom silom kako je prikazano na slici 2.43. Opterećenje  $P$  treba biti nanošeno postupnim povećavanjem intenziteta sile dok ne dođe do sloma uzorka bloka, s brzinom od  $10 \text{ N/s} \pm 3 \text{ N/s}$ . Opterećenje se nanosi na blok preko čelične ili drvene pločice dimenzija  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ , centrirano u horizontalnom smjeru i vertikalno postavljeno u najkritičniju točku s obzirom na čvrstoću bloka.



1 – upeti oslonac    2 - opterećenje P    3 - prilagodljivi oslonac

Slika 2. 43: Shema opterećenja i uvjeti oslanjanja pri ispitivanju bloka opterećenog koncentriranim opterećenjem, [55]  
Karakteristična otpornost na djelovanje koncentriranog opterećenja,  $P_{Rk}$ , treba biti dokazana u skladu sa zahtjevima propisanim u tablici 2.25.

Tablica 2. 25: Kriteriji potvrđivanja karakteristične otpornosti bloka na djelovanje koncentrirane sile, [55]

| Proizvodnja         | Broj blokova "n" | Kriterij 1<br>$\overline{P}_n \text{ (kN)}$ | Kriterij 2<br>$P_i \text{ (kN)}$ |
|---------------------|------------------|---|----------------------------------|
| na početku          | 3                | $\geq 1,2 P_{Rk}$                           | $\geq 0,8 P_{Rk}$                |
| tijekom proizvodnje | $\geq 15$        | $\geq P_{Rk} + 1,48 \sigma$                 | $\geq 0,8 P_{Rk}$                |

Gdje je:

$n$  - broj uzoraka. Čvrstoća uzorka je prosječna vrijednost rezultata dobivenih ispitivanjem čvrstoće na uzorcima,

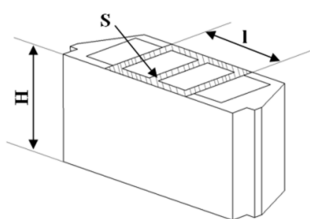
$\bar{P}_n$  - prosječna čvrstoća svih uzoraka tijekom promatranog vremenskog perioda, u kN,

$P_i$  - najmanja čvrstoća svih uzoraka, u kN,

$\sigma$  - standardna devijacija određena na najmanje 35 rezultata ispitivanja u najkraćem periodu od 3 mjeseca.

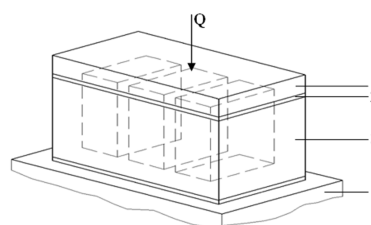
*b) Tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru nosivih i polunosivih blokova*

Ispitivanje horizontalne tlačne čvrstoće nosivih i polunosivih blokova provodi se na betonskim blokovima visine,  $H$ , najmanje 170 mm i širine,  $l$ , najmanje 200 mm, kako je prikazano na slici 2.44. Minimalna propisana tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru za blokove razreda R1 je 20 MPa.



$H \geq 170 \text{ mm}; l \geq 200 \text{ mm}$

Slika 2. 44: Nosivi i polunosivi blokovi za ispitivanje horizontalne tlačne čvrstoće blokova, [55]



1 – kruta ploča za jednoliku raspodjelu opterećenja; 2 – dodatna ploča, ako je potrebna; 3 – ispitni uzorak; 4 – postolja stroja za ispitivanje

Slika 2. 45: Metoda nanošenja opterećenja pri ispitivanju horizontalne tlačne čvrstoće, [55]

Prije početka ispitivanja gornja i donja ploha ispitnog uzorka trebaju biti paralelne. Nejednakost koja se pojavi ne smije biti veća od 0,5 mm. Kako bi se osiguralo jednoliko prenošenje opterećenja preko bloka, pri ispitivanju je potrebno upotrijebiti dodatnu ploču (označenu brojem 1 na slici 2.45) za raspodjelu opterećenja. Umjesto dodatne ploče moguće je koristiti sloj mortu, kojeg treba postaviti poštujući zahtjeve propisane normom HRN EN 15037-2:2009. Opterećenje,  $Q$ , nanosi se kako je prikazano slikom 2.45. Ono se postupno povećava u koracima ne većim od 2MPa/s, a povećava se sve do trenutka sloma uzorka.

Karakteristična tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru,  $f_{bk}$ , treba biti dokazana u skladu s postupkom propisanim u tablici 2.26. Tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru određuje se iz omjera opterećenja pri kojemu je nastupio slom uzorka,  $Q_R$ , i površine na koju djeluje opterećenje, pri čemu se izražava se s točnošću od 0,1 MPa. Površina na koju djeluje opterećenje šrafirana je na slici 2.44 i označena slovom  $S$ .

Tablica 2. 26: Kriterij potvrđivanja karakteristične tlačne čvrstoće betonskog bloka u horizontalnom smjeru, [55]

| Proizvodnja         | Broj blokova "n" | Kriterij 1<br>$\bar{f}_{bn} \text{ (MPa)}$ | Kriterij 2<br>$f_{bt} \text{ (MPa)}$ |
|---------------------|------------------|--|--------------------------------------|
| na početku          | 3                | $\geq f_{bk} + 4$                          | $\geq f_{bk} - 4$                    |
| tijekom proizvodnje | $\geq 15$        | $\geq f_{bk} + 1,48 \sigma$                | $\geq f_{bk} - 4$                    |

Gdje je:

$n$  - broj uzoraka koji se ispituje. Čvrstoća uzorka je prosječna vrijednost rezultata dobivenih ispitivanjem čvrstoće na uzorcima,

$\bar{f}_{bn}$  - prosječna čvrstoća svih uzoraka tijekom promatranog vremenskog perioda, u MPa,

$f_{bi}$  - najmanja čvrstoća svih uzoraka, u MPa,

$\sigma$  - standardna devijacija određena na najmanje 35 rezultata ispitivanja u najkraćem periodu od 3 mjeseca.

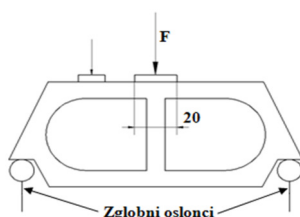
Za blokove razreda R2 potrebno je dokazati:

- čvrstoću pri savijanju (vidjeti pod a)),
- tlačnu čvrstoću u horizontalnom smjeru nosivih i polunosivih blokova (vidjeti pod b)).

#### a) Čvrstoća pri savijanju

Betonski blokovi svih tipova trebali bi podnijeti kontinuirano opterećenje ne manje od  $P = 12L$  (kN) koje djeluje u centru ili u najnepovoljnijoj točki, gdje je  $L$  duljina iskazana u m. Kontinuirano opterećenje ne bi trebalo biti manje od 2 kN.

Čvrstoća pri savijanju predgotovljenih betonskih blokova namijenjenih ugradnji u stropne sustave ispituje se na uzorcima bloka opterećenim kako je prikazano shemom na slici 2.46. Uzorci trebaju biti postavljeni na zglobne oslonce čiji je razmak jednak razmaku na kojemu će blok biti oslonjen u stropnom sustavu. Opterećenje se nanosi u obliku koncentrirane sile,  $F$ , preko trake širine 20 mm postavljene paralelno s osloncima preko koje se prenosi opterećenje kako je prikazano na slici 2.46. , brzinom 200 N/s. Sila se iskazuje u N, a zaokružuje se na vrijednost najbližu 50 N.



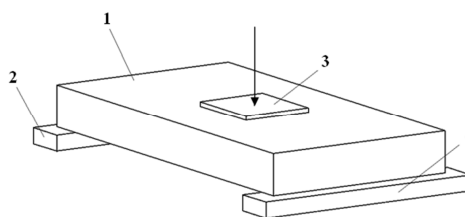
Slika 2. 46: Shema opterećenja i uvjeti oslanjanja pri ispitivanju čvrstoće pri savijanju blokova, [55]

#### b) Tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru novih i polunosivih blokova

Ako proizvođač propiše tlačnu čvrstoću u horizontalnom smjeru od najmanje 16 MPa koja se uzima u obzir pri proračunu gotovog stropnog sustava, tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru nosivih i polunosivih blokova treba biti ispitana na isti način kako je opisano pod a) za blokove razreda R1, a prema točki 5.2.3 norme HRN EN 15037-2:2009.

Ispitivanje čvrstoće u vertikalnom smjeru nosivih i polunosivih betonskih blokova provodi se u slučaju da se takvi blokovi ugrađuju u stropne sustave zajedno s nosivim gredama bez ugradbe završnog sloja betona in-situ. Ispitivanje se provodi na tri uzorka bloka izabrana slučajnim odabirom i njegovana u laboratorijskim

uvjetima pri  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  najmanje 24 sata. Udaljenost između oslonaca na koje se blok oslanja treba biti najmanje jednaka duljini uzorka koji se ispituje umanjenoj za 20 mm, kako je prikazano na slici 2.47.



1 – uzorak; 2 – oslonci;  
3 – čelična pločica; 4 – pomični nosač oslonca

Slika 2. 47: Shema opterećenja i uvjeti oslanjanja pri ispitivanju čvrstoće u vertikalnom smjeru, [55]

Oslonci trebaju biti postavljeni paralelno i prilagođeni tako da blok naliježe na oslonac na svakom kraju  $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ . Uzorci trebaju biti postavljeni centralno na nosače oslonaca, a čelična pločica dimenzija  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 25\text{ mm}$  preko koje se prenosi opterećenje koncentriranom silom treba biti postavljena centralno na gornjoj plohi uzorka. Opterećenje koncentriranom silom od 3,5 kN potrebno je postići nanošenjem opterećenja od 7 kN/min i njegovim zadržavanjem od  $30\text{ s} \pm 5\text{ s}$ .

Otpornost na požar predgotovljenih betonskih blokova za stropne sustave treba biti specificirana u skladu s točkama 4.3.4.1 i 4.3.4.3 norme EN 13369:2004. Za testiranje standardne požarne otpornosti stropnih sustava primjenjuje se Dodatak K norme EN 1365-2. Za blokove koji će se upotrebljavati u elementima u kojima postoji mogućnost izlaganja uvjetima požara proizvođač bi trebao definirati bruto obujamsku masu i sastav betona od kojega je blok napravljen. Bruto obujamsku masu bloka propisuje proizvođač na temelju ispitivanja u skladu s točkom 5.3 norme HRN EN 15037-2:2009. Obujamska masa lakoagregatnih betona ne bi trebala odstupati od one definirane od strane proizvođača za više od  $\pm 10\%$ . Za lakoagregatne blokove, skupljanje uslijed sušenja ispituje se prema točki 5.4 norme HRN EN 15037-2:2009.

Akustička i termička svojstva betonskih blokova propisana su normom za predgotovljene betonske proizvode HRN EN 13369:2004. Trajnosna svojstva betonskih blokova trebala bi biti u skladu s trajnosnim svojstvima koja imaju nosači stropnog sustava u koji se ugrađuju.

Dimenzije bloka određuju se sa točnošću od 1,0 mm, a prema sljedećem postupku:

- dva mjerenja širine bloka na rubnim dijelovima bloka s dvije suprotne strane,
- dva mjerenja duljine i to po jedno na sredini gornje i donje plohe bloka,
- dva mjerenja visine na sredini nasuprotnih bočnih ploha bloka,
- dva mjerenja debljine s nasuprotnih bočnih strana gornje plohe bloka,
- četiri mjerenja debljine rebara unutar bloka, dva na svakom kraju s obje strane bloka,
- širina i dubina zuba: blok se postavi na ravnu površinu, rade se dva mjerenja po jedno u sredini sa svake strane bloka.

Površina betonskog bloka kontrolira se vizualnim pregledom. Blokovi kod kojih se uoče greške na površini, a mogu utjecati na mehanička svojstva, trebaju biti odbačeni. Broj uzoraka bloka potreban za ispitivanja propisan je obzirom na vrstu ispitivanja, a prikazan je u tablici 2.27.

Tablica 2. 27: Broj uzoraka bloka za ispitivanje, [55]

| Vrsta ispitivanja                               | Broj uzoraka blokova koji se ispituju |                        |
|---|---------------------------------------|------------------------|
|   | $n_1$                                 | $n_2$                  |
| Geometrijska svojstva i karakteristike površine | 6                                     | 10                     |
| Mehanička čvrstoća                              | 3 za svako ispitivanje                | 6 za svako ispitivanje |
| Bruto obujamska masa                            | 3                                     | 6                      |
| Skupljanje uslijed sušenja                      | 6                                     | 12                     |

Postupci kontrole proizvodnje predgotovljenih betonskih elemenata propisani normom HRN EN 13369:2004 primjenjuju se i na predgotovljene betonske blokove. Norma HRN EN 15037-2:2009 propisuje postupke i uloge u postupku potvrđivanja sukladnosti predgotovljenih betonskih blokova namijenjenih ugradnji u stropne sustave, a prikazani su u tablicom 2.28.

Tablica 2. 28: Nadzor završenog proizvoda, [55]

|   | Predmet nadzora  | Metoda  | Svrha <sup>a</sup>   | Učestalost <sup>a</sup>   |
|---|--|---|--|---|
| 1 | Dimenzije: širina, visina, duljina, debljina gornje plohe bloka, širina i visina zuba, debljina rebra.   | Prema točki 5.1. norme HRN EN 15037-2:2009  | Sukladnost s propisanim i specificiranim dozvoljenim odstupanjima. | - 6 blokova po 4 000 m <sup>2</sup> stroja, ili<br>- 6 blokova po 30 000 postupaka rada stroja, i u slučaju promjene kalupa.  |
| 2 | Karakteristike površine.   | Vizualna inspekcija.  | Sukladnost s točkom 4.3.2 norme HRN EN 15037-2:2009                | Dnevno.   |
| 3 | Mehanička čvrstoća:<br>- otpornost na djelovanje koncentriranog opterećenja ili čvrstoća u vertikalnom smjeru (ako je mjerodavno),<br>- čvrstoća bloka pri savijanju,<br>- tlačna čvrstoća bloka mjerena u horizontalnom smjeru. | Kako je opisano ranije u ovom poglavlju, odnosno u skladu s točkama 5.2.1, 5.2.2., 5.2.3 i 5.2.4 norme HRN EN 15037-2:2009. | Sukladnost s razredom R1 i R2 propisanim od strane proizvođača.    | - 3 bloka po svakih 5 dana proizvodnje i u različitim danima, ili<br>- 3 bloka po 1 000 m <sup>3</sup> /stroju,<br>3 bloka po 8 000 postupaka rada stroja,<br>-u slučaju promjene glavnih parametara proizvodnje. |
| 4 | Bruto obujamska masa u suhom stanju  | Prema točki 5.3 norme HRN EN 15037-2:2009   | Sukladnost s propisanim vrijednostima od strane proizvođača.       | Jednom godišnje i u slučaju većih promjena u parametrima proizvodnje.   |
| 5 | Skupljanje uslijed sušenja lakoagregatnog betona.  | Prema točki 5.4 norme HRN EN 15037-2:2009   | Sukladnost s propisanim vrijednostima od strane proizvođača.       | Jednom u tri godine i u slučaju promjena sastava betona ili materijala.   |

<sup>a</sup> Navedena ispitivanja i učestalosti mogu se prilagoditi ili čak ukinuti ako se iz proizvoda izravno ili neizravno dobivaju istovjetni podatci.

## **2.4. Požarna otpornost**

Učinak požara na konstrukciju ovisi o upotrijebljenim materijalima pri izvođenju konstrukcije, a najbolje ponašanje pri povišenim temperaturama pokazuje beton. Agregat, kao dominantni materijal u betonu, u velikoj mjeri određuje ponašanje betona u slučaju izloženosti požaru. Od svih građevinskih materijala, beton pruža najbolju požarnu otpornost i ne gori, ne oslobađa toksične plinove i ima izuzetno malu toplinsku provodljivost.

Budući da je za beton nosivost na tlak mjerodavna, ispitivanja tlačne čvrstoće betona na povišenim temperaturama tema su brojnih kako znanstvenih tako i stručnih radova, [56]. Uočeno je da s porastom temperature tlačna čvrstoća betona pada, a naglo opadanje čvrstoće počinje kod temperatura između 300°C i 360°C.

Beton ima prihvatljivo ponašanje do 300°C, ali ni preko te temperature ne nastupa lom konstrukcije. Beton koji je bio izložen djelovanju visoke temperature mijenja boju, smanjuje se tlačna čvrstoća u zavisnosti od kemijskog sastava upotrijebljenog cementa i agregata. Već na temperaturama preko 600°C modul elastičnosti je manji od 10% od vrijednosti prije nastupanja požara, a uzrok sloma konstrukcije vjerojatno će se pripisati gubitku nosivosti armature.

Razaranje strukture betona na visokim temperaturama je posljedica različitih mehanizama razaranja, koji su međusobno zavisni. Sljedeće pojave utječu na razaranje strukture betona, [56]:

- stvaranje tlaka vode,
- kemijske promjene,
- slom armature (pad nosivosti armature),
- promjene dimenzija uslijed povišene temperature.

Kemijske promjene, mala požarna otpornost armature, kao i deformacije poprečnog presjeka pri djelovanju požara su povezani mehanizmi koji dovode do "kolapsa" konstrukcije, [51]. U betonu izloženom djelovanju požara na visokim temperaturama dolazi do kemijskih promjena na cementnoj pasti, a na temperaturi od 100°C voda u porama betona prelazi u vodenu paru i kada pritisak vodene pare prekorači vrijednost koju može podnijeti struktura betona počinje ljuškanje konstrukcije.

Kemijske promjene minerala iz očvrslje cementne paste i agregata pojavljuju se ovisno o temperaturi u betonu. Od 400°C na više dolazi do dehidracije kalcij-hidroksida u očvrsljoj cementnoj pati prema sljedećoj reakciji:  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

Raspadanje cementne paste uzrokuje smanjenje čvrstoće cementne paste, što dovodi do potpunog kolapsa betona. Voda koja je oslobođena u obliku vodene pare dodatno ubrzava proces razaranja, kao što je već opisano u [56].

U slučaju kada u betonu kao agregat koristimo kvarc, temperatura od 575°C uzrokuje transformaciju minerala, što je povezano s povećanjem volumena. Posljedica je prskanje (pucanje) betona i agregata koji sadrži kvarc.



Na temperaturama višim od 800°C, dekarbonatizacija vapnenca se događa prema sljedećoj kemijskoj jednadžbi:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Agregat, koji sadrži vapnenac, se raspada, pri čemu oslobođeni  $\text{CO}_2$  izlazi iz betona kao plin. Ako je put za izlazak plina spriječen, stvara se tlak koji uzrokuje raspadanje strukture betona, [56].

Na temperaturama do 200°C armaturni čelik ne mijenja ponašanje, ali već na temperaturama većim od 600°C nosivost armature je manja od 70%. Iz tog razloga ograničena je vrijednost temperature kojoj čelik smije biti izložen. U praksi se mali gubitci nosivosti toleriraju, tako da se granična vrijednost temperature kreće u području od 250°C do 300°C, [57]. Čelik s malim sadržajem ugljika, što je generalno slučaj kod armaturnog čelika, pokazuje nepravilnosti u ponašanju u području između 200°C i 300°C, [56]. Taj fenomen može biti pripisan strukturalnim promjenama.

Beton, kao i većina materijala, mijenja dimenzije uslijed promjene temperature. Promjene temperature uzrokovane klimatskim uvjetima uzimaju se u obzir tijekom projektiranja u statičkom proračunima konstrukcija, a u fazi izvođenja ugradnjom pomičnih ležajeva. U slučaju požara dolazi do opterećenja konstrukcije značajno višim temperaturama i promjene duljine su odgovarajući veće. Ako je prostor za promjenu duljine nedovoljan mogu se pojaviti sekundarni momenti, uzrokujući kolaps konstrukcije.

#### 2.4.1. Djelovanje požara na beton

Pri djelovanju požara moraju se uzeti u obzir svojstva gradiva ovisna o temperaturi. U ovom poglavlju prikazani su zahtjevi propisanoj normi HRN EN 1992-1-2:1995+AC:1996, koji se postavljaju na beton pri izlaganju požaru. Između ostalog, dane su veličine za umanjenje karakteristične tlačne čvrstoće betona pri djelovanju požara na beton te ostali zahtjevi koje je potrebno poštivati pri projektiranju armiranobetonskih konstrukcija u požarnim situacijama.

Umanjenje karakteristične tlačne čvrstoće betona kao funkcije temperature,  $\theta$ , određeno je koeficijentom  $k_c(\theta)$  prema jednadžbi:

$$f_{ck}(\theta) = k_c(\theta)f_{ck}(20^\circ\text{C}) \quad (26)$$

U pomanjkanju točnijih podataka, za beton sa silicijskim agregatom primjenjuju se niže navedene veličine za  $k_c(\theta)$ . Te su vrijednosti na strani sigurnosti za druge vrste betona.

$$k_c(\theta) = 1,0 \text{ za } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$$

$$k_c(\theta) = (1600 - \theta) / 1500 \text{ za } 100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C}$$

$$k_c(\theta) = (900 - \theta) / 625 \text{ za } 400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 900^\circ\text{C}$$

$$k_c(\theta) = 0 \text{ za } 900^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Čvrstoća i deformabilnost jednoosno naprezanoga betona pri povišenim temperaturama dane su nizom krivulja naprezanje-deformacija koje imaju oblik prema slici 2.48, [58]. Za zadanu temperaturu betona krivulja naprezanje-deformacija određena je s dva parametra:

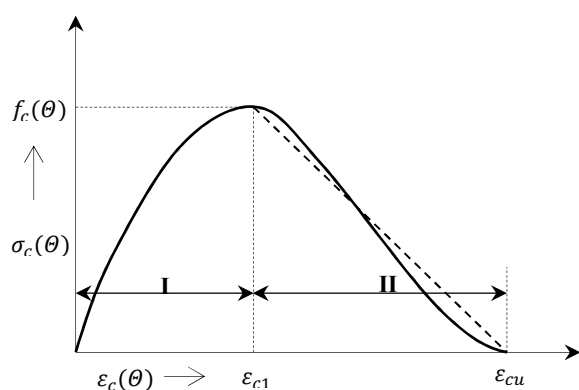
- tlačnom čvrstoćom  $f_c(\theta)$ ,
- deformacijom  $\varepsilon_1(\theta)$  koja odgovara  $f_c(\theta)$ .

Vrijednosti svakog od tih parametara dane su u tablici 2.29 kao funkcija temperature betona. Za međuvrijednosti temperature dopuštena je linearna interpolacija. Grafički prikaz dvaju parametara iz tablice 2.29 dan je na slici 2.49 kao funkcija temperature betona. Daljnji prikaz odnosa naprezanje-deformacija pri različitim temperaturama prikazan je na slici 2.50, [58]. Modul elastičnosti betona uvjetovan je istim faktorima kao i tlačna čvrstoća. Iz slike 2.49 možemo vidjeti da je redukcija modula elastičnosti s porastom temperature veća od redukcije tlačne čvrstoće jer se deformacija pri istoj vrijednosti naprezanja znatno povećava, [59].

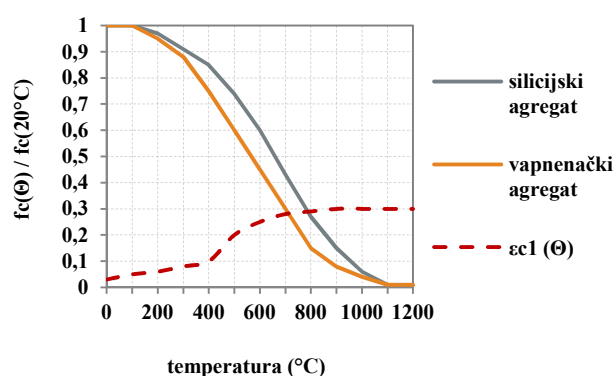
Područje I, slika 2.48:  $f_c(\theta)/f_c(20\text{ }^\circ\text{C})$  i  $\varepsilon_{c1}(\theta)$  treba odabrati u skladu s vrijednostima iz tablice 2.29, a tlačno naprezanje betona pri požaru,  $\sigma_c(\theta)$ , jednako je:

$$\sigma_c(\theta) = f_c(\theta) \left[ \frac{\varepsilon_c(\theta)}{\varepsilon_{c1}(\theta)} \cdot \frac{3}{2 + \left(\frac{\varepsilon_c(\theta)}{\varepsilon_{c1}(\theta)}\right)^3} \right] \quad (27)$$

- Područje II, slika 2.49: za proračun treba uzeti padajuću granu. Dopušteni su linearni i nelinearni modeli.



Slika 2.48: Model odnosa tlačnog naprezanja i deformacije betona sa silicijskim i vapnenačkim agregatom pri povišenim temperaturama, [58]

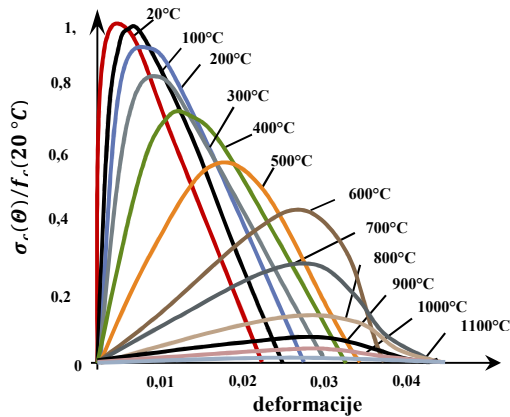


Slika 2.49: Parametri odnosa naprezanje-deformacija za beton pri povišenim temperaturama prema slici 2.48 i tablici 2.29, [58]

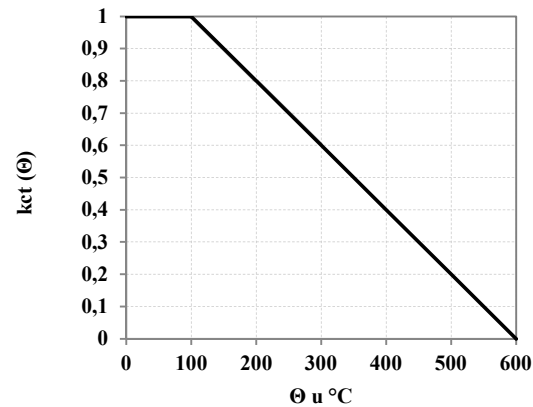
Tablica 2.29: Vrijednosti glavnih parametara odnosa naprezanje-deformacije betona sa silicijskim i vapnenačkim agregatom pri povišenim temperaturama (područje I na slici 2.48), [58]

| Temperatura betona<br>(°C) | $f_c(\theta)/f_c(20\text{ }^\circ\text{C})$ |                    | $\varepsilon_{c1}(\theta) \cdot 10^3$ |
|----------------------------|---|--------------------|---------------------------------------|
|                            | silicijski agregat                          | vapnenački agregat |                                       |
| 20                         | 1,00  | 1,00               | 2,5                                   |
| 100                        | 0,95  | 0,97               | 3,5                                   |
| 200                        | 0,90  | 0,94               | 4,5                                   |
| 300                        | 0,85  | 0,91               | 6,0                                   |
| 400                        | 0,75  | 0,85               | 7,5                                   |
| 500                        | 0,60  | 0,74               | 9,5                                   |
| 600                        | 0,45  | 0,60               | 12,5                                  |
| 700                        | 0,30  | 0,43               | 14,0                                  |
| 800                        | 0,15  | 0,27               | 14,5                                  |
| 900                        | 0,08  | 0,15               | 15,0                                  |
| 1000                       | 0,04  | 0,06               | 15,0                                  |
| 1100                       | 0,01  | 0,02               | 15,0                                  |

Vrijednosti iz tablice 2.29 preporučene su vrijednosti. Zbog različitih načina ispitivanja uzoraka, veličina  $\varepsilon_{c1}(\theta)$  pokazuje znatno rasipanje, koje je pokazano u tablici 2.30. Prikazane su i preporučene vrijednosti  $\varepsilon_{cu}(\theta)$  koje određuju područje na silaznoj grani. Zavisnost naprezanje-deformacije uključuje približno i učinke puzanja pri visokoj temperaturi. Ako se simulira prirodni požar, posebno pri razmatranju silazne temperaturne grane, potrebno je preinačiti ovdje pokazani model gradiva. U svim slučajevima može se uzeti da je granična vlačna čvrstoća betona jednaka nuli, što ja na strani sigurnosti.



Slika 2. 50: Odnos naprezanje-deformacija za beton sa silicijskim agregatom pri jednoosnom tlaku kod povišenih temperatura, [58, 60]

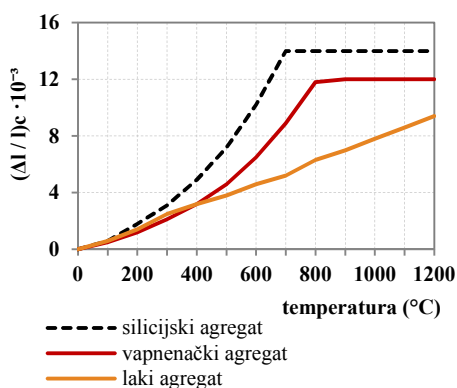


Slika 2. 51: Koeficijent  $k_c(\theta)$  kojim se uzima u obzir umanjenje vlačne čvrstoće betona,  $f_{ctk}$ , pri povišenim temperaturama, [58]

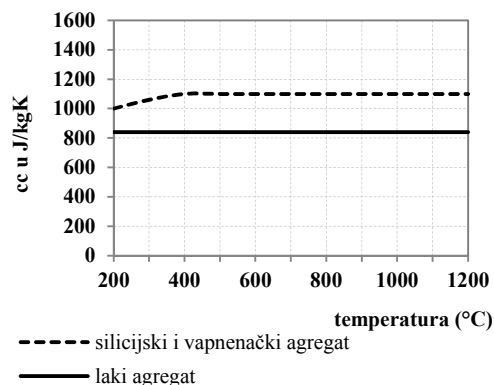
Ako je potrebno uzeti u obzir vlačnu čvrstoću pri upotrebi pojednostavljenoga ili općega postupka proračuna, mogu se uzeti u obzir podatci iz slike 2.51.

Tablica 2. 30: Preporučene vrijednosti za  $\varepsilon_{c1}(\theta)$  i  $\varepsilon_{cu}(\theta)$  i dopušteno područje  $\varepsilon_{c1}(\theta)$ , [58]

| Temperatura betona (°C) | $\varepsilon_{c1}(\theta) \cdot 10^3$ |             | $\varepsilon_{cu}(\theta) \cdot 10^3$ |
|-------------------------|---------------------------------------|-------------|---------------------------------------|
|                         | područje                              | preporučeno |                                       |
| 20                      | 2,5                                   | 2,5         | 20,0                                  |
| 100                     | 2,4 - 4,0                             | 3,5         | 22,5                                  |
| 200                     | 3,0 - 5,5                             | 4,5         | 25,0                                  |
| 300                     | 4,0 - 7,0                             | 6,0         | 27,5                                  |
| 400                     | 4,5 - 10,0                            | 7,5         | 30,0                                  |
| 500                     | 5,5 - 15,0                            | 9,5         | 32,5                                  |
| 600                     | 6,5 - 25,0                            | 12,5        | 35,0                                  |
| 700                     | 7,5 - 25,0                            | 14,0        | 37,5                                  |
| 800                     | 8,5 - 25,0                            | 14,5        | 40,0                                  |
| 900                     | 10,0 - 25,0                           | 15,0        | 42,5                                  |
| 1000                    | 10,0 - 25,0                           | 15,0        | 45,0                                  |
| 1100                    | 10,0 - 25,0                           | -15,0       | 47,5                                  |



Slika 2. 52: Ukupno toplinsko produljenje betona, [58]



Slika 2. 53: Specifična toplina betona, [58]

S porastom temperature dolazi do promjene toplinskih svojstva betona. Ukupno toplinsko produljenje betona  $\Delta l/l$  računajući od 20 °C može se odrediti prema slici 2.52 i jednadžbama propisanim normom HRN ENV 1992-1-2:2004.

Ako se zahtijeva samo približan odgovor (pri jednostavnim proračunima i procjenama), koeficijent toplinskog produljenja,  $\alpha_c = (d(\Delta l/l))/d\theta$ , može se uzeti kao neovisan o temperaturi betona i to:

- za beton sa silicijskim agregatom:  $\alpha_c = 18 \cdot 10^{-6} \cdot \theta$ ,
- za beton s vapnenačkim agregatom:  $\alpha_c = 12 \cdot 10^{-6} \cdot \theta$ ,
- za lakoagregatni beton:  $\alpha_c = 8 \cdot 10^{-6} \cdot \theta$ .

Iz slike 2.52 možemo vidjeti da je toplinsko produljenje sa porastom temperature kod betona normalne težine veće od toplinskog produljenja kod lakoagregatnog betona.

Specifična toplina betona raste s porastom temperature, dok kao posljedica toga toplinska provodljivost opada. Ona se u proračunu požarne otpornosti betona može uzeti u obzir prema jednadžbama propisanim normom HRN ENV 1992-1-2:2004 ili prema slici 2.53. Treba napomenuti da se pri izradi dijagrama prikazanog na slici 2.53 sadržaj vlage u betonu razmatra na razini ravnotežne vlage i da viši sadržaj vlage usporava zagrijavanje betona.

Ako se sadržaj vlage ne razmatra na razini ravnoteže topline i mase, za funkciju danu za specifičnu toplinu betona,  $c_{c\ peak}$ , sa silicijskim i vapnenačkim agregatom mogu se uzeti najveće vrijednosti koje se nalaze između 100 °C i 200 °C, i to:

$c_{c\ peak} = 1875$  J/kgK ako je vlažnost 2% od težine betona, odnosno

$c_{c\ peak} = 2750$  J/kgK ako je vlažnost 4% od težine betona.

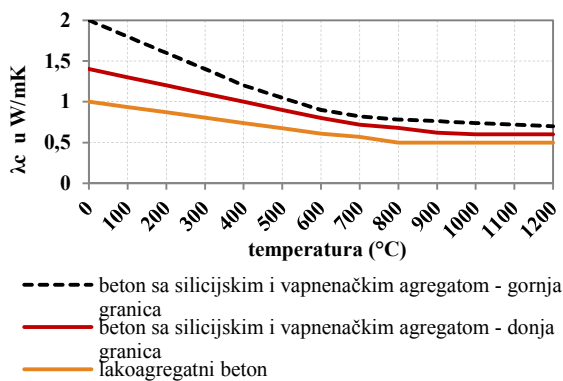
Ako se zahtijeva samo približan podatak može se uzeti da je specifična toplina neovisna o temperaturi betona i da iznosi  $c_c = 1000$  J/kgK za beton sa silicijskim i vapnenačkim agregatom, a  $c_c = 840$  J/kgK za lakoagregatni beton.

Toplinska vodljivost betona,  $\lambda_c$ , može se uzeti prema jednadžbama u Dodatku A norme HRN ENV 1992-1-2:2004, a također i prema slici 2.54 na kojoj su spometue jednadžbe prikazane. Ako se zahtijeva samo približan podatak, može se uzeti da je toplinska vodljivost neovisna o temperaturri i to:

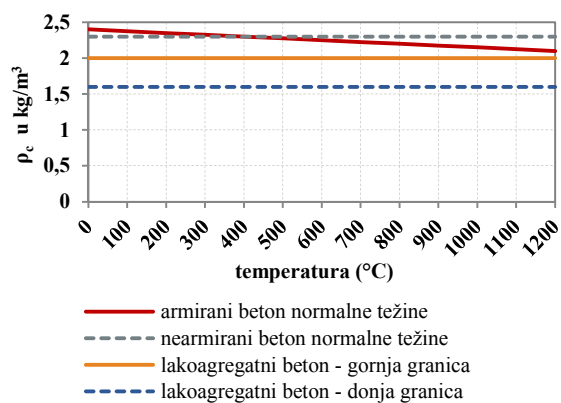
- za beton sa silicijskim agregatom:  $\lambda_c = 1,60$  W/mK,

- za beton sa vapnenačkim agregatom:  $\lambda_c = 1,30 \text{ W/mK}$ ,
- za lakoagregatni beton:  $\lambda_c = 0,80 \text{ W/mK}$ .

Gustoća betona,  $\rho_c$ , za statička opterećenja po EN 1994-1-2:2005 smatra se neovisnom o porastu temperature betona te se može odrediti prema prethodno navedenoj normi. Promjena gustoće se kod toplinskog odgovora uvažava s porastom temperature kako je to prikazano slikom 2.55. Zbog isparavanja vode može se uzeti da se gustoća smanjuje za  $100 \text{ kg/m}^3$  za temperature preko  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sadržaj vlage u betonu može se uzeti jednakim sadržaju ravnotežne vlage. Ako takvi podaci ne postoje, može se uzeti da sadržaj vlage iznosi  $\leq 2 \%$  od težine betona. Visoki sadržaj vlage usporava zagrijavanje betona, ali povećava opasnost odlamanja.



Slika 2. 54: Toplinska vodljivost betona, [58]



Slika 2. 55: Gustoća betona pri visokim temperaturama, [60]

Osim promjena mehaničkih i toplinskih svojstvima betona, pojavljuju se promjene i u njegovom površinskom izgledu, a manifestiraju se kao ljuštenje površine i pojava pukotina. Ljuštenje betona može biti površinsko, može doći do eksplozivnog odlamanja, odvajanje uglova, stvaranje depresija, a do ljuštenja može doći i nakon hlađenja. Najopasnije je naravno eksplozivno odlamanje jer dolazi do odvajanja komadića betona s učinkom eksplozije. Eksplozivno odlamanje je najčešće prouzročeno podizanjem tlaka vode u porama betona i uslijed toga prekoračenjem njegove vlačne čvrstoće tijekom požara, a karakteristično je da se pojavljuje u prvih 30 minuta, [59].

Do pojave pukotina dolazi uslijed naglog povećanja ili smanjenja temperature betona. Primjerice uslijed procesa naglog hlađenja betona tijekom gašenja požara dolazi do naglog stezanja dijelova površine betona što rezultira pojavom pukotina. Također nakon izlaganja betona visokoj temperaturi već od  $100^\circ\text{C}$  uslijed različitog istežanja agregata i cementne paste dolazi do formiranja mikropukotina po površini elementa, [59]. Pojavom pukotina omogućen je prolaz visokih temperatura u unutrašnjost betona te daljnje oštećenje betona. Beton i armatura se uslijed izloženosti visokim temperaturama počinju različito istežati. Armatura se isteže brže te dolazi do stvaranja dodatnih vlačnih naprezanja u blizini armature i u konačnici pojave pukotina.

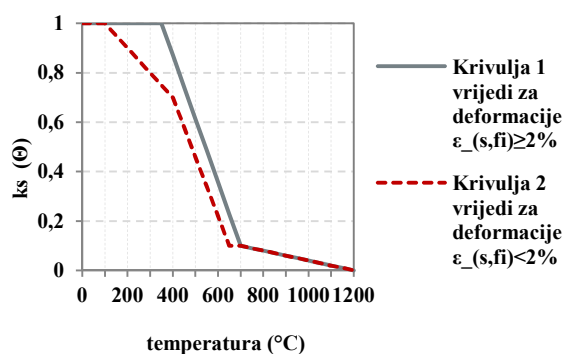
### 2.4.2. Djelovanje požara na čelik

Pri djelovanju požara potrebno je uzeti u obzir svojstva gradiva ovisna o temperaturi, u ovom poglavlju bit će prikazani zahtjevi propisani normama koji se postavljaju na čelik izložen požaru, a koji je sastavni dio armiranobetonskih elemenata. Također su dane veličine za umanjenje karakteristične čvrstoće betonskog čelika pri djelovanju požara te ostali zahtjevi koje je potrebno poštivati pri projektiranju armiranobetonskih konstrukcija u požarnim situacijama.

Umanjenje karakteristične čvrstoće betonskoga čelika kao funkcije temperature,  $\theta$ , određeno je koeficijentom,  $k_s(\theta)$ , prema jednadžbi:

$$f_{sk}(\theta) = k_s(\theta)f_{yk}(20^\circ\text{C}) \quad (28)$$

Ako se koeficijent  $k_s(\theta)$  uzima iz dokumentiranih podataka mora biti izveden na osnovi ispitivanja provedenih pri stalnom naprezanju i pri promjenljivoj temperaturi. U pomanjkanju točnijih podataka, za betonski čelik dopušteno je rabiti vrijednosti  $k_s(\theta)$  prema slici 2.56.



Slika 2. 56: Koeficijent,  $k_s(\theta)$ , umanjenja karakteristične čvrstoće betonskog čelika,  $f_{yk}$ , pri povišenim temperaturama, [58]

Za vlačnu armaturu greda i ploča, gdje je  $\epsilon_{s,fi} \geq 2\%$ , umanjenje čvrstoće može se uzeti kako je niže navedeno i prikazano na slici 2.56.

$$k_s(\theta) = 1,0 \text{ za } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 350^\circ\text{C}$$

$$k_s(\theta) = (6650 - 9\theta)/3500 \text{ za } 350^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}$$

$$k_s(\theta) = (1200 - \theta)/5000 \text{ za } 700^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

Za tlačnu armaturu u stupovima i tlačnim područjima greda i ploča mora se uzeti umanjenje čvrstoće pri deformaciji od 0,25, kako je niže navedeno i prikazano slikom 2.56. To vrijedi i za vlačnu armaturu ako je  $\epsilon_{s,fi} < 2\%$ , kada se upotrebljavaju pojednostavljeni ili opći proračunski postupci.

$$k_s(\theta) = 1,0 \text{ za } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$$

$$k_s(\theta) = (1100 - \theta)/1000 \text{ za } 100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C}$$

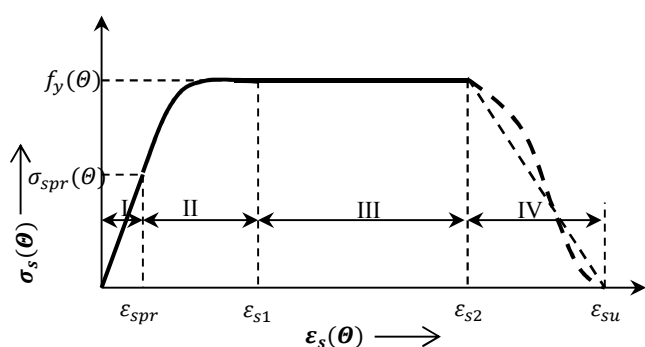
$$k_s(\theta) = (8300 - 12\theta)/5000 \text{ za } 400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 650^\circ\text{C}$$

$$k_s(\theta) = (1200 - \theta)/5500 \text{ za } 650^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

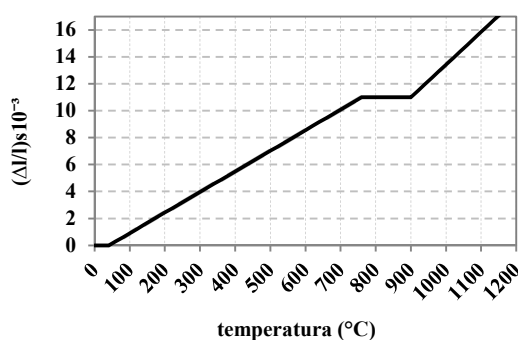
Čvrstoća i deformabilnost čelika pri povišenim temperaturama dani su krivuljama naprezanje-deformacija linearno eliptičnog oblika prema slici 2.57. Za zadanu temperaturu čelika krivulje naprezanje-deformacija na slici 2.57 određene su s tri parametra:

- nagibom linearnog elastičnog područja,  $\bar{E}_s(\theta)$ , za betonski čelik,
- granicom proporcionalnosti,  $\sigma_{spr}(\theta)$ ,
- najvećom razinom naprezanja,  $f_y(\theta)$ .

Vrijednosti svakog od navedenih parametara dane su kao funkcija temperature čelika za različite vrste armature i čelika za prednapinjanje u tablicama u Dodatku A norme HRN ENV 1992-1-2:2004.



Slika 2. 57: Model ovisnosti naprezanje-deformacija za betonski čelik pri povišenim temperaturama, [58]

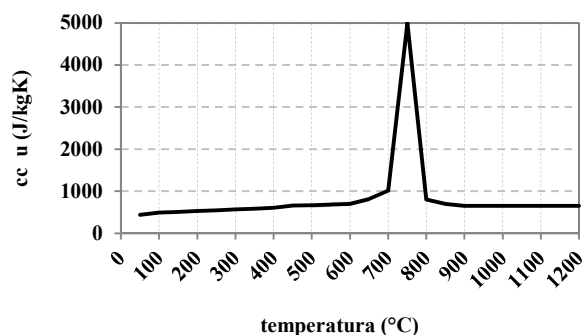


Slika 2. 58: Toplinsko produljenje čelika, [58]

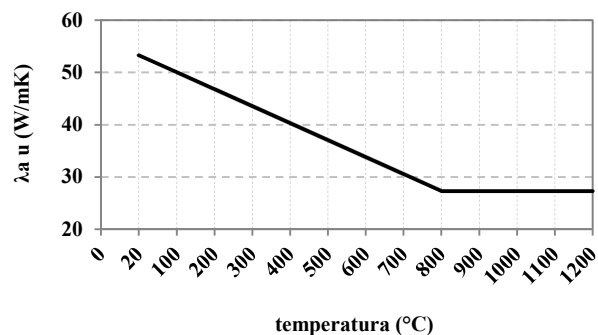
Odnos naprezanje-deformacija uključuje približno i učinak puzanja pri visokoj temperaturi. Kako učinci puzanja nisu izričito razmotreni, taj model gradiva provjeren je jedino za brzinu zagrijavanja sličnu onoj pri standardnim požarnim uvjetima. Ako je brzina zagrijavanja izvan toga područja, potrebno je izričito dokazati pouzdanost čvrstoće i deformacija čelika.

Toplinsko produljenje čelika,  $\Delta l/l$ , može se odrediti iz slike 2.58 i uzima se prema jednadžbama propisanim normom HRN ENV 1992-1-2:2004. Ako se zahtijeva samo približan podatak može se uzeti da je koeficijent toplinskoga produljenja neovisan o temperaturi čelika i jednak je  $(\Delta l/l)_s = 1,4 \cdot 10^{-6} \theta$ .

Kao i kod betona, kod čelika osim toplinskog produljenja pri visokim temperaturama dolazi i do promjena specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinske provodljivosti. Intenzitet tih promjena prikazan je slikama 2.59 i 2.60. Ako je utjecaj armature na porast temperature presjeka od male važnosti, mogu se zanemariti toplinska svojstva čelika odnosno njegova toplinska vodljivost,  $\lambda_s$ , koeficijent toplinskog produljenja,  $\alpha_s$  i specifična toplina,  $c_s$ .



Slika 2. 59: Specifična toplina čelika, [60]



Slika 2. 60: Toplinska vodljivost, [60]

Djelovanje visokih temperatura na vezu između betonskog čelika i betona ima veći utjecaj nego utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću betona. S porastom temperature dolazi do smanjenja vlačne čvrstoće betona i sila adhezije između betona i betonskog čelika. Smanjenje sile adhezije između betonskog čelika i betona uzrokuje nastanak pukotina i smanjenje kapaciteta nosivosti armiranobetonskog elementa.

Kako ne bi došlo do razaranja armiranobetonskog elementa u uvjetima požara uslijed sloma armature, zaštita čelika treba biti izvedena tako da uslijed djelovanja požara na element ne dolazi do prekoračenja temperature od 300°C na koju se zagrijava armatura. Pri temperaturi od 700 °C preostaje otprilike 20 % od nosivosti čelika pri normalnoj temperaturi. Način zaštite armature od djelovanja požara osim prikladnog zaštitnog sloja podrazumijeva i primjenu betona pažljivo odabranog sastava. Sastav betona treba projektirati na način da se uzme u obzir utjecaj visokih temperatura na svaku komponentu betona. Pravilno projektiranim sastavom betona može se postići zaštita od pojave ljuštenja betona, a time i od utjecaja visokih temperatura na betonski čelik.

### 2.4.3. Djelovanje požara na konstrukcije

Cilj požarne zaštite je ograničenje rizika pri djelovanju požara za osobe i društvo, susjednu imovinu i, gdje se to zahtijeva, za imovinu izravno izloženu požaru. Građevina mora biti projektirana i izvedena tako da u slučaju izbijanja požara:

- nosivost građevine ostane sačuvana tijekom određenog vremena,
- ograničeni su nastanak i širenje požara i dima unutar građevine,
- ograničeno je širenje požara na susjedne građevine,
- korisnici mogu napustiti zgradu ili da je na drugi način moguće njihovo spašavanje,
- sigurnost spasilačkih ekipa uzeta je u obzir.

Zahtjevi, prema normi HRN ENV 1992-1-2:2004, koji se postavljaju na ponašanje konstrukcije u požaru su sljedeći:

- ako se zahtijeva da konstrukcije imaju mehaničku otpornost u uvjetima požara, one se moraju proračunati i izvoditi tako da zadrže svoju nosivu funkciju za vrijeme mjerodavne izloženosti požaru – kriterij "R",



- ako se zahtijeva podjela na požarne odjeljke, elementi koji čine odjeljak, uključujući spojeve, proračunavaju se i izvode tako da zadrže svoju razdjelnu funkciju tijekom mjerodavne izloženosti požaru tj.:
  - da ne nastupi gubitak cjelovitosti uzrokovan pukotinama, rupama ili drugim otvorima koji su dostatno veliki da dopuste prodor požara putem vrućih plinova ili plamena – kriterij "E",
  - da ne nastupi gubitak izolacijske sposobnosti uzrokovan temperaturom koja premašuje temperaturu zapaljenja na neizloženoj površini – kriterij "I".

Kriterij "I" smatra se zadovoljenim ako srednji porast temperature pri standardnoj izloženosti požaruna izloženoj površini ne premašuje 140 K i ako najveći porast temperature ne premašuje 180 K. Elementi moraju zadovoljiti kriterije R, E, I na sljedeći način:

- ako su elementi samo razdjelni: E i I,
- ako su elementi samo nosivi: R,
- ako su elementi i razdjelni i nosivi: R, E, I.

Pri djelovanju požara moraju se uzeti u obzir svojstva gradiva ovisna o temperaturi. Standardni požarni uvjeti određeni su za temperature između 20 °C i 1200 °C, a u istim granicama određena su i svojstva gradiva. Proračunske vrijednosti toplinskih i mehaničkih svojstava gradiva,  $X_{d,fi}$ , prema normi HRN ENV 1992-1-2:2004 određene su ovako:

- toplinska svojstva za toplinski proračun:
  - ako je porast svojstva povoljan za sigurnost

$$X_{d,fi} = X_k(\theta) / \gamma_{M,fi} \quad (29)$$

- ako je porast svojstva nepovoljan za sigurnost

$$X_{d,fi} = X_k(\theta) \cdot \gamma_{M,fi} \quad (30)$$

- čvrstoća i svojstva deformacija u proračunu konstrukcije

$$X_{d,fi} = k(\theta) X_k / \gamma_{M,fi} \quad (31)$$

$X_k(\theta)$  - karakteristična vrijednost svojstva gradiva u proračunu na požar, općenito ovisna o temperaturi gradiva,

$X_k$  - karakteristična čvrstoća ili karakteristična deformacija, npr.  $f_{ck}$  i  $f_{yk}$ , za obični toplinski proračun,

$k(\theta) = X_k(\theta) / X_k$  - koeficijent umanjenja čvrstoće ili deformacijskog svojstva ovisan o temperaturi gradiva,

$\gamma_{M,fi}$  - parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstvo gradiva pri proračunu na požar. Za toplinska i mehanička svojstva betona i betonskog čelika u uvjetima izloženosti požaru uzima se  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ .

#### 2.4.3.1. Proračunska situacija i proračunski požar

Proračun na požarno djelovanje podrazumijeva sljedeće korake:

- izbor odgovarajuće proračunske situacije,
- određivanje odgovarajućeg proračunskog požara,
- proračun razvoja temperature u konstrukcijskim elementima,
- proračun mehaničkog ponašanja konstrukcije izložene požaru.

Požar se razvrstava kao izvanredno djelovanje. Da bi se odredila proračunska situacija, treba odrediti proračunski požarni događaj i s njim vezani proračunski požar na temelju prosuđivanja požarnog rizika. Za konstrukcije kod kojih se rizik od požara povećava kao posljedica nekih drugih izvanrednih djelovanja, ovaj rizik treba uzeti u obzir kod određivanja cjelokupnog koncepta sigurnosti. Pri tome valja uzeti u obzir ponašanje konstrukcije ovisno o vremenu i opterećenju prije izvanredne situacije. Za svaki mogući proračunski požarni događaj treba procijeniti proračunski požar u pojedinome požarnom odjeljku zgrade zasebno. Požarni odjeljci projektiraju se tako da spriječe širenje požara na druge požarne odjeljke. Ponašanje konstrukcije pri požaru ovisi o:

- toplinskom djelovanju i njegovom učinku na svojstva materijala posredno na mehaničko djelovanje
- neposrednom učinku na mehaničko djelovanje.

#### 2.4.3.2. Temperaturni proračun i toplinska djelovanja

Potrebno je uzeti u obzir položaj požara u odnosu na element. Za vanjske elemente promatra se izloženost požaru kroz otvore u fasadi i krovu. Za pregradne zidove valja uzeti u obzir izloženost požaru iznutra u promatranom požarnom odjeljku i s vanjske strane uslijed požara u drugim požarnim odjeljcima. Koriste se sljedeći postupci:

- uz korištenje nazivne krivulje ovisnosti temperature o vremenu, temperaturni proračun konstrukcijskog elementa provodi se za određeni vremenski period, bez faza hlađenja,
- uz korištenje modela požara, temperaturni proračun konstrukcijskog elementa provodi se za cjelokupno vrijeme trajanja požara, uključujući i fazu hlađenja.

Toplinsko djelovanje  $h_{net}$  prikazuje se neto toplinskim tokom u vatima po kvadratnom metru površine elementa ( $W/m^2$ ). Ono se određuje kao zbroj prijenosa topline konvekcijom i zračenjem:

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad (32)$$

Prijenos topline konvekcijom određuje se izrazom:

$$h_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (33)$$

$\alpha_c$  - koeficijent prijenosa topline konvekcijom ( $W/m^2K$ ),  $\alpha_c = 25 W/m^2K$ ,

$\theta_g$  - temperatura plina u okolišu elementa izloženog požaru ( $^{\circ}C$ ),

$\theta_m$  - površinska temperatura elementa ( $^{\circ}C$ ).

Za neizloženu stranu razdjelnih elemenata koristi se  $\alpha_c = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Koeficijent prijenosa topline uzima se  $\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$  kada sadržava učinke radijacije.

Prijenos topline zračenjem određuje se izrazom:

$$h_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (34)$$

$\Phi$  - faktor konfiguracije,

$\sigma$  - Stephan-Boltzmanova konstanta ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ),

$\theta_r$  - temperatura okoliša uzrokovana zračenjem ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$\theta_m$  - površinska temperatura elementa ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$\varepsilon_m$  - isijavanje koje se odnosi na površinsku tvar, kada drugačije nije određeno, uzima se  $\varepsilon_m = 0,7$ ,

$\varepsilon_f$  - isijavanje koje se odnosi na požarni odjeljak, obično  $\varepsilon_f = 0,8$ .

Prema europskoj normi EN 1991-1-2 ovi su koeficijenti isijavanja nešto drugačije predstavljeni:

$\varepsilon_m$  - površinsko isijavanje elementa, kada drugačije nije određeno, uzima se  $\varepsilon_m = 0,8$ ,

$\varepsilon_f$  - isijavanje požara je obično  $\varepsilon_f = 1,0$ .

Kada u eurokodovima za pojedine materijale nisu dani podatci, uzima se  $\Phi = 1,0$ . Manjom vrijednošću uzima se učinak položaja i zasjenjenja.

Faktor konfiguracije proračunava se u skladu s dodatkom G norme EN 1991-1-2, [61].

U slučaju elemenata potpuno obuhvaćenih požarom, temperatura zračenja  $\theta_r$  može se predstaviti temperaturom plina  $\theta_g$  oko elementa.

Površinska temperatura elementa  $\theta_m$ , ako je od značaja, proizlazi iz temperaturnog proračuna elemenata, u skladu s pojedinim dijelovima Eurokoda 2 do 6 i dijelom Eurokoda 9, koji se odnose na proračun djelovanja požara.

Temperatura plina  $\theta_g$  može se usvojiti prema nazivnim krivuljama promjene temperature u vremenu, ili u skladu s modelima požara.

#### 2.4.3.3. Temperaturne krivulje

Nazivne krivulje temperatura-vrijeme su:

- normirana krivulja temperatura-vrijeme dana vezom temperature plina u požarnom odjeljku  $\theta_g(^{\circ}\text{C})$  i vremena  $t$  (min):

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (35)$$

- krivulja vanjskog požara dana je vezom temperature plina u blizini elementa  $\theta_g(^{\circ}\text{C})$  i vremena  $t$  (min):

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (36)$$

- ugljikovodična krivulja dana je vezom temperature plina u požarnom odjeljku  $\theta_g(^{\circ}\text{C})$  i vremena  $t$  (min) pri čemu se koristi koeficijent prenošenja topline  $\alpha_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ :

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5,t}) + 20 \quad (37)$$

#### 2.4.3.4. Modeli požara

Prema EN 1991-1-2 modeli prirodnog požara mogu biti jednostavni i to su modeli požara u odjeljcima i lokalizirani požari ili složeni modeli požara. Za požare u odjeljcima koristi se jednolika temperatura kao funkcija vremena, a za lokalizirane požare koristi se nejednolika temperaturna raspodjela u funkciji vremena. Za jednostavne modele požara koeficijent prijenosa topline iznosi  $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Za požare u odjeljcima temperatura plina mora se odrediti iz fizikalnih parametara uzevši u obzir najmanju gustoću požarnog opterećenja i uvjete prozračivanja. Za požarne odjeljke s provjerenim sustavima gašenja, za koje se ipak zahtijeva proračun konstrukcije na požar, može se proračunska gustoća požarnog opterećenja uzeti prema dodatku D hrvatske norme HRN ENV 1991-2-2 (dodatak E europske norme EN 1991-1-2), [61].

Za unutrašnje elemente uzima se u obzir samo doprinos požarnog odjeljka toku topline od zračenja, a temperature plinova mogu se proračunati u skladu s dodatkom B hrvatske norme HRN EN 1991-2-2 (dodatak A europske norme EN 1991-1-2), [61].

Za vanjske elemente komponenta toka topline proračunava se kao zbroj doprinosa požarnog odjeljka i plamena koji je izašao kroz otvore. Za proračun vanjskih elemenata izloženih požaru kroz otvore na pročelju može se upotrijebiti dodatak C hrvatske norme HRN EN 1991-2-2 (dodatak B europske norme EN 1991-1-2), [61].

Metoda proračuna toplinskih djelovanja od lokaliziranog požara dana je u dodatku C europske norme EN 1991-1-2. Složeni modeli požara trebaju uzeti u obzir svojstva plina, izmjenu masa i izmjenu energije o čemu se može više saznati iz dodataka D i E europske norme EN 1991-1-2.

#### 2.4.3.5. Mehanički proračun konstrukcije i mehanička djelovanja

Mehanički proračun provodi se za isto vrijeme trajanja kao i temperaturni proračun. Požarna otpornost utvrđuje se:

- u pogledu vremena:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (38)$$

- ili u pogledu nosivosti:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (39)$$

- ili u pogledu temperature:

$$\theta_d \geq \theta_{cr,d} \quad (40)$$

gdje su:

$t_{fi,d}$  - proračunska vrijednost požarne otpornosti,

$t_{fi,requ}$  - zahtijevano vrijeme požarne otpornosti,

$R_{fi,d,t}$  - proračunska vrijednost otpornosti elementa u požarnoj situaciji u trenutku  $t$ ,

$E_{fi,d,t}$  - proračunska vrijednost važnih učinaka djelovanja u požarnoj situaciji u trenutku  $t$ ,

$\theta_d$  - proračunska vrijednost temperature materijala,

$\theta_{cr,d}$  - proračunska vrijednost kritične temperature materijala.

Prisilna i spriječena izduljenja i deformiranja izazvana temperaturnim promjenama uslijed izloženosti požaru rezultiraju silama i momentima, koji se razmatraju uvijek osim:

- kad se unaprijed može smatrati da su zanemarljivi ili povoljni,
- kad su uračunani uvjetima oslanjanja, rubnim uvjetima, i/ili kad su uzeti u obzir propisanim zahtjevima požarne sigurnosti.

Za procjenu neizravnih djelovanja treba razmotriti sljedeće:

- spriječena toplinska izduljenja samih elemenata, npr. stupova u višekratnim konstrukcijama s krutim zidovima,
- različita toplinska izduljenja u statički neodređenim elementima, npr. kontinuirane ploče međukatnih konstrukcija,
- toplinske gradijente unutar poprečnih presjeka, koji izazivaju unutrašnja naprezanja,
- toplinska izduljenja susjednih elemenata, npr. pomaci vrha stupa uslijed širenja ploče međukatne konstrukcije, ili produljenja zatega,
- toplinsko izduljenje elemenata koji utječu na druge elemente izvan požarnog odjeljka.

Proračunske vrijednosti neizravnih djelovanja  $A_{d,ind}$  određuju se na osnovi proračunskih vrijednosti toplinskih i mehaničkih svojstava gradiva, kao i na osnovi odgovarajuće izloženosti požaru. Neizravna djelovanja od susjednih elemenata ne treba razmatrati, ako se zahtjevi požarne sigurnosti odnose na elemente pod uobičajenim požarnim uvjetima.

Kako bi se dobili mjerodavni učinci djelovanja  $E_{fi,d,t}$  pri izloženosti konstrukcije požaru, mehanička djelovanja kombiniraju se u skladu s hrvatskom normom HRN EN 1991-1 odnosno europskom normom EN 1990 za izvanrednu proračunsku situaciju. Pri tome se za reprezentativnu vrijednost prevladavajućeg promjenjivog djelovanja može koristiti česta vrijednost  $\psi_{1,1}Q_1$ , ali se ipak u sklopu EN 1991-1-2 preporučuje nazovistalna vrijednost  $\psi_{2,1}Q_1$ .

U kombinacije djelovanja može biti potrebno unošenje dodatnih djelovanja u tijeku izlaganja požaru, npr. udar uslijed gubitka nosivosti konstrukcijskih elemenata ili teških strojeva. Požarni zidovi bi trebali biti proračunati na horizontalni udar proračunske energije  $A_d = 3000 Nm$  prema normi EN 1363-2. Pojednostavljenje je moguće kada nije neophodno razmatrati neizravna djelovanja požara, i tada se proračun konstrukcije provodi samo u vremenu  $t = 0$ , a učinci od djelovanja su konstantni za vrijeme izloženosti djelovanju požara. To je moguće kod npr. oslonaca ili rubnih elemenata, kada je proračun dijelova konstrukcije proveden u skladu s dijelovima normi za konstrukcije od pojedinih materijala koji se odnose na požarni proračun. Nadalje, učinci djelovanja mogu se izvesti iz onih koji su određeni u proračunu za uobičajenu temperaturu:

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (41)$$

gdje je:

$E_d$  - proračunska vrijednost učinka od djelovanja iz osnovne kombinacije djelovanja prema normi HRN EN 1991-1,

$E_{fi,d}$  - odgovarajuća konstantna proračunska vrijednost u požarnoj situaciji,

$\eta_{fi}$  - koeficijent umanjenja ovisan o  $\xi = Q_{k,1}/G_k$  što je opći omjer između glavnog promjenjivog i stalnog djelovanja na konstrukciju.

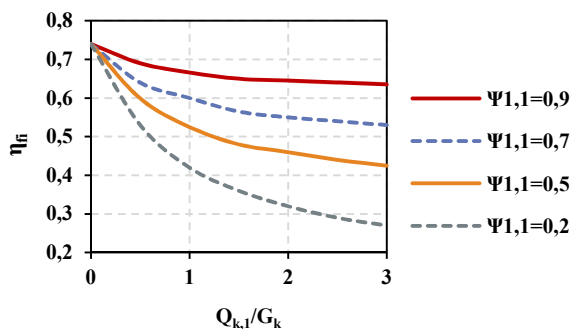
$$\eta_{fi} = (\gamma_{GA} + \psi_{1,1}\xi)/(\gamma_G + \gamma_Q\xi) \quad (42)$$

gdje je:

$\gamma_{GA}$  - koeficijent sigurnosti koji se okvirno uzima s vrijednošću 1,0;

$\psi_{1,1}$  - koeficijent kombinacije.

Na slici 2.61 dana je ovisnost koeficijenta umanjenja  $\eta_{fi}$  o odnosu  $Q_{k,1}/G_k$  za različite koeficijente kombinacije  $\psi_{1,1}$ .



Slika 2. 61: Ovisnost  $\eta_{fi}$  o odnosu  $Q_{k,1}/G_k$  za različite  $\psi_{1,1}$ , [58]

#### 2.4.3.6. Tablični postupak provjere elemenata na požar

Za provjeru normiranih zahtjeva požarne otpornosti pri proračunu elemenata moguće je koristiti tablične postupke prema HRN EN 1992-1-2 + AC, kojima se jednostavno provjeravaju izmjere presjeka i osnih razmaka. U nekim slučajevima potrebne su i jednostavne provjere razine opterećenja i dopunska pravila konstrukcijskih pojedinosti. Moguće je i tablične vrijednosti prilagoditi kada su točnije poznata stvarna naprezanja čelika i betona.

Razdjelni elementi moraju zadovoljiti:

- kriterij E: ne smije nastupiti gubitak cjelovitosti uzrokovan pukotinama, rupama ili drugim otvorima koji su dostatno veliki da dopuste prodor požara putem vrućih plinova ili plamena,
- kriterij I: ne smije nastupiti gubitak izolacijske sposobnosti uzrokovan temperaturom koja premašuje temperaturu zapaljenja na izloženoj površini.

Nosivi elementi moraju zadovoljiti:

- kriterij R: zadržati svoju nosivu funkciju za vrijeme mjerodavne izloženosti požaru.

Elementi koji su i nosivi i razdjelni moraju zadovoljiti kriterije:

- kriterij E,
- kriterij I,
- kriterij R.

Zahtjevi razdjelne funkcije smatraju se ispunjenim ako su najmanje debljine zidova i ploča u skladu s tablicom 2.31.

Tablica 2. 31: Okvirne vrijednosti najmanjih debljina nenosivih (pregradnih) zidova

| Normirana požarna otpornost (min) | Najmanja debljina zida (mm) |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| <b>EI 30</b>                      | 60                          |
| <b>EI 60</b>                      | 80                          |
| <b>EI 90</b>                      | 100                         |
| <b>EI 120</b>                     | 120                         |
| <b>EI 180</b>                     | 150                         |
| <b>EI 240</b>                     | 175                         |

Za nosivu funkciju u sljedećim tablicama dani su najmanji zahtjevi za izmjere presjeka ( $b_{min}$ ) i osni razmak armature ( $a$ ) do ruba betona tako da je omjer proračunskog učinka djelovanja za stanje požara i proračunske otpornosti za stanje požara manji ili jednak jedinici:

$$E_{fi,d}/R_{fi,d} \leq 1,0 \quad (43)$$

Napomena: osni razmak ( $a$ ) je razmak od osi armature (ili težišta skupine šipki) do najbližeg lica betona izloženog požaru. Razlikuje se od zaštitnog sloja koji predstavlja najmanji razmak od površine betona. Požarna otpornost armiranobetonskih nosivih zidova zadovoljavajuća je ako se primjeni tablica 2.32 i neka dodatna pravila dana u normi HRN EN 1992-1-2.

Tablica 2. 32: Okvirne vrijednosti najmanjih izmjera i osnih razmaka za nosive armiranobetonske zidove,[58]

| Normirana požarna otpornost | Najmanje izmjere (mm)<br>debljina zida/osni razmak ( $b_{min}/a$ ) |                        |                        |                        |
|-----------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|
|                             | $\mu_{fi} = 0,35$  |                        | $\mu_{fi} = 0,70$      |                        |
|                             | Izložen s jedne strane   | Izložen s dvije strane | Izložen s jedne strane | Izložen s dvije strane |
| <b>1</b>                    | <b>2</b>   | <b>3</b>               | <b>4</b>               | <b>5</b>               |
| <b>REI 30</b>               | 100/10*  | 120/10*                | 120/10*                | 120/10*                |
| <b>REI 60</b>               | 110/10*  | 120/10*                | 130/10*                | 140/10*                |
| <b>REI 90</b>               | 120/20*  | 140/10*                | 140/25                 | 170/25                 |
| <b>REI 120</b>              | 150/25   | 160/25                 | 160/35                 | 220/35                 |
| <b>REI 180</b>              | 180/45   | 200/45                 | 210/55                 | 300/55                 |
| <b>REI 240</b>              | 230/60   | 250/60                 | 270/70                 | 360/70                 |

\*obično će biti mjerodavan zaštitni sloj prema normi HRN ENV 1992-1-1

U tablici je uvedena razina opterećenja za slučaj požara  $\eta_{fi} = E_{d,fi}/R_{d,fi}$  ( $t = 0$ ) računajući na kombinacije opterećenja i proračunsku nosivost stupa na tlak i eventualno savijanje, uključujući učinke drugog reda. Proračunska duljina jednaka je stvarnoj duljini stupa.

Izmjera  $b$ , tablica 2.33, za stupove izložene samo s jedne strane vrijedi za stupove koji su u ravnini sa zidovima iste normirane požarne otpornosti ili za stupove koji su istaknuti iz zida, ako presjek u širini zida

može prenijeti cjelokupno opterećenje. Bilo koji otvor u zidu mora biti udaljen od stupa najmanje za izmjeru  $b$  danu u stupcu 5. U suprotnom se stup promatra kao da je izložen požaru na više od jedne strane.

Ako je stvarna širina ili promjer  $b$  stupa najmanje jednak  $1,2b_{min}$ , može se smanjiti osni razmak  $a$  do veličine koja nije manja od nazivnog zaštitnog sloja zahtijevanog prema normi ENV 1992-1-1.

Tablica 2. 33: Okvirne vrijednosti najmanjih izmjera i osnih razmaka za armiranobetonske stupove, [58]

| Normirana požarna otpornost | Najmanje izmjere (mm)                       |                   |                   |                          |
|-----------------------------|---|-------------------|-------------------|--------------------------|
|                             | širina stupa/osni razmak ( $b_{min}/a$ )    |                   |                   |                          |
|                             | Stup izložen požaru na više od jedne strane |                   |                   | Izložen na jednoj strani |
|                             | $\mu_{fi} = 0,20$                           | $\mu_{fi} = 0,50$ | $\mu_{fi} = 0,70$ | $\mu_{fi} = 0,70$        |
| 1                           | 2   | 3                 | 4                 | 5                        |
| R 30                        | 150/10*                                     | 150/10*           | 150/10*           | 100/10*                  |
| R 60                        | 150/10*                                     | 180/10*           | 200/10*           | 120/10*                  |
| R 90                        | 180/10*                                     | 210/10*           | 240/35            | 140/10*                  |
| R 120                       | 200/40                                      | 250/40            | 280/40            | 160/45                   |
| R 180                       | 240/50                                      | 320/50            | 360/50            | 200/60                   |
| R 240                       | 300/50                                      | 400/50            | 450/50            | 300/60                   |

\*obično će biti mjerodavan zaštitni sloj prema normi HRN ENV 1992-1-1

Tablica 2. 34: Okvirne vrijednosti najmanjih izmjera i osnih razmaka za slobodno oslonjene armiranobetonske i prednapete grede, [58]

| Normirana požarna otpornost | Najmanje izmjere (mm)   |         |         |         |     |
|-----------------------------|---|---------|---------|---------|-----|
|                             | širina grede/osni razmak ( $b_{min}/a$ ) - moguće kombinacije |         |         |         |     |
| 1                           | 2   | 3       | 4       | 5       | 6   |
| R 30                        | 80/25   | 120/15* | 160/10* | 200/10* | 80  |
| R 60                        | 120/40  | 160/35  | 200/30  | 300/25  | 100 |
| R 90                        | 150/55  | 200/45  | 250/40  | 400/35  | 100 |
| R120                        | 200/65  | 240/55  | 300/50  | 500/45  | 120 |
| R 180                       | 240/80  | 300/70  | 400/65  | 600/60  | 140 |
| R 240                       | 280/90  | 350/80  | 500/75  | 500/70  | 160 |

\*obično će biti mjerodavan zaštitni sloj prema normi HRN ENV 1992-1-1

Dostatna požarna otpornost armiranobetonskih i prednapetih betonskih greda postignuta je ako se primijeni tablica 2.34. Tablica vrijedi za slobodno oslonjene grede izložene požaru bočnim stranama i podgledom.

Prikladne izmjere presjeka radi zaštite armature osigurat će dodatna pravila:

- za grede promjenjive širine najmanja širina mjeri se u osi vlačne armature.
- proračunska visina  $d_{eff}$  donje pojasnice grede I presjeka mora biti veća od:

$$d_{eff} = d_1 + 0,5d_2 \geq b_{min} \quad (44)$$

- ako je stvarna širina donje pojasnice  $b$  veća od granične širine  $1,4b_w$ , mora se povećati osni razmak do armature i čelika za prednapinjanje:



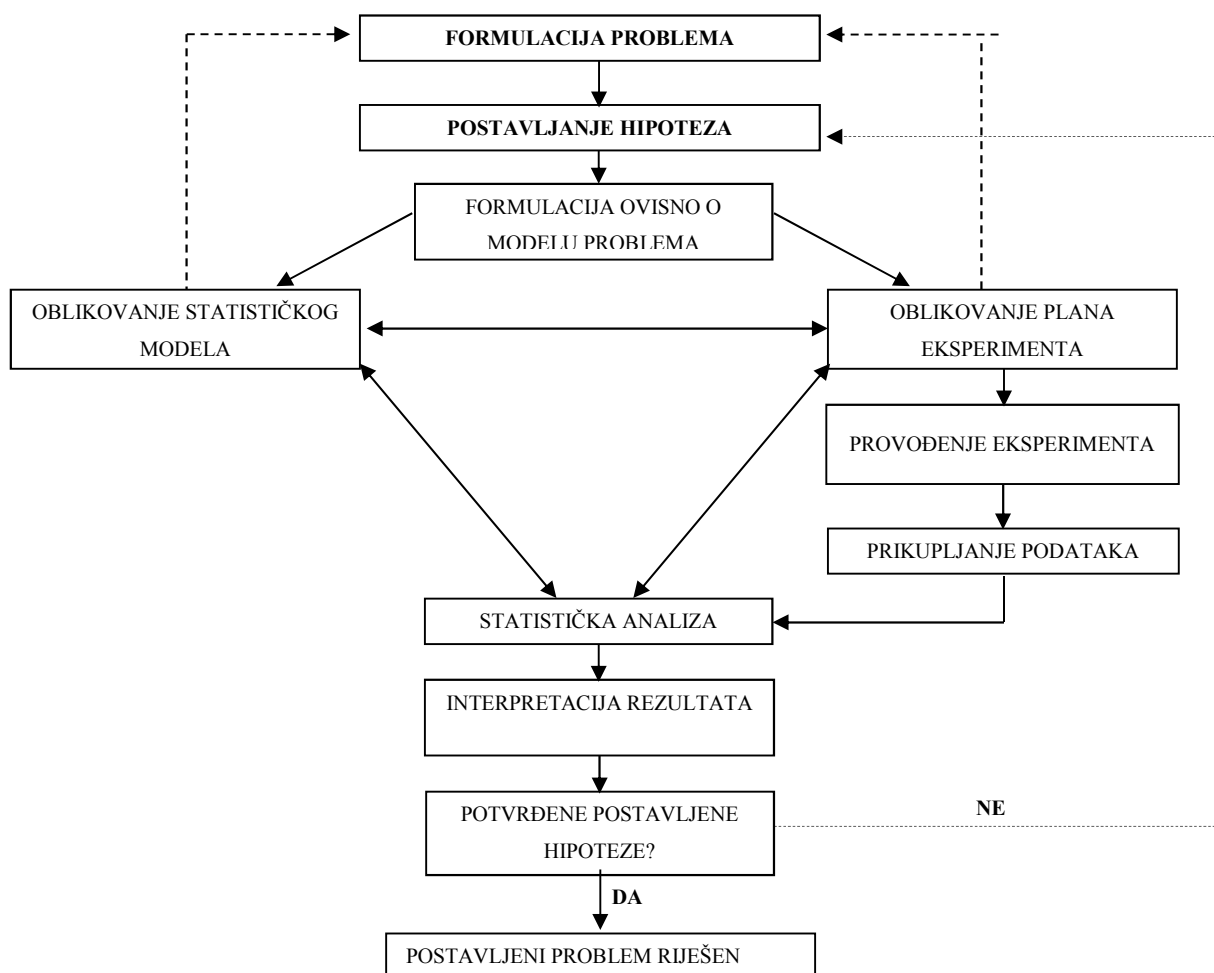
$$a_{eff} = a \left( 1,85 - \frac{d_{eff}}{b_{min}} \sqrt{\frac{b_w}{b}} \right) \geq a \quad (45)$$

- u donjim uglovima greda dolazi do koncentracije viših temperatura pa osni razmak  $a_{sd}$  prema bočnoj strani grede za kutnu šipku pri donjem rubu grede sa samo jednim slojem armature mora biti povećan za 10 mm za širine greda do onih u stupcu 4 tablice 2.34,
- za prednapete grede zahtijevani osni razmak valja povećati za:
  - 10 mm za šipke, za koje je kritična temperatura 400°C,
  - 15 mm za žice i užad, za koje je kritična temperatura 350°C.

### 3 Matematički pristup planiranju eksperimentalnog ispitivanja

Eksperiment je jedna od osnovnih metoda znanstvene spoznaje. Stoga znanstvenici diljem svijeta provode eksperimentalna ispitivanja iz gotovo svih područja ljudske djelatnosti kako bi istražili postojeće teorije ili nove hipoteze te kako bi iste na temelju eksperimentalnog ispitivanja bili u stanju potvrditi ili opovrgnuti.

Eksperimentalna ispitivanja imaju značajnu ulogu u području razvoja novih materijala, inovativne upotrebe postojećih materijala, poboljšanju i razvoju njihovog proizvodnog procesa. Postavljeni cilj eksperimentalnog ispitivanja može uzrokovati komplicirani postupak provedbe ispitivanja zbog velikog broja varijabli koje na cilj mogu utjecati. Stoga je potrebno odabrati postupak planiranja eksperimenta kojim bi se uzele u obzir najvažnije varijable i time smanjio opseg ispitivanja, a da pri tome nije značajno ugrožena točnost rezultata ispitivanja. Shematski prikaz osnovnih koraka u procesu definiranja eksperimenta dan je na slici 3.1, [62, 63].



Slika 3. 1: Osnovni koraci u procesu znanstvenog eksperimentiranja, [62, 63]

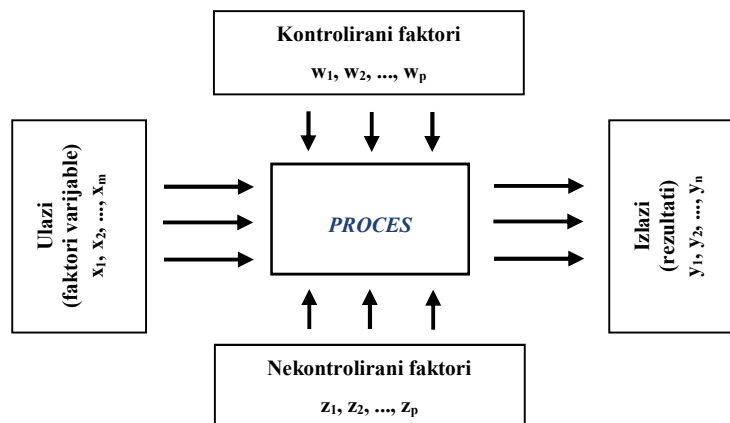
Veliki broj autora bavi se načinom obrade rezultata eksperimenta, tj. raznim statističkim metodama i analizama rezultata eksperimenta. Manji broj autora bavi se i fazom pripreme eksperimenta pod nazivom planiranje eksperimenata (eng. *design of experiments, experimental design*) pri čemu treba odlučiti o broju Ivana Miličević, 2014.

eksperimenata, o izboru promatranih fizikalnih veličina pri pojedinačnom ispitivanju, o vrijednostima ulaznih varijabli za koje će se vršiti ispitivanja i sl. Planiranje eksperimenta ili eksperimentalni dizajn je zapravo metodologija primjene statistike u procesu izvođenja eksperimenta, [64]. Može se koristiti i u laboratorijskim uvjetima (za razvoj novih proizvoda i procesa) i u proizvodnji (za poboljšanje postojećih proizvoda i procesa).

Izbor eksperimentalnog plana ima utjecaj na uspjeh izvođenog eksperimenta, te ovisi o prirodi problema, broju odabranih ulaznih varijabli, broju potrebnih odziva, odnosno izlaznih varijabli, o raspoloživim resursima za eksperiment i vremenu potrebnom za kompletiranje eksperimenta, [64].

To je vrlo važan segment koncepcije eksperimenta jer se provodi s ciljem da se uz što manji broj provedenih eksperimenata i ispitivanja dobije što veći broj kvalitetnih informacija na kojima će se temeljiti model promatranog procesa. Gotovi programi za statističku obradu podataka danas sadrže i algoritme za generiranje uobičajenih planova eksperimenta i popratnu obradu rezultata dobivenih tako izvedenim eksperimentima.

Koncept planiranja eksperimenta temelji se na mogućnosti kontrole svih ulaznih varijabli u procesu eksperimentalnog ispitivanja, te oblikovanje modela po stohastičkom načelu, a radi eliminacije utjecaja nekontroliranih varijabli što je prikazano na slici 3.2, [62, 65].



Slika 3. 2: Opći model postupka provođenja eksperimentalnog ispitivanja, [62, 65]

Planiranje eksperimenta se svodi na odabir ili oblikovanje adekvatnog modela eksperimenta iz već postojećeg kataloga eksperimenata, uzimajući u obzir ograničenja problema ili pak neke od kriterija optimalnosti, [62].

### **3.1. Kratki povijesni pregled razvoja plana eksperimenta**

Uspješna primjena planiranog eksperimenta javlja se još 20-ih i 30-ih godina prošlog stoljeća koju je proveo Roland A. Fisher na eksperimentalnoj postaji Rothamsted (eng. *Rothamsted Experimental Station*), [66]. Eksperimentalna postaja Rothamsted bila je smještena sjeverno od Londona, te prvenstveno namijenjena istraživanjima u poljoprivredi. Fisher je, naime, započeo razvoj pouzdane metode povezanosti između uzroka i efekata, radi analize i proučavanja utjecaja različitih tretmana na prihode žetve.

Iako je metoda planiranja eksperimenta bila prvobitno primijenjena u kontekstu poljoprivrede, 40-ih godina prošlog stoljeća uspješnu primjenu našla je i u vojne i znanstvene svrhe. Besse Day, koji je radio za *U.S. Naval Experimentation Laboratory*, koristio je plan eksperimenta kako bi rješavao probleme kao što su traženje uzroka loših zavora u brodogradilištima tijekom drugog svjetskog rata, [67]. George Box, zaposlen u *Imperial Chemical Industries*, prije dolaska u Sjedinjene Američke Države, bio je voditelj razvoja planiranja eksperimenata vezanih za optimizaciju kemijskih procesa.

Ranih 50-ih godina W. Edwards Deming je japanske znanstvenike poučavao statističkim metodama, uključujući plan eksperimenta, u doba kada je oznaka „*Made in Japan*“ predstavljala proizvode niske kvalitete. Genichi Taguchi, najpoznatiji japanski znanstvenik iz područja planiranja eksperimenta, uveo je metode poboljšanja kvalitete. Jedna od prvih tvrtki u kojoj je Taguchi primijenio svoje metode je Toyota.

Sjedinjene su Američke Države kasnih 70-ih ponovno postale zainteresirane za inicijativu poboljšanja kvalitete, također poznatu pod nazivom „Total Quality“ i „Six Sigma“ programi. Metoda planiranja eksperimenta kasnije je poboljšavana radovima niza autora (Yule, Box, Stu, B. Hunter, Scheffe, Cox, Taguchi i drugi), tako da ona danas predstavlja izvrstan alat za optimizaciju, [64].

### **3.2. Osnovni principi planiranja eksperimenta**

Eksperiment je proces u kojem u strogo kontroliranim uvjetima vršimo promjenu na nezavisnoj varijabli (varijablama) da bismo uzrokovali i izmjerili promjene na zavisnoj varijabli, [68]. Eksperimentalni plan upotrebljava se kako bi eksperiment bio definiran na organiziran i pregledan način te omogućio statističku analizu rezultata eksperimenta, [69-71]. Plan eksperimenta odnosi se na proces planiranja, projektiranja i analizu eksperimenta, na način da temeljem njega mogu biti doneseni valjani i objektivni zaključci, [72]. Uspjeh eksperimentalnog plana ovisi o planiranju, prikladnom odabiru plana, statističkoj analizi podataka i vještinama tima koji radi na eksperimentalnom planu. U metodama planiranja eksperimenta koriste se statističke metode za razvijanje matematičkih modela kojima će se predvidjeti način utjecaja ulaznih (promjenjivih) varijabli na izlaznu varijablu (odziv). Matematički model omogućava istraživaču predviđanje u kakvoj su ovisnosti odzivi o vrijednostima ulaznih varijabli koje nisu bile obuhvaćene eksperimentom.

Osnovna načela planiranja eksperimenta su:

- pravilan izbor plana eksperimenta,
- replikacija eksperimenta,

- korištenje blok-strategije,
- ortogonalnost,
- faktorski pristup planiranju eksperimenta.

**Izbor plana** ovisi o različitom broju čimbenika, npr. o raspoloživim resursima za eksperiment, kompleksnosti plana, lakoći razumijevanja problema, primjeni i prirodi problema, te cijeni i vremenu potrebnom za kompletiranje eksperimenta, [67]. Kako bismo smanjili potreban broj ulaznih varijabli u eksperimentu na tehnički prihvatljiv broj, što podrazumijeva smanjenje potrebnog broja eksperimenata i troškova cijelog eksperimentalnog procesa, preporučuje se izvođenje preliminarnih eksperimentalnih ispitivanja. Također se kao dobra praksa pokazalo i izvođenje niza manjih eksperimentalnih ispitivanja bitnih za razumijevanje ponašanja ispitivanog procesa umjesto skupljanja podataka o istom procesu na temelju jednog opširnog eksperimenta, [64]. Također je nužno izvesti tzv. „dokazne“ eksperimente radi verifikacije rezultata statističkih analiza.

Neki od mogućih uzroka dobivanja nedovoljno dobrih rezultata eksperimentalnog ispitivanja su:

- pogrešan izbor plana eksperimenta,
- nesvrshodan izbor odziva eksperimenta,
- neidentificiranje ključnih varijabli,
- neodgovarajući mjerni sustav,
- nedostatak statističkih znanja, itd.

Pri planiranju eksperimenta postoji razlika između **repliciranja** i **ponavljanja** eksperimenta. Ponavljanje je proces izvođenja većeg broja eksperimentalnih ispitivanja pod istim uvjetima. Replikacija je proizvodjanje proces izvođenja eksperimentalnih ispitivanja, pa zahtijeva ponovno postavljanje uvjeta eksperimentalnog ispitivanja, povećava broj potrebnih uzoraka eksperimentalnog ispitivanja, te su stoga troškovi izvođenja eksperimenta i utrošeno vrijeme znatno veći [3].

Metoda **blok-strategije** koristi se za minimiziranje utjecaja neželjene varijabilnosti faktora na rezultate eksperimentalnih ispitivanja (odzive). Do neželjene varijabilnosti faktora može doći zbog različitih uvjeta osoblja koje izvodi eksperiment, primjerice zbog različitih smjena osoblja tijekom jednog radnog dana, ili zbog razlika od uređaja do uređaja na kojima će se vršiti eksperimentalna ispitivanja, itd.

**Ortogonalnost** u eksperimentu podrazumijeva zahtjev da su ulazne varijable međusobno neovisne čime je rezultat lakše interpretirati. Za upoznavanje i razumijevanje varijabli koje su međusobno povezane potrebno je proučavati obrasce i stupnjeve njihove povezanosti, [73]. Upravo takve postupke pruža nam faktorska analiza koja će u nastavku biti detaljnije prikazana.

**Faktorska analiza** je skup matematičko-statističkih postupaka koji omogućavaju da se većem broju varijabli, među kojima postoji povezanost, utvrdi manji broj temeljnih varijabli koje objašnjavaju takvu međusobnu povezanost. Te temeljne varijable nazivaju se faktori.

Bilo da se radi o istraživanju nekog procesa, laboratorijskom ispitivanju, ispitivanju djelovanja nekog uređaja ili postrojenja prvi je korak izabrati veličinu ili više njih koje najbolje opisuju djelovanje tog sustava, [74]. Ta veličina je rezultat rada cijelog sustava i ona se naziva zavisna ili izlazna varijabla, odnosno odziv.

Također treba odrediti međusobno nezavisne veličine čije promjene imaju utjecaj na odziv, odnosno treba odrediti ulazne varijable koje su međusobno nezavisne (ortogonalne). Takve veličine se nazivaju nezavisne varijable ili faktori. Nakon toga treba planirati i obaviti eksperimentalna ispitivanja, te analizom rezultata doći do zaključka koji faktori i njihova međudjelovanja imaju značajan utjecaj na zavisnu varijablu i koliki je taj utjecaj. Pritom o broju faktora i broju različitih vrijednosti koje može primiti svaki od faktora ovisi i broj i složenost eksperimentalnih ispitivanja. Općenito se plan eksperimenta u tom slučaju naziva faktorski plan (*factorial design*).

Budući da eksperiment najčešće uključuje veliki broj faktora, cilj onoga koji izvodi eksperimentalno ispitivanje je da odredi utjecaj svih tih faktora na izlazne podatke eksperimentalnog ispitivanja. Opći pristup planiranja i provođenja eksperimentalnog ispitivanja naziva se strategijom eksperimentiranja, [65].

Nezavisna varijabla je ona varijabla koja se u eksperiment namjerno unosi i mijenja da bi se provjerilo utječe li na zavisnu varijablu, a ako utječe, da bi se utvrdilo kakav je tip odnosa prema zavisnoj varijabli (linearan, nelinearan ili bilo koji drugi). Zavisna varijabla je ona varijabla koja je predmet opažanja ili/ mjerjenja u eksperimentu. Dva su glavna tipa eksperimenta:

- kada se zavisna varijabla ispituje jedanput uz prisutnost i drugi put uz odsutnost nezavisne varijable. Takav se tip eksperimenta naziva faktorski eksperiment. Faktorski eksperiment nastoji odrediti (ne)postojanje uzročno-posljedične veze između zavisne i nezavisne varijable. Ispitivanje se izvodi s pomoću dvije eksperimentalne situacije: u jednoj je nezavisna varijabla nazočna, a u drugoj nije. Statistički se utvrđuje postoji li značajna razlika u veličini zavisne varijable u tim situacijama. Ako je odgovor pozitivan, tada je utjecaj dokazan.
- funkcionalni eksperiment pretpostavlja postojanje veze nezavisna-zavisna varijabla i nastoji odrediti kakve je vrste ta veza. Nezavisna je varijabla stalno nazočna, ali se u većem broju eksperimentalnih situacija varira njena vrijednost, te bilježi njen utjecaj na zavisnu.

Da bi eksperiment uopće mogao dati bilo kakav odgovor o vezi između ispitivanih varijabli, nužno je postaviti njihov odnos takav da je logički moguće zaključiti da izmjereni rezultati govore nešto o toj vezi. Pri tome vrijede pretpostavke:

- odnos između vrijednosti varijabli i brojčanih vrijednosti je odnos ekvivalencije – nakon što na brojčanim vrijednostima obavimo statističku analizu, imamo pravo tvrditi da je upravo takav odnos i među varijablama,
- moguće je izolirati sve relevantne utjecaje, ili ih barem držati pod kontrolom.

Faktorska analiza omogućuje analizu međuzavisnosti između većeg broja varijabli, u cilju njihove racionalnije klasifikacije i nalaženja temeljnih dimenzija koje se nalaze u osnovi analiziranih varijabli. U temelju faktorske analize stoji načelo parsimonije, što je heuristički naputak koji kaže da u izboru između dva ili više teorijskih objašnjenja neke pojave, prednost treba dati najjednostavnijem. Ispitivanje se obavlja po načelu uspoređivanja aritmetičkih sredina i standardnih devijacija izmjerenih distribucija, na temelju čega je moguće brojčano izraziti koliko je odstupanje između njih, tj. je li veće ili manje od neke kritične vrijednosti (koja govori da je razlika statistički značajna).

Faktorska analiza predstavlja način na koji je subjektivizam moguće svesti na najmanju moguću mjeru u znanstvenom radu. Kako bi se faktorska analiza mogla upotrebljavati u znanstvenom radu i kako bismo iz takve analize mogli dobiti korisne i trajne rezultate, potrebno je zadovoljiti određene uvjete. Upravo je to razlog zbog kojega je potrebno poznavanje preduvjeta koji moraju biti ispunjeni da bi faktorska analiza bila pouzdana i dala relevantne rezultate. Neki od najčešćih nedostataka u objavljenim radovima iz faktorske analize, [75], su sljedeći:

- neadekvatan izbor varijabli,
- nestabilni koeficijenti korelacije,
- zanemarivanje zahtjeva i postulata postupka analize,
- nedovoljna jasnoća iznošenja podataka,
- otkrivanje već dobro utvrđenih faktora,
- otkrivanje slučajnih faktora,
- nepostojanje integracije podataka u teorijske modele,
- ovisnost o programima,
- trivijalne polazne varijable.

Mnogi od spomenutih problema mogu se izbjeći dobrom pripremom istraživanja u kojemu se planira koristiti faktorska analiza. Priprema mora biti sustavna i mora voditi računa o bitnim elementima koji mogu utjecati na rezultate istraživanja, [75, 76].

### 3.3. Metodologija odzivne površine

Metode i planovi eksperimenata koji omogućavaju određivanje jednadžbe ovisnosti odziva o faktorima naziva se metodologija odzivne površine (eng. *response surface methodology, RSM*). Metodologija odzivne površine, u nastavku teksta RSM, sažetak je matematičkih i statističkih metoda kojima se modeliraju i analiziraju utjecaji nekoliko faktora na promatrani odziv. Kao uvjet za uporabu RSM-a trebaju postojati barem dva faktora ( $x_1$  i  $x_2$ ) i jedan odziv ( $y$ ):

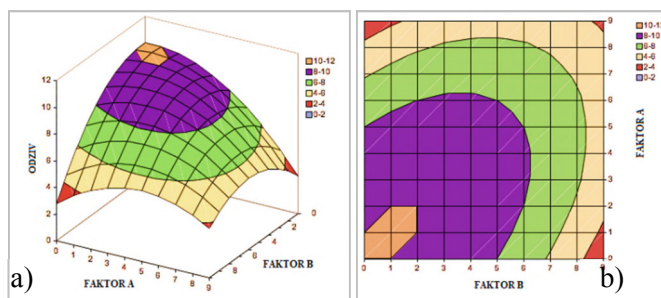
$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (46)$$

gdje je  $f(x_1, x_2)$  model odziva, a  $\varepsilon$  je pogreška modela odziva u odnosu na stvarni odziv. Pretpostavljajući zanemarivost pogreške  $\varepsilon$ , očekivana vrijednost odziva može se aproksimirati modelom odziva pri čemu je to ujedno i funkcija modela grafički prikazana odzivnom površinom:

$$y \approx f(x_1, x_2) \quad (47)$$

U nastavku teksta, ako nije naglašeno drugačije, pogreška  $\varepsilon$  smatrat će se zanemarivom, te će se model odziva skraćeno nazivati odziv pretpostavljajući njihovu jednakost.

Odzivna površina prikazuje se grafički u cijelom eksperimentalnom području, tj. u području kombinacija mogućih razina faktora. Primjerice, na slici 3.3a prikazan je odziv s dva faktora. Kako bi se lakše vizualizirala odzivna površina dvodimenzionalnim prikazom, često se upotrebljava konturni dijagram, slika 3.3b.



Slika 3. 3: Primjer odzivne površine (dva faktora sa po deset razina)

U većini RSM problema, oblik veze između odziva i faktora je nepoznat. Prvi korak u RSM metodi je traženje odziva i odgovarajuće aproksimacijske funkcije  $f$ . Najčešće se koristi polinom nižeg reda u odgovarajućim područjima vrijednosti faktora  $x_i$ . Ako se odziv može modelirati linearnom funkcijom faktora, tada je aproksimacijska funkcija model prvog reda:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (48)$$

Ako postoji nelinearnost i ako linearna funkcija nije odgovarajuća aproksimacija odziva, potrebno je koristiti polinom višeg stupnja. Jednadžba i ispitivanje nelinearne ovisnosti odziva o faktorima može biti vrlo složeno ako se radi o ispitivanju u koje su uključena više od dva faktora. Radi toga se problem ograničava na određivanje modela odziva drugog reda (jednadžbe drugog stupnja) koji za  $k$  faktora glasi:

$$y' = f(x_1, x_2, \dots, x_k) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (49)$$

pri čemu je odziv označen sa  $y$ , faktori sa  $x_i$ , a koeficijente  $\beta$  je potrebno izračunati kako bi što bolje odgovarali eksperimentalno odzivima. Prema tome model uključuje linearni utjecaj faktora, utjecaj njihovih kvadrata i međudjelovanja svaka dva faktora. Da bi se odredilo koeficijente  $\beta$  u jednadžbi (49), potrebno je imati određen broj vrijednosti odziva kao rezultata ispitivanja s nekoliko (svakako više od dvije) razine svakog od faktora. Standardna metoda nelinearne višestruke regresije omogućava određivanje koeficijenata u jednadžbi bez ikakvih pretpostavki o vrijednostima koji su imali faktori u svakom od ispitivanja, [74, 77]. Međutim, s ciljem da se optimalnim izborom vrijednosti pojedinog faktora smanji broj testova i poveća pouzdanost zaključivanja, izgrađeni su planovi eksperimenata za određivanje jednadžbe (48). Kako je malo vjerojatno da je funkcija polinoma prihvatljiva aproksimacija odziva za cijelo područje vrijednosti faktora, uključujući područje izvan eksperimentalnog prostora, model odziva određen je granicama eksperimentalnog prostora.

Eksperimentalni prostor definiran je rasponom u kojem će se varirati razine faktora, tj. ono područje gdje je teoretski, a i praktično moguće izvesti ispitivanja i evaluirati vrijednosti odziva. Eksperimentalni prostor je ujedno i prostor interesa, tj. prostor u kojem je potrebno pronaći funkciju koja definira odnos odziva  $y$  i faktora  $x$ .

Područje operabilnosti je skup svih mogućih stanja eksperimenta koji se mogu izvesti. Prilikom odabira i postavljanja plana eksperimenta jedan od bitnih ograničavajućih čimbenika jest područje operabilnosti, [62].



U praksi se često mogu javiti eksperimentalni prostori koji su ograničeni mogućnošću variranja parametara zbog karakteristika eksperimentalne opreme, iako bi se teoretski mogli varirati.

### 3.4. Vrste faktorskog plana

U nastavku će se pretpostaviti da se pod pojmom ulazne varijable ujedno podrazumijeva da su one međusobno nezavisne (ortogonalne), te će se sukladno tome takve varijable nazivati faktori, a njihove vrijednosti odabrane za provođenje eksperimenta nazivat će se razine faktora. Usto će se za izlaznu (zavisnu) varijablu podrazumijevati da je ona rezultat eksperimentalnog ispitivanja za odabrani skup razina faktora, te će se u nastavku nazivati odzivom.

#### 3.4.1. Potpuni faktorski plan

Potpuni faktorski plan (eng. *full factorial design*) je najpotpuniji plan za pojedinačnu vrijednost faktora, te je potrebno provesti broj eksperimentalnih ispitivanja  $N$  prema sljedećem izrazu:

$$N = n^k \quad (50)$$

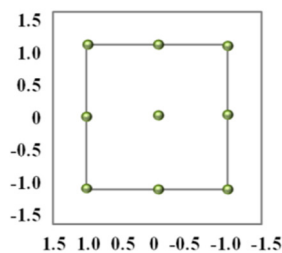
gdje je  $k$  broj faktora, a  $n$  broj razina faktora.

Mnogi eksperimenti uključuju proučavanje efekta dva ili više faktora, te ja za takav tip eksperimenta najdjelotvorniji faktorski pristup projektiranju samog eksperimenta. Pritom efekt definiramo kao promjenu u prosječnom odzivu za dvije različite razine faktora [78]. Pri faktorskom pristupu projektiranja eksperimenta istražuju se sve moguće kombinacije različitih razina faktora za svako novo eksperimentalno ispitivanje ili njegovu replikaciju.

Potpuni  $2^k$  faktorski plan (*full  $2^k$  factorial design*) je plan eksperimenta u kojemu se želi analizirati utjecaj koji na odziv ima  $k$  faktora pri čemu svaki od faktora ima dvije razine odnosno poprima samo dvije različite vrijednosti. Sastavni dio analize rezultata punog  $2^k$  plana je i proračun procjene veličine utjecaja koji pojedini faktor ili međudjelovanje dvaju faktora imaju na odziv, [74].

U  $2^k$  faktorskom planu faktori poprimaju samo po dvije različite vrijednosti pa analiza rezultata podrazumijeva linearnu ovisnost odziva o pojedinom faktoru. Takvu je pretpostavku često teško unaprijed prihvatiti već je potrebno proširiti ispitivanja i na više različitih razina svakog od faktora da bi se tek nakon ispitivanja i analize rezultata zaključilo o obliku ovisnosti odziva o faktorima, [74]. Općenito je cilj odrediti jednadžbu ovisnosti odziva o faktorima na osnovi rezultata obavljenih ispitivanja, dakle cilj je odrediti jednadžbu regresije, (48), (49).

U slučaju dva faktora i pod pretpostavkom da ovisnost nije linearna u odnosu na faktore, jednadžba (49) predstavlja plohu u trodimenzionalnom prostoru. Nelinearna jednadžba ovisnosti može se odrediti i za više od dva faktora i tada je nije moguće predočiti u trodimenzionalnom prostoru, jer je riječ o plohi u višedimenzionalnom prostoru. Slika 3.4 prikazuje eksperimentalni prostor za potpuni faktorski plan za dva faktora sa tri razine.



Slika 3. 4: Eksperimentalni prostor za potpuni faktorski plan sa dva faktora na tri razine

### 3.4.2. Djelomični faktorski plan eksperimenta

U slučaju kada nije moguće provesti zahtijevani broj eksperimenata prema potpunom faktorskom planu zbog ekonomskih ili vremenskih razloga, moguće je upotrijebiti djelomični faktorski plan (eng. *fractional factorial design*) kod kojeg je broj potrebnih ispitivanja znatno smanjen. To utječe na količinu informacija koje se mogu izvući iz provedenih ispitivanja. U tom planu zanemaruju se određena međudjelovanja, odnosno zamjenjuje ih se određenim brojem glavnih faktora. Za djelomični plan kaže se da nema potpuno rješenje (eng. *resolution*), nego je ono određenog stupnja.

Djelomični faktorski plan uključuje pretpostavku da su efekti međusobno združeni (eng. *confounded*). Efekti su međusobno združeni ako njihove izračunate vrijednosti mogu biti pripisane samo njihovu zajedničkom djelovanju na odziv, a ne njihovim individualnim utjecajima,[76].

U djelomičnom faktorskom planu efekti koji su od primarnog interesa trebali bi biti nezdruženi s ostalim efektima ili združeni s efektima koji imaju neznatan utjecaj na eksperimentalne rezultate. Istraživač, prije realizacije eksperimenta, treba znati koji od efekata su združeni. Djelomični faktorski eksperimenti određeni su s tzv. definiranimirajućim kontrastom  $I$  (eng. *defining contrast*), [65]. Definirajući kontrast  $I$  je generator pojedine frakcije/dijela. Primjerice, kako bismo proveli djelomični faktorski plan sa tri razine sa dva faktora  $A$  i  $B$  neophodno je definirati razine  $x_1$  i  $x_2$  za oba faktora kao 0, 1 ili 2 i odrediti kontrast  $I$ . Primjerice, možemo odabrati kontrast  $I$  jednak:

$$I = AB^2 \tag{51}$$

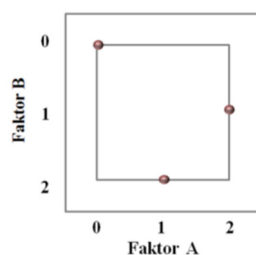
Tada istraživač može po volji odabrati jednu frakciju od sljedećih ponuđenih opcija:

$$x_1 + 2x_2 = 0 \text{ mod } 3, \tag{52}$$

$$x_1 + 2x_2 = 1 \text{ mod } 3, \tag{53}$$

$$x_1 + 2x_2 = 2 \text{ mod } 3, \tag{54}$$

te izvesti eksperiment koji zadovoljava izabranu funkciju (52) do (54). Slika 3.5 prikazuje eksperimentalni prostor za djelomični faktorski plan za navedeni primjer gdje je frakcija odabrana prema jednadžbi (53).



Slika 3. 5: Eksperimentalni prostor za djelomični faktorski plan - dva faktora po tri razine, jedan definirajući kontrast ( $n = 3, k = 2, m = 1$ )

Primjenjujući kontrast  $I$  broj eksperimenata koje je potrebno izvesti smanjuje se u usporedbi s potpunim faktorskim pristupom, pri čemu se broj eksperimenata  $N$  određuje prema izrazu:

$$N = n^{k-1} \quad (55)$$

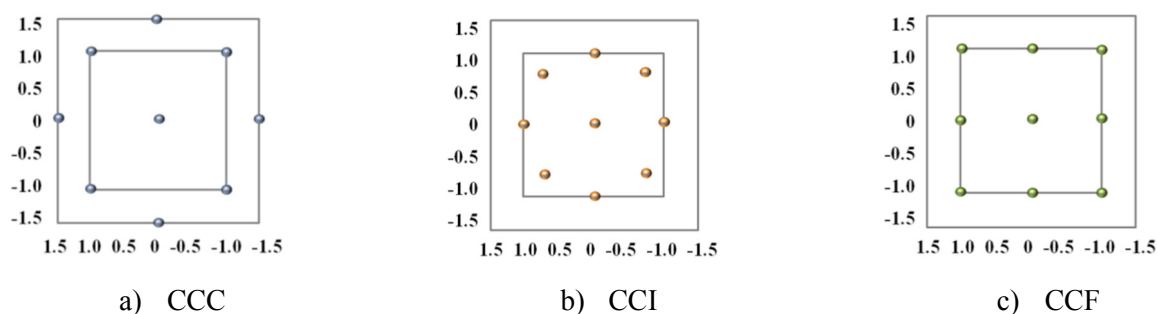
Svaki dodatni definirajući kontrast smanjuje broj eksperimenata na jednak način, a prema izrazu:

$$N = n^{k-m} \quad (56)$$

gdje je  $m$  broj definirajućih kontrasta.

### 3.4.3. Centralno kompozitni plan eksperimenta

Kako bi se dodatno smanjio broj potrebnih eksperimentalnih ispitivanja, za opis nelinearnih sustava koristi se centralno kompozitni plan eksperimenta, koji se svrstava u nefaktorijalne planove, [79]. Centralno kompozitni plan (eng. *central composite design, CCD*) najčešće je primjenjivan plan eksperimenata za određivanje jednadžbe regresije drugog stupnja. Pritom je svaki faktor variran na pet razina, ali se ne upotrebljavaju sve kombinacije razina. Umjesto toga CCD se sastoji od potpunog  $2^k$  plana čije se točke u prikazu eksperimentalnog prostora nazivaju točke kocke, [74], kojima je dodan određen broj centralnih točaka i  $2k$  tzv. aksijalnih točaka koje su po dvije na svakoj osi jednako udaljene od središta i one se nazivaju točke zvijezde, slika 3.6.



Slika 3. 6: Primjer centralno kompozitnog plana eksperimenta ( $k=2$ )

Ukupni broj eksperimenata u centralnom kompozitnom planu iznosi:

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (57)$$

pri čemu je  $k$  broj faktora, a  $n_0$  broj ponavljanja eksperimenta za razine faktora definirane centralnom točkom.

S obzirom na pozicioniranje odabranog CCD-a u eksperimentalnom prostoru, on može imati tri različita oblika:

- opisani centralno kompozitni plan eksperimenta (*Circumscribed CCD, CCC*), s razinama faktora:  $(-\alpha, -1, 0, 1, \alpha)$ , slika 3.6a
- upisani centralno kompozitni plan eksperimenta (*Inscribed CCD, CCI*), s razinama faktora:  $(-1, -1/\alpha, 0, 1/\alpha, 1)$ , slika 3.6b
- plošno centriran kompozitni plan eksperimenta (*Faced CCD, CCF*), s razinama faktora:  $(-1, 0, 1)$ , slika 3.6c,

gdje udaljenost aksijalnih točaka  $\alpha$  iznosi:

$$\alpha = \sqrt[4]{2^n} \quad (58)$$

Udaljenost aksijalnih točaka od ishodišta  $\alpha$  i broj centralnih točaka ovisi o broju faktora. Centralna točka CCD-a daje informaciju o nelinearnosti u odzivu, dok aksijalne točke daju mogućnost efikasne procjene parametara drugog reda, [62]. Tako sastavljen plan približno zadovoljava uvjete ortogonalnosti i rotabilnosti, [65]. Također se može se reći da se ispunjavanjem tih uvjeta postiže nezavisnost informacija koje se mogu izvući iz provedenog plana, a time i pouzdanije zaključivanje.

Svojstvo rotabilnosti podrazumijeva procjenu odziva jednake preciznosti u svim točkama područja operabilnosti koje su jednako udaljene od središta plana eksperimenta [78], tj. plan eksperimenta je rotabilan ako predviđanje odstupanja od stvarne vrijednosti ovisi samo o udaljenosti točke plana eksperimenta od centra plana, [80].

Kad god je moguće vrijednosti razina varirati po volji, preporučljivo je koristiti CCD plan eksperimenta. Velika prednost CCD plana je mogućnost sekvencijalnog izvođenja, [79]. Naime, istraživanje se može započeti upotrebom faktorijalnog plana na dvije razine. Ako se pokaže da je linearni model neadekvatan i nakon dodavanja centralne točke (nezanimariva pogreška  $\epsilon$ , (46)), istraživanje se može proširiti dodatnim mjerenjima uvodeći aksijalne točke CCD plana.

#### **3.4.4. Box-Behnkenov plan eksperimenta**

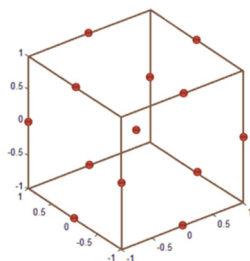
Ako su vrijednosti razina fizički ograničene na strogo definirane vrijednosti za određeni proces ili sustav, te time nije moguće upotrijebiti CCD plan [18], koristi se metoda Box-Behnkenovog planiranja eksperimenta. Box-Behnkenov plan ima nižu pouzdanost od CCD plana eksperimenta, te spada u skupinu nezavisnih kvadratnih planova eksperimenta koji nije temeljen na punom ili djelomičnom faktorskom planu, [62].

Kombinacije razina faktora čine glavna stanja eksperimenta, koja su na polovicama stranica eksperimentalnog prostora, uz centralnu točku. Box-Behnkenov plan smatra se rotabilnim s naglaskom da

se koriste tri razine za svaki faktor. Zahtijevani broj eksperimenata koje je potrebno izvesti prema Box-Behnkenovu planu eksperimenta određuje se prema izrazu:

$$N = 2k(k - 1) + n_0 \quad (59)$$

pri čemu svaki faktor ima tri razine (-1, 0, +1), slika 3.7., te je  $k$  broj faktora, a  $n_0$  broj ponavljanja eksperimenta za razine faktora definirane centralnom točkom.



Slika 3. 7: Primjer Box-Behnkenovog dizajna ( $k=3$ )

Prednost upotrebe Box-Behnkenovog plana je u slučaju ograničenog eksperimentalnog prostora zbog nemogućnosti izvođenja eksperimenta na samim vrhovima eksperimentalnog prostora, čime je smanjen i broj potrebnih eksperimenata, [62]. Smanjenje broja eksperimenata je izražena prednost u odnosu na CCD kod modela sa četiri i više faktora, [62, 81].

### 3.4.5. Usporedba planova eksperimenta

U tablici 3.1 prikazana su važna svojstva spomenutih eksperimentalnih planova, te će se ona u poglavlju 4. Preliminarna eksperimentalna ispitivanja uzeti u obzir pri odabiru plana s obzirom na zahtjeve i mogućnosti realizacije preliminarnih ispitivanja.

Tablica 3. 1: Svojstva eksperimentalnih planova: CCC, CCI, CCF i Box-Behnkenovog plana

| Plan eksperimenta | Razine faktora                  | Broj eksperimenata | Rotabilnost | Svojstvo  |
|-------------------|---------------------------------|--------------------|-------------|---|
| CCC               | $-\alpha, -1, 0, 1, \alpha$     | $N=2^k+2k+n_0$     | DA          | Dobar unutar cijelog operabilnog prostora eksperimenta.   |
| CCI               | $-1, -1/\alpha, 0, 1/\alpha, 1$ |                    | NE          | Dobar unutar centralnog dijela operabilnog prostora eksperimenta.                                     |
| CCF               | $-1, 0, 1$                      |                    | NE          | Dovoljno dobar unutar cijelog operabilnog prostora eksperimenta, loš za čiste kvadratne koeficijente. |
| BB                | $-1, 0, 1$                      | $N=2k(k-1)+n_0$    | DA          | Kao i CCI, iako su ekstremne vrijednosti pri tome slabo procijenjene.                                 |

## 4. Preliminarna eksperimentalna ispitivanja

Kako bismo došli do spoznaja o predgotovljenim betonskim elementima s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom, kao konačnim ciljem doktorske disertacije, potrebno je provesti preliminarna eksperimentalna ispitivanja svojstava komponenti betona i samog betona s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom. Stoga su u ovom poglavlju opisana preliminarna eksperimentalna ispitivanja te plan eksperimentalnog ispitivanja temeljem kojega su ispitivanja provedena.

### 4.1. Plan eksperimenta za preliminarna ispitivanja betona s drobljenim opekarskim lomom

Kako bismo mogli optimirati mješavinu betona s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom potrebno je dobiti osnovna svojstva betonskih mješavina s različitim udjelima njegovih komponenti koje bi trebale biti značajne za samu betonsku mješavinu.

Svako svojstvo bit će optimirano upotrebom RSM kako bismo u konačnici dobili model drugog reda prikazanog u izrazu (49) gdje je odziv  $y$  model pojedinog svojstva betona, faktori  $x$  su komponente betona, a parametre  $\beta$  je potrebno izračunati kako bi odziv  $y$  što bolje odgovarao eksperimentalno dobivenim rezultatima  $y$ . Nakon toga, mješavina betona s drobljenim opekarskim lomom će biti optimirana uzimajući u obzir jednu od metoda višekriterijskog odlučivanja (eng. *multi-criteria decision*).

Kako bismo dobili model drugog reda nužna je upotreba plana eksperimenta kod kojega faktor može imati najmanje tri razine. Iz tog razloga razmotrene su mogućnosti korištenja potpunog faktorskog plana u kojemu faktor ima tri razine, djelomičnog faktorskog plana, centralnog kompozitnog plana kao i Box-Behnkenovog plana eksperimenta [6].

Navedeni planovi će biti uspoređeni uzimajući u obzir provedivost eksperimenta s obzirom na ekonomske i vremenske zahtjeve.

Tablica 4.1. prikazuje osnovna svojstva betona s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom koja bi trebala biti ispitana, broj potrebnih uzoraka za svako pojedino ispitivanje svojstava betona i troškove ispitivanja temeljene na prosječnoj cijeni ispitnih laboratorija u Hrvatskoj u srpnju 2011. godine.

Tablica 4. 1: Sumarni prikaz potrebnih ispitivanja i njihovih troškova

| Svojstvo               | Gustoća        | Poroznost          | Konzistencija | Tlačna čvrstoća        | Vlačna čvrstoća | Apsorpcija             | Skupljanje od sušenja |
|------------------------|----------------|--------------------|---------------|------------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|
| Broj uzoraka           | 0 <sup>2</sup> |                    |               | 3                      | 3               | 0 (3) <sup>3</sup>     | 3                     |
| Cijena                 | 10 €           | 20 €               | 10 €          | 60 €                   | 60 €            | 225 €                  | 900 €                 |
| Svojstvo               | Puzanje        | Modul elastičnosti | Abracija      | Termička provodljivost | Vatrootpornost  | Smrzavanje/odmrzavanje |                       |
| Broj uzoraka           | 3              | 6                  | 1 serija      | 2                      | 30              | 3                      |                       |
| Cijena                 | 1200 €         | 600 €              | 130 €         | 750 €                  | 1200 €          | 750 €                  |                       |
| <b>Ukupni troškovi</b> | <b>5915 €</b>  |                    |               |                        |                 |                        |                       |

<sup>2</sup> Ispitivanja se provode na svježem betonu.  
<sup>3</sup> Uzorci su isti za više različitih ispitivanja.

Cijena materijala i proizvodnje betonskih mješavina i njihovih uzoraka, kao i troškovi radnih sati potrebnih za proizvodnju izračunati su s obzirom na potreban broj uzoraka za ispitivanja na svježem i očvrslom betonu. Navedeni troškovi za uzorke i ispitivanja navedena u tablici 3.2 iznose 240 € što rezultira ukupnim troškom ispitivanja jedne betonske mješavine od: 240 € + 5915 € = 6155 €.

Faktori koji su važni za optimizaciju mješavine betona, a stoga i korišteni u planu eksperimenta su sljedeći:

- faktor 1: cement,
- faktor 2: vodocementni omjer (v/c),
- faktor 3: dodatak betonu,
- faktor 4: postotak udjela drobljenog crijepa frakcije 0-4 mm,
- faktor 5: postotak udjela drobljenog crijepa frakcije 4-16 mm,
- faktor 6: postotak udjela drobljene opeke frakcije 0-4 mm,
- faktor 7: postotak udjela drobljene opeke frakcije 4-16 mm.

Granice svakog od navedenih faktora prikazane su u tablici 4.2., pri čemu gornja i donja granica faktora odgovara normiranim razinama faktora  $-a$  i  $+a$  samo za CCC plan eksperimenta. Za sve ostale planove eksperimenta donja i gornja granica odgovaraju normiranim razinama faktora  $-1$  i  $1$ . Sve ostale upotrijebljene razine faktora mogu se jednostavno izračunati upotrebljavajući definirane gornje i donje granice razine faktora.

Tablica 4. 2: Granice faktora

| Faktor   | Komponente betona  | Donja granica | Gornja granica |
|----------|--|---------------|----------------|
| Faktor 1 | Cement, (kg)   | 300           | 500            |
| Faktor 2 | v/c  | 0,40          | 0,60           |
| Faktor 3 | Dodatak betonu, (%)                                      | 0,0           | 1,0            |
| Faktor 4 | Postotak udjela drobljenog crijepa, frakcije 0-4 mm,(%)  | 0,0           | 50             |
| Faktor 5 | Postotak udjela drobljenog crijepa, frakcije 4-16 mm,(%) | 0,0           | 50             |
| Faktor 6 | Postotak udjela drobljene opeke, frakcije 0-4 mm,(%)     | 0,0           | 50             |
| Faktor 7 | Postotak udjela drobljene opeke, frakcije 4-16 mm, (%)   | 0,0           | 50             |

Donje i gornje granice u tablici 4.2 odabrane su s obzirom na dosada provedena ispitivanja i preporuke iz literature, što je detaljno vidljivo iz poglavlja 2. *Pregled literature*. Postotak prirodnog agregata (PA%), koji je također jedan od komponenti betona, nije uzet kao faktor jer nije nezavisna varijabla, tj. za svaku od frakcija (par faktora 4 i 6, te par faktora 5 i 7) ovisi o postotku upotrebljenog drobljenog crijepa (DC%) i postotku upotrebljene drobljene opeke (DO%) prema izrazu:

$$PA\% = 100\% - DC\% - DO\% \quad (60)$$

Postotak udjela DC i DO za svaku od frakcija ograničen je prema izrazu:

$$DC\% + DO\% \leq 100\% \quad (61)$$

što je dodatni razlog za odabir raspona vrijednosti navedenog u tablici 4.2 za par faktora 4 i 6, i za par faktora 5 i 7. Naime, u slučaju šireg raspona navedenih faktora svi predviđeni eksperimenti ne bi mogli biti

izvedeni, jer neke kombinacije vrijednosti faktora ne bi zadovoljavale izraz (61). Primjerice, za raspon faktora 4 i 6 kod kojega je donja granica 0 % i gornja granica 66,6% ne bi bilo moguće izvesti sve eksperimente predviđene prema planu eksperimenta, tj. ne bi se mogli izvesti eksperimenti kod kojih bi vrijednosti obaju navedenih faktora trebali biti jednaki 66 %, jer tada ne bi vrijedila nejednakost (61):  $66\%+66\%>100\%$ . Navedeno također vrijedi i za par faktora 5 i 7.

Prema potpunom i djelomičnom faktorskom planu eksperimenta potrebno je izvesti značajno veći broj eksperimentalnih ispitivanja u usporedbi s centralno kompozitnim i Box-Behnkenovom planom eksperimenta.

Tablica 4. 3: Broj eksperimentalnih ispitivanja obzirom na vrstu plana eksperimenta

| Eksperimentalni plan              | Potpuni faktorski plan | Djelomični faktorski plan | CCC | CCI | CCF | BB |
|-----------------------------------|------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|----|
| Broj eksperimentalnih ispitivanja | 2187                   | 729                       | 143 | 143 | 143 | 62 |

Uzimajući u obzir podatke o potrebnom broju eksperimentalnih ispitivanja iz tablice 4.3 te ukupni trošak jedne mješavine betona od 6155 € možemo zaključiti kako su iz vremenskih i financijskih razloga potpuni plan, djelomični faktorski plan te centralno kompozitni plan neprihvatljivi. Box-Behnkenov plan eksperimenta je odabran iz sljedećih razloga:

- prihvatljiv broj potrebnih eksperimentalnih ispitivanja uzimajući u obzir vremenske i financijske zahtjeve,
- ispunjeni uvjeti rotabilnosti.

U tablici 4.4 prikazan je Box-Behnkenov plan eksperimenta prema kojemu će biti izvedena preliminarna ispitivanja na betonu s opekarskim lomom kao agregatom. Box-Behnkenov plan eksperimenta izrađen je uz pomoć programa Matlab, Version 7.8.0.347 (naredba *bbdesign*).

Tablica 4. 4: Sastav betonskih mješavina prema Box-Behnkenovom planu eksperimenta

| Mješavina BM | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Faktor 1     | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 300 | 300 | 300 | 300 | 500 | 500 |
| Faktor 2     | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Faktor 3     | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Faktor 4     | 0   | 0   | 0   | 0   | 50  | 50  | 50  | 50  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  |
| Faktor 5     | 0   | 0   | 50  | 50  | 0   | 0   | 50  | 50  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  |
| Faktor 6     | 0   | 50  | 0   | 50  | 0   | 50  | 0   | 50  | 0   | 0   | 50  | 50  | 0   | 0   |
| Faktor 7     | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 0   | 50  | 0   | 50  | 0   | 50  |
| PA (0-4 mm)  | 100 | 50  | 100 | 50  | 50  | 0   | 50  | 0   | 75  | 75  | 25  | 25  | 75  | 75  |
| PA (4-16 mm) | 75  | 75  | 25  | 25  | 75  | 75  | 25  | 25  | 75  | 25  | 75  | 25  | 75  | 25  |
| Mješavina BM | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  |
| Faktor 1     | 500 | 500 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Faktor 2     | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.6 |
| Faktor 3     | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Faktor 4     | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 0   | 50  | 0   | 50  |
| Faktor 5     | 25  | 25  | 0   | 0   | 50  | 50  | 0   | 0   | 50  | 50  | 25  | 25  | 25  | 25  |
| Faktor 6     | 50  | 50  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  |



|                     |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Faktor 7            | 0         | 50        | 0         | 50        | 0         | 50        | 0         | 50        | 0         | 50        | 25        | 25        | 25        | 25        |
| PA (0-4 mm)         | 25        | 25        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 75        | 25        | 75        | 25        |
| PA (4-16 mm)        | 75        | 25        | 100       | 50        | 50        | 0         | 100       | 50        | 50        | 0         | 50        | 50        | 50        | 50        |
| <b>Mješavina BM</b> | <b>29</b> | <b>30</b> | <b>31</b> | <b>32</b> | <b>33</b> | <b>34</b> | <b>35</b> | <b>36</b> | <b>37</b> | <b>38</b> | <b>39</b> | <b>40</b> | <b>41</b> | <b>42</b> |
| Faktor 1            | 500       | 500       | 500       | 500       | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       | 300       | 300       |
| Faktor 2            | 0.4       | 0.4       | 0.6       | 0.6       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       |
| Faktor 3            | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0         | 0         | 0         | 0         | 1         | 1         | 1         | 1         | 0         | 0         |
| Faktor 4            | 0         | 50        | 0         | 50        | 0         | 0         | 50        | 50        | 0         | 0         | 50        | 50        | 25        | 25        |
| Faktor 5            | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 0         | 50        |
| Faktor 6            | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        |
| Faktor 7            | 25        | 25        | 25        | 25        | 0         | 50        | 0         | 50        | 0         | 50        | 0         | 50        | 25        | 25        |
| PA (0-4 mm)         | 75        | 25        | 75        | 25        | 75        | 75        | 25        | 25        | 75        | 75        | 25        | 25        | 50        | 50        |
| PA (4-16 mm)        | 50        | 50        | 50        | 50        | 75        | 25        | 75        | 25        | 75        | 25        | 75        | 25        | 75        | 25        |
| <b>Mješavina BM</b> | <b>43</b> | <b>44</b> | <b>45</b> | <b>46</b> | <b>47</b> | <b>48</b> | <b>49</b> | <b>50</b> | <b>51</b> | <b>52</b> | <b>53</b> | <b>54</b> | <b>55</b> | <b>56</b> |
| Faktor 1            | 300       | 300       | 500       | 500       | 500       | 500       | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       |
| Faktor 2            | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.4       | 0.4       | 0.4       | 0.4       | 0.6       | 0.6       | 0.6       | 0.6       |
| Faktor 3            | 1         | 1         | 0         | 0         | 1         | 1         | 0         | 0         | 1         | 1         | 0         | 0         | 1         | 1         |
| Faktor 4            | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        |
| Faktor 5            | 0         | 50        | 0         | 50        | 0         | 50        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        |
| Faktor 6            | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 0         | 50        | 0         | 50        | 0         | 50        | 0         | 50        |
| Faktor 7            | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        |
| PA (0-4 mm)         | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 75        | 25        | 75        | 25        | 75        | 25        | 75        | 25        |
| PA (4-16 mm)        | 75        | 25        | 75        | 25        | 75        | 25        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        |
| <b>Mješavina BM</b> | <b>57</b> | <b>58</b> | <b>59</b> | <b>60</b> | <b>61</b> | <b>62</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Faktor 1            | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       | 400       |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Faktor 2            | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Faktor 3            | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       | 0.5       |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Faktor 4            | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Faktor 5            | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Faktor 6            | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Faktor 7            | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        | 25        |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PA (0-4 mm)         | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PA (4-16 mm)        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        | 50        |           |           |           |           |           |           |           |           |

Troškovi eksperimentalnog ispitivanja, provedenog prema planu Box-Behnkena, a uzimajući u obzir ispitivanja navedena u tablici 4.1 i broj ispitivanja prikazan u tablici 4.4, iznose:  $6155 \text{ €} * 62 = 381\,610 \text{ €}$  što se može smatrati neisplativim. Naime, ispitivanje svojstava kao što su apsorpcija, skupljanje od sušenja, puzanje, abrazija, termička provodljivost, vatrootpornost i otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja jest suviše ako beton ne zadovoljava osnovna svojstva. Stoga su za preliminarnu fazu eksperimentalnog ispitivanja izabrana ispitivanja osnovnih svojstva betona u svježem i očvrslom stanju. Osnovna svojstva koja su ispitana prikazana su u tablici 4.5., te se u nastavku mogu smatrati odzivom  $y$  pri planiranju eksperimenta.

Tablica 4. 5: Popis ispitivanja svojstava betona u preliminarnoj fazi eksperimentalnog ispitivanja

| Svojstva betona                       | Broj uzoraka po mješavini | Oblik i dimenzije uzorka                             | Starost uzorka | Ispitna metoda     |
|---------------------------------------|---------------------------|--|----------------|--------------------|
| <b>Ispitivanja na svježem betonu</b>  |                           |  |                |                    |
| Gustoća                               | 1                         | -  | -              | HRN EN 12350-6     |
| Sadržaj pora                          | 1                         | -  | -              | HRN EN 12350-7     |
| Konzistencija slijeganjem             | 1                         | -  | -              | HRN EN 12350       |
| <b>Ispitivanja na očvrslom betonu</b> |                           |  |                |                    |
| Tlačna čvrstoća                       | 3/6                       | Kocka 15cm x15cm x15cm<br>Kocka 10cm x 10 cm x 10 cm | 28 i 56 dan    | HRN EN 12390-3     |
| Vlačna čvrstoća savijanjem            | 3                         | Prizma<br>10cm x10cm x40cm                           | 56 dan         | HRN EN 12390-5     |
| Statički modul elastičnosti pritiskom | 6                         | Prizma<br>10cm x10cm x30cm                           | 56 dan         | HRN U.M1.025.1982. |

U slučaju ispitivanja samo osnovnih svojstava betona, troškovi materijala, proizvodnje i radnih sati iznose 62 €, dok su troškovi ispitivanja jedne mješavine 760 € (tablice 4.1 i 4.5). Ukupni troškovi preliminarnih ispitivanja iznose:  $(760 \text{ €} + 62 \text{ €}) * 62 = 50\,964 \text{ €}$ . Cilj preliminarnih ispitivanja jest utvrđivanje modela drugog reda (49) za svako od osnovnih svojstava prikazanih u tablici 4.5, kao odziva  $y_p$  ( $p = 1, 2, \dots, 9$ ) na faktore  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) prikazane u tablici 4.2. Na temelju modela odredit će se vrijednosti faktora za koje će svako od osnovnih svojstava imati prihvatljivu vrijednost. Nakon toga će se odabranim kriterijom višekriterijske optimizacije odabrati optimalne mješavine na kojima će biti izvršena ispitivanja svojstava betona navedena u tablici 4.1, a koja nisu obuhvaćena preliminarnim ispitivanjima (tablica 4.5). Troškovi ispitivanja svake od mješavina iznosit će  $5915 \text{ €} - 760 \text{ €} = 5155 \text{ €}$ . U ovom slučaju troškovi materijala i proizvodnje jedne mješavine, uključujući i sate rada, iznose  $240 \text{ €} - 62 \text{ €} = 178 \text{ €}$ , čime ukupni troškovi izrade i ispitivanja jedne mješavine iznose  $5155 \text{ €} + 178 \text{ €} = 5333 \text{ €}$ . Ukupni troškovi, primjerice u slučaju odabrane tri mješavine, u usporedbi s troškom od **381 610 €** znatno bi bili smanjeni:  $50\,964 \text{ €} + 5\,333 \text{ €} * 3 = 66\,963 \text{ €}$ .

## 4.2 Rezultati preliminarnih ispitivanja

### 4.2.1. Ispitivanje svojstva agregata

Kao agregat za spravljanje mješavina betona korištena je drobljena opeka, drobljeni crijep i dolomit. Dolomit nije bilo potrebno nikako dodatno obrađivati jer je bio čist bez ikakvih onečišćenja i razdvojen na frakcije. Drobljena opeka i crijep zdrobljene u krugu tvornice i dopremljene su na mjesto izrade betonskih mješavina. Budući da su i drobljena opeka i drobljeni crijep nastali kao otpad pri proizvodnji novih opekarskih elemenata također nije bila potrebna nikakva dodatna obrada u smislu čišćenja materijala jer je on potpuno čist.

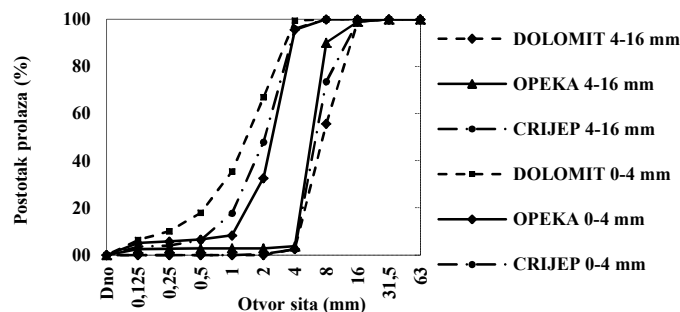
Kako bi se drobljena opeka i drobljeni crijep mogli koristiti kao agregati za beton bilo je potrebno dokazati da su primjerena zamjena uobičajeno korištenom prirodnom agregatu. Sukladno navedenom provedena su ispitivanja svojstava agregata predviđena normom HRN EN 12620 Agregati za beton:

- određivanje granulometrijskog sastava

- određivanje indeksa oblika zrna krupnog agregata
- udio prašinastih čestica
- određivanje gustoće i upijanja vode
- ispitivanje kemijskih svojstava agregata
- ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata: otpornost na drobljenje
- ispitivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje: ispitivanje magnezijevim sulfatom.

#### 4.2.1.1. Granulometrijski sastav

Drobljena opeka i crijep su ručno prosijani na frakcije 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm. Frakcije 4-8 mm bilo je u vrlo malim količinama u odnosu na preostale dvije frakcije jer se drobljenje opeke i crijepa provodi na drobilicama u krugu tvornice za proizvodnju opekarskih proizvoda i ne postoji mogućnost dodatnog reguliranja veličine zrna na koju se drobi opeka ili crijep. Dodatni trošak bi bio nositi materijal iz tvornice na drobilice na kojima postoji mogućnost regulacije veličine zrna te stoga ta opcija nije razmatrana. Kao frakcije koje smo koristili u daljnjim ispitivanjima uzeli smo sitnu frakciju (0-4 mm) i krupnu (4-16 mm). Granulometrijski sastav drobljene opeke i crijepa te dolomita korištenih u daljnjim ispitivanjima prikazan je slici 3.8. Krivulje prikazane na slici 3.8. dobivene su kao srednje vrijednosti tri prosijavanja pojedinog agregata.



Slika 4. 1: Krivulje prosijavanja agregata

Na temelju granulometrijskog sastava određeni su razredi agregata prikazani u tablici 4.6. Iz tablice je vidljivo da drobljena opeka i drobljeni crijep zadovoljavaju zahtjeve propisane normom HRN EN 12620 i Tehničkim propisom za betonske konstrukcije (TPBK) te se mogu koristiti kao zamjena uobičajeno korištenom prirodnom agregatu.

Tablica 4. 6: Razredi agregata prema HRN EN 12620

| Vrsta agregata | Frakcija         | Zahtjev prema HRN EN 12620                         | Razred                   | Zadovoljava - razred |
|----------------|------------------|--|--------------------------|----------------------|
| <b>Opeka</b>   | Sitna (0-4 mm)   | $D \leq 4$ i $d=0$                                 | $G_F85$                  | DA – $G_F85$         |
|                | Krupna (4-16 mm) | $D/d \leq 2$ ili $D11,2$<br>$D/d > 2$ i $D > 11,2$ | $G_C85/20$<br>$G_C90/15$ | DA - $G_C90/15$      |
| <b>Crijep</b>  | Sitna (0-4 mm)   | $D \leq 4$ i $d=0$                                 | $G_F85$                  | DA – $G_F85$         |
|                | Krupna (4-16 mm) | $D/d \leq 2$ ili $D11,2$<br>$D/d > 2$ i $D > 11,2$ | $G_C85/20$<br>$G_C90/15$ | DA - $G_C90/15$      |
| <b>Dolomit</b> | Sitna (0-4 mm)   | $D \leq 4$ i $d=0$                                 | $G_F85$                  | DA – $G_F85$         |
|                | Krupna (4-16 mm) | $D/d \leq 2$ ili $D11,2$<br>$D/d > 2$ i $D > 11,2$ | $G_C85/20$<br>$G_C90/15$ | DA - $G_C90/15$      |

#### 4.2.1.2 Indeks oblika zrna krupnog agregata

Oblik zrna krupnog agregata određen je prema normi HRN EN 12620 razredom indeksa oblika zrna na uzorcima drobljene opeke, drobljenog crijepa i dolomita. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 4.7., a dobiveni su kao srednja vrijednost od po tri provedena postupka ispitivanja indeksa oblika za svaku frakciju. Razred indeksa oblika zrna odabran je prema zahtjevima norme HRN EN 933-4. Tehničkim propisom za betonske konstrukcije propisan je najveći dopušteni razred indeksa oblika zrna  $SI_{20}$  za konstruktivne betone te je iz tablice 4.7 vidljivo da sva tri agregata zadovoljavaju propisani zahtjev.

Tablica 4. 7: Razred indeksa oblika zrna

| Opis                   | Oznaka | Jedinica mjere | Izračunata vrijednost | Razred indeksa oblika zrna HRN EN 12620 |
|------------------------|--------|----------------|-----------------------|---|
| <b>OPEKA 4-16 mm</b>   |        |                |                       |   |
| Indeks oblika zrna     | SI     | %              | 7                     | $SI_{15}$                               |
| <b>CRIJEP 4-16 mm</b>  |        |                |                       |   |
| Indeks oblika zrna     | SI     | %              | 11                    | $SI_{15}$                               |
| <b>DOLOMIT 4-16 mm</b> |        |                |                       |   |
| Indeks oblika zrna     | SI     | %              | 6                     | $SI_{15}$                               |

#### 4.2.1.3 Sadržaj sitnih čestica

Sadržaj sitnih čestica određen je u skladu s normom HRN EN 933-8 i Tehničkim propisom za betonske konstrukcije. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.8, a dobiveni su kao srednja vrijednost tri ispitivanja udjela sitnih čestica za svaki uzorak agregata. Razred agregata s obzirom na udio sitnih čestica određen je prema normi HRN EN 12620. Najveće dopuštene vrijednosti razreda udjela sitnih čestica propisane Tehničkim propisom za betonske konstrukcije su:  $f_3$  za prirodni sitni agregat,  $f_{10}$  za drobljeni i miješani sitni agregat i  $f_{1,5}$  za krupnu frakciju. Uzimajući u obzir navede dopuštene vrijednosti, a kako slijedi iz tablice 4.8, sva tri agregata zadovoljavaju tražene zahtjeve.

Tablica 4. 8: Sadržaj sitnih čestica

| Vrsta agregata | Frakcija (mm) | Udio čestica sitnijih od 0,063 mm (%) | Razred agregata s obzirom na udio sitnih čestica HRN EN 12620 |
|----------------|---------------|---------------------------------------|---|
| Opeka          | 0-4           | 4,4                                   | f <sub>10</sub>   |
|                | 4-16          | 0,4                                   | f <sub>1,5</sub>  |
| Crijep         | 0-4           | 3,6                                   | f <sub>10</sub>   |
|                | 4-16          | 0,8                                   | f <sub>1,5</sub>  |
| Dolomit        | 0-4           | 3,2                                   | f <sub>10</sub>   |
|                | 4-16          | 0,8                                   | f <sub>1,5</sub>  |

#### 4.2.1.4 Nasipna gustoća i šupljine

Nasipna gustoća ispitana je prema normi HRN EN 1097-3. Tehnički propisom za betonske konstrukcije propisano je da nasipna gustoća agregata mora zadovoljiti projektne zahtjeve ili zahtjeve naručitelja ili kupca. U tablici 4.9 prikazani su rezultati ispitivanja nasipne gustoće i postotka šupljina u agregatu.

Tablica 4. 9: Nasipna gustoća i postotak šupljina

| Vrsta agregata         | Jedinica          | Oznaka         | Izmjerena/izračunata vrijednost prema HRN EN 1097-3 |
|------------------------|-------------------|----------------|---|
| <b>OPEKA 0-4 mm</b>    |                   |                |   |
| Nasipna gustoća        | Mg/m <sup>3</sup> | ρ <sub>b</sub> | 0,97  |
| Postotak šupljina      | (%)               | v              | 46  |
| <b>OPEKA 4-16 mm</b>   |                   |                |   |
| Nasipna gustoća        | Mg/m <sup>3</sup> | ρ <sub>b</sub> | 1,00  |
| Postotak šupljina      | (%)               | v              | 46  |
| <b>CRIJEP 0-4 mm</b>   |                   |                |   |
| Nasipna gustoća        | Mg/m <sup>3</sup> | ρ <sub>b</sub> | 1,11  |
| Postotak šupljina      | (%)               | v              | 46  |
| <b>CRIJEP 4-16 mm</b>  |                   |                |   |
| Nasipna gustoća        | Mg/m <sup>3</sup> | ρ <sub>b</sub> | 1,12  |
| Postotak šupljina      | (%)               | v              | 46  |
| <b>DOLOMIT 0-4 mm</b>  |                   |                |   |
| Nasipna gustoća        | Mg/m <sup>3</sup> | ρ <sub>b</sub> | 1,62  |
| Postotak šupljina      | (%)               | v              | 42  |
| <b>DOLOMIT 4-16 mm</b> |                   |                |   |
| Nasipna gustoća        | Mg/m <sup>3</sup> | ρ <sub>b</sub> | 1,70  |
| Postotak šupljina      | (%)               | v              | 41  |

#### 4.2.1.5 Gustoća zrna i upijanje vode

Gustoća zrna i upijanje vode ispitani su prema normi HRN EN 1097-6. Kao i kod nasipne gustoće Tehničkim propisom za betonske konstrukcije gustoća zrna agregata mora zadovoljavati projektne zahtjeve ili zahtjeve naručitelja ili kupca. U tablici 4.10 prikazani su rezultati ispitivanja gustoće zrna i upijanje vode za opeku, crijep i dolomit. Iz navedene tablice moguće je zaključiti da drobljena opeka i crijep imaju manje gustoće od prirodnih agregata. Za očekivati je da će betonske mješavine spravljene s opekarskim lomom biti manjih gustoća u ovisnosti o postotku zamjene prirodnog agregata s opekarskim lomom. Iz tablice 4.10 vidljivo je da je upijanje opeke i crijepa znatno veće od prirodnog agregata dolomita. Upijanje vode potrebno je uzeti u obzir prilikom projektiranja sastava betonskih mješavina zbog njihovih visokih vrijednosti: 16% -

19% za opeku i 9% - 11% za crijep ovisno o frakciji. Pri projektiranju sastava betona u kojemu bi se koristila dva ili više agregata različitih gustoća (dolomit, opeka i crijep) treba posebnu pozornost posvetiti tome da postoji mogućnost pojave segregacije upravo uslijed različitih gustoća zrna agregata.

Tablica 4. 10: Gustoća zrna i upijanje vode

| Opis  | Oznaka           | Jedinica mjere    | Izmjerena/izračunata vrijednost prema HRN EN 1097-6 |
|---|------------------|-------------------|---|
| <b>OPEKA 0-4 mm</b>                                   |                  |                   |   |
| Upijanje vode   | WA <sub>24</sub> | (%)               | 19,05   |
| Stvarna gustoća čestica                               | ρ <sub>a</sub>   | Mg/m <sup>3</sup> | 2,72  |
| Gustoća čestica na suhoj osnovi                       | ρ <sub>rd</sub>  | Mg/m <sup>3</sup> | 1,79  |
| Gustoća čestica na zasićenju, površinski suhoj osnovi | ρ <sub>ssd</sub> | Mg/m <sup>3</sup> | 2,13  |
| <b>OPEKA 4-16 mm</b>                                  |                  |                   |   |
| Upijanje vode   | WA <sub>24</sub> | (%)               | 16,71   |
| Stvarna gustoća čestica                               | ρ <sub>a</sub>   | Mg/m <sup>3</sup> | 2,69  |
| Gustoća čestica na suhoj osnovi                       | ρ <sub>rd</sub>  | Mg/m <sup>3</sup> | 1,85  |
| Gustoća čestica na zasićenju, površinski suhoj osnovi | ρ <sub>ssd</sub> | Mg/m <sup>3</sup> | 2,16  |
| <b>CRIJEP 0-4 mm</b>                                  |                  |                   |   |
| Upijanje vode   | WA <sub>24</sub> | (%)               | 11,50   |
| Stvarna gustoća čestica                               | ρ <sub>a</sub>   | Mg/m <sup>3</sup> | 2,68  |
| Gustoća čestica na suhoj osnovi                       | ρ <sub>rd</sub>  | Mg/m <sup>3</sup> | 2,05  |
| Gustoća čestica na zasićenju, površinski suhoj osnovi | ρ <sub>ssd</sub> | Mg/m <sup>3</sup> | 2,29  |
| <b>CRIJEP 4-16mm</b>                                  |                  |                   |   |
| Upijanje vode   | WA <sub>24</sub> | (%)               | 9,25  |
| Stvarna gustoća čestica                               | ρ <sub>a</sub>   | Mg/m <sup>3</sup> | 2,55  |
| Gustoća čestica na suhoj osnovi                       | ρ <sub>rd</sub>  | Mg/m <sup>3</sup> | 2,06  |
| Gustoća čestica na zasićenju, površinski suhoj osnovi | ρ <sub>ssd</sub> | Mg/m <sup>3</sup> | 2,25  |
| <b>DOLOMIT 0-4 mm</b>                                 |                  |                   |   |
| Upijanje vode   | WA <sub>24</sub> | (%)               | 2,29  |
| Stvarna gustoća čestica                               | ρ <sub>a</sub>   | Mg/m <sup>3</sup> | 2,99  |
| Gustoća čestica na suhoj osnovi                       | ρ <sub>rd</sub>  | Mg/m <sup>3</sup> | 2,79  |
| Gustoća čestica na zasićenju, površinski suhoj osnovi | ρ <sub>ssd</sub> | Mg/m <sup>3</sup> | 2,86  |
| <b>DOLOMIT 4-16 mm</b>                                |                  |                   |   |
| Upijanje vode   | WA <sub>24</sub> | (%)               | 0,50  |
| Stvarna gustoća čestica                               | ρ <sub>a</sub>   | Mg/m <sup>3</sup> | 2,91  |
| Gustoća čestica na suhoj osnovi                       | ρ <sub>rd</sub>  | Mg/m <sup>3</sup> | 2,86  |
| Gustoća čestica na zasićenju, površinski suhoj osnovi | ρ <sub>ssd</sub> | Mg/m <sup>3</sup> | 2,88  |

#### 4.2.1.6 Kemijska svojstva agregata

Ispitivanja kemijskih parametara izvršeno je u skladu s normom HRN EN 1774-1:2010. Iz uzoraka crijeva i opeke metodom četvrtanja izdvojeni su uzorci za ispitivanje koji su zatim obrađeni i pripremljeni prema zahtjevima norme po kojoj je izvršeno ispitivanje. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.11., a iz nje je vidljivo da su svi zahtjevi propisani normom i Tehničkim propisom zadovoljeni.

Tablica 4. 11: Kemijska analiza opeke i crijeva

| Uzorak                                       | Svojstvo uzorka   | Rezultat | Zahtjev/razred prema HRN EN 12620 i TPBK          |
|--|---|----------|---|
| <b>OPEKA</b><br>mješavina 0-4 mm i 4-16 mm   | Određivanje u vodi topivih soli klorida Volhardovom metodom | 0,001%   | < 0,15% nearmirani beton<br><0,06% armirani beton |
|  | Određivanje sadržaja ukupnog sumpora                        | 0,0%     | <1%   |
|  | Određivanje u kiselini topivih sulfata                      | 0,0%     | AS <sub>0,2</sub>                                 |
| <b>Crijep</b><br>mješavina 0-4 mm i 4-16 mm  | Određivanje u vodi topivih soli klorida Volhardovom metodom | 0,001%   | < 0,15% nearmirani beton<br><0,06% armirani beton |
|  | Određivanje sadržaja ukupnog sumpora                        | 0,0%     | <1%   |
|  | Određivanje u kiselini topivih sulfata                      | 0,0%     | AS <sub>0,2</sub>                                 |
| <b>Dolomit</b><br>mješavina 0-4 mm i 4-16 mm | Određivanje u vodi topivih soli klorida Volhardovom metodom | 0,0%     | < 0,15% nearmirani beton<br><0,06% armirani beton |
|  | Određivanje sadržaja ukupnog sumpora                        | 0,023%   | <1%   |
|  | Određivanje u kiselini topivih sulfata                      | 0,0%     | AS <sub>0,2</sub>                                 |

#### 4.2.1.7 Otpornost na drobljenje – metoda Los Angeles

Ispitivanje otpornosti na drobljenje krupnog agregata (Los Angeles – LA) izvršeno je prema normi HRN EN 1097-2:2004 i HRN EN 1097-2:2004/A1:2007 a u skladu s TPBK. Razredi otpornosti na drobljenje određeni su prema normi HRN EN 12620 ovisno o krajnjoj upotrebi betona do najviše:

- LA<sub>35</sub> za betone opće namjene
- LA<sub>30</sub> za betone razreda izloženosti XF1 do XF4 prema HRN EN 206-1.

U tablici 4.12 prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na drobljenje i razredba agregata s obzirom na otpornost na drobljenje. Iz tablice je vidljivo da sva tri agregata zadovoljavaju propisane zahtjeve, te da je opekarski lom unatoč očekivanjima o slabijoj otpornosti na drobljenje pokazao zadovoljavajuće rezultate.

Tablica 4. 12: Otpornost na drobljenje krupnog agregata

| Agregat        | Veličina ispitane frakcije (mm) | Veličina frakcija ispitnog dijela uzorka (mm) | Udio ispitnog uzorka (mas. %) | Los Angeles koeficijent | Razred prema HRN EN 12620 |
|----------------|---------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| <b>Opeka</b>   | 10-14                           | 10-12,5                                       | 65                            | 40                      | LA <sub>30</sub>          |
|                |                                 | 12,5-14                                       | 35                            |                         |                           |
| <b>Crijep</b>  | 10-14                           | 10-12,5                                       | 65                            | 37                      | LA <sub>30</sub>          |
|                |                                 | 12,5-14                                       | 35                            |                         |                           |
| <b>Dolomit</b> | 10-14                           | 10-12,5                                       | 65                            | 24                      | LA <sub>25</sub>          |
|                |                                 | 12,5-14                                       | 35                            |                         |                           |

#### 4.2.1.8 Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje krupnog agregata

Otpornost agregata na smrzavanje i odmrzavanje ispitana je prema normi HRN EN 1367-2:2010. Izvršeno je ispitivanje magnezijevim sulfatom. Razredi koje agregat treba zadovoljiti u ovisnosti o krajnjoj upotrebi betona propisani su normom HRN EN 12620 i s Tehničkim propisom za betonske konstrukcije. Prema TPBK agregat mora zadovoljiti razrede:

- MS<sub>25</sub> za betone razreda izloženosti XF1 i XF3 prema HRN EN 206-1
- MS<sub>18</sub> za betone razreda izloženosti XF2 i XF4 prema HRN EN 206-1.

Tablicom 4.13 prikazani su rezultati provedenih ispitivanja, te je iz tablice zaključeno da sva tri agregata zadovoljavaju propisane zahtjeve i svrstani su u isti razred.

Tablica 4. 13: Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje - ispitivanje magnezijevim sulfatom

| <b>OPEKA</b>  |                  |      |
|---|------------------|------|
| Veličina frakcije ispitnog uzorka (mm)                                | 10-14            |      |
| Maseni udio laboratorijskog uzorka korištenog za ispitnu količinu (%) | 45               |      |
| Broj uzoraka  | I                | II   |
| Vrijednost magnezijevog sulfata MS <sub>i</sub> (%)                   | 2,8              | 2,4  |
| Srednja vrijednost magnezijevog sulfata MS (%)                        | 3                |      |
| Razred prema HRN EN 12620   | MS <sub>18</sub> |      |
| <b>CRIJEP</b>   |                  |      |
| Veličina frakcije ispitnog uzorka (mm)                                | 10-14            |      |
| Maseni udio laboratorijskog uzorka korištenog za ispitnu količinu (%) | 50               |      |
| Broj uzoraka  | I                | II   |
| Vrijednost magnezijevog sulfata MS <sub>i</sub> (%)                   | 3,9              | 3,2  |
| Srednja vrijednost magnezijevog sulfata MS (%)                        | 4                |      |
| Razred prema HRN EN 12620   | MS <sub>18</sub> |      |
| <b>DOLOMIT</b>  |                  |      |
| Veličina frakcije ispitnog uzorka (mm)                                | 10-14            |      |
| Maseni udio laboratorijskog uzorka korištenog za ispitnu količinu (%) | 45               |      |
| Broj uzoraka  | I                | II   |
| Vrijednost magnezijevog sulfata MS <sub>i</sub> (%)                   | 10,4             | 10,9 |
| Srednja vrijednost magnezijevog sulfata MS (%)                        | 10,7             |      |
| Razred prema HRN EN 12620   | MS <sub>18</sub> |      |

Sagledavši rezultate ispitivanja svojstava opekarskog loma (drobljene opeke i drobljenog crijepa) kao agregata moguće je zaključiti:

- *drobljena opeka i drobljeni crijep mogu se koristiti kao potpuna ili djelomična zamjena prirodnom agregatu, u našem slučaju odabranom dolomitu,*
- *posebnu pažnju potrebno je posvetiti projektiranju sastava betonskih mješavina s obzirom na količinu potrebne vode te postotak zamjene prirodnog agregata s opekarskim lomom u ovisnosti o zahtijevanim svojstvima betona.*



#### **4.2.2. Svojstva cementa**

U fazi preliminarnog eksperimentalnog ispitivanja korišten je portlandski cement CEM I 42,5 N u betonskim mješavinama. Njegove karakteristična mehanička, fizikalna i kemijska svojstva određena od strane proizvođača, a prema normi HRN EN 197-1:2005 dana su u tablici 4.14.

Tablica 4. 14: Karakteristične vrijednosti svojstava za cement CEM I 42,5 N

| <b>Fizikalna i mehanička svojstva</b>      | <b>CEM I 42,5 N</b> | <b>Zahtjev norme HRN EN 197-1:2005</b> |
|--|---------------------|--|
| <b>Vrijeme početka vezivanja (min)</b>     | 145                 | $\geq 60$                              |
| <b>Postojanost volumena (mm)</b>           | 0,50                | $\leq 10$                              |
| <b>Tlačna čvrstoća nakon 2 dana (MPa)</b>  | 25,1                | $\geq 10$                              |
| <b>Tlačna čvrstoća nakon 28 dana (Mpa)</b> | 54,8                | $\geq 42,5 \leq 62,5$                  |
| <b>Kemijska svojstva</b>                   | CEM I 42,5 N        | Zahtjev norme HRN EN 197-1:2005        |
| <b>SO<sub>3</sub> (%)</b>                  | 2,73                | $\leq 3,5$                             |
| <b>Cl (%)</b>                              | 0,06                | $\leq 0,1$                             |

Odabrani cement zadovoljava sve zahtjeve propisane normom. U preliminarnoj fazi ispitivanja prvenstveno smo htjeli provjeriti ponašanje opekarskog loma u betonskim mješavinama i njegov utjecaj na svojstva betona. Čisti portland cement CEM I 42,5 N odabran je upravo iz razloga jer smo htjeli postići što manji utjecaj cementa i njegovih dodataka na konačna svojstva betona u svježem i očvrslom stanju.

#### **4.2.3. Ispitivanje svojstava betonskih mješavina**

##### *4.2.3.1. Projektiranje sastava betonskih mješavina*

Projektiranje sastava betonskih mješavina provedeno je uzevši u obzir Box-Behnkenov plan eksperimenta prikazan u tablici 4.4. Prilikom projektiranja sastava betonskih mješavina uz potrebnu količinu vode prema tablici 4.4. izračunata je i količina vode potrebna da se agregat dovede u zasićeno površinski suho stanje. Sastav betonskih mješavina prikazan je tablicom 4.15. Prilikom izrade samih mješavina agregati su dovedeni u zasićeno površinski suho stanje dodatkom potrebne vode s obzirom na postotak upijanja svakog agregata.

Tablica 4. 15: Sastav betonskih mješavina

| Oznaka mješavine         |             | BM 1    |                              |                      | BM 2    |                              |                      | BM 3    |                              |                      | BM 4    |                              |                      |  |
|--------------------------|-------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|--|
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |  |
| Voda                     |             | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               |  |
| Dodatak                  |             | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 455,92  | 2,25                         | 202,63               | 455,92  | 2,25                         | 202,63               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 250,23  | 2,13                         | 117,48               | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 250,23  | 2,13                         | 117,48               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 671,99  | 2,86                         | 234,96               | 336,00  | 2,86                         | 117,48               | 671,99  | 2,86                         | 234,96               | 336,00  | 2,86                         | 117,48               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 875,36  | 2,88                         | 303,95               | 875,36  | 2,88                         | 303,95               | 291,79  | 2,88                         | 101,32               | 291,79  | 2,88                         | 101,32               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 640,22               |         |                              |                      | 640,22  |                              |                      |         | 640,22                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2368,20 | 2,37                         | 1000                 | 2282,43 | 2,28                         | 1000                 | 2240,54 | 2,24                         | 1000                 | 2154,78 | 2,15                         | 1000                 |  |
| Oznaka mješavine         |             | BM 5    |                              |                      | BM 6    |                              |                      | BM 7    |                              |                      | BM 8    |                              |                      |  |
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |  |
| Voda                     |             | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               |  |
| Dodatak                  |             | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 269,03  | 2,29                         | 117,48               | 269,03  | 2,29                         | 117,48               | 269,03  | 2,29                         | 117,48               | 269,03  | 2,29                         | 117,48               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 455,92  | 2,25                         | 202,63               | 455,92  | 2,25                         | 202,63               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 250,23  | 2,13                         | 117,48               | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 250,23  | 2,13                         | 117,48               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 336,00  | 2,86                         | 117,48               | 0,00    | 2,86                         | 0,00                 | 336,00  | 2,86                         | 117,48               | 0,00    | 2,86                         | 0,00                 |  |
|                          | 4mm-16mm    | 875,36  | 2,88                         | 303,95               | 875,36  | 2,88                         | 303,95               | 291,79  | 2,88                         | 101,32               | 291,79  | 2,88                         | 101,32               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 640,22               |         |                              |                      | 640,22  |                              |                      |         | 640,22                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2301,23 | 2,30                         | 1000                 | 2215,47 | 2,22                         | 1000                 | 2173,57 | 2,17                         | 1000                 | 2087,81 | 2,09                         | 1000                 |  |

| Oznaka mješavine         |             | BM 9    |                              |                      | BM 10   |                              |                      | BM 11   |                              |                      | BM 12   |                              |                      |  |
|--------------------------|-------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|--|
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 300,00  | 3,01                         | 99,67                | 300,00  | 3,01                         | 99,67                | 300,00  | 3,01                         | 99,67                | 300,00  | 3,01                         | 99,67                |  |
| Voda                     |             | 150,00  | 1,00                         | 150,00               | 150,00  | 1,00                         | 150,00               | 150,00  | 1,00                         | 150,00               | 150,00  | 1,00                         | 150,00               |  |
| Dodatak                  |             | 1,50    | 1,06                         | 1,42                 | 1,50    | 1,06                         | 1,42                 | 1,50    | 1,06                         | 1,42                 | 1,50    | 1,06                         | 1,42                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 152,10  | 2,29                         | 66,42                | 152,10  | 2,29                         | 66,42                | 152,10  | 2,29                         | 66,42                | 152,10  | 2,29                         | 66,42                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 257,76  | 2,25                         | 114,56               | 257,76  | 2,25                         | 114,56               | 257,76  | 2,25                         | 114,56               | 257,76  | 2,25                         | 114,56               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 282,95  | 2,13                         | 132,84               | 282,95  | 2,13                         | 132,84               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 494,90  | 2,16                         | 229,12               | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 494,90  | 2,16                         | 229,12               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 569,88  | 2,86                         | 199,26               | 569,88  | 2,86                         | 199,26               | 189,96  | 2,86                         | 66,42                | 189,96  | 2,86                         | 66,42                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 989,80  | 2,88                         | 343,68               | 329,93  | 2,88                         | 114,56               | 989,80  | 2,88                         | 343,68               | 329,93  | 2,88                         | 114,56               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 723,92               |         |                              |                      | 723,92  |                              |                      |         | 723,92                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2421,04 | 2,42                         | 1000                 | 2256,07 | 2,26                         | 1000                 | 2324,06 | 2,32                         | 1000                 | 2159,10 | 2,16                         | 1000                 |  |
| Oznaka mješavine         |             | BM 13   |                              |                      | BM 14   |                              |                      | BM 15   |                              |                      | BM 16   |                              |                      |  |
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 500,00  | 3,01                         | 166,11               | 500,00  | 3,01                         | 166,11               | 500,00  | 3,01                         | 166,11               | 500,00  | 3,01                         | 166,11               |  |
| Voda                     |             | 250,00  | 1,00                         | 250,00               | 250,00  | 1,00                         | 250,00               | 250,00  | 1,00                         | 250,00               | 250,00  | 1,00                         | 250,00               |  |
| Dodatak                  |             | 2,50    | 1,06                         | 2,36                 | 2,50    | 1,06                         | 2,36                 | 2,50    | 1,06                         | 2,36                 | 2,50    | 1,06                         | 2,36                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 116,93  | 2,29                         | 51,06                | 116,93  | 2,29                         | 51,06                | 116,93  | 2,29                         | 51,06                | 116,93  | 2,29                         | 51,06                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 198,16  | 2,25                         | 88,07                | 198,16  | 2,25                         | 88,07                | 198,16  | 2,25                         | 88,07                | 198,16  | 2,25                         | 88,07                |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 217,52  | 2,13                         | 102,12               | 217,52  | 2,13                         | 102,12               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 380,47  | 2,16                         | 176,14               | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 380,47  | 2,16                         | 176,14               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 438,11  | 2,86                         | 153,18               | 438,11  | 2,86                         | 153,18               | 146,04  | 2,86                         | 51,06                | 146,04  | 2,86                         | 51,06                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 760,93  | 2,88                         | 264,21               | 253,64  | 2,88                         | 88,07                | 760,93  | 2,88                         | 264,21               | 253,64  | 2,88                         | 88,07                |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 556,53               |         |                              |                      | 556,53  |                              |                      |         | 556,53                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2266,63 | 2,27                         | 1000                 | 2139,81 | 2,14                         | 1000                 | 2192,08 | 2,19                         | 1000                 | 2065,26 | 2,07                         | 1000                 |  |

| Oznaka mješavine         |             | BM 17   |                              |                      | BM 18   |                              |                      | BM 19   |                              |                      | BM 20   |                              |                      |  |
|--------------------------|-------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|--|
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |  |
| Voda                     |             | 160,00  | 1,00                         | 160,00               | 160,00  | 1,00                         | 160,00               | 160,00  | 1,00                         | 160,00               | 160,00  | 1,00                         | 160,00               |  |
| Dodatak                  |             | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 142,92  | 2,29                         | 62,41                | 142,92  | 2,29                         | 62,41                | 142,92  | 2,29                         | 62,41                | 142,92  | 2,29                         | 62,41                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 484,40  | 2,25                         | 215,29               | 484,40  | 2,25                         | 215,29               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 132,93  | 2,13                         | 62,41                | 132,93  | 2,13                         | 62,41                | 132,93  | 2,13                         | 62,41                | 132,93  | 2,13                         | 62,41                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 465,03  | 2,16                         | 215,29               | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 465,03  | 2,16                         | 215,29               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 356,99  | 2,86                         | 124,82               | 356,99  | 2,86                         | 124,82               | 356,99  | 2,86                         | 124,82               | 356,99  | 2,86                         | 124,82               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 1240,07 | 2,88                         | 430,58               | 620,04  | 2,88                         | 215,29               | 620,04  | 2,88                         | 215,29               | 0,00    | 2,88                         | 0,00                 |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 680,22               |         |                              |                      | 680,22  |                              |                      |         | 680,22                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2434,92 | 2,43                         | 1000                 | 2279,91 | 2,28                         | 1000                 | 2299,28 | 2,30                         | 1000                 | 2144,27 | 2,14                         | 1000                 |  |
| Oznaka mješavine         |             | BM 21   |                              |                      | BM 22   |                              |                      | BM 23   |                              |                      | BM 24   |                              |                      |  |
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |  |
| Voda                     |             | 240,00  | 1,00                         | 240,00               | 240,00  | 1,00                         | 240,00               | 240,00  | 1,00                         | 240,00               | 240,00  | 1,00                         | 240,00               |  |
| Dodatak                  |             | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 126,11  | 2,29                         | 55,07                | 126,11  | 2,29                         | 55,07                | 126,11  | 2,29                         | 55,07                | 126,11  | 2,29                         | 55,07                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 427,43  | 2,25                         | 189,97               | 427,43  | 2,25                         | 189,97               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 117,30  | 2,13                         | 55,07                | 117,30  | 2,13                         | 55,07                | 117,30  | 2,13                         | 55,07                | 117,30  | 2,13                         | 55,07                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 410,34  | 2,16                         | 189,97               | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 410,34  | 2,16                         | 189,97               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 315,00  | 2,86                         | 110,14               | 315,00  | 2,86                         | 110,14               | 315,00  | 2,86                         | 110,14               | 315,00  | 2,86                         | 110,14               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 1094,23 | 2,88                         | 379,94               | 547,12  | 2,88                         | 189,97               | 547,12  | 2,88                         | 189,97               | 0,00    | 2,88                         | 0,00                 |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 600,22               |         |                              |                      | 600,22  |                              |                      |         | 600,22                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2294,64 | 2,29                         | 1000                 | 2157,87 | 2,16                         | 1000                 | 2174,96 | 2,17                         | 1000                 | 2038,18 | 2,04                         | 1000                 |  |

| Oznaka mješavine         |             | BM 25   |                              |                      | BM 26   |                              |                      | BM 27   |                              |                      | BM 28   |                              |                      |  |
|--------------------------|-------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|--|
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 300,00  | 3,01                         | 99,67                | 300,00  | 3,01                         | 99,67                | 300,00  | 3,01                         | 99,67                | 300,00  | 3,01                         | 99,67                |  |
| Voda                     |             | 120,00  | 1,00                         | 120,00               | 120,00  | 1,00                         | 120,00               | 180,00  | 1,00                         | 180,00               | 180,00  | 1,00                         | 180,00               |  |
| Dodatak                  |             | 1,50    | 1,06                         | 1,42                 | 1,50    | 1,06                         | 1,42                 | 1,50    | 1,06                         | 1,42                 | 1,50    | 1,06                         | 1,42                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 316,81  | 2,29                         | 138,34               | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 291,59  | 2,29                         | 127,33               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 268,44  | 2,25                         | 119,31               | 268,44  | 2,25                         | 119,31               | 247,08  | 2,25                         | 109,81               | 247,08  | 2,25                         | 109,81               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 147,34  | 2,13                         | 69,17                | 147,34  | 2,13                         | 69,17                | 135,61  | 2,13                         | 63,67                | 135,61  | 2,13                         | 63,67                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 257,70  | 2,16                         | 119,31               | 257,70  | 2,16                         | 119,31               | 237,19  | 2,16                         | 109,81               | 237,19  | 2,16                         | 109,81               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 593,49  | 2,86                         | 207,52               | 197,83  | 2,86                         | 69,17                | 546,26  | 2,86                         | 191,00               | 182,09  | 2,86                         | 63,67                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 687,21  | 2,88                         | 238,61               | 687,21  | 2,88                         | 238,61               | 632,52  | 2,88                         | 219,62               | 632,52  | 2,88                         | 219,62               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 753,92               |         |                              |                      | 753,92  |                              |                      |         | 693,92                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2375,69 | 2,38                         | 1000                 | 2296,83 | 2,30                         | 1000                 | 2280,16 | 2,28                         | 1000                 | 2207,58 | 2,21                         | 1000                 |  |
| Oznaka mješavine         |             | BM 29   |                              |                      | BM 30   |                              |                      | BM 31   |                              |                      | BM 32   |                              |                      |  |
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 500,00  | 3,01                         | 166,11               | 500,00  | 3,01                         | 166,11               | 500,00  | 3,01                         | 166,11               | 500,00  | 3,01                         | 166,11               |  |
| Voda                     |             | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 300,00  | 1,00                         | 300,00               | 300,00  | 1,00                         | 300,00               |  |
| Dodatak                  |             | 2,50    | 1,06                         | 2,36                 | 2,50    | 1,06                         | 2,36                 | 2,50    | 1,06                         | 2,36                 | 2,50    | 1,06                         | 2,36                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 254,87  | 2,29                         | 111,30               | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 212,85  | 2,29                         | 92,95                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 215,96  | 2,25                         | 95,98                | 215,96  | 2,25                         | 95,98                | 180,36  | 2,25                         | 80,16                | 180,36  | 2,25                         | 80,16                |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 118,53  | 2,13                         | 55,65                | 118,53  | 2,13                         | 55,65                | 98,99   | 2,13                         | 46,47                | 98,99   | 2,13                         | 46,47                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 207,32  | 2,16                         | 95,98                | 207,32  | 2,16                         | 95,98                | 173,14  | 2,16                         | 80,16                | 173,14  | 2,16                         | 80,16                |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 477,47  | 2,86                         | 166,95               | 159,16  | 2,86                         | 55,65                | 398,75  | 2,86                         | 139,42               | 132,92  | 2,86                         | 46,47                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 552,86  | 2,88                         | 191,97               | 552,86  | 2,88                         | 191,97               | 461,71  | 2,88                         | 160,32               | 461,71  | 2,88                         | 160,32               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 606,53               |         |                              |                      | 606,53  |                              |                      |         | 506,53                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2274,65 | 2,27                         | 1000                 | 2211,21 | 2,21                         | 1000                 | 2115,44 | 2,12                         | 1000                 | 2062,46 | 2,06                         | 1000                 |  |

| Oznaka mješavine         |             | BM 33   |                              |                      | BM 34   |                              |                      | BM 35   |                              |                      | BM 36   |                              |                      |  |
|--------------------------|-------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|--|
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |  |
| Voda                     |             | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               |  |
| Dodatak                  |             | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 269,82  | 2,29                         | 117,83               | 269,82  | 2,29                         | 117,83               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 228,63  | 2,25                         | 101,61               | 228,63  | 2,25                         | 101,61               | 228,63  | 2,25                         | 101,61               | 228,63  | 2,25                         | 101,61               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 125,49  | 2,13                         | 58,91                | 125,49  | 2,13                         | 58,91                | 125,49  | 2,13                         | 58,91                | 125,49  | 2,13                         | 58,91                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 438,97  | 2,16                         | 203,23               | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 438,97  | 2,16                         | 203,23               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 505,48  | 2,86                         | 176,74               | 505,48  | 2,86                         | 176,74               | 168,49  | 2,86                         | 58,91                | 168,49  | 2,86                         | 58,91                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 877,94  | 2,88                         | 304,84               | 292,65  | 2,88                         | 101,61               | 877,94  | 2,88                         | 304,84               | 292,65  | 2,88                         | 101,61               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 642,11               |         |                              |                      | 642,11  |                              |                      |         | 642,11                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2337,54 | 2,34                         | 1000                 | 2191,22 | 2,19                         | 1000                 | 2270,38 | 2,27                         | 1000                 | 2124,05 | 2,12                         | 1000                 |  |
| Oznaka mješavine         |             | BM 37   |                              |                      | BM 38   |                              |                      | BM 39   |                              |                      | BM 40   |                              |                      |  |
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |  |
| Voda                     |             | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               |  |
| Dodatak                  |             | 4,00    | 1,06                         | 3,77                 | 4,00    | 1,06                         | 3,77                 | 4,00    | 1,06                         | 3,77                 | 4,00    | 1,06                         | 3,77                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 0,00    | 2,29                         | 0,00                 | 268,24  | 2,29                         | 117,13               | 268,24  | 2,29                         | 117,13               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 227,29  | 2,25                         | 101,02               | 227,29  | 2,25                         | 101,02               | 227,29  | 2,25                         | 101,02               | 227,29  | 2,25                         | 101,02               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 124,75  | 2,13                         | 58,57                | 124,75  | 2,13                         | 58,57                | 124,75  | 2,13                         | 58,57                | 124,75  | 2,13                         | 58,57                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 436,39  | 2,16                         | 202,03               | 0,00    | 2,16                         | 0,00                 | 436,39  | 2,16                         | 202,03               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 502,51  | 2,86                         | 175,70               | 502,51  | 2,86                         | 175,70               | 167,50  | 2,86                         | 58,57                | 167,50  | 2,86                         | 58,57                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 872,78  | 2,88                         | 303,05               | 290,93  | 2,88                         | 101,02               | 872,78  | 2,88                         | 303,05               | 290,93  | 2,88                         | 101,02               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 638,34               |         |                              |                      | 638,34  |                              |                      |         | 638,34                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2331,33 | 2,33                         | 1000                 | 2185,86 | 2,19                         | 1000                 | 2264,56 | 2,26                         | 1000                 | 2119,10 | 2,12                         | 1000                 |  |

| Oznaka mješavine         |             | BM 41   |                              |                      | BM 42   |                              |                      | BM 43   |                              |                      | BM 44   |                              |                      |  |
|--------------------------|-------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|--|
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 300,00  | 3,01                         | 99,67                | 300,00  | 3,01                         | 99,67                | 300,00  | 3,01                         | 99,67                | 300,00  | 3,01                         | 99,67                |  |
| Voda                     |             | 150,00  | 1,00                         | 150,00               | 150,00  | 1,00                         | 150,00               | 150,00  | 1,00                         | 150,00               | 150,00  | 1,00                         | 150,00               |  |
| Dodatak                  |             | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 3,00    | 1,06                         | 2,83                 | 3,00    | 1,06                         | 2,83                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 152,40  | 2,29                         | 66,55                | 152,40  | 2,29                         | 66,55                | 151,80  | 2,29                         | 66,29                | 151,80  | 2,29                         | 66,29                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 516,53  | 2,25                         | 229,57               | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 514,51  | 2,25                         | 228,67               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 141,75  | 2,13                         | 66,55                | 141,75  | 2,13                         | 66,55                | 141,20  | 2,13                         | 66,29                | 141,20  | 2,13                         | 66,29                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 247,93  | 2,16                         | 114,78               | 247,93  | 2,16                         | 114,78               | 246,97  | 2,16                         | 114,34               | 246,97  | 2,16                         | 114,34               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 380,66  | 2,86                         | 133,10               | 380,66  | 2,86                         | 133,10               | 379,18  | 2,86                         | 132,58               | 379,18  | 2,86                         | 132,58               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 991,73  | 2,88                         | 344,35               | 330,58  | 2,88                         | 114,78               | 987,86  | 2,88                         | 343,01               | 329,29  | 2,88                         | 114,34               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 725,33               |         |                              |                      | 725,33  |                              |                      |         | 722,50                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2364,47 | 2,36                         | 1000                 | 2219,85 | 2,22                         | 1000                 | 2360,00 | 2,36                         | 1000                 | 2215,94 | 2,22                         | 1000                 |  |
| Oznaka mješavine         |             | BM 45   |                              |                      | BM 46   |                              |                      | BM 47   |                              |                      | BM 48   |                              |                      |  |
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 500,00  | 3,01                         | 166,11               | 500,00  | 3,01                         | 166,11               | 500,00  | 3,01                         | 166,11               | 500,00  | 3,01                         | 166,11               |  |
| Voda                     |             | 250,00  | 1,00                         | 250,00               | 250,00  | 1,00                         | 250,00               | 250,00  | 1,00                         | 250,00               | 250,00  | 1,00                         | 250,00               |  |
| Dodatak                  |             | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 5,00    | 1,06                         | 4,72                 | 5,00    | 1,06                         | 4,72                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 117,43  | 2,29                         | 51,28                | 117,43  | 2,29                         | 51,28                | 116,44  | 2,29                         | 50,85                | 116,44  | 2,29                         | 50,85                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 398,00  | 2,25                         | 176,89               | 0,00    | 2,25                         | 0,00                 | 394,64  | 2,25                         | 175,39               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 109,22  | 2,13                         | 51,28                | 109,22  | 2,13                         | 51,28                | 108,30  | 2,13                         | 50,85                | 108,30  | 2,13                         | 50,85                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 191,04  | 2,16                         | 88,44                | 191,04  | 2,16                         | 88,44                | 189,43  | 2,16                         | 87,70                | 189,43  | 2,16                         | 87,70                |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 293,31  | 2,86                         | 102,56               | 293,31  | 2,86                         | 102,56               | 290,83  | 2,86                         | 101,69               | 290,83  | 2,86                         | 101,69               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 764,16  | 2,88                         | 265,33               | 254,72  | 2,88                         | 88,44                | 757,71  | 2,88                         | 263,09               | 252,57  | 2,88                         | 87,70                |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 558,89               |         |                              |                      | 558,89  |                              |                      |         | 554,17                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2225,15 | 2,23                         | 1000                 | 2113,71 | 2,11                         | 1000                 | 2217,70 | 2,22                         | 1000                 | 2107,20 | 2,11                         | 1000                 |  |

Doktorska disertacija  
Požarna otpornost betona s opekarskim lomom kao agregatom

| Oznaka mješavine         |             | BM 49   |                              |                      | BM 50   |                              |                      | BM 51   |                              |                      | BM 52   |                              |                      |  |
|--------------------------|-------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|--|
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |  |
| Voda                     |             | 160,00  | 1,00                         | 160,00               | 160,00  | 1,00                         | 160,00               | 160,00  | 1,00                         | 160,00               | 160,00  | 1,00                         | 160,00               |  |
| Dodatak                  |             | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 4,00    | 1,06                         | 3,77                 | 4,00    | 1,06                         | 3,77                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 143,32  | 2,29                         | 62,58                | 143,32  | 2,29                         | 62,58                | 142,52  | 2,29                         | 62,24                | 142,52  | 2,29                         | 62,24                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 242,87  | 2,25                         | 107,94               | 242,87  | 2,25                         | 107,94               | 241,53  | 2,25                         | 107,35               | 241,53  | 2,25                         | 107,35               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 266,61  | 2,13                         | 125,17               | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 265,13  | 2,13                         | 124,47               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 233,16  | 2,16                         | 107,94               | 233,16  | 2,16                         | 107,94               | 231,87  | 2,16                         | 107,35               | 231,87  | 2,16                         | 107,35               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 536,97  | 2,86                         | 187,75               | 178,99  | 2,86                         | 62,58                | 534,00  | 2,86                         | 186,71               | 178,00  | 2,86                         | 62,24                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 621,76  | 2,88                         | 215,89               | 621,76  | 2,88                         | 215,89               | 618,32  | 2,88                         | 214,69               | 618,32  | 2,88                         | 214,69               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 682,11               |         |                              |                      | 682,11  |                              |                      |         | 678,34                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2338,07 | 2,34                         | 1000                 | 2246,70 | 2,25                         | 1000                 | 2332,24 | 2,33                         | 1000                 | 2241,37 | 2,24                         | 1000                 |  |
| Oznaka mješavine         |             | BM 53   |                              |                      | BM 54   |                              |                      | BM 55   |                              |                      | BM 56   |                              |                      |  |
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |  |
| Voda                     |             | 240,00  | 1,00                         | 240,00               | 240,00  | 1,00                         | 240,00               | 240,00  | 1,00                         | 240,00               | 240,00  | 1,00                         | 240,00               |  |
| Dodatak                  |             | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 0,00    | 1,06                         | 0,00                 | 4,00    | 1,06                         | 3,77                 | 4,00    | 1,06                         | 3,77                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 126,51  | 2,29                         | 55,24                | 126,51  | 2,29                         | 55,24                | 125,71  | 2,29                         | 54,90                | 125,71  | 2,29                         | 54,90                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 214,39  | 2,25                         | 95,28                | 214,39  | 2,25                         | 95,28                | 213,05  | 2,25                         | 94,69                | 213,05  | 2,25                         | 94,69                |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 235,34  | 2,13                         | 110,49               | 0,00    | 2,13                         | 0,00                 | 233,86  | 2,13                         | 109,79               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 205,81  | 2,16                         | 95,28                | 205,81  | 2,16                         | 95,28                | 204,52  | 2,16                         | 94,69                | 204,52  | 2,16                         | 94,69                |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 473,99  | 2,86                         | 165,73               | 158,00  | 2,86                         | 55,24                | 471,02  | 2,86                         | 164,69               | 157,01  | 2,86                         | 54,90                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 548,83  | 2,88                         | 190,57               | 548,83  | 2,88                         | 190,57               | 545,40  | 2,88                         | 189,37               | 545,40  | 2,88                         | 189,37               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 602,11               |         |                              |                      | 602,11  |                              |                      |         | 598,34                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2209,53 | 2,21                         | 1000                 | 2128,88 | 2,13                         | 1000                 | 2203,70 | 2,20                         | 1000                 | 2123,55 | 2,12                         | 1000                 |  |



| Oznaka mješavine         |             | BM 57   |                              |                      | BM 58   |                              |                      | BM 59   |                              |                      | BM 60   |                              |                      |  |
|--------------------------|-------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|---------|------------------------------|----------------------|--|
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |  |
| Voda                     |             | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               |  |
| Dodatak                  |             | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 134,52  | 2,29                         | 58,74                | 134,52  | 2,29                         | 58,74                | 134,52  | 2,29                         | 58,74                | 134,52  | 2,29                         | 58,74                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 227,96  | 2,25                         | 101,32               | 227,96  | 2,25                         | 101,32               | 227,96  | 2,25                         | 101,32               | 227,96  | 2,25                         | 101,32               |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 125,12  | 2,13                         | 58,74                | 125,12  | 2,13                         | 58,74                | 125,12  | 2,13                         | 58,74                | 125,12  | 2,13                         | 58,74                |  |
|                          | 4mm-16mm    | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 336,00  | 2,86                         | 117,48               | 336,00  | 2,86                         | 117,48               | 336,00  | 2,86                         | 117,48               | 336,00  | 2,86                         | 117,48               |  |
|                          | 4mm-16mm    | 583,58  | 2,88                         | 202,63               | 583,58  | 2,88                         | 202,63               | 583,58  | 2,88                         | 202,63               | 583,58  | 2,88                         | 202,63               |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 640,22               |         |                              |                      | 640,22  |                              |                      |         | 640,22                       |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2228,00 | 2,23                         | 1000                 | 2228,00 | 2,23                         | 1000                 | 2228,00 | 2,23                         | 1000                 | 2228,00 | 2,23                         | 1000                 |  |
| Oznaka mješavine         |             | BM 61   |                              |                      | BM 62   |                              |                      |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| Komponente betona        |             | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| Cement                   |             | 400,00  | 3,01                         | 132,89               | 400,00  | 3,01                         | 132,89               |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| Voda                     |             | 200,00  | 1,00                         | 200,00               | 200,00  | 1,00                         | 200,00               |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| Dodatak                  |             | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 | 2,00    | 1,06                         | 1,89                 |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| Zrak                     |             | -       | -                            | 25,00                | -       | -                            | 25,00                |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| DC                       | 0 mm - 4 mm | 134,52  | 2,29                         | 58,74                | 134,52  | 2,29                         | 58,74                |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
|                          | 4mm-16mm    | 227,96  | 2,25                         | 101,32               | 227,96  | 2,25                         | 101,32               |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| DO                       | 0mm-4mm     | 125,12  | 2,13                         | 58,74                | 125,12  | 2,13                         | 58,74                |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
|                          | 4mm-16mm    | 218,84  | 2,16                         | 101,32               | 218,84  | 2,16                         | 101,32               |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| PA                       | 0mm-4mm     | 336,00  | 2,86                         | 117,48               | 336,00  | 2,86                         | 117,48               |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
|                          | 4mm-16mm    | 583,58  | 2,88                         | 202,63               | 583,58  | 2,88                         | 202,63               |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| Agregat - ukupni volumen |             |         |                              | 640,22               |         |                              |                      |         |                              |                      |         |                              |                      |  |
| Ukupno                   |             | 2228,00 | 2,23                         | 1000                 | 2228,00 | 2,23                         | 1000                 |         |                              |                      |         |                              |                      |  |

#### 4.2.3.2. Ispitivanje svojstava svježeg betona

Nakon što su zamiješane betonske mješavine sastava prikazanog u tablici 4.15 provedena su ispitivanja svojstava svježeg betona prikazana u tablici 4.16.

Tablica 4. 16: Svojstva svježeg betona

| Oznaka mješavine                         |                             | BM1    | BM2    | BM3    | BM4    | BM5    | BM6    | BM7    | BM8    | BM9    | BM10   | BM11   | BM12   | BM13   |
|--|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Gustoća HRN EN 12350-6:2009</b>       | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 2136   | 2096   | 1933   | 2027   | 2066   | 2028   | 1921   | 1696   | 1953   | 1826   | 2041,2 | 1897   | 2350   |
| <b>Konzistencija HRN EN 12350-2:2000</b> | (mm)                        | 235    | 205    | 185    | 210    | 190    | 200    | 170    | 220    | 175    | 190    | 115    | 120    | 230    |
|  | Razred                      | S5     | S4     | S4     | S4     | S4     | S4     | S4     | S4     | S4     | S4     | S3     | S3     | S5     |
| <b>Sadržaj pora HRN EN 12350-7:2000</b>  | (%)                         | 11,20% | 11,50% | 14,40% | 12,10% | 9,60%  | 11,40% | 13,40% | 14,00% | 3,40%  | 17,00% | 12,00% | 10,00% | 4,20%  |
| Oznaka mješavine                         |                             | BM14   | BM15   | BM16   | BM17   | BM18   | BM19   | BM20   | BM21   | BM22   | BM23   | BM24   | BM25   | BM26   |
| <b>Gustoća HRN EN 12350-6:2009</b>       | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 2289   | 2303   | 2120   | 2361   | 2060   | 2149   | 1928   | 2362   | 2336,4 | 2222   | 2176   | 2355   | 2048   |
| <b>Konzistencija HRN EN 12350-2:2000</b> | (mm)                        | 185    | 215    | 180    | 30     | 180    | 55     | 220    | 215    | 225    | 200    | 265    | 15     | 30     |
|  | Razred                      | S4     | S4     | S4     | S1     | S4     | S2     | S5     | S4     | S4     | S4     | S5     | S1     | S1     |
| <b>Sadržaj pora HRN EN 12350-7:2000</b>  | (%)                         | 3,60%  | 2,20%  | 7,20%  | 5,50%  | 9,80%  | 8,00%  | 10,20% | 3,30%  | 2,80%  | 5,40%  | 5,80%  | 6,60%  | 8,60%  |
| Oznaka mješavine                         |                             | BM27   | BM28   | BM29   | BM30   | BM31   | BM32   | BM33   | BM34   | BM35   | BM36   | BM37   | BM38   | BM39   |
| <b>Gustoća HRN EN 12350-6:2009</b>       | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 2127   | 1854   | 2230   | 2152   | 2199   | 2069   | 2115   | 2088   | 2152   | 2185   | 2094   | 2021   | 2048   |
| <b>Konzistencija HRN EN 12350-2:2000</b> | (mm)                        | 235    | 230    | 220    | 220    | 255    | 250    | 135    | 30     | 60     | 30     | 200    | 210    | 165    |
|  | Razred                      | S5     | S5     | S5     | S5     | S5     | S5     | S3     | S1     | S2     | S1     | S4     | S4     | S4     |
| <b>Sadržaj pora HRN EN 12350-7:2000</b>  | (%)                         | 9,80%  | 10,20% | 8,80%  | 8,40%  | 5,80%  | 6,60%  | 13,00% | 9,40%  | 9,00%  | 4,40%  | 9,50%  | 10,00% | 7,50%  |
| Oznaka mješavine                         |                             | BM40   | BM41   | BM42   | BM43   | BM44   | BM45   | BM46   | BM47   | BM48   | BM49   | BM50   | BM51   | BM52   |
| <b>Gustoća HRN EN 12350-6:2009</b>       | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 1932   | 1985   | 1923   | 1957   | 1815   | 2206   | 2038   | 2234   | 2058   | 2333   | 2150   | 2144   | 1837   |
| <b>Konzistencija HRN EN 12350-2:2000</b> | (mm)                        | 200    | 50     | 15     | 160    | 210    | 225    | 240    | 180    | 175    | 25     | 20     | 200    | 210    |
|  | Razred                      | S4     | S2     | S1     | S4     | S4     | S5     | S5     | S4     | S4     | S1     | S1     | S4     | S4     |
| <b>Sadržaj pora HRN EN 12350-7:2000</b>  | (%)                         | 8,20%  | 9,60%  | 7,00%  | 8,80%  | 12,20% | 7,60%  | 8,20%  | 4,40%  | 2,60%  | 5,40%  | 5,00%  | 7,00%  | 11,00% |
| Oznaka mješavine                         |                             | BM53   | BM54   | BM55   | BM56   | BM57   | BM58   | BM59   | BM60   | BM61   | BM62   |        |        |        |
| <b>Gustoća HRN EN 12350-6:2009</b>       | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 2242   | 2144   | 2244   | 2086   | 2026   | 2029   | 2057   | 2047   | 1960   | 1988   |        |        |        |
| <b>Konzistencija HRN EN 12350-2:2000</b> | (mm)                        | 250    | 240    | 150    | 165    | 230    | 210    | 210    | 230    | 195    | 210    |        |        |        |
|  | Razred                      | S5     | S5     | S3     | S4     | S5     | S4     | S4     | S5     | S4     | S5     |        |        |        |
| <b>Sadržaj pora HRN EN 12350-7:2000</b>  | (%)                         | 8,30%  | 9,40%  | 2,40%  | 2,30%  | 8,20%  | 9,40%  | 10,30% | 8,60%  | 10,30% | 9,60%  |        |        |        |

Iz tablice 4.16 je vidljivo da je gustoća svježih betonskih mješavina u granicama od 1815,0 kg/m<sup>3</sup> do 2361,0 kg/m<sup>3</sup> što ukazuje na činjenicu da će neke od mješavina imati gustoće u očvrslom stanju manje od 2000 kg/m<sup>3</sup> što će ih svrstati u kategoriju lakih betona. Takve mješavine bile pogodnije za izradu stropnih elemenata ukoliko bi zadovoljile ostale zahtjeve vezane za čvrstoće i dr.

Razred slijeganja je u rasponu od S1 do S5 iz čega je vidljivo da ovisno o sastavu mješavine možemo dobiti željenu konzistenciju. Pri tome treba voditi računa o izdvajanju zrna agregata koje je uočeno u nizu mješavina konzistencije S5. Pretpostavka je da je do segregacije došlo uslijed nedovoljne količine sitnih čestica, te različite gustoće zrna korištenih agregata. Preporuka je da se prilikom projektiranja sastava betona s opekarskim lomom osigura dovoljna količina sitnih čestica u ovisnosti o maksimalnom zrnu agregata.

Sadržaj pora u mješavinama betona je visok i kako je vidljivo iz tablice 4.16 kreće se od 2,2% do 14,4%. Pretpostavka je da se zbog specifičnog oblika zrna opekarskog loma i njegove strukture povećala količina pora u betonu. Kako bismo bili sigurni uslijed čega dolazi do povećane količine pora u betonu, u nastavku istraživanja ovakvih betona bit će potrebno provesti mikroskopsku analizu pora na očvrslom betonu kako bi se ustanovile karakteristike zračnih pora (ukupna količina pora, faktor razmaka i specifična ploština). Kako granulometrijski sastav također utječe na raspored sitnih i krupnih zrna u betonu, pretpostavka je da bi se količina pora mogla poboljšati boljim granulometrijskim sastavom korištenih agregata te će ta pretpostavka biti uzeta u obzir pri projektiranju sastava optimalnih mješavina (v. poglavlje 5.1 *Komponente sastava optimalnih mješavina*).

#### 4.2.3.3. Ispitivanje svojstava očvrsllog betona

Ispitivanja svojstava betona u očvrslom stanju ispitana su prema planu eksperimenta danom u poglavlju 4.1 *Plan eksperimenta za preliminarna ispitivanja betona s drobljenim opekarskim lomom*. U tablici 4.17. prikazani su rezultati ispitivanja betonskih mješavina u očvrslom stanju. Sva ispitivanja provedena su prema skupu normi HRN EN 12390.

Tablica 4. 17: Svojstva betona u očvrslom stanju

| Oznaka mješavine | Tlačna čvrstoća 28 dan                   | Gustoća 28 dan                           | Tlačna čvrstoća 56 dan                   | Vlačna čvrstoća savijanjem 56 dan        | Proračunska vlačna čvrstoća (direktni vlak) | Statički modul elastičnosti 56 dan     |
|------------------|--|--|--|--|---|--|
|                  | HRN EN 12390-3:2001<br>N/mm <sup>2</sup> | HRN EN 12390-7:2000<br>kg/m <sup>3</sup> | HRN EN 12390-3:2001<br>N/mm <sup>2</sup> | HRN EN 12390-5:2009<br>N/mm <sup>2</sup> | HRN EN 1992-1-1:2004<br>N/mm <sup>2</sup>   | HRN U.M1.025:1982<br>N/mm <sup>2</sup> |
| BM1              | 8,86                                     | 1959,49                                  | 10,95                                    | 3,24                                     | 1,62  | 14951,07                               |
| BM2              | 20,22                                    | 2099,96                                  | 23,50                                    | 5,46                                     | 2,73  | 16708,11                               |
| BM3              | 7,97                                     | 1777,21                                  | 8,70                                     | 2,65                                     | 1,32  | 12820,47                               |
| BM4              | 12,23                                    | 1909,00                                  | 16,60                                    | 3,84                                     | 1,92  | 12031,12                               |
| BM5              | 21,32                                    | 2082,50                                  | 22,40                                    | 4,58                                     | 2,29  | 20071,73                               |
| BM6              | 10,62                                    | 1950,78                                  | 16,84                                    | 3,23                                     | 1,61  | 15343,12                               |
| BM7              | 18,69                                    | 1859,05                                  | 18,80                                    | 3,67                                     | 1,84  | 14926,05                               |
| BM8              | 8,87                                     | 1698,84                                  | 9,60                                     | 2,32                                     | 1,16  | 9852,82                                |
| BM9              | 14,87                                    | 1958,91                                  | 15,50                                    | 3,54                                     | 1,77  | 17275,53                               |
| BM10             | 13,09                                    | 1764,96                                  | 15,27                                    | 3,39                                     | 1,70  | 15654,40                               |
| BM11             | 16,80                                    | 2056,65                                  | 20,00                                    | 4,82                                     | 2,41  | 23329,30                               |

|   |       |         |       |      |      |          |
|---|-------|---------|-------|------|------|----------|
| BM12  | 8,47  | 1775,84 | 10,84 | 3,10 | 1,55 | 11258,70 |
| BM13  | 42,60 | 2450,27 | 54,50 | 6,93 | 3,46 | 28859,49 |
| BM14  | 26,53 | 2173,47 | 28,40 | 5,99 | 2,99 | 20625,20 |
| BM15  | 42,87 | 2283,16 | 45,20 | 6,89 | 3,45 | 24421,23 |
| BM16  | 25,75 | 2005,42 | 25,40 | 4,77 | 2,38 | 19032,11 |
| BM17  | 51,93 | 2354,80 | 61,75 | 8,84 | 4,42 | 31995,86 |
| BM18  | 21,14 | 2000,50 | 23,07 | 5,23 | 2,62 | 17174,12 |
| BM19  | 19,24 | 1842,02 | 23,32 | 5,98 | 2,99 | 20088,61 |
| BM20  | 14,65 | 2049,20 | 14,83 | 4,25 | 2,12 | 13681,22 |
| BM21  | 25,13 | 2373,64 | 26,00 | 6,50 | 3,25 | 28041,83 |
| BM22  | 19,25 | 2143,36 | 21,13 | 4,79 | 2,39 | 23907,37 |
| BM23  | 25,28 | 2170,20 | 27,53 | 6,16 | 3,08 | 23008,37 |
| BM24  | 14,88 | 2131,20 | 16,74 | 3,37 | 1,69 | 12918,44 |
| BM25  | 46,08 | 2241,91 | 46,43 | 7,48 | 3,74 | 24685,23 |
| BM26  | 20,53 | 2064,92 | 21,33 | 4,72 | 2,36 | 17142,57 |
| BM27  | 7,85  | 1915,46 | 17,25 | 2,79 | 1,39 | 13398,96 |
| BM28  | 9,77  | 1983,98 | 13,05 | 3,62 | 1,81 | 14851,25 |
| BM29  | 34,54 | 2164,11 | 41,33 | 6,87 | 3,44 | 22690,16 |
| BM30  | 44,48 | 2110,84 | 46,00 | 6,68 | 3,34 | 23086,99 |
| BM31  | 36,59 | 2261,44 | 43,75 | 6,67 | 3,34 | 21766,06 |
| BM32  | 24,33 | 2131,61 | 33,15 | 5,63 | 2,82 | 18066,36 |
| BM33  | 7,70  | 1966,20 | 9,97  | 2,31 | 1,15 | 16658,88 |
| BM34  | 24,00 | 2009,98 | 24,43 | 5,07 | 2,53 | 16832,28 |
| BM35  | 34,20 | 2146,90 | 34,80 | 5,32 | 2,66 | 21168,56 |
| BM36  | 41,72 | 2193,24 | 42,24 | 5,94 | 2,97 | 19777,52 |
| BM37  | 34,49 | 2264,84 | 37,60 | 6,87 | 3,44 | 26138,79 |
| BM38  | 23,13 | 2031,87 | 22,40 | 4,87 | 2,43 | 17917,45 |
| BM39  | 27,68 | 2208,20 | 32,00 | 5,12 | 2,56 | 23516,19 |
| BM40  | 16,68 | 1942,49 | 16,82 | 4,70 | 2,35 | 15836,87 |
| BM41  | 21,33 | 2184,21 | 21,00 | 3,43 | 1,72 | 23950,58 |
| BM42  | 23,60 | 1959,36 | 23,97 | 3,97 | 1,99 | 18474,44 |
| BM43  | 16,64 | 2064,96 | 18,04 | 4,58 | 2,29 | 18729,97 |
| BM44  | 7,68  | 1863,37 | 9,04  | 2,73 | 1,36 | 11066,34 |
| BM45  | 31,07 | 2045,40 | 29,80 | 4,49 | 2,24 | 17905,95 |
| BM46  | 20,00 | 1943,96 | 26,13 | 3,69 | 1,84 | 13606,89 |
| BM47  | 31,92 | 2374,09 | 32,13 | 6,27 | 3,13 | 30667,05 |
| BM48  | 15,67 | 1923,96 | 40,30 | 6,66 | 3,33 | 17682,40 |
| BM49  | 43,38 | 2229,98 | 43,80 | 5,43 | 2,72 | 23178,31 |
| BM50  | 42,67 | 2125,51 | 44,80 | 5,18 | 2,59 | 21741,93 |
| BM51  | 33,78 | 2194,20 | 33,00 | 5,49 | 2,74 | 24169,12 |
| BM52  | 11,64 | 1914,85 | 15,34 | 3,73 | 1,87 | 15081,66 |
| BM53  | 13,63 | 1974,96 | 20,65 | 3,51 | 1,76 | 14717,35 |
| BM54  | 20,41 | 1986,54 | 25,16 | 3,56 | 1,78 | 13306,18 |
| BM55  | 31,02 | 2250,15 | 47,75 | 8,00 | 4,00 | 16700,65 |
| BM56  | 19,50 | 2105,92 | 27,97 | 7,45 | 3,72 | 10022,56 |
| BM57  | 11,77 | 1740,09 | 19,28 | 3,88 | 1,94 | 14061,35 |
| BM58  | 10,66 | 1793,43 | 28,05 | 5,11 | 2,55 | 13773,88 |
| BM59  | 20,82 | 2023,10 | 20,70 | 3,71 | 1,86 | 17717,54 |
| BM60  | 19,33 | 1959,74 | 23,08 | 4,69 | 2,35 | 14120,64 |
| BM61  | 20,82 | 2023,10 | 22,53 | 4,02 | 2,01 | 15340,95 |
| BM62  | 11,77 | 1740,09 | 26,15 | 4,82 | 2,41 | 11601,80 |
| <b>Mješavine koje ne zadovoljavaju uvjete postavljene normama HRN EN 15037-2:2009 i HRN EN 15037-1:2008</b> |       |         |       |      |      |          |
| Mješavine koje zadovoljavaju uvjete norme HRN EN 15037-2:2009   |       |         |       |      |      |          |

Tlačne čvrstoće betona mjerene su 28 dan kako bi se mogao odrediti razred tlačne čvrstoće betona, a ostala mjerenja provedena su pri starosti betona od 56 dana zbog praktičnih razloga jer su ispitivanja

rađena na relaciji Osijek – Zagreb te ih je ovako bilo lakše uskladiti. Broj uzoraka i dimenzije uzoraka na kojima su ispitivana svojstva tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće savijanjem i statičkog modula elastičnosti, prikazana su u tablici 4.5, a rezultati tih ispitivanja prikazani su kao srednje vrijednosti svakog ispitivanja u tablici 4.17. Iz prikazanih rezultata moguće je zaključiti:

- gustoća betona u očvrslom stanju ovisna je o postotku udjela opekarskog loma u mješavini. Pretpostavka je bila da će se povećanjem udjela opekarskog loma gustoća smanjivati jer je gustoća zrna opekarskog loma manja od gustoće zrna prirodnog agregata. Gustoće betona s opekarskim lomom kao agregatom su manje čak do 30% pri 50% zamjene sitne i 25% zamjene krupne frakcije prirodnog agregata opekarskim lomom od betona napravljenog samo s prirodnim agregatom. Također je vidljivo da velik broj mješavina ima gustoće manje od  $2000 \text{ kg/m}^3$  čime se mogu svrstati u kategoriju lakih betona. Iz tablice 4.17 možemo zaključiti da je 40% mješavina s gustoćom manjom od  $2000 \text{ kg/m}^3$  odnosno da spadaju u kategoriju lakih betona. Preostalih 60% mješavina imaju gustoće koje su unutar raspona  $2000 \text{ kg/m}^3$  do  $2300 \text{ kg/m}^3$  što je opet bliže granici prema lakim betonima. Budući da je u ispitivanju korišten dolomit kao prirodni agregat i da on ima veću gustoću nego riječni agregat za pretpostaviti je da bismo upotrebom riječnog agregata dobili sve mješavine u kategoriji lakih betona.
- tlačna čvrstoća betona s opekarskim lomom kao agregatom smanjuje se s povećanjem udjela opekarskog loma. Budući da je cilj ovog istraživanja dobiti mješavine betona pogodne za izradu betonskih stropnih blokova potrebno je zadovoljiti razrede čvrstoće C12/15 (LC 12/13). Iz rezultata prikazanih u tablici 4.17 a uzimajući u obzir zahtjeve postavljene normom za betonske blokove, HRN EN 15037-2:2009, vezane za razred tlačne čvrstoće, moguće je zaključiti da se s opekarskim lomom kao agregatom mogu proizvesti betoni zadovoljavajućih tlačnih čvrstoća za izradu predgotovljenih stropnih blokova. Iz tablice 4.17 je vidljivo da mješavine označene plavom bojom ne zadovoljavaju zahtjeve za tlačne čvrstoće propisane normama. Navedene mješavine imaju visok postotak zamjene prirodnog agregata s opekarskim lomom ( 50%-100%, tablica 4.15) se može zaključiti da se postotak zamjene mora kretati ispod 50% za dobivanje navedenit tlačnih čvrstoća. Kako bismo odredili optimalne mješavine betona za izradu stropnih blokova, u nastavku će biti prikazana optimizacija betonskih mješavina s obzirom na normama postavljene zahtjeve.
- vlačna čvrstoća savijanjem betona smanjuje se povećanjem udjela opekarskog loma. Budući da se vlačna čvrstoća savijanjem smanjuje proporcionalno s tlačnom čvrstoćom, a nema ograničenja postavljenih normom vezanih za vlačne čvrstoće, može se smatrati da vrijede isti zaključci kao kod tlačne čvrstoće. U tablici 4.17 prikazana je i tzv. „prava“ vlačna čvrstoća (direktni vlak) koja je jednaka polovici vrijednosti vlačne čvrstoće savijanjem, a proračunata prema normi HRN EN 1992 1-1: 2004.
- statički modul elastičnosti običnog betona normalnih čvrstoća prema normi EN 1992-1-1:2004 + AC 2010 kreće se od  $27\ 000 \text{ N/mm}^2$  do  $39\ 000 \text{ N/mm}^2$  ovisno o razredu betona. Iz tablice 4.17

vidljivo je da je srednja vrijednost modula elastičnosti betona s opekarskim lomom za ispitane mješavine 18 323 N/mm<sup>2</sup> tj. za oko 30% do 50% manji od modula elastičnosti za obični beton. Manji modul elastičnosti može dati elastičniju konstrukciju u konačnici, što bi bilo značajno u primjeni pri djelovanju potresa, [82]. Također manji modul elastičnosti ukazuje na to da ćemo pri proračunu armature potrebne za ugradnju u nosive betonske elemente dobiti manju potrebnu količinu armature, što je isplativo s ekonomskog gledišta, [82].

#### 4.2.3.4 Korelacija rezultata ispitivanja

Pojava korelacije između dvije ili više varijabli fenomen koji se u statistici naziva kolinearnost i govori koliko su dvije varijable povezane, odnosno s kolikom je vjerojatnošću moguće predvidjeti vrijednost neke varijable ako znamo vrijednost druge varijable koja je s njom u korelaciji [83], [84].

Koeficijent korelacije omogućava procjenu utjecaja jedne varijable na vrijednost druge varijable. Koeficijent korelacije definiran je od -1 do +1, a interpretacija vrijednosti koeficijenta korelacije prema Petzu prikazana je u tablici 4.18, [85]:

Tablica 4. 18: Kriteriji za koeficijent korelacije

| R              | Tumačenje                         |
|----------------|-----------------------------------|
| 0 do ±0,20     | Nikakva ili neznatna korelacija   |
| ±0,20 do ±0,40 | Povezanost                        |
| ±0,40 do ±0,70 | Značajna povezanost               |
| ±0,70 do 1,00  | Visoka ili vrlo visoka povezanost |

Utjecaj sastava pojedine komponente betona na svojstva betona u njegovu svježem i očvrslom stanju te utjecaj i međusobna ovisnost svojstava betona prikazana je tablici 4.19.

Tablica 4.19 prikazuje matricu korelacije odnosno na koji način više varijabli međusobno utječe jedna na drugu. Retci i stupci matrice predstavljaju promatrane varijable (komponente betona, svojstva betona u svježem i očvrslom stanju), a podatak na presjeku određenog retka i stupca predstavlja koeficijent korelacije u odgovarajućem retku i stupcu. Matrica na dijagonali ima koeficijent korelacije 1 budući da je svaka varijabla sama sa sobom u potpunoj korelaciji. Dobivena matrica je simetrična - podaci iznad i ispod dijagonale za isti par varijabli su identični. Zbog tih svojstava matrica je redundantna i dovoljno je promatrati jedan njezin dio, iznad dijagonale ili ispod dijagonale.

Iz tablice 4.19 vidljivo je da nema korelacije između komponenti betona ( $R=0,00$ ), što je i očekivano jer su komponente betona odabrane kao nezavisne varijable prilikom planiranja eksperimenta. Dijagrami korelacije komponenti betona, za betone čiji je sastav prikazan u tablici 4.15, prikazani su u Prilogu P.1.

Između svojstava betona u svježem stanju i komponenti betona postoji korelacija no ona se ne smatra značajnom jer su vrijednosti korelacijskih faktora ispod 0,7.

Korelacija između gustoće i v/c faktora te konzistencije i opekarskog loma jednaka je nuli (označeno plavo u tablici 4.19). To upućuje na zaključak da ostali faktori koji su istovremeno mijenjani s v/c

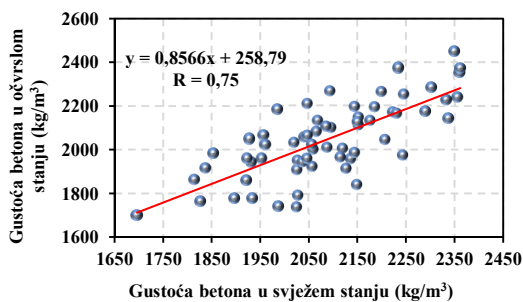
faktorom odnosno opekarskim lomom nemaju značajan utjecaj na svojstva betona u svježem stanju jer nema korelacije između navedenih svojstava i komponenti betona. Dijagrami korelacija svojstava betona u svježem stanju prikazani su u Prilogu P.1.

Iz tablice 4.19 je vidljivo da vrlo visoka povezanost ( $R = \pm 0,70$  do 1,00) postoji između:

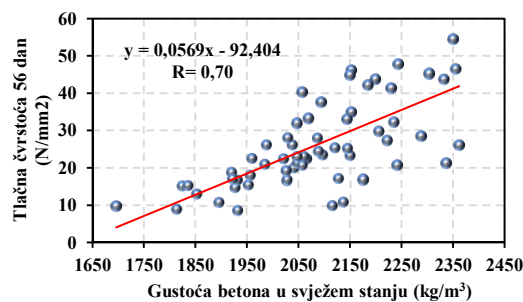
- gustoće betona u svježem i očvrslom stanju,  $R = 0,75$ ; slika 4.2.
- gustoće betona u svježem stanju i tlačne čvrstoće betona,  $R = 0,70$ ; slika 4.3.
- gustoće betona u očvrslom stanju i tlačne čvrstoće betona,  $R = 0,71$ ; slika 4.4. i  $R = 0,79$ ; slika 4.5.
- gustoće betona u očvrslom stanju i vlačne čvrstoće savijanjem betona,  $R = 0,71$ ; slika 4.6.
- gustoće betona u očvrslom stanju i statičkog modula elastičnosti,  $R = 0,82$ ; slika 4.7.
- tlačne čvrstoće 28 dan i tlačne čvrstoće 56 dan,  $R = 0,91$ ; slika 4.8.
- tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti,  $R = 0,77$ ; slika 4.9.
- tlačne i vlačne čvrstoće;  $R = 0,87$ ; slika 4.10.

Tablica 4. 19: Matrica korelacije komponenti betona, svojstava svježeg betona i svojstava očvrsllog betona

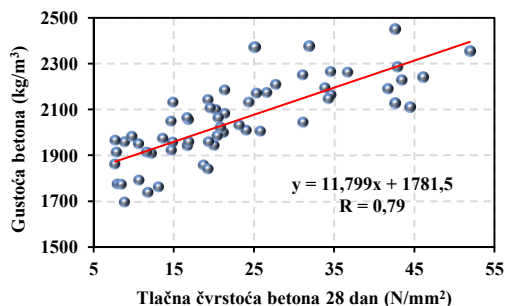
| Koeficijent korelacije R  |                              | Komponente betona |      |         |               | Svježe stanje |               |              | Očvršlo stanje |                  |                   |                              |                             |
|---|------------------------------|-------------------|------|---------|---------------|---------------|---------------|--------------|----------------|------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|
|   |                              | Cement            | v/c  | Dodatak | Opekarski lom | Gustoća       | Konzistencija | Sadržaj pora | Gustoća        | Tlačna čvrstoća* | Tlačna čvrstoća** | Vlačna čvrstoća savijanjem** | Statički modul elastičnosti |
| Komponente betona   | Cement                       | 1,00              | 0,00 | 0,00    | 0,00          | 0,44          | 0,37          | 0,39         | 0,32           | 0,40             | 0,48              | 0,41                         | 0,26                        |
|   | v/c                          | 0,00              | 1,00 | 0,00    | 0,00          | 0,00          | 0,47          | 0,17         | 0,00           | 0,30             | 0,20              | 0,14                         | 0,22                        |
|   | Dodatak                      | 0,00              | 0,00 | 1,00    | 0,00          | 0,20          | 0,32          | 0,10         | 0,00           | 0,10             | 0,00              | 0,26                         | 0,00                        |
|   | Opekarski lom                | 0,00              | 0,00 | 0,00    | 1,00          | 0,48          | 0,00          | 0,14         | 0,41           | 0,22             | 0,26              | 0,26                         | 0,50                        |
| Svježe stanje   | Gustoća                      | 0,44              | 0,00 | 0,20    | 0,48          | 1,00          | 0,14          | 0,69         | 0,75           | 0,69             | 0,70              | 0,66                         | 0,68                        |
|   | Konzistencija                | 0,37              | 0,47 | 0,32    | 0,00          | 0,14          | 1,00          | 0,10         | 0,17           | 0,37             | 0,26              | 0,22                         | 0,28                        |
|   | Sadržaj pora                 | 0,39              | 0,17 | 0,10    | 0,14          | 0,69          | 0,10          | 1,00         | 0,65           | 0,55             | 0,63              | 0,68                         | 0,48                        |
| Očvršlo stanje  | Gustoća                      | 0,32              | 0,00 | 0,00    | 0,41          | 0,75          | 0,17          | 0,65         | 1,00           | 0,79             | 0,71              | 0,71                         | 0,82                        |
|   | Tlačna čvrstoća*             | 0,40              | 0,30 | 0,10    | 0,24          | 0,69          | 0,37          | 0,55         | 0,79           | 1,00             | 0,91              | 0,69                         | 0,69                        |
|   | Tlačna čvrstoća**            | 0,48              | 0,20 | 0,00    | 0,26          | 0,70          | 0,26          | 0,63         | 0,71           | 0,91             | 1,00              | 0,87                         | 0,77                        |
|   | Vlačna čvrstoća savijanjem** | 0,41              | 0,14 | 0,26    | 0,26          | 0,66          | 0,22          | 0,68         | 0,71           | 0,69             | 0,87              | 1,00                         | 0,66                        |
|   | Statički modul elastičnosti  | 0,26              | 0,22 | 0,00    | 0,50          | 0,68          | 0,28          | 0,48         | 0,82           | 0,69             | 0,77              | 0,66                         | 1,00                        |
| *Čvrstoća ispitana u 28 danu starosti betona, **Čvrstoća ispitana u 56 danu starosti betona |                              |                   |      |         |               |               |               |              |                |                  |                   |                              |                             |
| Značajna povezanost   |                              |                   |      |         |               |               |               |              |                |                  |                   |                              |                             |
| Visoka ili vrlo visoka povezanost   |                              |                   |      |         |               |               |               |              |                |                  |                   |                              |                             |
| Nema korelacije   |                              |                   |      |         |               |               |               |              |                |                  |                   |                              |                             |



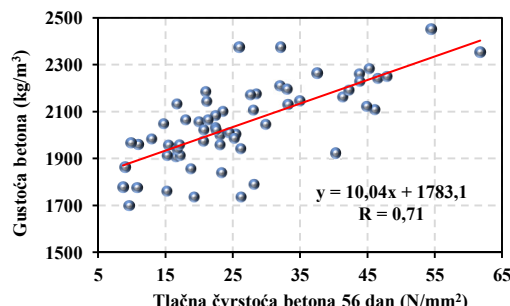
Slika 4. 2: Korelacija između gustoće betona u svježem i očvrslom stanju



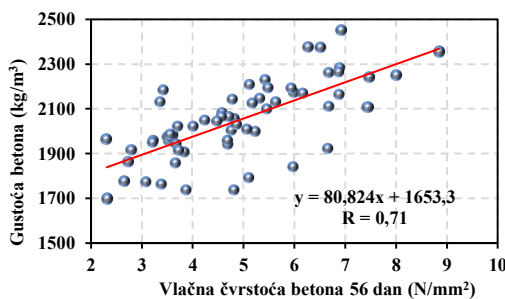
Slika 4. 3: Korelacija između gustoće u svježem stanju i tlačne čvrstoće (56 dan)



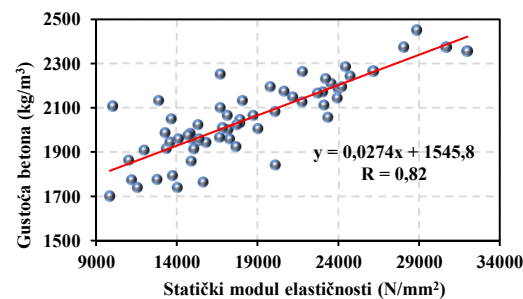
Slika 4. 4: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i tlačne čvrstoće (28 dan)



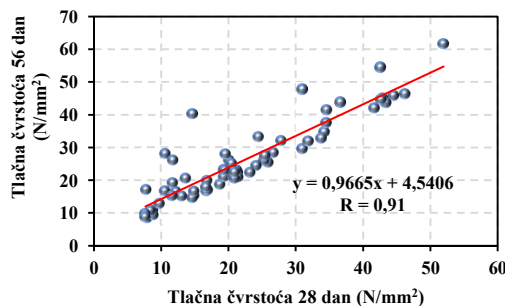
Slika 4. 5: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i tlačne čvrstoće (56 dan)



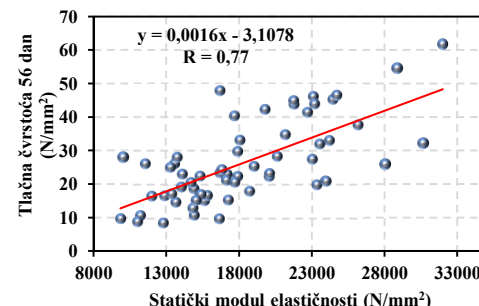
Slika 4. 6: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i vlačne čvrstoće savijanjem (56 dan)



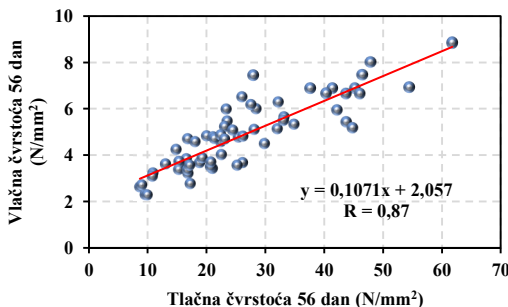
Slika 4. 7: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i statičkog modula elastičnosti



Slika 4. 8: Korelacija između tlačne čvrstoće 28 dan i tlačne čvrstoće 56 dan



Slika 4. 9: Korelacija između tlačne čvrstoće statičkog modula elastičnosti



Slika 4. 10: Korelacija između tlačne i vlačne čvrstoće savijanjem



Gustoća svježeg betona i gustoća očvrsllog betona nisu identične, kako je i očekivano, a između njih postoji vrlo visoka povezanost (slika 4.2 i tablica 4.19.) Veza između gustoće betona u svježem stanju i gustoće betona u očvrslom stanju ovisi o nizu faktora: sastavu betona i karakteristikama agregata, o stupnju obradljivosti betona, volumnim promjenama, starosti betona i njezi betona. Ovim istraživanjem nije obuhvaćeno proučavanje utjecaja navedenih faktora na gustoće betona te bi detaljnu analizu utjecaja pojedinog faktora na gustoće trebalo napraviti u nekom od daljnjih istraživanja.

Kako bismo mogli zaključiti je li moguće na temelju gustoće betona izmjerene u svježem stanju procijeniti i predvidjeti kolika će biti tlačna čvrstoća betona, mjerena 28 ili 56 dan, potrebno je odrediti kolika je povezanost tih dvaju svojstava međusobno.

Gustoća betona između ostalog ovisi o vrsti i karakteristikama agregata, te količini agregata koji se koristi u betonu. Povećanjem količine agregata u betonu povećava se i njegova gustoća. Betoni s opekarskim lomom kao agregatom imaju manje gustoće od betona s prirodnim agregatom u ovisnosti o postotku zamjene prirodnog agregata opekarskim lomom.

Kako je agregat jedan od parametara utjecaja na čvrstoću betona (volumen, poroznost i maksimalno zrno) za očekivati je da se iz veze utjecaja agregata na gustoću i tlačnu čvrstoću može očekivati i dobra povezanost gustoće i tlačne čvrstoće.

Iz tablice 4.19, te slika 4.3 i 4.4 moguće je zaključiti da postoji visoka povezanost dvaju navedenih svojstava te upućuje na činjenicu da je moguće predvidjeti tlačnu čvrstoću betona s opekarskim lomom na temelju izmjerene gustoće betona u svježem stanju.

Također je potrebno napomenuti da dobra povezanost tj. visok koeficijent korelacije ne znači nužno i uzročno posljedičnu vezu između pojedinih svojstava već je to potrebno dodatno potkrijepiti ispitivanjima i proračunom. Ako bi se dodatno potvrdile pretpostavke o mogućnosti predviđanja tlačne čvrstoće betona preko njegove gustoće tada bi se gustoća betona mogla koristiti kao rani pokazatelj tlačne čvrstoće betona s opekarskim lomom.

Iz tablice 4.19 i slike 4.5 može se zaključiti da je povezanost između gustoće betona u očvrslom stanju s tlačnom čvrstoćom betona vrlo visoka. Uzimajući u obzir da je u ovom slučaju koeficijent korelacije  $R$  svega 0,01 manji nego koeficijent korelacije između tlačne čvrstoće i gustoće u svježem stanju, možemo zaključiti da je razlika koeficijentata korelacije zanemarivo mala. Iz toga slijedi da za povezanost gustoće betona u očvrslom stanju i tlačne čvrstoće vrijede isti zaključci kao i kod povezanosti gustoće betona u svježem stanju i tlačne čvrstoće.

U tablici 4.19 i na slici 4.6 možemo vidjeti da je koeficijent korelacije između tlačne čvrstoće savijanjem betona s opekarskim lomom i gustoće istog betona u očvrslom stanju 0,71 što upućuje na zaključak da postoji visoka povezanost između navedenih svojstava. Kao i u prethodnim slučajevima, slijedi da je moguće procijeniti tlačnu čvrstoću savijanjem betona na temelju određene gustoće betona u očvrslom stanju no točnost takve procjene i izraz na temelju kojega bismo procjenu mogli proračunati, te uzročno posljedična veza takvog ponašanja nisu bili predmet ove faze istraživanja i trebalo bi ih dodatno istražiti.

Koeficijent korelacije između gustoće betona i statičkog modula elastičnosti iznosi 0,82 (tablica 4.19 i slika 4.7) te slijedi da postoji vrlo visoka povezanost među navedenim svojstvima. Parametri koji utječu na modul elastičnosti betona su: stanje vlažnosti uzorka i uvjeti opterećivanja; modul elastičnosti cementnog kamena; poroznost i sastav prijelazne zone (sučeljka); modul elastičnosti agregata i volumni udio agregata.

Veća gustoća agregata i veći udio agregata znači i veći modul elastičnosti. Iz veze između agregata i modula elastičnosti te agregata i gustoće očekivano je da će ta dva svojstva imati visoku međusobnu povezanost, što je i pokazano provedenim ispitivanjima, slika 4.7.

Tlačna čvrstoća betona s opekarskim lomom mjerena je na uzorcima starim 28 i 56 dana. Budući da se betonu s vremenom povećava tlačna čvrstoća očekivano je da će tlačne čvrstoće mjerene 28. dan biti manje od tlačnih čvrstoća mjenjenih 56. dan. Iz tablice 4.19 i slike 4.8 možemo zaključiti da postoji visoka povezanost između tlačnih čvrstoća mjenjenih 28. i 56. dan starosti betona.

Uzročno posljedična veza između tlačne čvrstoće betona i statičkog modula betona propisana je u normi HRN EN 1992-1-1:2004, a dana je izrazom:

$$E_{cm} = 9,5 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \quad (62)$$

gdje je:

$E_{cm}$  –sekantni modul elastičnosti betona,

$f_{ck}$  – karakteristična tlačna čvrstoća betona mjerena na uzorku oblika valjka pri starosti betona od 28 dana.

Također je propisano da se pri upotrebi vapnenačkog agregata vrijednosti modula elastičnosti trebaju umanjiti za 10% do 30%, a bazalta kao agregata za 20%. Kako bismo mogli dokazati vrijedi li isti matematički izraz i za betone s opekarskim lomom kao agregatom te koji je postotak kojim bi trebalo umanjiti proračunate vrijednosti potrebno je odrediti modul elastičnosti betona pri 28 danu starosti betona. Kako je mjerenje modula elastičnosti u ovoj fazi istraživanja provedeno samo pri starosti betona 56 dan nije moguće analizirati vrijedi li navedeni matematički izraz i za beton s opekarskim lomom.

Povezanost između tlačne čvrstoće betona i modula elastičnosti vidljiva je u tablici 4.19 i slici 4.9 a iskazana koeficijentom korelacije iznosi 0,77. Budući da postoji visoka povezanost ( $R=0,77$ ) između tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti možemo zaključiti da je kao i u prethodnim slučajevima, moguće procijeniti statički modul elastičnosti betona na temelju određene tlačne čvrstoće betona no točnost takve procjene i izraz na temelju kojega bismo procjenu mogli proračunati, te uzročno posljedična veza takvog ponašanja nisu bili predmet ove faze istraživanja i trebalo bi ih dodatno istražiti.

Prema EN 1992 (Eurocode 2) vlačnu čvrstoća betona možemo prikazati kao funkciju tlačne čvrstoće. Njezina vrijednost ovisi o parametrima kao što su oblik i tekstura agregata, te je u odnosu na tlačnu čvrstoću znatno varijabilnija. Odnos između tlačne i vlačne čvrstoće betona prema EN 1992 dan je izrazom:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (63)$$

gdje je:

$f_{ct,m}$  – srednja vrijednost vlačne čvrstoće betona,

$f_{ck}$  – tlačna čvrstoća betona mjerena na uzorku oblika valjka pri starosti od 28 dana.

Kako su mjerenja tlačne čvrstoće betona 28 dan u ovoj fazi istraživanja mjerena samo na uzorcima oblika kocke, a ne na valjcima kako je dano u formuli, nije moguće izračunati vlačnu čvrstoću preko tlačne čvrstoće po izrazu (63), te se u sljedećoj fazi ispitivanja preporuča određivanje tlačne čvrstoće na uzorcima oblika valjka.

Iz slike 4.10 vidljivo je da je koeficijent korelacije između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće savijanjem jednak 0,87 te nam ukazuje na vrlo visoku povezanost između ta dva svojstva. Iz jednadžbe pravca  $y$ , prikazane na slici 4.10, vidljivo je da je vlačna čvrstoća savijanjem betona s opekarskim lomom kao agregatom jednaka 10,71% tlačne čvrstoće betona.

### **4.3 Odabir prihvatljivih mješavina na temelju eksperimenta**

Nakon provedenih eksperimentalnih ispitivanja, čiji su rezultati prikazani u poglavlju 4.2.3 *Ispitivanje svojstava betonskih mješavina*, proveden je odabir prihvatljivih mješavina za izradu blokova. U nastavku teksta će se, jednostavnosti radi, pojedinačna svojstva označavati na sljedeći način:

- A gustoća u svježem stanju
- B konzistencija po metodi slijeganja u svježem stanju
- C sadržaj pora u svježem stanju
- D srednja vrijednost tlačne čvrstoće 28. dan
- E srednja vrijednost gustoće očvrslog betona 28. dan
- F srednja vrijednost tlačne čvrstoće 56. dan
- G srednja vrijednost vlačne čvrstoće 56. dan
- H srednja vrijednost gustoće očvrslog betona 56. dan
- I statički modul elastičnosti 56. dan

Pri odabiru prihvatljivih mješavina za blokove uzeti su dozvoljeni rasponi vrijednosti prikazani u tablici 4.20. Pritom za svojstva A i I nema ograničenja. Za svojstvo B i gornja i donja granica (od 10 mm do 90 mm) navedene su prema preporukama iz norme HRN EN 206-1:2006.

Svojstvo C neće se uzimati u obzir kao značajno za odabir mješavine jer nije korišten optimalni granulometrijski sastav već granulometrijski sastav prikazan na slici 4.1, kako je opisano u poglavlju 4.2.1.1 *Granulometrijski sastav*. Pri tome je zaključeno da sadržaj pora u svježem stanju neće biti uzet u obzir za odabir prihvatljivih mješavina (v. poglavlje 4.2.3.2. *Ispitivanje svojstava svježeg betona*). Važno je napomenuti da će projektiranje granulometrijskog sastava biti uzeto u obzir pri projektiranju sastava i ispitivanju odabranih optimalnih mješavina.

Za svojstva D i F navedena je samo donja granica (13 N/mm<sup>2</sup>) prema normama HRN EN 15037-2:2009.

Budući da je cilj dobiti prihvatljive mješavine sa što većim postotkom zamjene prirodnog agregata s drobljenim crijepom i opekom, te u konačnici dobiti betonski blok što manje mase odabrana je granica za svojstva E i H kako je navedeno u tablici 4.20.

Vlačna čvrstoća običnog betona iznosi u prosjeku 5% do 15% tlačne čvrstoće betona, a eksperimentalno je dobiveno da je za beton s opekarskim lomom vlačna čvrstoća jednaka 5% tlačne čvrstoće betona s opekarskim lomom, tablica 4.17. Budući da normom HRN EN 15037-2:2009 nema propisanih ograničenja vezanih za vlačnu čvrstoću, svojstvo G neće biti uzeto u obzir za odabir prihvatljivih mješavina.

Tablica 4. 20: Dozvoljeni rasponi vrijednosti ispitivanih svojstava

| Svojstvo | Ograničenja vrijednosti svojstava za blokove |
|----------|--|
| A        | Ne uzima se u obzir                          |
| B        | Od 10 mm do 90 mm                            |
| C        | Ne uzima se u obzir                          |
| D        | Vrijednost veća od 13 N/mm <sup>2</sup>      |
| E        | Vrijednost veća od 800 kg/m <sup>3</sup>     |
| F        | Vrijednost veća od 13 N/mm <sup>2</sup>      |
| G        | Ne uzima se u obzir                          |
| H        | Vrijednost veća od 800 kg/m <sup>3</sup>     |
| I        | Ne uzima se u obzir                          |

Od ukupno 62 ispitane mješavine, u tablici 4.21 izdvojeno je 11 mješavina koje zadovoljavaju uvjete B, D, E, F i H navedene u tablici 4.20. Ove će se mješavine kao kandidati za optimalnu mješavinu ravnopravno uspoređivati s mješavinama dobivenim na temelju modela drugog reda opisanog u sljedećem poglavlju.

Tablica 4. 21: Mješavine koje zadovoljavaju uvjete B, D, E, F i H iz tablice 4.20

|  | Mješavine za blok  |
|--|--|
| Redni broj mješavine prema tablici 4.4 | BM17, BM19, BM25, BM26, BM34, BM35, BM36, BM41, BM42, BM49, BM50 |

#### 4.4 Modeliranje svojstava betona

Rezultati preliminarnih ispitivanja provedenih prema Box-Behnkenovom planu eksperimenta, definiranom u tablici 4.4, za odabrana osnovna svojstva prikazana u tablici 4.2 prikazani su u tablicama 4.16 i 4.17. Primjenjujući regresijsku analizu dobiveni su parametri  $\beta$  potrebni u izrazu (49) za određivanje modela drugog reda  $y$  za svako od svojstava iz tablice 4.2.

Za dobivanje parametara  $\beta$  upotrijebljen je Matlab, Version 7.8.0.347, tj. naredba *regstats* čiji se algoritam temelji na QR dekompoziciji matrica, [86]. Uvjet za uspješno izvođenje algoritma jest da model ima broj članova manji ili jednak broju mjerenja:

$$\text{broj članova modela} \leq \text{broj mjerenja} = 62 \quad (64)$$

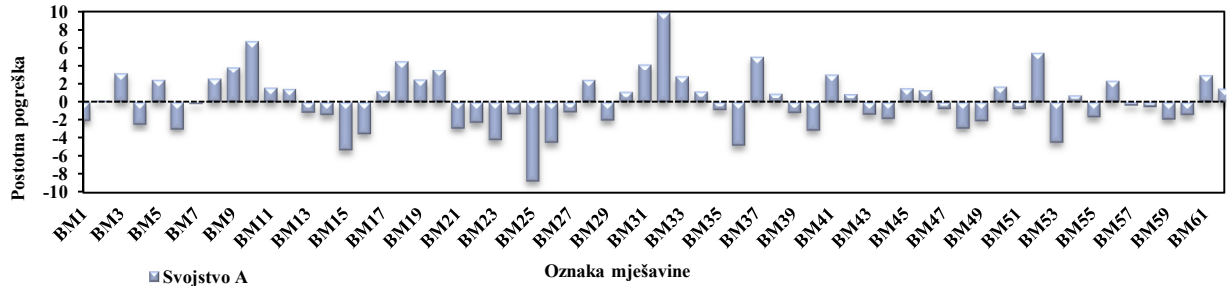
Model drugog reda prema (49) sadrži 36 članova modela čime je zadovoljen uvjet (64). U tablici 4.22 prikazani su na taj način izračunati parametri  $\beta$  za svako od svojstava. Pritom su vrijednosti faktora normirane na raspon [-1, 1], gdje -1 odnosno 1 odgovaraju donjoj, odnosno gornjoj granici faktora prema Tablici 4.2.

Tablica 4. 22: Parametri modela drugog reda

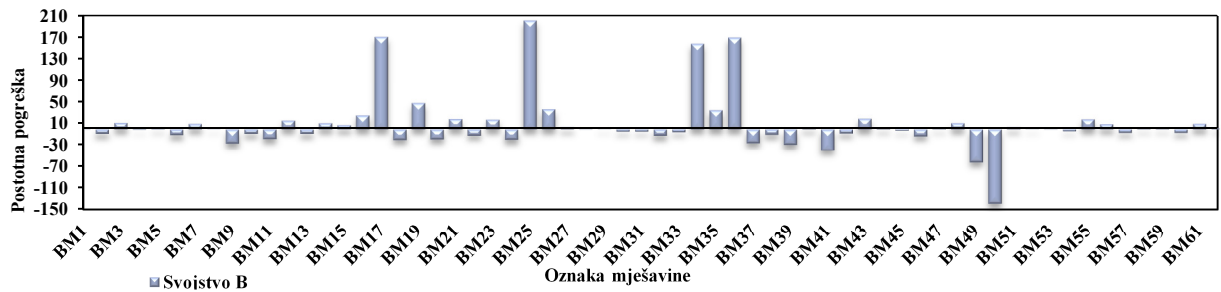
| $\beta$      | Svježe stanje |        |       | 28. dan |         | 56. dan |       |         |          |
|--------------|---------------|--------|-------|---------|---------|---------|-------|---------|----------|
|              | $y_A$         | $y_B$  | $y_C$ | $y_D$   | $y_E$   | $y_F$   | $y_G$ | $y_H$   | $y_I$    |
| $\beta_0$    | 2017,80       | 214,17 | 0,09  | 15,86   | 1879,90 | 23,30   | 2,19  | 2038,40 | 14436,00 |
| $\beta_1$    | 102,78        | 42,08  | -0,02 | 7,35    | 84,72   | 9,22    | 0,49  | 88,21   | 2153,00  |
| $\beta_2$    | 13,10         | 52,29  | -0,01 | -5,68   | 5,65    | -3,95   | -0,16 | 5,90    | -1833,80 |
| $\beta_3$    | -45,46        | 36,88  | -0,01 | -1,96   | 15,53   | -0,31   | 0,31  | 45,90   | 387,05   |
| $\beta_4$    | -52,92        | -7,08  | 0,00  | 0,63    | -9,51   | 0,17    | -0,05 | -8,82   | -123,27  |
| $\beta_5$    | -80,89        | 3,75   | 0,01  | -4,06   | -104,43 | -3,25   | -0,24 | -94,82  | -3432,00 |
| $\beta_6$    | -42,16        | -3,54  | 0,00  | -1,49   | -31,78  | -1,60   | -0,04 | -25,99  | -1325,90 |
| $\beta_7$    | -53,83        | 10,00  | 0,01  | -3,90   | -77,26  | -5,28   | -0,29 | -119,93 | -3328,60 |
| $\beta_{12}$ | 38,50         | -44,38 | -0,01 | 3,86    | 65,69   | 3,38    | 0,29  | 54,79   | 954,11   |
| $\beta_{13}$ | 23,00         | -49,38 | -0,01 | 1,30    | 65,49   | 3,44    | 0,28  | 79,63   | 3298,30  |
| $\beta_{14}$ | 46,50         | -1,88  | 0,00  | 2,66    | -9,33   | 2,92    | 0,04  | 27,94   | 348,44   |
| $\beta_{15}$ | -17,50        | -3,13  | -0,01 | -1,74   | -15,64  | 2,17    | 0,08  | -6,05   | -133,11  |
| $\beta_{16}$ | -46,90        | 13,75  | 0,00  | 0,27    | -55,47  | -1,55   | -0,14 | -40,35  | -961,18  |
| $\beta_{17}$ | 3,40          | -12,50 | -0,01 | -2,89   | -9,97   | -4,56   | -0,08 | -15,72  | 8,54     |
| $\beta_{23}$ | 55,75         | -67,50 | -0,03 | 7,14    | 80,13   | 8,77    | 0,61  | 100,92  | 546,14   |
| $\beta_{24}$ | -2,25         | -3,13  | 0,00  | 0,66    | 21,12   | 0,70    | 0,17  | 3,85    | 612,30   |
| $\beta_{25}$ | 5,45          | -5,00  | 0,00  | 4,37    | 31,06   | 5,48    | 0,13  | 36,31   | -77,78   |
| $\beta_{26}$ | 29,25         | 0,00   | 0,00  | 2,26    | 31,40   | 0,17    | 0,09  | 33,77   | 304,32   |
| $\beta_{27}$ | 56,30         | -30,00 | -0,01 | 2,39    | -15,27  | 3,94    | 0,05  | -1,09   | 875,59   |
| $\beta_{34}$ | -33,63        | 3,75   | 0,01  | -7,19   | -63,75  | -6,73   | -0,36 | -89,80  | -1519,80 |
| $\beta_{35}$ | -11,00        | 5,63   | 0,00  | -1,21   | -40,68  | 0,84    | -0,05 | -18,71  | -974,25  |
| $\beta_{36}$ | -23,00        | 5,00   | 0,00  | -4,97   | -41,34  | -5,37   | -0,13 | -35,70  | -1614,80 |
| $\beta_{37}$ | -24,38        | 22,50  | 0,01  | -5,77   | -73,60  | -6,54   | -0,36 | -82,51  | -1835,40 |
| $\beta_{45}$ | -25,63        | 5,63   | 0,00  | 0,56    | -12,77  | -0,21   | 0,03  | -23,28  | -478,55  |
| $\beta_{46}$ | -39,63        | 8,13   | 0,01  | -4,52   | -70,53  | -4,40   | -0,38 | -68,08  | -1346,20 |
| $\beta_{47}$ | 2,13          | 12,50  | 0,00  | -1,05   | -3,77   | -0,88   | -0,03 | -1,05   | -127,80  |
| $\beta_{56}$ | -6,63         | 11,88  | 0,00  | -0,78   | -4,65   | -1,04   | -0,06 | -3,70   | -361,38  |
| $\beta_{57}$ | 7,45          | 8,75   | 0,00  | 2,71    | 94,10   | 3,03    | 0,05  | 21,57   | 307,36   |
| $\beta_{67}$ | -17,40        | 0,00   | -0,01 | -0,95   | -10,97  | -0,33   | -0,17 | -49,77  | -950,54  |
| $\beta_{11}$ | 9,60          | -9,20  | -0,01 | 3,60    | 70,38   | 3,10    | 0,12  | 26,60   | 2396,60  |
| $\beta_{22}$ | 120,80        | -11,39 | -0,02 | 7,06    | 134,07  | 7,11    | 0,52  | 92,68   | 2413,60  |
| $\beta_{33}$ | 9,71          | -45,14 | -0,01 | 4,26    | 83,06   | 3,18    | 0,08  | 21,39   | 1185,40  |
| $\beta_{44}$ | -18,98        | -11,70 | 0,02  | 1,49    | 24,91   | -0,72   | -0,05 | -34,37  | 214,72   |
| $\beta_{55}$ | -10,14        | -0,45  | 0,01  | -3,58   | 11,55   | -5,38   | -0,18 | -82,66  | 607,61   |
| $\beta_{66}$ | -0,84         | -0,14  | 0,00  | -0,18   | 0,71    | -1,28   | -0,14 | -47,69  | -670,30  |
| $\beta_{77}$ | 70,81         | -28,58 | -0,01 | 4,59    | 107,57  | 1,77    | 0,29  | 40,25   | 3894,70  |

Slike 4.11. prikazuju za svako pojedinačno mjerenje postotne pogreške vrijednosti dobivenih modelom  $y$  u odnosu na mjerene vrijednosti  $y'$

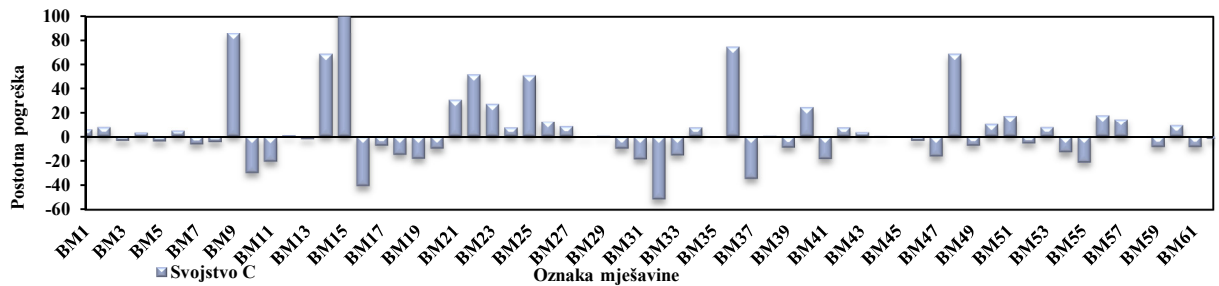
$$p = \frac{y - y'}{y'} * 100\% \quad (65)$$



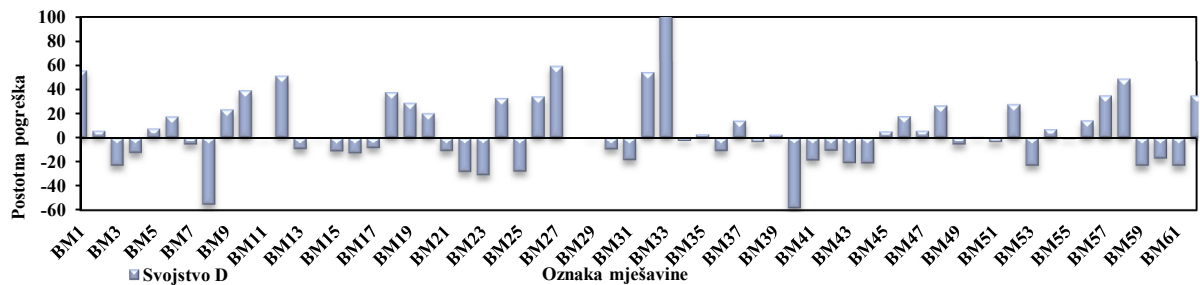
a) Postotna pogreška za svojstvo A



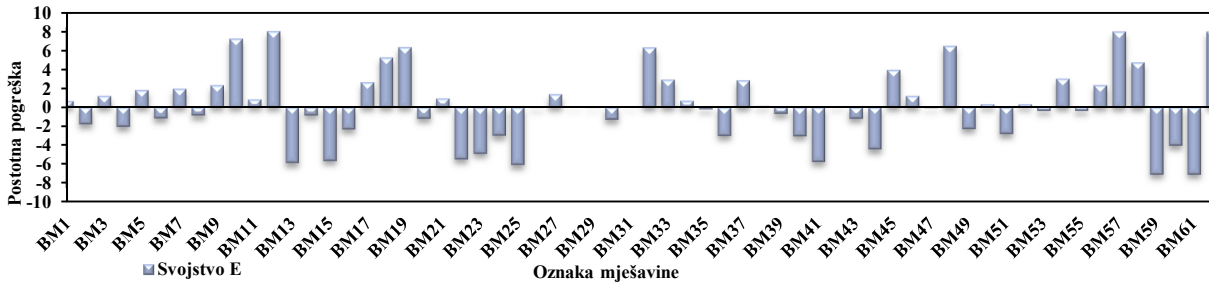
a) Postotna pogreška za svojstvo B



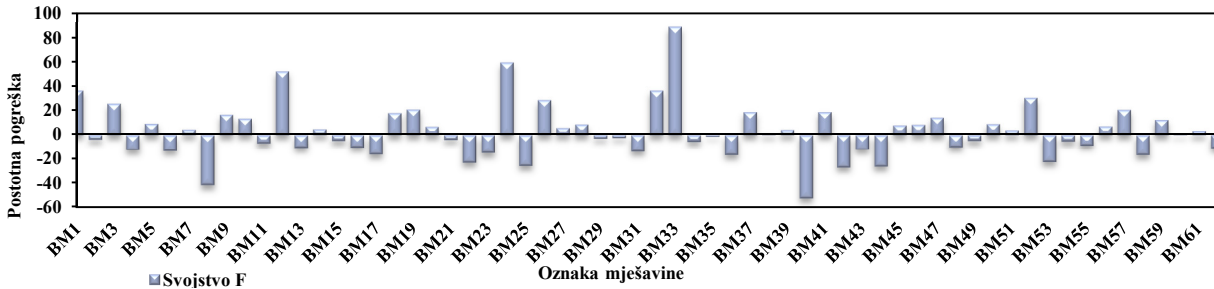
b) Postotna pogreška za svojstvo C



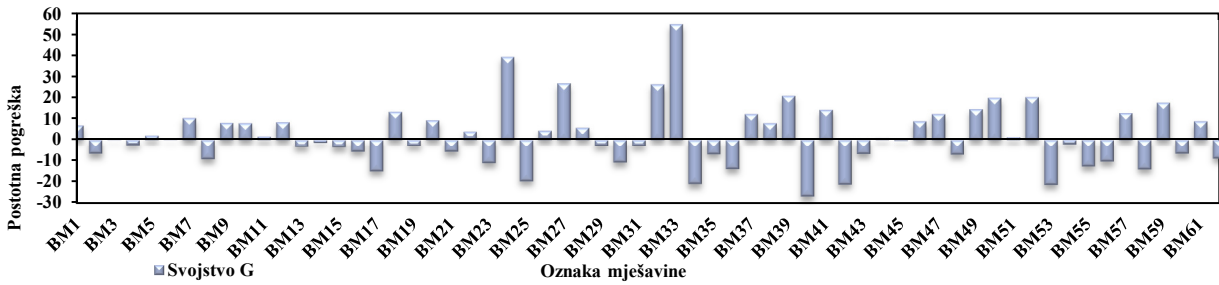
c) Postotna pogreška za svojstvo D



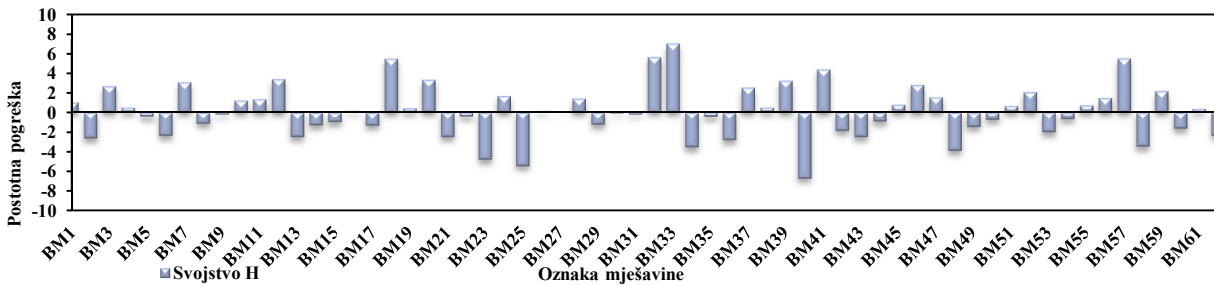
e) Postotna pogreška za svojstvo E



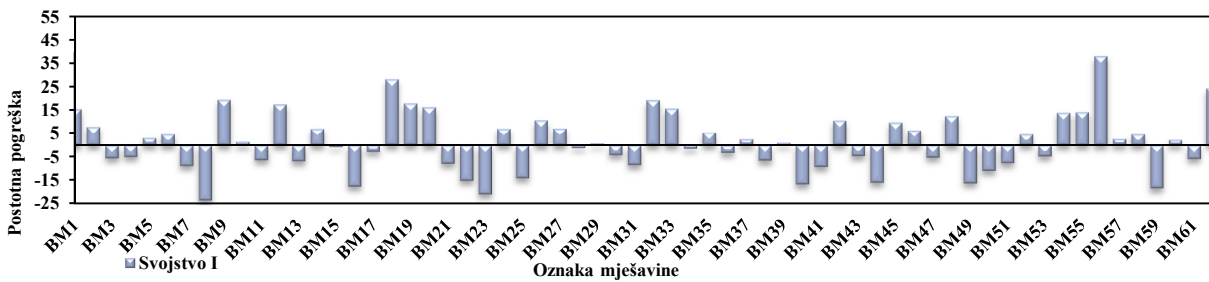
f) Postotna pogreška za svojstvo F



g) Postotna pogreška za svojstvo G



h) Postotna pogreška za svojstvo H



i) Postotna pogreška za svojstvo I

Slika 4. 11: Postotne pogreške za svojstva A do I

Točnost modela procijenjena je za svako svojstvo računanjem srednje apsolutne postotne pogreške vrijednosti dobivenih modelom  $y$  u odnosu na mjerene vrijednosti  $y'$ :

$$\bar{p} = \frac{1}{62} \sum_{i=1}^{62} \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| * 100\% \quad (66)$$

utvrđivanjem najveće apsolutne postotne pogreške za pojedinačna mjerenja:

$$p_{\max} = \max_i \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| * 100\% \quad (67)$$

te računanjem standardnih devijacija:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{62} \sum_{i=1}^{62} (y_i - y'_i)^2} \quad (68)$$

i koeficijent varijacije:

$$\sigma_{sr} = \frac{\sigma}{\frac{1}{62} \sum_{i=1}^{62} y'_i} \quad (69)$$

Tablica 4. 23: Pokazatelji točnosti modela

|                | A     | B      | C      | D      | E     | F     | G     | H     | I      |
|----------------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $\bar{p}$ , %  | 2,59  | 25,19  | 20,60  | 22,00  | 2,91  | 16,63 | 11,14 | 2,12  | 10,26  |
| $p_{\max}$ , % | 9,95  | 201,39 | 231,08 | 126,17 | 8,07  | 88,67 | 54,82 | 7,01  | 37,97  |
| $\sigma$       | 67,76 | 25,25  | 0,02   | 4,74   | 75,81 | 4,59  | 0,33  | 55,11 | 2129,4 |
| $\sigma_{sr}$  | 0,03  | 0,14   | 0,20   | 0,21   | 0,037 | 0,17  | 0,13  | 0,03  | 0,12   |

Tablica 4.23 prikazuje navedene pokazatelje točnosti. Ako uzmemo srednju apsolutnu postotnu pogrešku  $\bar{p}$  od najviše 10 % kao tehnički prihvatljivu, iz Tablice 4.23 vidljivo je da pretpostavljeni model (49), uz parametre  $\beta$  iz Tablice 4.22, najbolje opisuje svojstva A, E, i H, te da je usto i svojstvo G blizu tehnički prihvatljive pogreške. Međutim, ako istu granicu od 10 % primijenimo na postotne pogreške pojedinačnih mjerenja svakog svojstva, iz slika 4.11 vidljivo je da sukladno izrazu (65) samo svojstva A, E i H zadovoljavaju postavljenu uvjet.

Dakle, modelom drugog reda (49) mogu se opisati samo svojstva A, E i H sa zadovoljavajućom točnošću na cijelom 7-dimenzionalnom eksperimentalnom prostoru. Modeli ostalih svojstava se mogu smatrati točnima samo na onim dijelovima 7-dimenzionalnog eksperimentalnog prostora na kojima je točnost modela zadovoljavajuća što će biti detaljnije provjereno u sljedećem poglavlju u kontekstu odabira prihvatljivih mješavina na temelju modela.

#### 4.5 Odabir prihvatljivih mješavina na temelju modela

U svrhu odabira prihvatljive mješavine na temelju modela, 7-dimenzionalni eksperimentalni prostor podijeljen je na deset jednakih dijelova za svaki od sedam faktora:

$$x_i = -1; -0,8; -0,6; -0,4; -0,2; 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,$$

te je onda za dobivenih  $11^7$  točaka podijeljenog eksperimentalnog prostora (tj. za  $11^7$  mogućih mješavina) provjeravano je li za najbližu točku eksperimentalnog prostora cjelobrojnih normiranih iznosa faktora provedeno mjerenje prema tablici 4.4, kao što je prikazano na primjeru u tablici 4.24.



Tablica 4. 24: Primjer određivanja najbliže točke eksperimentalnog prostora

|   | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Primjer točke podijeljenog eksperimentalnog prostora  | -0,8  | 0,2   | -0,6  | 0     | 1     | 0,4   | 0,6   |
| Najbliža točka eksperimentalnog prostora cjelobrojnih normiranih iznosa faktora                                     | -1    | 0     | -1    | 0     | 1     | 0     | 1     |
| Nenormirani iznosi faktora najbliže točke eksperimentalnog prostora cjelobrojnih iznosa faktora (prema tablici 4.2) | 300   | 0,5   | 0     | 25    | 50    | 25    | 50    |

U slučaju da je mjerenje provedeno, u sljedećem koraku se provjerava je li postotna pogreška, prema izrazu (65), manja od 10 % za svako od svojstava A do I. Na kraju se provjerava zadovoljavaju li svojstva, dobivena eksperimentalnim točkama koje su zadovoljile prethodne provjere, uvjete navedene u tablici 4.20. Na ovaj način je utvrđeno da je od ukupno 11<sup>7</sup> točaka podijeljenog eksperimentalnog prostora u slučaju 1023125 točaka provedeno mjerenje za njima najbližu točku eksperimentalnog prostora. Od toga zahtijevanu točnost od 10 %, te uvjete navedene u tablici 4.20 zadovoljava 12 točaka (mješavina) za blok (v. Tablicu 4.25). Ovime ukupan broj prihvatljivih mješavina iznosi 23 (12 na temelju modela i 11 na temelju eksperimenta). U sljedećem će se poglavlju optimalne mješavine odabrati na temelju metoda višekriterijskog odlučivanja.

U tablici 4.26 prikazane su izračunate vrijednosti svojstava za mješavine prikazane u tablici 4.25 s pomoću matematičkog modela (49) i vrijednosti parametara modela prikazanih u tablici 4.22.

Tablica 4. 25: Mješavine prihvatljive na temelju modela

| Oznaka mješavine | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| B1               | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -1    | 0,8   | 0,4   |
| B2               | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -1    | 1     | -0,4  |
| B3               | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -1    | 1     | -0,2  |
| B4               | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -1    | 1     | 0     |
| B5               | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -1    | 1     | 0,2   |
| B6               | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -1    | 1     | 0,4   |
| B7               | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -0,8  | 1     | -0,4  |
| B8               | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -0,8  | 1     | 0,4   |
| B9               | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -0,6  | 1     | -0,4  |
| B10              | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -1    | -0,6  | 1     | 0,4   |
| B11              | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -0,8  | -1    | 1     | -0,4  |
| B12              | -0,4  | -0,4  | -0,4  | -0,8  | -1    | 1     | 0,4   |

Tablica 4. 26: Izračunate vrijednosti svojstava

| Oznaka mješavine | Gustoća u svježem stanju | Konzistencija | Sadržaj pora | Tlačna čvrstoća 28.dan | Gustoća očvrslom stanju | Tlačna čvrstoća 56.dan | Vlačna čvrstoća 56.dan | Modul elastičnosti   |
|------------------|--------------------------|---------------|--------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| Jedinica         | (kg/dm <sup>3</sup> )    | (mm)          | (%)          | (N/mm <sup>2</sup> )   | (kg/dm <sup>3</sup> )   | (N/mm <sup>2</sup> )   | (N/mm <sup>2</sup> )   | (N/mm <sup>2</sup> ) |
| B1               | 2095,43                  | 49,42         | 7%           | 24,19                  | 2042,71                 | 27,63                  | 4,55                   | 18753,19             |
| B2               | 2173,75                  | 47,41         | 7%           | 28,20                  | 2167,21                 | 32,37                  | 4,84                   | 21956,49             |
| B3               | 2146,27                  | 48,94         | 7%           | 26,85                  | 2126,50                 | 31,18                  | 4,74                   | 20673,48             |
| B4               | 2124,45                  | 49,21         | 7%           | 25,86                  | 2094,40                 | 30,13                  | 4,66                   | 19702,05             |
| B5               | 2108,29                  | 48,23         | 7%           | 25,25                  | 2070,89                 | 29,22                  | 4,61                   | 19042,19             |
| B6               | 2097,80                  | 45,98         | 7%           | 25,00                  | 2056,00                 | 28,45                  | 4,58                   | 18693,91             |
| B7               | 2166,27                  | 48,33         | 7%           | 28,07                  | 2138,29                 | 32,57                  | 4,82                   | 21145,00             |
| B8               | 2091,52                  | 47,67         | 7%           | 25,31                  | 2042,13                 | 29,14                  | 4,57                   | 17931,60             |

|            |         |       |    |       |         |       |      |          |
|------------|---------|-------|----|-------|---------|-------|------|----------|
| <b>B9</b>  | 2157,98 | 49,22 | 7% | 27,66 | 2110,28 | 32,34 | 4,79 | 20382,12 |
| <b>B10</b> | 2084,42 | 49,33 | 6% | 25,34 | 2029,18 | 29,39 | 4,55 | 17217,90 |
| <b>B11</b> | 2166,18 | 48,73 | 6% | 27,16 | 2149,25 | 32,14 | 4,78 | 21735,95 |
| <b>B12</b> | 2090,57 | 48,40 | 6% | 23,80 | 2037,43 | 28,08 | 4,52 | 18452,93 |

#### 4.6 Višekriterijsko odlučivanje o optimalnoj mješavini betona

Odabir optimalne mješavine će se provesti koristeći mješavine koje su prihvatljive na temelju eksperimenta, tablica 4.21, te na temelju mješavina koje su prihvatljive na temelju modela, Tablica 4.25. Pritom će se kao kriteriji uzimati svojstva E i H navedena u tablici 4.20 i normirani iznosi faktora  $x_4$  do  $x_7$  (postotak udjela reciliranog crijepa i opeke, v. tablicu 4.4) primjenjujući metodu ponderiranog zbroja [87] za dobivanje jednoznačnog pokazatelja optimalnosti mješavine. Optimalnost mješavine  $Opt$  bit će određena s pomoću izraza:

$$Opt = 20 \cdot f_E + 20 \cdot f_H + 1 \cdot x_4 + 1 \cdot x_5 + 1 \cdot x_6 + 1 \cdot x_7 \quad (70)$$

Dakle, svojstva  $E$  i  $H$  imaju težinski faktor 20, a faktori  $x_4, x_5, x_6$  i  $x_7$  imaju težinski faktor 1. Pritom funkcije  $f_E$  i  $f_H$  glase:  $f_E = 800/y''$ , odnosno  $f_H = 800/y''$ , gdje je sa  $y''$  označena je vrijednost pripadajućeg svojstva prihvatljive mješavine. Pritom su vrijednosti svojstava mješavina prihvatljivih na temelju eksperimenta, Tablica 4.21, preuzete izravno iz rezultata mjerenja, Tablice 4.16 i 4.17, dok su vrijednosti svojstava mješavina prihvatljivih na temelju modela izračunate s pomoću modela (49), uzimajući koeficijente iz Tablice 4.22 i vrijednosti faktora navedene u Tablici 4.25.

U Tablici 4.27 prikazane su vrijednosti izračunatih optimalnosti za sve 23 prihvatljive mješavine, dok je u tablici 4.28 izdvojena po jedna mješavina s najvišom optimalnosti dobivena na temelju eksperimenta, odnosno na temelju matematičkog modela.

Tablica 4. 27: Izračunate optimalnosti mješavina

| Oznaka mješavine | $20 \cdot f_E$ | $20 \cdot f_H$ | $1 \cdot x_4$ | $1 \cdot x_5$ | $1 \cdot x_6$ | $1 \cdot x_7$ | $Opt$        |
|------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| <b>B1</b>        | 7,83           | 8,18           | -1            | -1            | 0,80          | 0,40          | 15,21        |
| <b>B2</b>        | 7,38           | 7,73           | -1            | -1            | 1             | -0,40         | 13,72        |
| <b>B3</b>        | 7,52           | 7,87           | -1            | -1            | 1             | -0,20         | 14,19        |
| <b>B4</b>        | 7,64           | 7,99           | -1            | -1            | 1             | 0,00          | 14,63        |
| <b>B5</b>        | 7,73           | 8,11           | -1            | -1            | 1             | 0,20          | 15,03        |
| <b>B6</b>        | 7,78           | 8,21           | -1            | -1            | 1             | 0,40          | 15,39        |
| <b>B7</b>        | 7,48           | 7,69           | -1            | -0,80         | 1             | -0,40         | 13,97        |
| <b>B8</b>        | 7,83           | 8,15           | -1            | -0,80         | 1             | 0,40          | 15,58        |
| <b>B9</b>        | 7,58           | 7,67           | -1            | -0,60         | 1             | -0,40         | 14,25        |
| <b>B10</b>       | <b>7,88</b>    | <b>8,11</b>    | <b>-1</b>     | <b>-0,60</b>  | <b>1</b>      | <b>0,40</b>   | <b>15,79</b> |
| <b>B11</b>       | 7,44           | 7,71           | -0,80         | -1,00         | 1             | -0,40         | 13,95        |
| <b>B12</b>       | 7,85           | 8,19           | -0,80         | -1,00         | 1             | 0,40          | 15,64        |
| <b>BM17</b>      | 6,79           | 6,70           | 0             | -1            | 0             | -1            | 11,50        |
| <b>BM19</b>      | 8,69           | 7,85           | 0             | 1             | 0             | -1            | 16,53        |
| <b>BM25</b>      | 7,14           | 7,12           | -1            | 0             | 0             | 0             | 13,26        |
| <b>BM26</b>      | 7,75           | 7,85           | 1             | 0             | 0             | 0             | 16,59        |
| <b>BM34</b>      | 7,96           | 8,11           | -1            | 0             | 0             | 1             | 16,07        |
| <b>BM35</b>      | 7,45           | 7,44           | 1             | 0             | 0             | -1            | 14,89        |

|             |             |             |          |          |          |          |              |
|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| <b>BM36</b> | 7,30        | 7,54        | 1        | 0        | 0        | 1        | 16,83        |
| <b>BM41</b> | 7,33        | 8,27        | 0        | -1       | 0        | 0        | 14,60        |
| <b>BM42</b> | <b>8,17</b> | <b>8,35</b> | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>17,52</b> |
| <b>BM49</b> | 7,17        | 7,24        | 0        | 0        | -1       | 0        | 13,41        |
| <b>BM50</b> | 7,53        | 7,45        | 0        | 0        | 1        | 0        | 15,98        |

Tablica 4. 28: Mješavine za blok s najvišom optimalnosti

| Redni broj mješavine prema 4.26 | Cement, (kg) | v/c  | Dodatak betonu, (%) | DC 0-4 mm, (%) | DC 4-16 mm, (%) | DO 0-4 mm, (%) | DO 4-16 mm, (%) |
|---------------------------------|--------------|------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| <b>BM42</b>                     | 300          | 0,50 | 0,00                | 25             | 50              | 25             | 25              |
| <b>B10</b>                      | 360          | 0,46 | 0,3                 | 0,0            | 10              | 50             | 35              |

Mješavine s najvišom optimalnosti (v. tablicu 4.28) su odabrane mješavine na kojima će detaljno biti ispitana mehanička, trajnosna i toplinska svojstva u poglavlju 5. *Eksperimentalna ispitivanja optimalnih mješavina*. Od navedene dvije mješavine bit će zatim odabrana jedna mješavina s kojom će biti izrađeni blokovi na kojima će biti provedena ispitivanja nosivosti i požarne otpornosti (v. poglavlje 6. *Betonski stropni blokovi s opekarskim lomom kao agregatom*).

## 5. Eksperimentalna ispitivanja optimalnih mješavina

Na temelju rezultata provedenih preliminarnih eksperimentalnih ispitivanja svojstava komponenti betona i samog betona s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom u ovom poglavlju opisana su eksperimentalna ispitivanja optimalnih mješavina betona s opekarskim lomom, te su dani rezultati i zaključci provedenih ispitivanja.

### 5.1 Komponente sastava optimalnih mješavina betona

Kao agregat za spravljanje mješavina betona korištena je drobljena opeka (DO), drobljeni crijep (DC) i dolomit (PA). Drobljenu opeku, drobljeni crijep i dolomit nije bilo potrebno nikako dodatno obrađivati jer je materijal bio čist bez ikakvih onečišćenja. Ranije je dokazano (v. poglavlje 4.2.1. *Ispitivanje svojstva agregata*) da su drobljena opeka i drobljeni crijep primjerena zamjena uobičajeno korištenom prirodnom agregatu.

Drobljena opeka, crijep i dolomit su ručno prosijani na frakcije 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm. Opeka i crijep drobljeni su na drobilicama u krugu tvornice kako je prikazano na slikama 5.1 i 5.2.



Slika 5. 1: Drobilica za opeku



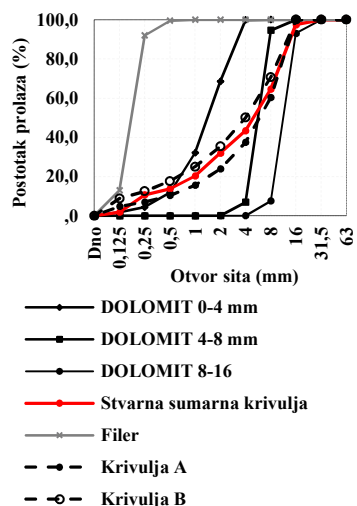
Slika 5. 2: Pokretna drobilica za crijep

Oblik zrna krupnog agregata određen je prema normi HRN EN 12620 razredom indeksa oblika zrna prema normi HRN EN 933-4 na uzorcima drobljene opeke, drobljenog crijepa i dolomita. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 5.1., a dobiveni su kao srednja vrijednost od po tri provedena postupka ispitivanja indeksa oblika za svaku frakciju. Razred indeksa oblika zrna odabran je prema zahtjevima norme HRN EN 933-4. Kako je Tehničkim propisom za betonske konstrukcije propisan najveći dopušteni razred indeksa oblika zrna  $SI_{20}$  za konstruktivne betone iz tablice 5.1 vidljivo da sva tri agregata zadovoljavaju propisani zahtjev.

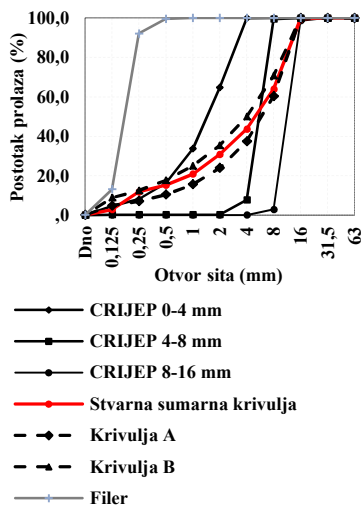
Tablica 5. 1: Razred indeksa oblika zrna

| Opis            | Oznaka | Jedinica mjere | Izračunata vrijednost | Razred indeksa oblika zrna HRN EN 12620 |
|-----------------|--------|----------------|-----------------------|---|
| OPEKA 4-8 mm    | SI     | %              | 9                     | $SI_{15}$                               |
| OPEKA 8-16 mm   |        |                | 15,2                  | $SI_{20}$                               |
| CRIJEP 4-8 mm   | SI     | %              | 19                    | $SI_{20}$                               |
| CRIJEP 8-16 mm  |        |                | 10,4                  | $SI_{15}$                               |
| DOLOMIT 4-8 mm  | SI     | %              | 9                     | $SI_{15}$                               |
| DOLOMIT 8-16 mm |        |                | 9                     | $SI_{15}$                               |

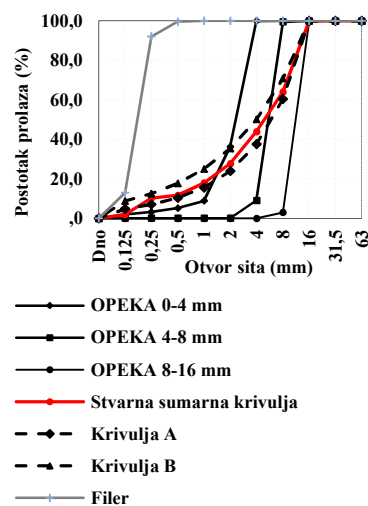
Granulometrijski sastav drobljene opeke i crijepa te dolomita korištenih u daljnjim ispitivanjima prikazan je na slikama 5.3 do 5.5. Krivulje prikazane na slikama 5.3, 5.4 i 5.5 dobivene su kao srednje vrijednosti tri prosijavanja pojedinog agregata. Na temelju granulometrijskog sastava određeni su razredi agregata prikazani u tablici 4.6.(v. poglavlje 4.2.1.1 *Granulometrijski sastav*).



Slika 5. 3: Granulometrijski sastav dolomita



Slika 5. 4: Granulometrijski sastav crijepa



Slika 5. 5: Granulometrijski sastav opeke

Sadržaj sitnih čestica određen je u skladu s normom HRN EN 933-8 i Tehničkim propisom za betonske konstrukcije ( u nastavku označen kraticom TPBK). Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.8 (v. poglavlje 4.2.1.3 *Sadržaj sitnih čestica*).

Gustoća zrna i upijanje vode ispitani su prema normi HRN EN 1097-6. U tablici 5.2 prikazani su rezultati ispitivanja gustoće zrna i upijanje vode za opeku, crijep i dolomit. Iz tablice 5.2 vidljivo je da je upijanje opeke i crijepa znatno veće od prirodnog agregata dolomita.

Tablica 5. 2: Gustoća zrna i upijanje vode prema HRN EN 1097-6

| Vrsta agregata | Frakcija (mm) | Upijanje vode $W_{A24}(\%)$ | Stvarna gustoća čestica $\rho_a$ (Mg/m <sup>3</sup> ) | Gustoća čestica na suhoj osnovi $\rho_{rd}$ (Mg/m <sup>3</sup> ) | Gustoća čestica na zasićenju, površinski suhoj osnovi $\rho_{ssd}$ (Mg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------|---------------|-----------------------------|---|--|---|
| Opeka          | 0-4           | 16,56                       | 2,32  | 1,68   | 1,95  |
|                | 4-8           | 14,38                       | 2,29  | 1,72   | 1,97  |
|                | 8-16          | 13,13                       | 2,22  | 1,72   | 1,95  |
| Crijep         | 0-4           | 8,71                        | 2,35  | 1,95   | 2,12  |
|                | 4-8           | 12,04                       | 2,30  | 1,80   | 2,02  |
|                | 8-16          | 19,73                       | 2,59  | 1,71   | 2,05  |
| Dolomit        | 0-4           | 2,19                        | 2,71  | 2,56   | 2,62  |
|                | 4-8           | 0,63                        | 2,82  | 2,77   | 2,79  |
|                | 8-16          | 0,31                        | 2,79  | 2,77   | 2,78  |

Ispitivanja kemijskih parametara izvršeno je u skladu s normom HRN EN 1774-1:2010, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.11 (v. poglavlje 4.2.1.6 *Kemijska svojstva agregata*).

Ispitivanje otpornosti na drobljenje krupnog agregata (Los Angeles – LA) izvršeno je prema normi HRN EN 1097-2:2004 i HRN EN 1097-2:2004/A1:2007 a u skladu s TPBK. U tablici 4.12 (v. poglavlje 4.2.1.7 *Otpornost na drobljenje – metoda Los Angeles*).

Otpornost agregata na smrzavanje i odmrzavanje ispitana je prema normi HRN EN 1367-2:2010. Izvršeno je ispitivanje magnezijevim sulfatom. Razredi koje agregat treba zadovoljiti u ovisnosti o krajnjoj upotrebi betona propisani su normom HRN EN 12620 i s Tehničkim propisom za betonske konstrukcije. Rezultati provedenih ispitivanja prikazani su u tablici 4.13 (v. poglavlje 4.2.1.8 *Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje krupnog agregata*).

Kako bi se održala kohezija i spriječila segregacija agregata koja je primjećena kod nekih mješavina ispitanih u poglavlju 4.2.3.3. *Ispitivanje svojstava očvrstlog betona* korišteno je dolomitno punilo čiji je granulometrijski sastav prikazan na slikama 5.3, 5.4 i 5.5 i tablici 5.3.

Tablica 5. 3: Granulometrijski sastav dolomitnog punila

| Sito(mm)             | 1,0 | 0,5  | 0,25 | 0,125 | 0,0 |
|----------------------|-----|------|------|-------|-----|
| Prolaz kroz sito (%) | 100 | 99,5 | 92   | 13    | 0   |

Za pripremu optimalnih betonskih mješavina korišten je portlandski cement CEM I 42,5 N. Njegova karakteristična mehanička, fizikalna i kemijska svojstva određena od strane proizvođača, a prema normi HRN EN 197-1:2005 prikazana su u tablici 4.14 u poglavlju 4.2.2. *Svojstva cementa*.

Prilikom pripreme optimalne mješavine s dodatkom superplastifikatora korišten je superplastifikator Sika ViscoCrete -20 Gold na polikarboksilatnoj bazi za postizanje velike plastičnosti s ranim prirastom čvrstoće. To je tekućina smeđe boje topiva u vodi. Ispitane karakteristike superplastifikatora od strane proizvođača, te preporuke o doziranju i načinu ugradnje prikazane su u tablici 5.4.

Tablica 5. 4: Tehnički podatci za ViscoCrete - 20 Gold

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <b>Kemijska svojstva</b> | Polikarboksilat eter   |
| <b>Gustoća</b>           | 1,06 kg/dm <sup>3</sup> pri 20°C   |
| <b>pH vrijednost</b>     | oko 4,0  |
| <b>Sadržaj klorida</b>   | < 0,1%   |
| <b>Sadržaj lužina</b>    | <0,5%  |
| <b>Doziranje</b>         | 0,2% do 2,5% na masu cementa   |
| <b>Ugradnja</b>          | Dodaje se istodobno s vodom u mješalicu, preporučljivo je da mokra dužina mješanja iznosi minimalno 1minutu. |

## 5.2. Sastav optimalnih mješavina betona

Odabir optimalnih mješavina betona prikazan je u poglavlju 4.6 *Višekriterijsko odlučivanje o optimalnoj mješavini betona*. Sastav odabranih mješavina prikazan je u tablicama 5.5, 5.6, i 5.7.

Referentna mješavina jednakog je sastava kao mješavina odabrana na temelju eksperimenta s tim da je kao agregat upotrijebljen samo dolomit. Prilikom spravljanja mješavina agregat je bio u zasićenom, površinski suhom stanju, te je ukupna količina vode koja je dodana u mješavine ona prikazana u tablicama 5.5, 5.6 i 5.7. Kao filer korišteno je dolomitno brašno.

Tablica 5. 5: Sastav referentne betonske mješavine, **RM**

| Komponente betona        |         |      | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|---------|------|---------|------------------------------|----------------------|
| Cement                   |         |      | 300,00  | 3,01                         | 99,67                |
| Voda                     |         |      | 150,00  | 1,00                         | 150,00               |
| v/c                      | 0,50    |      | -       | -                            | -                    |
| Zrak                     |         | 2,5% | -       | -                            | 25,00                |
| Dolomit                  | 0-4 mm  | 32%  | 608,12  | 2,62                         | 232,11               |
|                          | 4-8 mm  | 21%  | 424,97  | 2,79                         | 152,32               |
|                          | 8-16 mm | 37%  | 746,08  | 2,78                         | 268,37               |
| Filer                    |         | 10%  | 208,17  | 2,87                         | 72,53                |
| Dolomit - ukupni volumen |         |      |         |                              | 725,33               |
| Ukupno                   |         |      | 2437,34 | 2,44                         | 1000                 |

Tablica 5. 6: Sastav optimalne betonske mješavine odabrane na temelju eksperimenta, **EM-BM42**

| Komponente betona        |         |        | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|---------|--------|---------|------------------------------|----------------------|
| Cement                   |         |        | 300,00  | 3,01                         | 99,67                |
| Voda                     |         |        | 150,00  | 1,00                         | 150,00               |
| v/c                      | 0,50    |        | -       | -                            | -                    |
| Zrak                     |         | 2,5%   | -       | -                            | 25,00                |
| Crijepl                  | 0-4 mm  | 8,0%   | 118,95  | 2,05                         | 58,03                |
|                          | 4-8 mm  | 10,50% | 153,84  | 2,02                         | 76,16                |
|                          | 8-16 mm | 18,50% | 284,48  | 2,12                         | 134,19               |
| Opeka                    | 0-4 mm  | 8,00%  | 113,15  | 1,95                         | 58,03                |
|                          | 4-8 mm  | 5,25%  | 75,02   | 1,97                         | 38,08                |
|                          | 8-16 mm | 9,25%  | 130,83  | 1,95                         | 67,09                |
| Dolomit                  | 0-4 mm  | 16,00% | 304,06  | 2,62                         | 116,05               |
|                          | 4-8 mm  | 5,25%  | 106,24  | 2,79                         | 38,08                |
|                          | 8-16 mm | 9,25%  | 186,52  | 2,78                         | 67,09                |
| Filer                    |         | 10%    | 208,17  | 2,87                         | 72,53                |
| Agregat - ukupni volumen |         |        |         |                              | 725,33               |
| Ukupno                   |         |        | 2131,27 | 2,13                         | 1000                 |

Tablica 5. 7: Sastav optimalne betonske mješavine na temelju matematičkog modela, **MM-B10**

| Komponente betona        |         |        | m (kg)  | $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> ) | V (dm <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|---------|--------|---------|------------------------------|----------------------|
| Cement                   |         |        | 360,00  | 3,01                         | 119,60               |
| Voda                     |         |        | 165,60  | 1,00                         | 165,60               |
| v/c                      | 0,46    |        | -       | -                            | -                    |
| Dodatak                  |         | 0,3%   | 1,08    | 1,06                         | 1,02                 |
| Zrak                     |         | 2,5%   | -       | -                            | 25,00                |
| Crijepl                  | 0-4 mm  | 0,00%  | 0,00    | 2,05                         | 0,00                 |
|                          | 4-8 mm  | 2,10%  | 29,22   | 2,02                         | 14,46                |
|                          | 8-16 mm | 3,70%  | 54,03   | 2,12                         | 25,48                |
| Opeka                    | 0-4 mm  | 16,00% | 214,90  | 1,95                         | 110,20               |
|                          | 4-8 mm  | 7,35%  | 99,73   | 1,97                         | 50,63                |
|                          | 8-16 mm | 12,95% | 173,93  | 1,95                         | 89,20                |
| Dolomit                  | 0-4 mm  | 16,00% | 288,74  | 2,62                         | 110,20               |
|                          | 4-8 mm  | 11,55% | 221,96  | 2,79                         | 79,55                |
|                          | 8-16 mm | 20,35% | 389,66  | 2,78                         | 140,17               |
| Filer                    |         | 10%    | 197,68  | 2,87                         | 68,88                |
| Agregat - ukupni volumen |         |        |         |                              | 688,78               |
| Ukupno                   |         |        | 2196,53 | 2,20                         | 1000                 |

### 5.3 Ispitivanje svojstava optimalnih mješavina betona

Na referentnoj i optimalnim mješavinama betona provedena su ispitivanja njihovih svojstava u svježem i očvrslom stanju navedena u tablicama 5.8 i 5.9.

Tablica 5. 8: Pregled ispitivanja betona pri sobnoj temperaturi

| Ispitivano svojstvo                      | Norma/postupak  |
|--|-----------------|
| Gustoća u svježem stanju                 | HRN EN 12350-6  |
| Konzistencija slijeganjem                | HRN EN 12350-2  |
| Sadržaj pora                             | HRN EN 12350-7  |
| Tlačna čvrstoća 28. i 56.dan             | HRN EN 12390-3  |
| Vlačna čvrstoća savijanjem 28. i 56. dan | HRN EN 12390-5  |
| Gustoća betona u očvrslom stanju         | Vaganje uzoraka |
| Brzina prolaza ultrazvuka 28. i 56. dan  | HRN EN 12504-4  |
| Statički modul elastičnosti              | HRN U.M1.025    |
| Volumne deformacije betona               | HRN U.M1.029    |
| Plinopropusnost                          | HRN EN 993-4    |

Tablica 5. 9: Pregled ispitivanja betona nakon izlaganja uzoraka 200°C, 600°C i 1000°C.

| Ispitivano svojstvo                | Norma/postupak  |
|------------------------------------|-----------------|
| Tlačna čvrstoća 56. dan            | HRN EN 12390-3  |
| Vlačna čvrstoća savijanjem 56. dan | HRN EN 12390-5  |
| Gustoća betona u očvrslom stanju   | Vaganje uzoraka |
| Brzina prolaza ultrazvuka 56. dan  | HRN EN 12504-4  |
| Statički modul elastičnosti        | HRN U.M1.025    |
| Plinopropusnost                    | HRN EN 993-4    |

#### 5.3.1 Svojstva svježeg betona

Betonske mješavine spravljene su u laboratorijskoj miješalici maksimalne zapremine 70 litara, slika 5.6. Svaka od tri mješavine spravljena je po tri puta da bi se dokazala ponovljivost rezultata ispitivanja.

Zbijanje mješavina vršeno je na vibro stolu frekvencije 150 Hz. Na slici 5.7 prikazan je izgled mješavine (RM) neposredno nakon spravljanja, a prije ugradnje u kalupe.

Nakon što su zamiješane betonske mješavine sastava prikazanog u tablicama 5.5, 5.6 i 5.7, provedena su ispitivanja svojstava svježeg betona prikazana u tablici 5.10 i slikama 5.8 do 5.10.

Ispitivanja su provedena prema skupu normi HRN EN 12350 za svježi beton. Svako ispitivanje provedeno je na tri uzorka iste mješavine betona te je u tablici 5.10 prikazana njihova srednja vrijednost.



Slika 5. 6: Mješalica za izradu betonskih mješavina



Slika 5. 7 a): Izgled mješavine neposredno nakon spravljanja

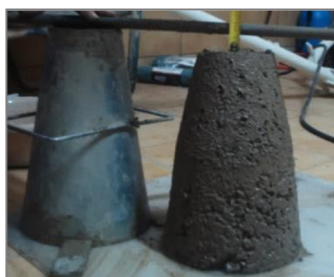


Slika 5. 8 b): Detalj mješavine neposredno nakon spravljanja



Tablica 5. 10: Svojstva svježeg betona za mješavine RM, EM-BM42, i MM-B10

| Oznaka mješavine | Gustoća                     |   | Konzistencija po metodi slijeganja |                         |                   | Sadržaj pora             |                        |
|------------------|-----------------------------|---|------------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
|                  | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Srednja vrijednost (kg/m <sup>3</sup> ) | (mm)                               | Srednja vrijednost (mm) | Razred slijeganja | Izmjerena vrijednost (%) | Srednja vrijednost (%) |
| RM               | 2626                        | 2658                                    | 37                                 | 31,67                   | S1                | 3,4%                     | 2,53%                  |
|                  | 2680                        |   | 40                                 |                         |                   | 1,4%                     |                        |
|                  | 2668                        |   | 18                                 |                         |                   | 2,8%                     |                        |
| EM - BM42        | 2291                        | 2296                                    | 15                                 | 11,67                   | S1                | 4,2%                     | 4,43%                  |
|                  | 2291                        |   | 12                                 |                         |                   | 4,4%                     |                        |
|                  | 2307                        |   | 8                                  |                         |                   | 4,7%                     |                        |
| MM - B10         | 2373                        | 2353                                    | 28                                 | 31,67                   | S1                | 4,1%                     | 4,27%                  |
|                  | 2344                        |   | 27                                 |                         |                   | 4,7%                     |                        |
|                  | 2343                        |   | 40,0                               |                         |                   | 4,0%                     |                        |



Slika 5. 9: Konzistencija slijeganjem RM



Slika 5. 10: Konzistencija slijeganjem EM-B42



Slika 5. 11: Konzistencija slijeganjem MM-B10

Iz rezultata ispitivanja prikazanih u tablici 5.10 moguće je zaključiti da optimalna mješavina odabrana na temelju eksperimenta odstupa od rezultata ispitivanja provedenih u prvoj fazi ispitivanja (tablica 4.16, v. poglavlje 4.2.3.2 *Ispitivanje svojstava svježeg betona*) do čega je došlo uslijed dodatka filera koji u prvoj fazi ispitivanja nije korišten, te drugačijih granulometrijskih krivulja PA, DC i DO.

Također, moguće je zaključiti da optimalna mješavina dobivena matematičkim modelom zadovoljava uvjete navedene prilikom odabira optimalnih mješavina. Naime, matematičkim modelom izračunate su vrijednosti svojstava betona u svježem stanju prikazane u tablici 4.26 (v. poglavlje 4.5 *Odabir prihvatljivih mješavina na temelju modela*).

Tablica 5. 11: Usporedba rezultata mješavina B10 i MM-B10

| Oznaka mješavine | Gustoća u svježem stanju | Konzistencija | Sadržaj pora |
|------------------|--------------------------|---------------|--------------|
| Jedinica         | (kg/dm <sup>3</sup> )    | (mm)          | (%)          |
| B10              | 2084                     | 49,33         | 6,00         |
| MM-B10           | 2353                     | 31,67         | 4,27         |
| Greška modela    | 11,4%                    | 55,8%         | 40,5%        |

Usporedbom rezultata eksperimentalnih ispitivanja s vrijednostima dobivenim matematičkim modelom (tablica 5.11) moguće je zaključiti da je najmanja greška modela dobivena za gustoću u svježem stanju.

Iz tablice 5.11 vidljivo je da je greška modela za gustoću betona u svježem stanju 11,4% iz čega možemo zaključiti da je pretpostavljeni model (49), uz parametre  $\beta$  iz Tablice 4.22, točan uz tehnički prihvatljivu pogrešku.

Greška modela za konzistenciju iznosa 55,8% tehnički nije prihvatljiva, ali je takav rezultat bio i očekivan. Naime, budući da se u eksperimentalnom dijelu dodao filer, promijenile su se granulometrijske krivulje te je očekivano da bi se trebala promijeniti i konzistencija mješavine. Konzistencija betona dobivena eksperimentalno razreda je S1 kao i konzistencija dobivena modelom, tablica 5.11. Jedan od zahtjeva kojega smo htjeli ispuniti prilikom odabira prihvatljivih mješavina jest upravo postizanje razreda konzistencije S1 ili S2. Budući da je i modelom i eksperimentalno dobiven razred konzistencije S1 rezultat greške modela od približno 56% u ovom slučaju smatra se prihvatljivim.

Greška modela za proračun sadržaja pora je 40,5%. Naime, u prvoj fazi ispitivanja je bilo ustanovljeno da je eksperimentalno izmjereni sadržaj pora visok iz razloga navedenih u poglavlju 4.2.3.2. *Ispitivanje svojstava svježeg betona*, te da dobiveni model na temelju tih eksperimentalnih podataka nije zadovoljavajuće točnosti na cijelom 7-dimenzionalnom eksperimentalnom prostoru. Sadržaj pora u betonskoj mješavini MM-B10 čiji je optimalni sastav komponenti betona odabran na temelju matematičkog modela je prihvatljiv. Prihvatljiv sadržaj pora postignut je uzimanjem u obzir sugestija danih u poglavlju 4.2.3.2. *Ispitivanje svojstava svježeg betona* prilikom projektiranja granulometrijskih krivulja.

U tablici 5. 12 prikazana je usporedba rezultata eksperimentalnog ispitivanja mješavine BM42 i EM-BM42 ispitanih u preliminarnoj fazi i fazi ispitivanja optimalnih mješavina. Kako je moguće vidjeti iz tablice postoji odstupanje izmjerenih vrijednosti optimalne mješavine EM-BM42 i do 37% u odnosu na vrijednosti mjerene u preliminarnoj fazi ispitivanja na mješavini BM42.

Razlog odstupanja mogao je nastati uslijed razlike između sastava te dvije mješavine. Naime, prilikom izrade sastava betonske mješavine EM-BM42 dodan je filer i drugačije su granulometrijske krivulje istih agregata što je doprinijelo promjeni svojstava svježe betonske mješavine kako je vidljivo iz tablice 5.12. Poroznost svježe betonske mješavine je znatno smanjena što potvrđuje činjenicu koja je već ranije spomenuta i dokazana kod primjera navedenog u tablici 5.11, tj. da je pravilno projektiranje granulometrijskog sastava dovelo do smanjenja sadržaja pora. Konzistencija i gustoća nisu značajno promijenjene, te se odstupanje smatra prihvatljivim a eksperiment ponovljivim.

Tablica 5. 12: Usporedba eksperimentalno ispitanih mješavina

| Oznaka mješavine | Gustoća u svježem stanju | Konzistencija | Sadržaj pora |
|------------------|--------------------------|---------------|--------------|
| Jedinica         | (kg/dm <sup>3</sup> )    | (mm)          | (%)          |
| RM               | 2658                     | 31,7          | 2,6          |
| BM42             | 1923                     | 15,0          | 7,0          |
| EM-BM42          | 2296                     | 11,7          | 4,4          |
| Odstupanje       | 19,4%                    | 22,0%         | 37,1%        |

Usporedbom mješavina RM, EM-BM42 i MM-B10 i svega navedenog pod poglavljem 5.3.1 *Svojstva svježeg betona* možemo zaključiti da je:

- gustoća mješavine EM-BM42 2,42% manja od gustoće MM-B10, te 13,6% manja od gustoće RM,
- konzistencija sve tri mješavine u skladu je s preporukama iz norme HRN EN 206-1:2006,
- sadržaj pora nešto bolji kod mješavine RM, te da se mješavinama s opekarskim lomom s obzirom na oblik zrna opekarskog loma sadržaj pora od oko 4% smatra se prihvatljivim.

Iz svega navedenog možemo zaključiti da je mješavina EM-BM42 po svojstvima betona u svježem stanju vrlo bliska mješavini MM-B10, no odabire se kao najbolja s obzirom da nam je cilj odabrati mješavinu za izradu stropnih blokova s najvećim udjelom opekarskog loma, a time i najmanjom gustoćom. Nakon ispitivanja i interpretacije rezultata ispitivanja svojstava betona u očvrslom stanju, koja će biti opisana u sljedećem podpoglavlju, bit će donesen zaključak i odabir mješavine za izradu stropnih betonskih blokova.

### 5.3.2 Svojstva betona u očvrslom stanju

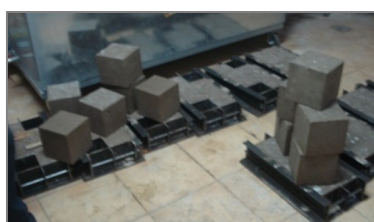
#### 5.3.2.1 Svojstva betona u očvrslom stanju pri sobnoj temperaturi

Ispitivanja svojstava očvrsllog betona pri sobnoj temperaturi provedena su prema skupu normi navedenih u tablici 5.8. Sve mješavine betona su nakon ispitanih svojstava betona u svježem stanju ugrađene u kalupe dimenzija prema tablici 5.13. Uzorci su nakon ugradnje u kalupe prekriveni plastičnom folijom te ostavljeni u kalupu 24 sata.

Tablica 5. 13: Dimenzije uzoraka za ispitivanje svojstava očvrsllog betona

| Oznaka mješavina        | Ispitivanje                              | Dimenzije kalupa (mm) |
|-------------------------|--|-----------------------|
| RM<br>EM-BM42<br>MM-B10 | Tlačna čvrstoća 28. i 56. dan            | 150 x 150 x 150       |
|                         | Vlačna čvrstoća savijanjem 28. i 56. dan | 100 x 100 x 400       |
|                         | Brzina prolaza ultrazvuka 28. i 56. dan  | 100 x 100 x 400       |
|                         | Statički modul elastičnosti              | 100 x 100 x 300       |
|                         | Volumne deformacije betona               | 100 x 100 x 400       |
|                         | Plinopropusnost                          | Φ 50, v = 50          |

Nakon vađenja iz kalupa, slika 5.11., uzorci betona su njegovani pod vodom na kontroliranoj temperaturi od  $20^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$  do trenutka ispitivanja uzoraka, slika 5.12.



Slika 5. 12: Uzorci u kalupima i nakon vađenja iz kalupa



Slika 5. 13: Njega uzoraka

Na slikama 5.13 do 5.19 prikazana su ispitivanja svojstava očvrsllog betona. U tablicama 5.14 i 5.15 prikazani su rezultati ispitivanja svojstava očvrsllog betona pri starosti uzoraka od 28 i 56 dana pri sobnoj temperaturi. Ispitivanja su provedena na po tri uzorka iste mješavine betona te su u tablicama 5.14 i 5.15 prikazane njihove srednje vrijednosti i standardne devijacije.



Slika 5. 14: Mjerenje dimenzija uzoraka



Slika 5. 15: Mjerenje mase uzoraka



Slika 5. 16: Ispitivanje brzine prolaza ultrazvuka



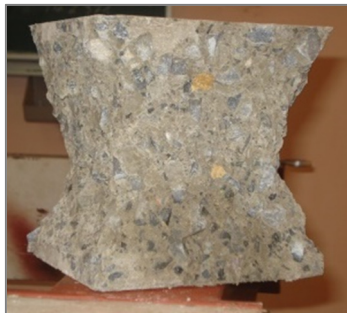
Slika 5. 17: Tlačna čvrstoća na kocki brida 10 cm



Slika 5. 18: Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem



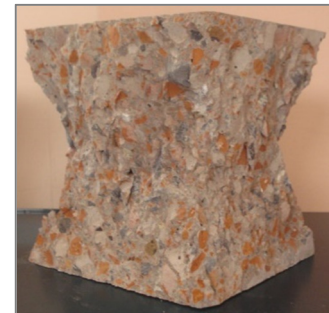
Slika 5. 19: Uzorci za ispitivanje plinopropusnosti



a) RM



b) EM-BM42



c) MM-B10

Slika 5. 20: Oblik tlačnog sloma uzoraka



a) RM



b) EM-BM42



c) MM-B10

Slika 5. 21: Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem

Tablica 5. 14: Svojstva očvrstlog betona pri starosti uzoraka od 28 dana

| Oznaka mješavine | Tlačna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> ) | St.dev. (N/mm <sup>2</sup> ) | Vlačna čvrstoća savijanjem (N/mm <sup>2</sup> ) | St.dev. (N/mm <sup>2</sup> ) | Gustoća očvrstlog betona (kg/m <sup>3</sup> ) | St.dev. (kg/m <sup>3</sup> ) | Brzina ultrazvučnog impulsa (km/s) | St.dev. (km/s) |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|------------------------------|---|------------------------------|------------------------------------|----------------|
| RM               | 39,36                                | 0,42                         | 5,71  | 0,43                         | 2479,58                                       | 10,31                        | 5,03                               | 0,06           |
| EM-BM42          | 25,53                                | 0,32                         | 4,34  | 0,05                         | 2165,27                                       | 3,65                         | 3,89                               | 0,04           |
| MM-B10           | 31,95                                | 0,61                         | 5,31  | 0,15                         | 2250,01                                       | 14,38                        | 4,24                               | 0,04           |

Tablica 5. 15: Svojstva očvrstlog betona pri starosti uzoraka od 56 dana

| Oznaka mješavine | Tlačna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> ) | St.dev. (N/mm <sup>2</sup> ) | Vlačna čvrstoća savijanjem (N/mm <sup>2</sup> ) | St.dev. (N/mm <sup>2</sup> ) | Gustoća očvrstlog betona (kg/m <sup>3</sup> ) | St.dev. (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|------------------------------|---|------------------------------|
| RM               | 45,33                                | 0,00                         | 6,00  | 0,49                         | 2476,05                                       | 28,25                        |
| EM-BM42          | 33,42                                | 1,33                         | 4,96  | 0,33                         | 2100,89                                       | 21,24                        |
| MM-B10           | 37,33                                | 0,44                         | 5,38  | 0,36                         | 2184,44                                       | 23,48                        |

| Oznaka mješavine | Statički modul elastičnosti (MPa) | St.dev. (MPa) | Brzina ultrazvučnog impulsa (km/s) | St.dev. (km/s) | Plinopropusnost (m <sup>2</sup> ) | St.dev. (m <sup>2</sup> ) |
|------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------|
| RM               | 41,85                             | 1,70          | 5,07                               | 0,06           | 3,49x10 <sup>-16</sup>            | 0,16x10 <sup>-16</sup>    |
| EM-BM42          | 19,26                             | 0,26          | 3,96                               | 0,01           | 4,10x10 <sup>-16</sup>            | 0,13x10 <sup>-16</sup>    |
| MM-B10           | 22,60                             | 1,12          | 4,13                               | 0,05           | 5,25x10 <sup>-16</sup>            | 0,19x10 <sup>-16</sup>    |

Gustoća betona s opekarskim lomom je manja od gustoće referentne mješavine što je bilo i očekivano. Također je moguće uočiti da mješavina EM-BM42 ima manju gustoću od mješavine MM-B10 zbog većeg udjela opekarskog loma. Svakim daljnjim povećanjem udjela opekarskog loma u mješavinama mogu se dobiti betoni manjih gustoća pri čemu treba voditi računa o zahtjevima postavljenim za tlačne čvrstoće.

Iz tablica 5.14 i 5.15 možemo zaključiti da tlačna čvrstoća betona sve tri mješavine zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 15037-2:2009 u kojoj je propisan minimalni razred betona C 12/15 za nosive stropne blokove. Slikama 5.16 i 5.17 prikazana su ispitivanja tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće savijanjem.

Usporedbom tlačnih čvrstoća referentne mješavine s mješavinama u kojima je korišten opekarski lom moguće je zaključiti da je upotrebom opekarskog loma kao agregata moguće dobiti beton tlačne čvrstoće jednake kao i kod betona s prirodnim agregatom. Također je moguće zaključiti da je tlačna čvrstoća u dvadesetom danu starosti mješavine EM-BM42 35,2% manja od tlačne čvrstoće RM kako je i očekivano. Tlačna čvrstoća u dvadeset i osmom danu starosti mješavine MM-B10 je 18,8% manja od RM. Manja razlika u čvrstoćama između mješavine MM-B10 i RM u odnosu na EM-BM42 i RM može biti posljedica manjeg v/c faktora (0,46) i dodatka superplastifikatora. Moguće je zaključiti da se u betonu s opekarskim lomom mogu postići tlačne čvrstoće gotovo jednake kao i čvrstoće uobičajenog betona s prirodnim agregatom poštujući ograničenje od 45% zamjene krupne i 50% zamjene sitne frakcije prirodnog agregata s opekarskim lomom.

Iz slike 5.19 možemo uočiti da sve tri mješavine imaju karakterističan oblik sloma nakon ispitivanja tlačnih čvrstoća betona na kockama.

Vlačna čvrstoća savijanjem mješavine EM-BM42 iznosi 17% tlačne čvrstoće betona, mješavine MM-B10 iznosi 16,6%, a mješavine RM 14,5% tlačne čvrstoće betona. Možemo zaključiti da je vlačna čvrstoća savijanjem mješavina s opekarskim lomom oko 7% do 20% manja od vlačne čvrstoće savijanjem betona s prirodnim agregatom, što je u skladu sa zaključcima navedenim u poglavlju 2. *Pregled literature*. Uzorci betona nakon ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem prikazani su na slici 5.20.

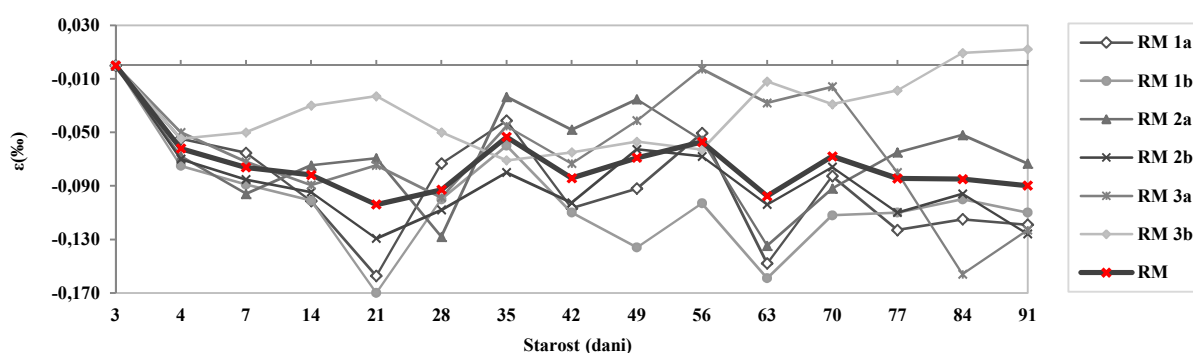
Plinopropusnost betona izmjerena je na uzorcima oblika i dimenzija prikazanih u tablici 5.13. Uzorci na kojima je provedeno mjerenje plinopropusnosti prikazani su slikom 5.18., a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 5.15. Sva ispitivanja provedena su na po tri uzorka, a u tablici 5.15 prikazane su njihove srednje vrijednosti. Iz rezultata ispitivanja moguće je zaključiti da sve tri mješavine betona s obzirom na koeficijent plinopropusnosti spadaju u kategoriju betona loše kvalitete. Razlog tomu je priprema uzoraka u plastičnim cijevima promjera 5 cm u kojima se beton nije mogao pravilno ugraditi, te je došlo do pojave šupljina koje se pripisuju nepravilnoj ugradnji betona. Ispitivanja bi trebalo ponoviti na uzorcima promjera 10 cm te usporediti rezultate kako bi se odredila točnost provedenog ispitivanja. Iz rezultata je također moguće zaključiti da betoni s opekarskim lomom imaju veću plinopropusnost od betona s prirodnim agregatom. Pretpostavka je da je uzrok veće plinopropusnosti struktura zrna opekarskog loma koja je poroznija od dolomita.

Prema tablici 5.15. možemo zaključiti da je statički modul elastičnosti mješavina s opekarskim lomom do 50% manji od modula elastičnosti betona s prirodnim agregatom. Prilikom projektiranja nosivih konstruktivnih elemenata od betona s opekarskim lomom kod kojih deformacije imaju važnu ulogu bitno je uzeti u obzir smanjeni modul elastičnosti elemenata konstrukcije. Manji modul elastičnosti doprinosi manjoj krutosti konstrukcije. Budući da je krutost konstrukcije prilikom upotrebe betona s opekarskim lomom manja preporuča se upotreba ovakvog betona u vertikalnim elementima konstrukcije kao ispun (npr. okvir sa zidanim ispunom). Također se preporuča upotreba betonskih blokova s opekarskim lomom kao ispun okvirnih konstrukcija gdje bi takvi ispuni dali bolju otpornost konstrukcije na djelovanje potresa. Upotrebom ovakvog betona u horizontalnim elementima konstrukcije (stropne grede, ploče i sl.) dobili bismo elemente koji u odnosu na beton s prirodnim agregatom rezultiraju s većim deformacijama pri jednakom opterećenju. Budući da su stropni blokovi kratki elementi kod kojih krutost nema značajnu ulogu možemo zaključiti da je upotreba opekarskog loma u nosivim ili polunosivim stropnim blokovima moguća što će biti dokazano u poglavlju 6. *Betonski stropni blokovi s opekarskim lomom kao agregatom*.

Usporedbom rezultata ispitivanja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa prikazanih u tablicama 5.14 i 5.15 moguće je uočiti kako uzorci s opekarskim lomom imaju manje brzine prolaza ultrazvučnog impulsa što može ukazivati na pojavu defekata, pukotina, veće poroznosti i drugih nehomogenosti materijala. Uzimajući u obzir razredbu kvalitete betona ovisno o brzini prolaza ultrazvučnog impulsa možemo zaključiti da sve tri mješavine imaju brzinu prolaska ultrazvučnog impulsa iznad 3,60 km/s što ih svrstava u razred vrlo kvalitetnih betona.

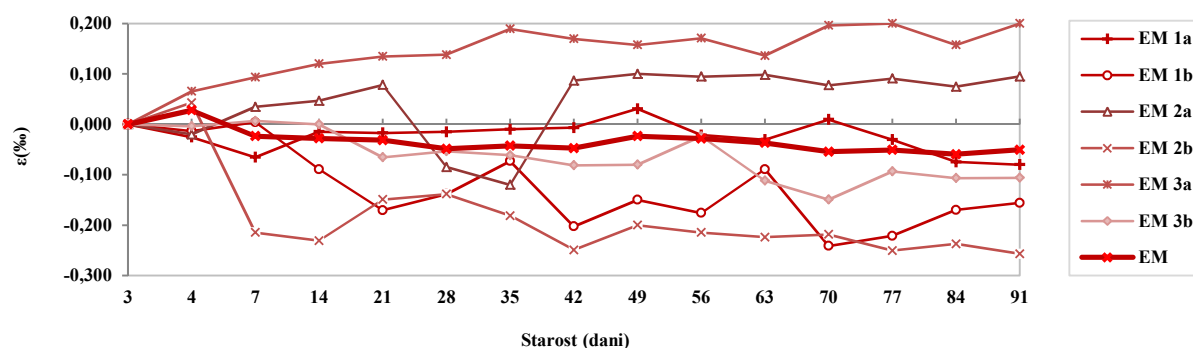
Volumne deformacije betona prikazane na slikama 5.21 do 5.24 mjerene su na uzorcima izloženim stalnoj vlažnosti od  $95\pm 5\%$  relativne vlage zraka. Kao i ostala svojstva betona u očvrslom stanju, volumne deformacije praćene su na tri uzorka iste mješavine. Na svakom uzorku deformacije su praćene na dvije mjerne linije suprotne jedna drugoj 3., 4., 7. dan starosti i nakon toga svakog sedmog dana do starosti uzorka od 91 dan.

Iz rezultata ispitivanja prikazanih na slici 5.21 možemo zaključiti da se beton s prirodnim agregatom skupljao uslijed sušenja, te je maksimalna dostignuta vrijednost skupljanja mješavine RM 91. dan iznosila  $0,10\%$ . Budući da je deformacija skupljanja za relativnu vlažnost okoliša od  $90\%$  i srednju debljinu presjeka od  $10\text{ cm}$  dana tablično u Tehničkom propisu za betonske konstrukcije (TPBK)  $0,15\%$  možemo zaključiti da je za beton RM moguća tablična procjena deformacija skupljanja, te su deformacije betonske mješavine RM u skladu s očekivanjima.



Slika 5.22: Volumne deformacije mješavine RM

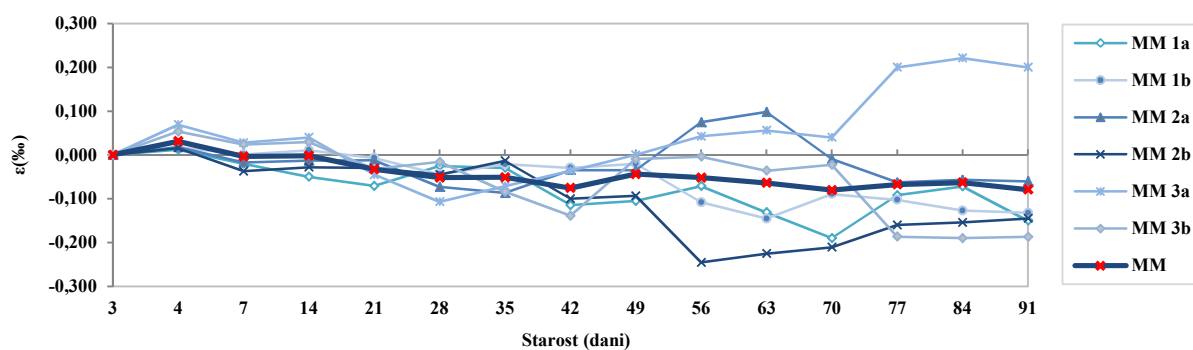
Iz slike 5.22 možemo zaključiti da su volumne deformacije mješavine EM-BM42 unutar granica  $0,05\%$  te u odnosu na mješavinu RM znatno manje, što je u suprotnosti s dosadašnjim istraživanjima volumnih deformacija (v. poglavlje 2.1.3 *Fizikalno-mehanička svojstva betona s recikliranom opekom*). Budući da su mješavine RM i EM-BM42 izložene jednakom režimu vlage okoliša tijekom trajanja mjerenja, jednak v/c faktor i istu količinu cementa, a različitu vrstu agregata, pretpostavka je da je ključnu ulogu u smanjenom skupljanju i bubrenju imao opekarski lom.



Slika 5.23: Volumne deformacije mješavine EM-BM42

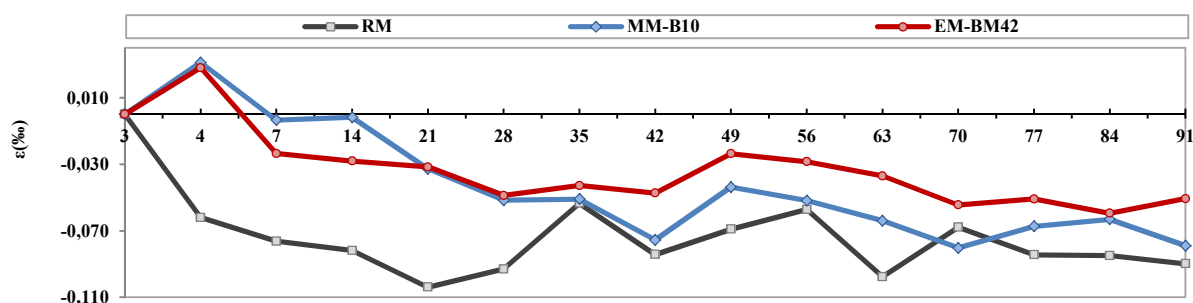
Kod mješavine MM-B10 uočene su nešto veće volumne deformacije nego u mješavini EM-BM42, slika 5.23. Kao i kod mješavine EM-BM42 suprotno dosadašnjim saznanjima o većim volumnim

deformacijama betona s opekarskim lomom u odnosu na betone s prirodnim agregatom ovdje se pokazalo da su volumne deformacije MM-B10 u prosjeku 12% manje od volumnih deformacija mješavina RM. Iz slike 5.24 moguće je zaključiti da mješavina EM-BM42 ima u prosjeku 35% manje deformacije uslijed skupljanja i bubrenja od mješavine MM-B10, a 43% manje od RM. Pretpostavka je da je zbog strukture opekarskih zrna voda sporije evaporirala u odnosu na dolomitni agregat, što bi u daljnim istraživanjima trebalo dokazati uvidom u mikrostrukturu betona.



Slika 5. 24: Volumne deformacije mješavine MM- B10

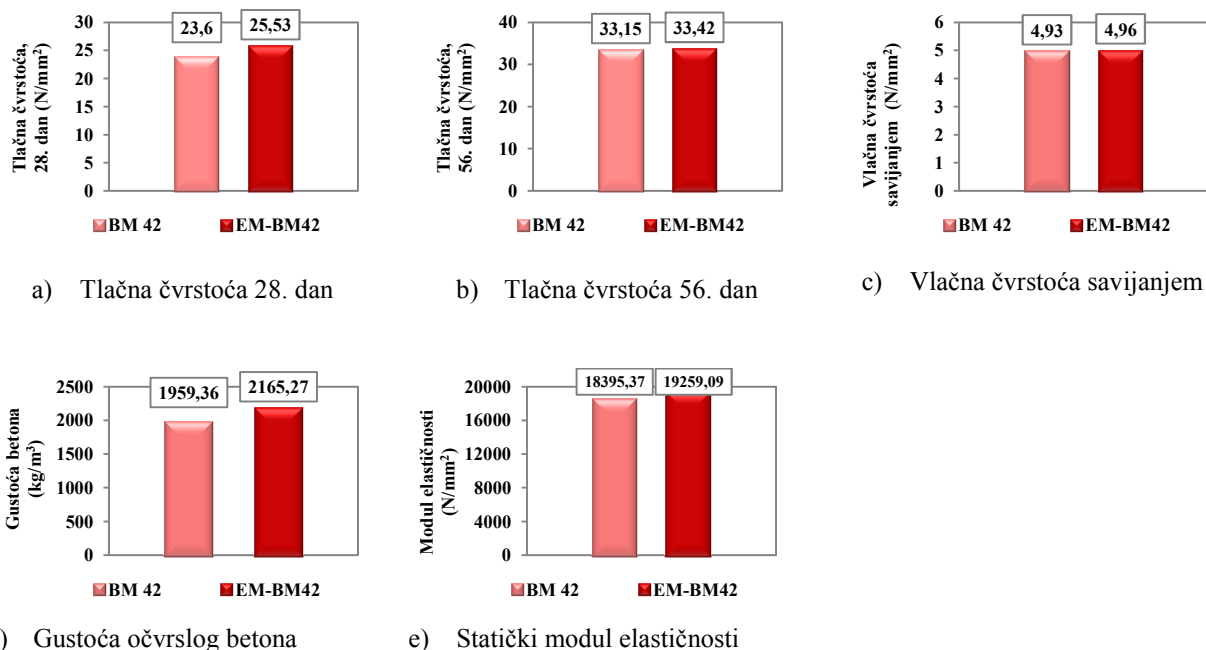
Iz slike 5.24 na kojoj je prikazana usporedba volumnih deformacija mjerenih tijekom devedeset i jednog dana na mješavinama RM, EM-BM42 i MM-B10, možemo zaključiti da se najmanje volumne deformacije pojavljuju na uzorcima EM-BM42 što bi za krajnju primjenu ovakvog betona u stropnim betonskim blokovima moglo imati pozitivan učinak.



Slika 5. 25: Usporedba volumnih deformacija mješavina RM, EM-BM42 i MM-B10

Na slici 5.25 prikazana je usporedba rezultata eksperimentalnih ispitivanja mješavine EM-BM42 u fazi ispitivanja optimalnih mješavina i mješavine BM42 ispitane u fazi preliminarnih ispitivanja. Iz slike 5.25 je općenito vidljivo kako su vrijednosti svojstava mješavine EM-BM42 veće za 0,6% do 10,5% od vrijednosti dobivenih ispitivanjem mješavine BM42. Pretpostavka je da je razlog tomu promjena u granulometrijskom sastavu mješavine (drugačije granulometrijske krivulje i dodatak filera). Dobivena postotna razlika rezultata ispitivanja, prikazana tablicom 5.16, smatra se prihvatljivom, a eksperiment ponovljivim.



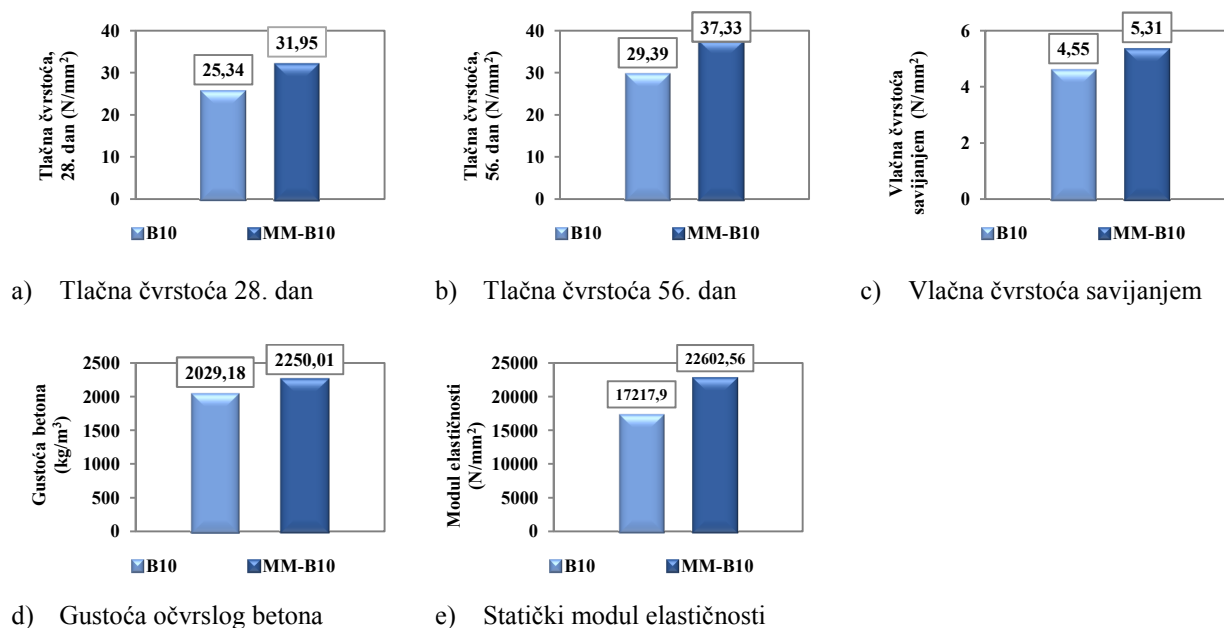


Slika 5. 26: Usporedba svojstava betona u očvrslom stanju mješavina BM42 i EM-BM42

Tablica 5. 16: Razlika vrijednosti izmjerenih svojstava mješavina BM42 i EM-BM42

| Ispitivano svojstvo        | Tlačna čvrstoća 28. dan | Tlačna čvrstoća 56. dan | Vlačna čvrstoća savijanjem | Gustoća očvrsllog betona | Statički modul elastičnosti |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Odstupanje EM-BM42 od BM42 | 8,1%                    | 0,8%                    | 0,61%                      | 10,5%                    | 4,7%                        |

Na slici 5.26 prikazana je usporedba svojstva betona u očvrslom stanju eksperimentalno ispitanih uzoraka mješavine MM-B10 i svojstava mješavine B10 dobivenih proračunom iz matematičkih modela.



Slika 5. 27: Usporedba svojstava u očvrslom stanju mješavina B10 i MM-B10

Tablica 5. 17: Razlika vrijednosti izmjerenih i izračunatih svojstava mješavina B10 i MM-B10

| Ispitivano svojstvo         | Tlačna čvrstoća<br>28. dan | Tlačna čvrstoća<br>56. dan | Vlačna čvrstoća<br>savijanjem | Gustoća očvrsllog<br>betona | Statički modul<br>elastičnosti |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Odstupanje<br>B10 od MM-B10 | 26%                        | 27%                        | 16,7%                         | 10,8%                       | 31,3%                          |

Iz slike 5.26 a) i b) možemo uočiti kako je tlačna čvrstoća dobivena eksperimentalno oko 26% veća od tlačne čvrstoće betona proračunate modelom. Pretpostavka je da je razlog odstupanja od 26% u komponentama betona korištenim za dobivanje modela koji su bili različiti od onih korištenih u eksperimentu. Budući da su sve vrijednosti svojstava ispitanih eksperimentalno veći od onih dobivenih matematičkim modelom, zaključak što je bio i cilj prilikom izmjena u sastavu betona proizlazi da je model zadovoljavajuće točnosti za predviđanje tlačne čvrstoće betona. U budućim istraživanjima potrebno je dokazati navedeno provjerom utjecaja promijenjenih komponenti betona na konačni model.

Vlačna čvrstoća savijanjem dobivena eksperimentalno je 16,7% veća od one dobivene matematičkim modelom. Zaključci navedeni u prethodnom odlomku vezani za tlačnu čvrstoću betona vrijede i za vlačnu čvrstoću savijanjem, te se model smatra prihvatljivim za predviđanje vlačne čvrstoće savijanjem.

Gustoća betona dobivena eksperimentalno je 10,8% veća od gustoće dobivene matematičkim modelom, što se može smatrati tehnički prihvatljivim. Kao što je ranije spomenuto (v. poglavlje 4. *Preliminarna eksperimentalna ispitivanja*) model dobro opisuje svojstvo gustoće betona.

Statički modul elastičnosti dobiven eksperimentalno je 31,3% veći od modula elastičnosti dobivenog matematičkim modelom. Svi zaključci navedeni za tlačnu i vlačnu čvrstoću vrijede i za statički modul elastičnosti.

Uzimajući općenito u obzir vrijednosti dobivene eksperimentalno u odnosu na one dobivene matematičkim modelom možemo zaključiti da su vrijednosti dobivene eksperimentalno veće od onih predviđenih matematičkim modelom do 30%. Budući da se vrijednosti dobivene eksperimentalno u preliminarnoj fazi ispitivanja i fazi ispitivanja optimalnih mješavina također razlikuju i to na način da su vrijednosti dobivene u drugoj fazi ispitivanja veće možemo zaključiti sljedeće:

- promjenom granulometrijskih krivulja i dodatkom filera odabrane optimalne mješavine EM-BM42 i MM-B10, s obzirom na svojstva u očvrslom stanju, pokazale su se boljima od mješavina BM42 i B10,
- mješavina definirana Box-Behnken planom eksperimenta EM-BM42 pokazala se prihvatljivijom za izradu stropnih betonskih blokova od mješavine MM-B10 definirane matematičkim modelom prvenstveno iz razloga većeg udjela opekarškog loma u sastavu mješavine, a optimalnih svojstava koja zadovoljavaju uvjete propisane normom HRN EN 12390.

### 5.3.2.2 Svojstva betona u očvrslom stanju nakon izlaganja visokim temperaturama

Ispitivanja svojstava očvrslom betona nakon izlaganja visokim temperaturama provedena su prema skupu normi navedenih u tablici 5.9. Sve mješavine betona su nakon ispitanih svojstava betona u svježem stanju ugrađene u kalupe dimenzija prema tablici 5.13. Uzorci su nakon ugradnje u kalupe prekriveni plastičnom folijom te ostavljeni u kalupu 24 sata. Nakon vađenja iz kalupa, uzorci betona su njegovani pod vodom na kontroliranoj temperaturi od  $20^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$  do 28 dana starosti uzoraka. Nakon 28 dana uzorci su izvađeni iz vode. Prije stavljanja uzoraka u sušionik na  $105^{\circ}\text{C}$  uzorci su držani na sobnoj temperaturi 7 dana kako nebi došlo do razvoja pukotina uslijed naglog sušenja na  $105^{\circ}\text{C}$ . Sušeni su do trenutka dok nije postignuta vlažnost uzorka do 1%.

Uzorci su izlagani visokim temperaturama u električnoj peći izgleda kao što je prikazano na slikama 5.27 do 5.29. Krivulja prirasta temperatura u peći s obzirom na temperature kojima su uzorci izlagani ( $200^{\circ}\text{C}$ ,  $600^{\circ}\text{C}$ ,  $800^{\circ}\text{C}$  i  $1000^{\circ}\text{C}$ ) prikazane su na slikama 5.30 i 5.31. Prirast temperature iznosio je  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , a mjeren je termo sondom koja se nalazila na samoj peći i sondom koja je stavljena u peć kao kontrolna. Uzorci su izloženi režimu zagrijavanja u skladu s preporukama RILEM TC 200-HTC, [88], slike 5.30 i 5.31. U tri uzorka svake mješavine ugrađeni su termoparovi preko kojih je praćen prirast temperature u uzorku, koji je prikazan na slikama 5.32 i 5.33.



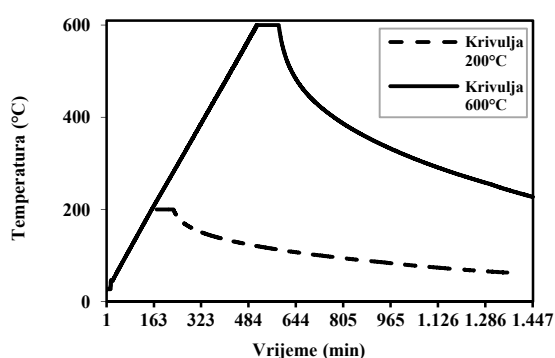
Slika 5. 28: Električna peć



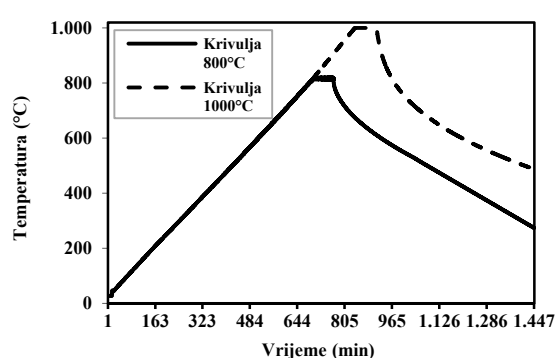
Slika 5. 29: Raspored uzoraka



Slika 5. 30: Priključak termosondi



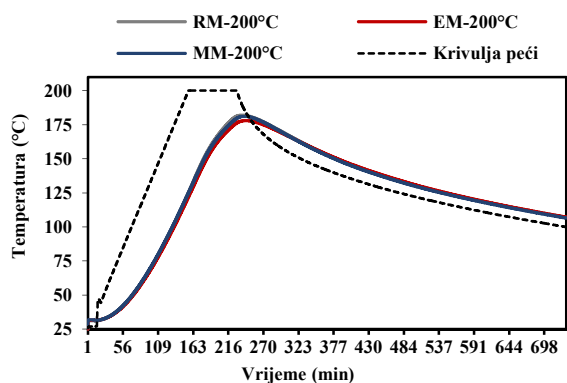
Slika 5. 31: Režim zagrijavanja i hlađenja peći,  $200^{\circ}\text{C}$  i  $600^{\circ}\text{C}$



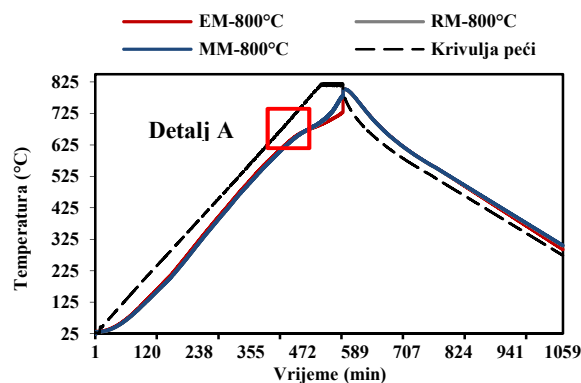
Slika 5. 32: Režim zagrijavanja i hlađenja peći,  $800^{\circ}\text{C}$  i  $1000^{\circ}\text{C}$

Režim zagrijavanja i hlađenja uzoraka na temperature  $600^{\circ}\text{C}$  i  $1000^{\circ}\text{C}$  prikazan je tablično u *Prilogu P.2*, a za temperature izloženosti od  $200^{\circ}\text{C}$  i  $800^{\circ}\text{C}$  na slikama 5.32, 5.33a) i 5.33b). Iz slike 5.32 moguće je zaključiti da je krivulja prirasta temperatura u sve tri mješavine betona približno jednaka prilikom

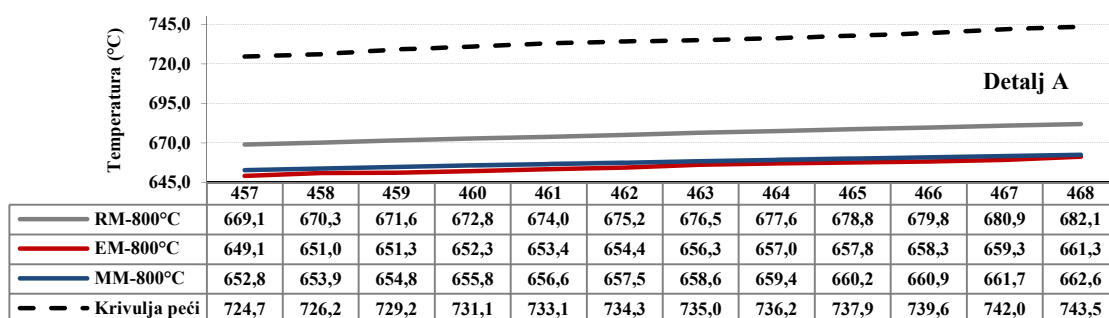
zagrijavanja uzoraka na 200°C. Nakon izlaganja temperaturi od 600°C dolazi do bržeg prirasta temperature u uzorcima mješavine RM kako je i vidljivo na primjeru detalja A prikazanog na slici 5.33 b). Pretpostavka je da do bržeg prirasta temperature u uzorcima RM dolazi zbog veće toplinske provodljivosti betona RM u odnosu na betone EM-BM42 i MM-B10, što je potvrđeno i ispitivanjem koeficijenta toplinske provodljivosti u poglavlju 5.3.2. *Svojstva betona u očvrslom stanju*. Iz slike 5.33 također je vidljiv sporiji prirast temperature u uzorcima s opekarskim lomom, te je moguće donijeti konačan zaključak da betoni s opekarskim lomom imaju bolja svojstva toplinske provodljivosti u odnosu na beton s prirodnim agregatom.



Slika 5. 33: Režim zagrijavanja i hlađenja uzoraka, 200°C



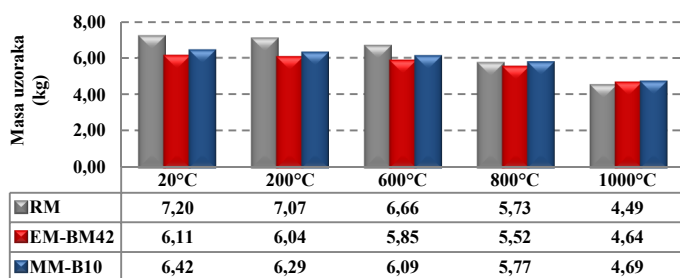
Slika 5. 34a): Režim zagrijavanja i hlađenja uzoraka, 800°C



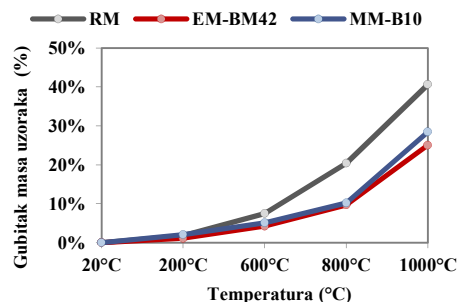
Slika 5. 35b): Detalj A - zagrijavanje i hlađenje uzoraka, 725°C – 745°C

Beton, kao i većina materijala, mijenja masu uslijed promjene temperature. Mase uzoraka mjerene su prije i nakon izlaganja visokim temperaturama na digitalnoj vagi preciznosti  $\pm 0,1$  g, a rezultati su prikazani na slici 5.34.

Gubitci masa uzoraka nakon zagrijavanja prikazani su na slici 5.35. Rezidualna masa uzoraka, odnosno postotak preostale mase u odnosu na početnu masu prije zagrijavanja je za sve uzorke izložene temperaturi od 200°C oko 98%. Nakon izlaganja uzoraka temperaturama od 600°C, 800°C i 1000°C možemo uočiti da mješavina RM značajno gubi na masi u odnosu na početnu masu, dok mješavine s opekarskim lomom pokazuju bolju otpornost gubitku mase nakon zagrijavanja.



Slika 5. 36 Masa uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama

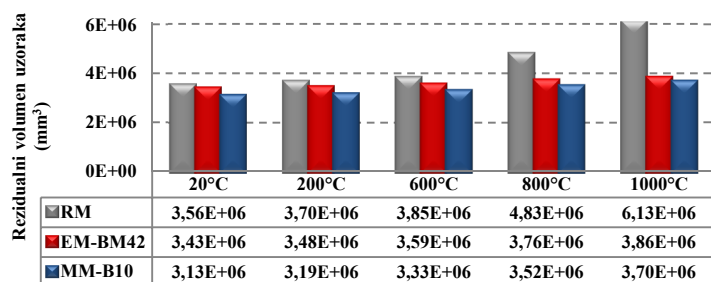


Slika 5. 375 Gubitak mase nakon zagrijavanja

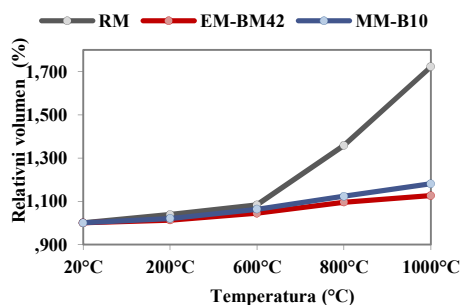
Gubitak mase betona nakon zagrijavanja izračunat je prema izrazu (45), a prikazani na slici 5.35:

$$M_{gubitak} = (M_{početna} - M_{zagrijavana}) / M_{početna} \quad (71)$$

Također je moguće uočiti da najmanji gubitak mase ima mješavina s najvećim udjelom opekarskog loma EM-BM42. Gubitak mase betona EM-BM42 je 25% nakon izlaganja temperaturi od 1000°C, dok je gubitak mase referentne mješavine RM 40,6%. Iz navedenog je moguće zaključiti kako je pri zamjeni 50% sitne frakcije i 75% krupne frakcije prirodnog agregata s opekarskim lomom moguće postići znatno manji gubitak mase betona nakon izlaganja visokim temperaturama. Budući da su svi uzorci imali do 1% vlage prije zagrijavanja, pretpostavka je da je gubitak mase u uzorcima nastao uslijed evaporacije vode iz uzoraka. Manji gubitak mase betona ukazuje na činjenicu da je put za izlazak plina koji nastaje uslijed visokih temperatura u betonu bolje osiguran kod betona s opekarskim lomom. Pretpostavka je da se uslijed navedenog stvara manji tlak koji uzrokuje raspadanje betona te može utjecati na bolju cjelovitost komponenti betona, tj. veća rezidualna mehanička svojstva betona.



Slika 5. 38 Volumen uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama

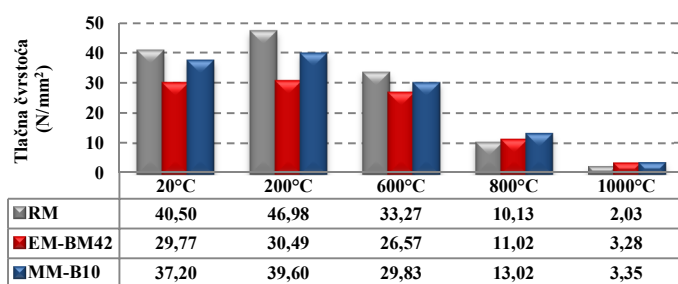


Slika 5. 397 Relativni volumen uzoraka kao funkcija povišenih temperatura

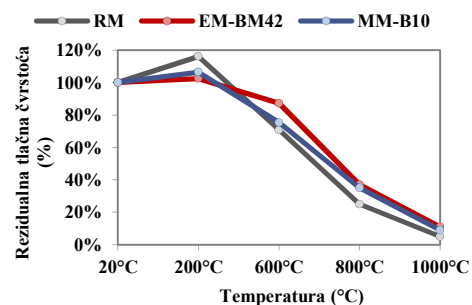
Beton mijenja dimenzije uslijed promjene temperature te su osim masa izmjerene i dimenzije, tj. volumen, svakog uzorka prije i nakon zagrijavanja. Na slici 5.36 prikazani su rezultati mjerenja volumena, a na slici 5.37 postotak povećanja volumena uzoraka nakon zagrijavanja u odnosu na volumen prije zagrijavanja. Iz slika 5.36 i 5.37 moguće je zaključiti da je najmanja promjena volumena uočena kod uzoraka EM-BM42. Primjerice, povećanje volumena uzoraka nakon izlaganja temperaturi od 800°C za RM iznosila je 36%, dok za EM-BM42 9,5% odnosno za MM-B10 12,3%. Iz navedenog je vidljivo da

beton s opekarskim lomom ima za oko 25% manje volumne promjene nakon izlaganja visokim temperaturama. Pretpostavka je da bi, u slučaju provođenja ispitivanja utjecaja visokih temperatura na promjenu volumena betona pri djelovanju opterećenja (jednoosnog, dvoosnog ili troosnog), volumne promjene bile manje od onih prikazanih slikom 5.37. Naime, prilikom djelovanja tlačnog opterećenja na uzorke izložene visokim temperaturama dolazi do zbijanja unutar strukture betona a time i smanjenja razvoja pukotina.

Kako u slučaju požara dolazi do opterećenja konstrukcije značajno višim temperaturama i promjene duljine su odgovarajuće veće. Ako je prostor za promjenu duljine nedovoljan, mogu se pojaviti sekundarni momenti, uzrokujući kolaps konstrukcije. Budući da uzorci mješavine EM-BM42 imaju najmanje promjene volumena nakon izlaganja visokim temperaturama, možemo zaključiti da je ta mješavina najpovoljnija u pogledu izrade konstruktivnih elemenata.



Slika 5. 40 Tlačna čvrstoća betona nakon izlaganja visokim temperaturama



Slika 5. 41 Rezidualna tlačna čvrstoća

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona nakon zagrijavanja prikazani su na slici 5.38. Slikom 5.39 prikazane su rezidualne tlačne čvrstoće betona nakon zagrijavanja uzoraka. Rezidualne čvrstoće uzoraka dobivene su kao postotak preostale čvrstoće pri izloženosti visokoj temperaturi u odnosu na početnu tlačnu čvrstoću prije zagrijavanja.

Iz slike 5.38 moguće je uočiti da se nakon izlaganja betona temperaturi od 200°C tlačna čvrstoća svih uzoraka povećala u odnosu na tlačnu čvrstoću uzoraka pri sobnoj temperaturi od 20°C. Povećanje tlačne čvrstoće u odnosu na inicijalnu za uzorke RM iznosi 16%, za EM-BM42 2%, a za MM-B10 6%. Do povećanja tlačne čvrstoće prema pretpostavkama navedenim u literaturi, [89-91], dolazi uslijed kemijskih promjena na cementnoj pasti. Naime pretpostavka je da dolazi do gubitka vlage iz slojeva cementne paste uslijed čega dolazi do povećanja veznih sila između hidratacijskih produkata a time i povećanja tlačne čvrstoće. Također, pretpostavka je da do porasta tlačne čvrstoće dolazi uslijed kratkog perioda izlaganja visokoj temperaturi (u odnosu na trajanje pri zagrijavanju na 600°C itd.) koja ujedno utječe i na ubrzanje hidratacijskih reakcija, [90].

Beton s opekarskim lomom pokazuje jednak profil razvoja čvrstoće pri visokim temperaturama kao i beton s prirodnim agregatom, tj. opadanje tlačne čvrstoće nakon izlaganja visokim temperaturama. Kemijske promjene minerala iz očvrslje cementne paste i agregata pojavljuju se ovisno o temperaturi u betonu.

Pri izlaganju uzoraka temperaturi od 400°C pa na više, dolazi do dehidracije kalcij-hidroksida (CSH) u očvrslj cementnoj pasti. Iz slike 5.38 moguće je zaključiti da je do otprilike 400°C početna tlačna čvrstoća uzoraka neznatno smanjena te se gubitak tlačne čvrstoće kreće se unutar granica od 10%.

Pretpostavka je da do smanjenja do navedenih 10% dolazi uslijed eliminacije slobodne vode i od dehidracije CSH u betonu, [92, 93].

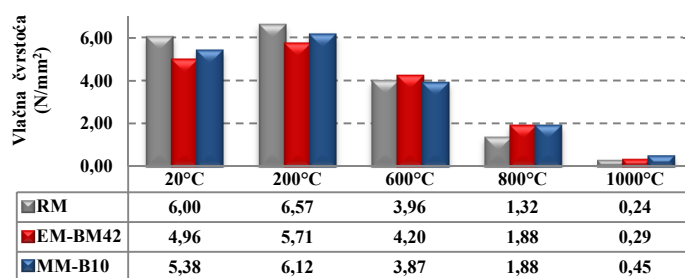
Nakon izlaganja betona temperaturama iznad 600°C gubitak tlačne čvrstoće uzoraka postaje značajniji i to za RM iznosi 29%, EM-BM42 13%, a MM-B10 25%. Uzorci s najvećim udjelom opekarskog loma (EM-BM42), kako je i očekivano, pokazuju najmanji gubitak čvrstoće pri izlaganju temperaturi od 600°C. Razlog tome može biti struktura zrna opekarskog loma koja omogućava bolji prolaz oslobođenog plina kroz beton.

Na temperaturama višim od 800°C dolazi do dekarbonatizacija vapnenca te se agregat koji sadrži CaCO<sub>3</sub> raspada, pri čemu oslobođeni CO<sub>2</sub> izlazi iz betona kao plin. Ako je put za izlazak plina spriječen, stvara se tlak koji uzrokuje mikropukotine i raspadanje strukture betona. Budući da se prilikom proizvodnje crijepa i opeke kao osnovno ograničenje kemijskog sastava gline postavlja udio kalcijkarbonata na maksimalnih 4%, pretpostavka je da će beton s takvim agregatom imati znatno bolju cjelovitost, a time i veće preostale čvrstoće od betona s dolomitom kao agregatom kod kojeg se udio kalcijkarbonata kreće oko 30%. Nakon izlaganja visokim temperaturama dekarbonatizacijom dolomita nastaje porozno dolomitno vapno velike specifične površine. Nastalo dolomitno vapno povećava svoj volumen upravo uslijed ranije opisane reakcije i spriječenog izlaska plina iz betona.

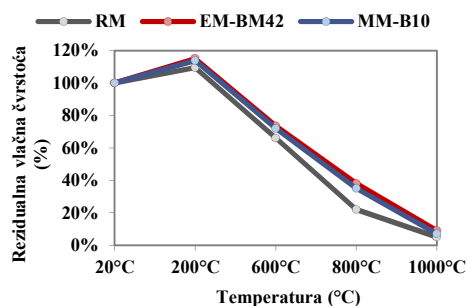
Svi uzorci izloženi temperaturi od 1000°C pokazali su male rezidualne tlačne čvrstoće: RM 5%, EM-BM42 11% i MM-B10 7%. Uzorci su ispitani odmah nakon hlađenja na sobnu temperaturu, tj. dan nakon zagrijavanja uzoraka. Svi uzorci ostavljeni 7 dana, u uvjetima sobne temperature i vlage, raspali su se zbog širenja dolomita i pukotina nastalih uslijed širenja, kako je i opisano u prethodnom odlomku.

Opekarski lom ima oštiji i hrapaviji oblik zrna što može uzrokovati bolju prionjivost između zrna agregata i cementne paste te i time utjecati bolje mehaničke karakteristike betona.

Iz svega navedenog slijedi da opekarski lom bolje podnosi visoke temperature u odnosu na dolomit upravo uslijed manjeg udjela CaO u kemijskom sastavu i geometrijskih karakteristika zrna, što je i vidljivo iz postotka preostalih tlačnih čvrstoća na slici 5.38.

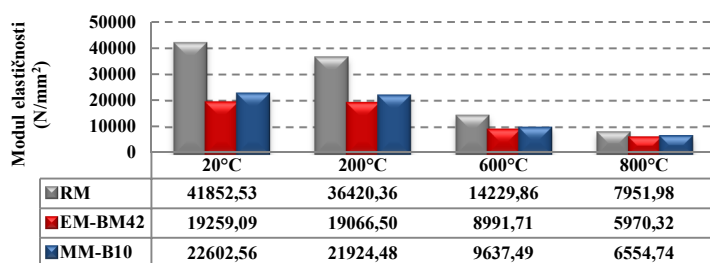


Slika 5. 42 Vlačna čvrstoća betona nakon izlaganja visokim temperaturama

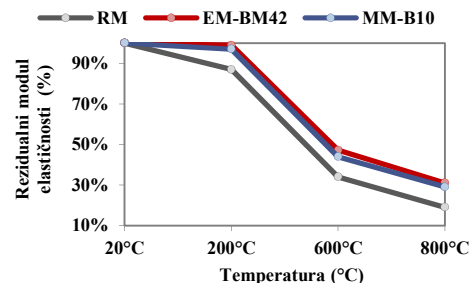


Slika 5. 43 Rezidualna vlačna čvrstoća

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće betona nakon izlaganja visokim temperaturama prikazani su na slici 5.40. Rezidualne čvrstoće prikazane su na slici 5.41. Svi zaključci navedeni za rezidualne tlačne čvrstoće betona RM, EM-BM42 i MM-B10 vrijede i za rezidualne vlačne čvrstoće. Uzorci mješavina EM-BM42 pokazuju najbolja svojstva u pogledu rezidualnih vlačnih čvrstoća betona.



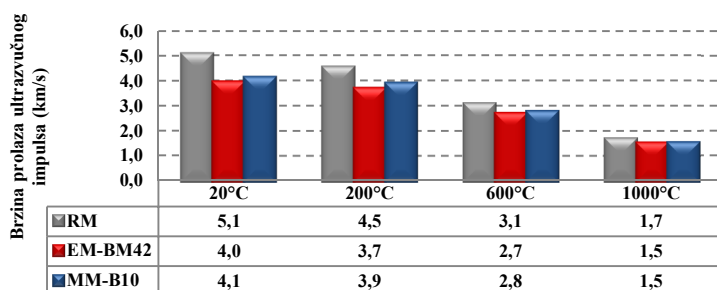
Slika 5. 44: Modul elastičnosti nakon izlaganja visokim temperaturama



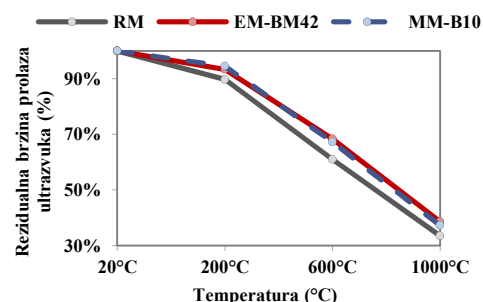
Slika 5. 45: Rezidualni modul elastičnosti

Modul elastičnosti betona smanjuje se nakon izlaganja visokim temperaturama kako je prikazano na slikama 5.42 i 5.43. Uzorke izložene temperaturi od 1000°C nije bilo moguće ispitivati jer se njihova valjska površina ljuštila te nije bilo moguće pravilno postaviti uređaj za ispitivanje i dobiti ispravne rezultate. Stoga su ispitivanja provedena za uzorke izložene temperaturama 200°C, 600°C i 800°C.

Iz rezultata ispitivanja vidljivo je da su rezidualni moduli elastičnosti betona s opekarskim lomom tijekom zagrijavanja na ispitne temperature kontinuirano veći za oko 10% do 13%. Također je moguće uočiti da najveći rezidualni modul elastičnosti nakon izlaganja svim temperaturama ima mješavina EM-BM42. Uspoređujući slike 5.39 i 5.43 možemo vidjeti da je redukcija modula elastičnosti s porastom temperature veća od redukcije tlačne čvrstoće jer se deformacija pri istoj vrijednosti naprezanja povećava. Pretpostavka je da se zbog boljih termičkih karakteristika opekarskog loma u odnosu na dolomit dolazi do manjih deformacija nakon izlaganja visokim temperaturama što može ukazivati na mogućnost primjene betona s opekarskim lomom u nosivim ili polunosivim stropnim blokovima.



Slika 5. 46: Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa nakon izlaganja visokim temperaturama



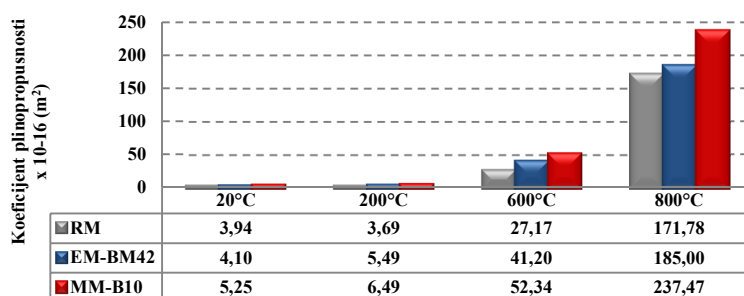
Slika 5. 47: Rezidualna brzina prolaza ultrazvučnog impulsa

Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorke određivana je prije i nakon zagrijavanja uzoraka na visoke temperature, te su rezultati ispitivanja prikazani na slikama 5.44 i 5.45. Kako struktura pora



koja se mijenja tijekom izlaganja betona visokim temperaturama ima utjecaj na promjenu mehaničkih svojstava betona, određivanje brzine prolaska ultrazvučnog vala kroz RM, EM-BM42 i MM-B10 korišteno je kako bi se ustanovilo je li pojava razvoja pukotina u strukturi betona određena ovom metodom praćena opadanjem mehaničkih svojstava.

Iz slike 5.45 uočljivo je da RM ima oko 5% manju rezidualnu brzinu prolaska ultrazvučnog impulsa na svim temperaturama kojima je bio izložen od EM-BM42 i MM-B10, što ukazuje na veći razvoj pukotina u betonu s prirodnim agregatom, što je i vidljivo iz slike 5.46.



Slika 5. 48: Plinopropusnost betona nakon izlaganja visokim temperaturama

Kako je za mješavine u ovoj fazi eksperimentalnog ispitivanja potrebno definirati i trajnosna svojstva betona, nakon izlaganja visokim temperaturama odabrano je ispitivanje plinopropusnosti kao mjerodavno zbog konačne primjene ovakvog betona u stropnim blokovima. Naime, budući da stropni blokovi neće biti izloženi vanjskim utjecajima okoliša (razred izloženosti X0) pretpostavka je da je plinopropusnost svojstvo koje će u pogledu trajnosti imati najveći značaj.

Kako metode za laboratorijsko ispitivanje plinopropusnosti još uvijek nisu normirane, ali su opisane i preporučene od strane tehničkog odbora 116-PCD unutar europske organizacije RILEM [94], ispitivanja su provedena prema preporukama Cembureau (RILEM TC 116 – PCD). Uz rezultate ispitivanja dana je i ocjena kvalitete betona obzirom na plinopropusnost nakon izlaganja visokim temperaturama.

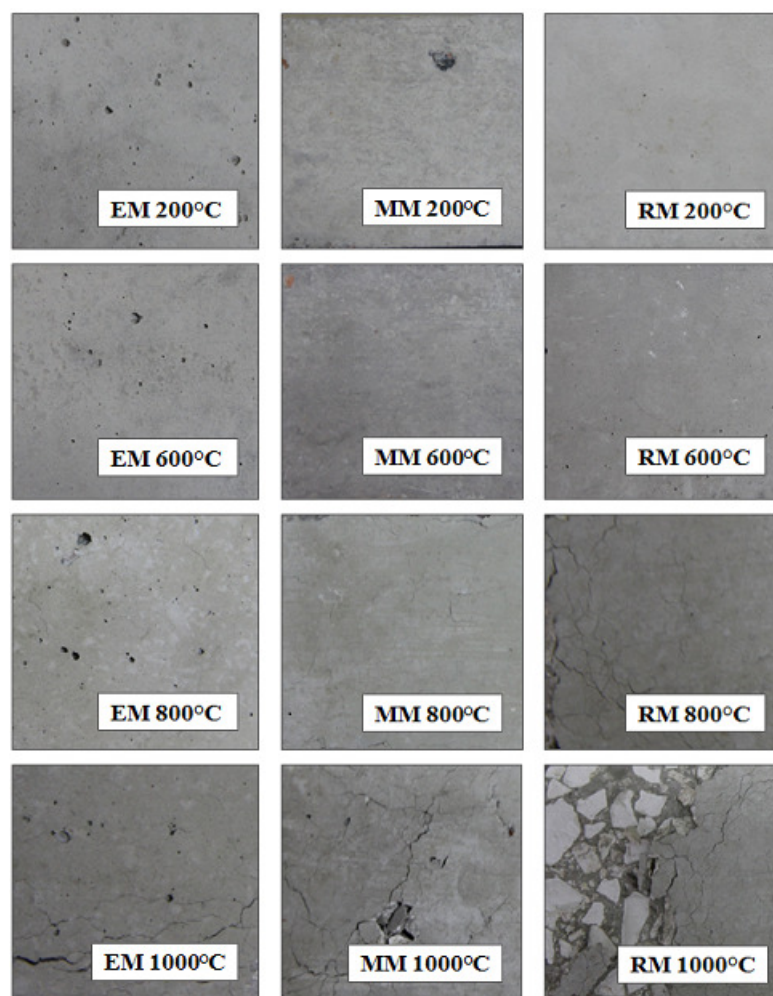
Iz slike 5.46 moguće je zaključiti da beton RM ima manji koeficijent plinopropusnosti od mješavina EM-BM42 i MM-B10 te je time najpovoljniji u pogledu prolaska plinova kroz beton nakon izlaganja visokim temperaturama. Također je moguće uočiti da sve tri mješavine betona spadaju u kategoriju betona loše kvalitete u smislu plinopropusnosti, a svi zaključci ranije spomenuti kod ispitivanja plinopropusnosti na sobnoj temperaturi vrijede i za plinopropusnost uzoraka izloženih visokim temperaturama.

Iz slike 5.46 vidljivo je da je plinopropusnost nakon izlaganja temperaturama iznad 600°C i do 47 puta veća od plinopropusnosti nakon izlaganja temperaturi od 200°C, iz čega možemo zaključiti da se kvaliteta betona u pogledu plinopropusnosti znatno smanjuje. Razlog tome je pojava pukotina u strukturi betona.

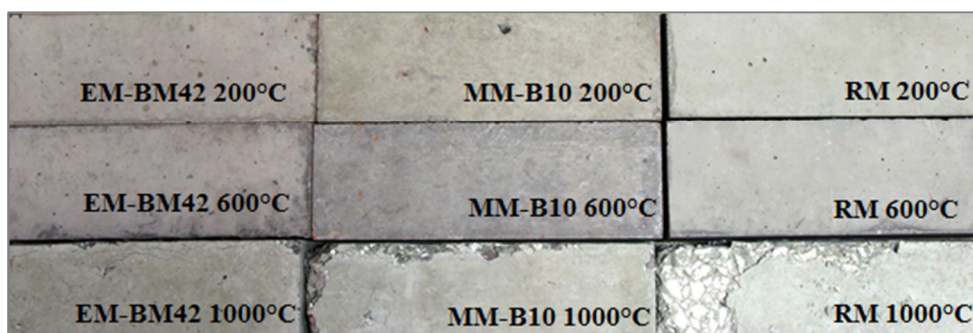
Kako prilikom izlaganja betona visokim temperaturama dolazi do pojave pukotina i promjene boje betona u nastavku je prikazan vizualni izgled betona RM, EM-BM42 i MM-B10 nakon izloženosti visokim temperaturama.

Površinske pukotine betona nakon izlaganja visokim temperaturama prikazane su slikom 5.47. Iz slike je vidljivo da se pukotine na uzorcima RM pojavljuju nakon izlaganja betona temperaturi od 600°C, te se kontinuirano njihov broj i veličina povećava obzirom na više temperature kojima je izlagan (800°C i 1000°C). Kod mješavina EM-BM42 i MM-B10 površinske pukotine pojavljuju se tek nakon izlaganja 800°C. Pretpostavka je da su pukotine manjih dimenzija i da ih je manje u uzorcima s opekarskim lomom uslijed manjeg udjela kalcijkarbonata u sastavu opeke i crijepa od dolomita.

Slikom 5.48 prikazana je promjena boje betona uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama. Iz slika 5.47 i 5.48 moguća je vizualna identifikacija modifikacije svojstava betona nakon izlaganja visokim temperaturama.

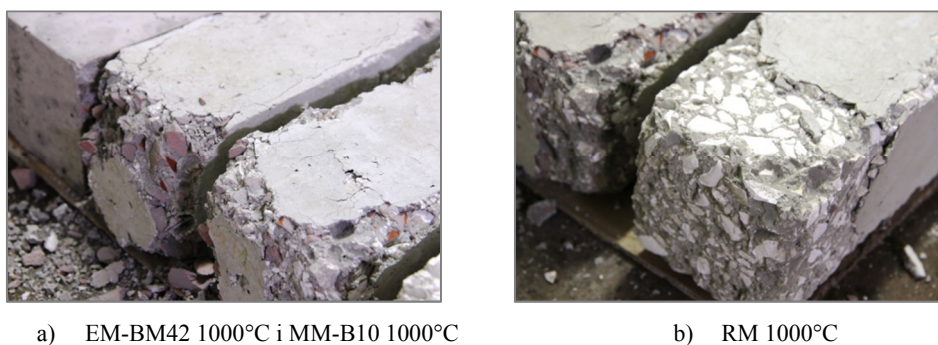


Slika 5. 49: Izgled površine betona nakon izlaganja visokim temperaturama



Slika 5. 50: Promjena boje betona nakon izlaganja visokim temperaturama

Na slikama 5.49 a) i 5.49 b) prikazani su uzorci sedam dana nakon izlaganja temperaturi od 1000°C. Iz slika je moguće uočiti kako je do odlamanja betona u uzorcima RM došlo preko zrna agregata dok kod uzoraka EM-BM42 i MM-B10 dolazi do odlamanja betona preko matrice betona i zrna dolomita. Zrna opeke i crijepa zadržala su svoju cjelovitost, te je moguće zaključiti i potvrditi već ranije navede tvrdnje da je opekarski lom povoljan za ugradnju u požarno otporne betone. Također se može zaključiti da je potrebno poboljšati svojstva matrice betona u pogledu njezinih termičkih svojstava. Preporuka za poboljšanje jest upotreba cementa veće požarne otpornosti (npr. aluminatnog cementa) ili upotrebom mljevenog opekarskog loma kao djelomične zamjene cementa, što bi trebalo dodatno istražiti.



Slika 5. 51: Izgled površine odlamanja betona nakon izloženosti temperaturi od 1000°C

Nakon provedenih laboratorijskih ispitivanja na optimalnim mješavinama EM-BM42 i MM-B10, te njihovom usporedbom s referentnom mješavinom RM proizlazi konačni zaključak:

- ***mješavina EM-BM42 ima najbolja fizikalno-mehanička, trajnosna i požarna svojstva obzirom na primjenu takvog betona u izradi predgotovljenih stropnih blokova.***

## 6. Betonski stropni blokovi s opekarskim lomom - BlokOL

Na temelju rezultata provedenih eksperimentalnih ispitivanja u prošlom poglavlju i odabrane mješavine EM-BM42 kao optimalne za primjenu u stropnim betonskim blokovima u ovom poglavlju opisana su eksperimentalna ispitivanja betonskih stropnih blokova, te su dani rezultati i konačni zaključci provedenih ispitivanja. Također je proveden dokaz nosivosti stropnih blokova te proračun polumontažne stropne konstrukcije prije i nakon opožarivanja.

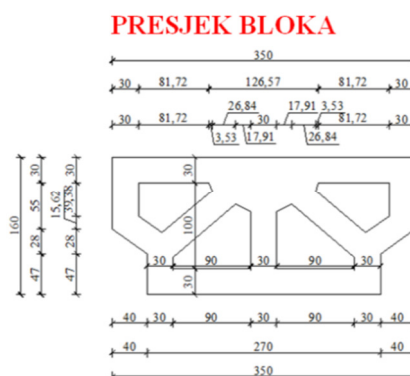
### 6.1 Eksperimentalna ispitivanja stropnih blokova

#### 6.1.1 Mehanička svojstva BlokOLa pri sobnoj temperaturi

Uzorci stropnih blokova spravljeni su od betona sastava prema tablici 5.6., v. poglavlje 5.2 *Sastav optimalnih mješavina betona*. Betonski blokovi s opekarskim lomom spravljeni od mješavine betona EM-BM42 u nastavku će se označavati kraticom **BlokOL**. Nakon spravljanja beton je ugrađen u kalupe dimenzija i izgleda kako je prikazano na slikama 6.1 i 6.2. Kalupi su napravljeni u skladu sa zahtjevima o dimenzijama betonskih stropnih blokova propisanih normom HRN EN 15037-2:2009. Prije ugradnje betona u kalupe za svaku mješavinu od koje su rađena po tri bloka ispitana su svojstva betona u svježem stanju kako bi se dokazala i potvrdila ponovljivost eksperimenta. Beton je u kalupe ugrađen u dva sloja, a svaki sloj vibriran je na vibro stolu frekvencije 150 Hz. Nakon ugradnje betona u kalupe, kalupi su prekriveni najlonskom folijom i ostavljeni 24h na sobnoj temperaturi od  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Režim njege betonskih blokova do dana ispitivanja jednak je režimu njege uzoraka betona EM-BM42, v. poglavlje 5.2 *Svojstva betona u očvrslom stanju nakon izlaganja visokim temperaturama*.



Slika 6.1: Izgled kalupa za izradu blokova



Slika 6.2: Dimenzije blokova

Zahtjevi koje BlokOL mora zadovoljiti odnose se na: geometrijska svojstva, površinski izgled, mehaničku otpornost, otpornost na požar, akustička svojstva, toplinska svojstva i trajnost.

Nakon 28 dana starosti blokova ispitana su njihova svojstva pri sobnoj temperaturi, a slikama 6.3 do 6.8 prikazana su ispitivanja i izgled BlokOLa. Ispitivanja su provedena na po tri uzorka BlokOLa, a prije

svakog ispitivanja provjerena su geometrijska svojstva bloka. Dimenzije bloka određene su prema sljedećem postupku:

- dva mjerenja širine bloka na rubnim dijelovima bloka s dvije suprotne strane,
- dva mjerenja duljine i to po jedno na sredini gornje i donje plohe bloka,
- dva mjerenja visine na sredini nasuprotnih bočnih ploha bloka,
- dva mjerenja debljine s nasuprotnih bočnih strana gornje plohe bloka,
- četiri mjerenja debljine rebara unutar bloka, dva na svakom kraju s obje strane bloka,
- širina i dubina zuba: blok se postavi na ravnu površinu, rade se dva mjerenja po jedno u sredini sa svake strane bloka.

Površina betonskog bloka kontrolirana je vizualnim pregledom. Blokovi kod kojih su uočene greške na površini, a mogu utjecati na mehanička svojstva, bili su odbačeni. Površine svih uzoraka prije nanošenja opterećenja pripremljeni su brušenjem.

Prema preporukama danim u normi HRN EN 772-13: 2003 *Određivanje neto i bruto obujamske mase suhih zidnih elemenata* određena je bruto obujamska masa BlokOLa. Masa BlokOLa određena je nakon što blokovi osušeni u sušioniku na 105°C do stalne mase, a volumen je određen mjerenjem dimenzija pomičnim mjerilom. Izmjerena obujamska masa u suhom stanju iznosila je 1995 kg/m<sup>3</sup>.

Na slikama 6.3, 6.4 i 6.5 prikazana je izrada, izgled i mjerenje dimenzija BlokOLa, a na slikama 6.6 do 6.8 prikazana su ispitivanja mehaničkih svojstava.



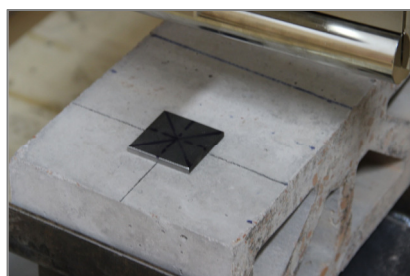
Slika 6. 3: Izrada BlokOLa



Slika 6. 4: Izgled gotovih BlokOLa



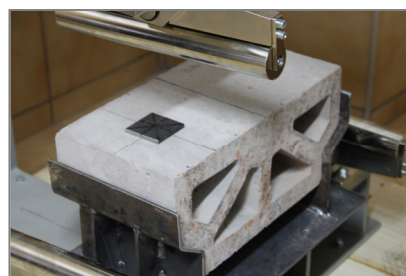
Slika 6. 5: Priprema uzoraka za ispitivanje



a) pločica za prijenos opterećenja



b) izgled nepomičnog krutog oslonca

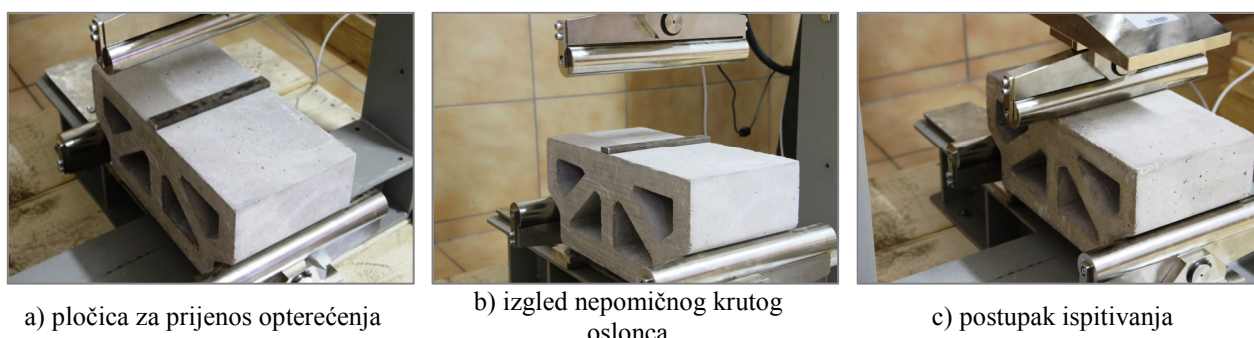


c) postupak ispitivanja

Slika 6. 6: Ispitivanje otpornosti na koncentrirano opterećenje



Slika 6. 7: Ispitivanje tlačne čvrstoće u horizontalnom smjeru



Slika 6. 8: Ispitivanje čvrstoće pri savijanju

Mehanička svojstva bloka ispitana su prema zahtjevima norme HRN EN 15037- 2:2009 opisanim upoglavljju 2.3.3 *Zahtjevi za predgotovljene betonske stropne sustave: betonske blokove*. Rezultati provedenih ispitivanja prikazani su u tablici 6.1.

Ispitivanja su se provodila na po tri uzorka bloka za svako ispitivano svojstvo, a na uzorcima njegovanim najmanje 24 sata u laboratorijskim uvjetima pri  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tablica 6. 1: Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava blokova

| Ispitivanje  | BlokOL | Tip bloka | Zadovoljava zahtjev za razred mehaničke otpornosti prema HRN EN 15037-2:2009 |
|--|--------|-----------|--|
| Otpornost na djelovanje koncentriranog opterećenja na blokove (kN) | 6,9    | RR/SR     | Da/R1  |
| Tlačna čvrstoća bloka u horizontalnom smjeru (MPa)                 | 18,0   |           | Da/R2  |
| Čvrstoća bloka pri savijanju (kN)                                  | 13,3   |           | Da/R2  |

Iz tablice 6.1 možemo zaključiti da BlokOL zadovoljava zahtjeve za razrede mehaničke otpornosti R2 prema normi HRN EN 15037-2:2009 te ga je moguće koristiti u svrhu polunosivog ili nosivog stropnog bloka predgotovljene stropne konstrukcije.

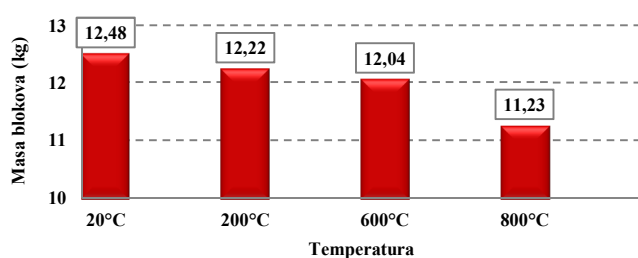
Preporuka je da se u slučaju izrade nosivih stropnih blokova izradi zub na gornjoj plohi bloka, prema normi HRN EN 15037-2:2009, koji bi osigurao njegovo sudjelovanje u nosivosti zajedno s nosivim gredama. Također, u tom slučaju trebalo bi dodatno ispitati tlačnu čvrstoću bloka u vertikalnom smjeru.

### 6.1.2 Mehanička svojstva BlokOLA nakon izloženosti visokim temperaturama

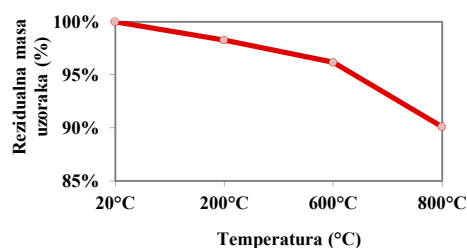
Blokovi su u 28 danu starosti izvađeni iz vode, ostavljeni na sobnoj temperaturi 7 dana, a nakon toga sušeni u sušioniku na 105°C do stalne mase, tj. vlažnosti bloka manje od 1%. Nakon postignute željene vlažnosti uzorka blokovi su izloženi visokim temperaturama od 200°C, 600°C i 800°C. Prirast temperature iznosio je 1°C/min, a mjereno je termo sondom koja se nalazila na samoj peći i sondom koja je stavljena u peć kao kontrolna. Režim zagrijavanja jednak je režimu zagrijavanja uzoraka u poglavlju 5.3.2 *Svojstva betona u očvrslom stanju*, a prikazan je slikama 5.30 i 5.31.

Masa blokova mjerena je prije i nakon zagrijavanja blokova, a rezultati mjerenja prikazani su u na slici 6.9. Rezidualna masa blokova nakon zagrijavanja prikazana je na slici 6.10. Rezidualna masa uzoraka za uzorke izložene temperaturi od 200°C iznosi oko 98%. Nakon izlaganja uzoraka temperaturama od 600°C masa uzoraka neznatno opada u odnosu na izloženost temperaturi od 200°C, tj. rezidualna masa iznosi oko 96% početne mase. Usporedbom rezidualne mase bloka i mase betona iste mješavine ranije ispitane, približno jednake vlažnosti uzoraka prije zagrijavanja (do 1%), slike 5.35 i 6.10., vidimo da je gubitak mase pri ispitivanjima na razini materijala i pri ispitivanjima na razini elementa konstrukcije jednak. Nakon zagrijavanja uzoraka na 800°C rezidualne mase uzoraka bile su oko 90% početne mase. Također usporedbom slika 5.35 i 6.10 vidimo da je gubitak mase nakon 800°C jednak mjereno na razini materijala ili na razini elementa konstrukcije.

Iz svega navedenog možemo zaključiti da je gubitak mase blokova i uzoraka betona nakon izloženosti visokim temperaturama jednak. To upućuje na zaključak da je po pitanju gubitka početne mase dovoljno ispitati uzorke samo na razini materijala i na temelju toga moguće je donijeti konačne zaključke o ponašanju blokova pri istim režimima izloženosti visokim temperaturama, a pod jednakim početnim uvjetima vlage i temperature.



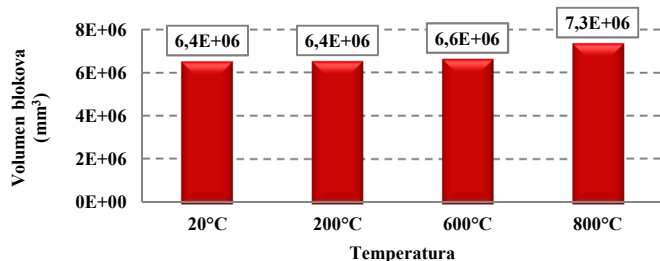
Slika 6. 9: Masa bloka prije i nakon izlaganja visokim temperaturama



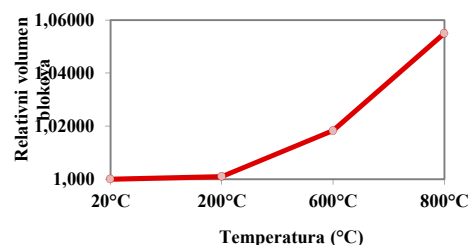
Slika 6. 10: Rezidualne mase blokova nakon zagrijavanja

Blok mijenja dimenzije uslijed promjene temperature te su osim masa izmjerene i vanjske dimenzije, tj. ukupni volumen, svakog uzorka prije i nakon zagrijavanja. Na slici 6.11 prikazani su rezultati mjerenja volumena, a na slici 6.12 postotak povećanja ukupnog volumena blokova nakon zagrijavanja u odnosu na volumen prije zagrijavanja. Nakon izlaganja temperaturi od 200°C povećanje volumena kreće se do 1% što se može smatrati zanemarivim. Nakon izlaganja temperaturi od 600°C volumen blokova se povećava do 2%, a nakon izlaganja temperaturi 800°C oko 5%. Kako u slučaju požara dolazi do promjene duljine

betonskih blokova, potrebno je osigurati dostatan prostor za njezinu promjenu. Uzimajući u obzir navedena povećanja nakon izlaganja BlokOLa temperaturama od 600°C i 800°C, a primjenjujući to na dimenzije bloka, možemo zaključiti da je preporučeno propisati toleranciju duljine oslanjanja BlokOLa na  $49 \pm 3$  mm.

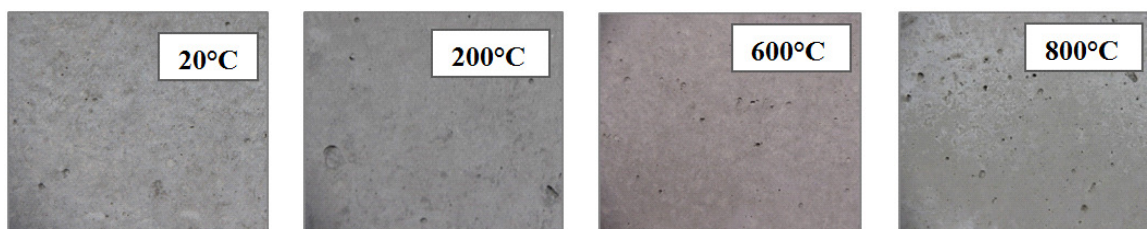


Slika 6. 11: Volumen blokova nakon izlaganja visokim temperaturama



Slika 6. 12: Relativni volumen blokova kao funkcija povišenih temperatura

Površina betonskog bloka kontrolirana je vizualnim pregledom nakon izlaganja visokim temperaturama. Na slici 6.13 prikazan je izgled gornje (donje) plohe blokova nakon izlaganja visokim temperaturama. Izgled gornje i donje plohe bloka bitan je zbog vizualne mogućnosti utvrđivanja stanja betona stropa nakon izloženosti visokim temperaturama. Iz vizualnog pregleda (slika 6.13) nije moguće uočiti promjene (pukotine ili oštećenja) na gornjoj ili donjoj plohi bloka nakon izlaganja temperaturama 200°C i 600 °C već tek nakon izlaganja temperaturi od 800°C.

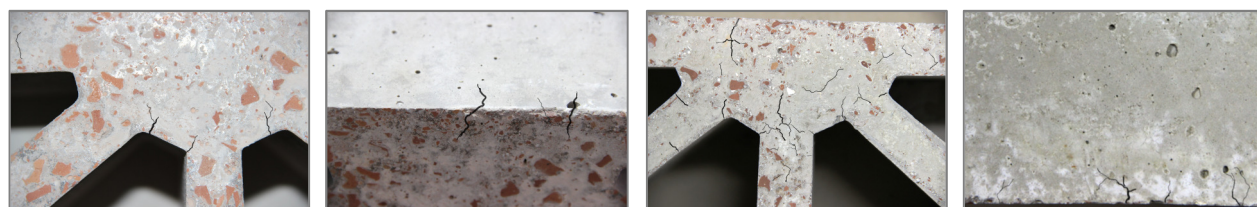


Slika 6. 13: Gornja ploha blokova nakon izlaganja visokim temperaturama

Na slikama 6.14a) do 6.14d) prikazani su detalji blokova nakon izlaganja visokim temperaturama, gdje su pukotine obojane crnom bojom kako bi bile uočljive na slikama jer su slabo uočljive i sitne na stvarnom prikazu. Iz slike 6.14a) i 6.14 c) vidljivo je da se pukotine pojavljuju na rubnim djelovima gornje i donje plohe bloka te na rubnim djelovima stijenki šupljina bloka. Na blokovima izloženim temperaturi od 600°C uočene sitne pukotine su u skladu s očekivanjima proizašlih iz rezultata ranije provedenih ispitivanja na razini materijala. Također je moguće uočiti da su pukotine na blokovima uočene na vanjskim površinama (gornjoj, donjoj i bočnim ploham) jednake pukotinama uočenim na uzorcima betona (slika 5.46). Nakon izlaganja uzoraka temperaturi od 800°C dolazi do pojave pukotina po vanjskim površinama bloka, kao i po bridovima stijenki BlokOLa. Pretpostavka je da je do većeg broja sitnih mrežastih pukotina po matrici betona došlo uslijed razlike u debljini stijenke betona BlokOLa u odnosu na uzorke prizme EM-BM42. Kako su stjenke blokova debljine 3 cm, dolazi do znatno bržeg



zagrijavanja uzorka na izloženu temperaturu nego kod uzorka prizme debljine 10 cm. Uzorci prizmi tijekom jednosatne izloženosti visokim temperaturama ne postižu temperaturu u sredini uzorka jednaku onoj u peći (slika 5.32 i 5.33), dok je pretpostavka da uzorci blokova budu progrijani na izloženu temperaturu jer je stijenka cca 1/3 debljine prizme. Zaključak je da su geometrijske karakteristike i brže progrijavanje uzorka razlog pojavi pukotina na rubnim djelovima BlokOLa, slika 6.14.



a) 600°C uz šupljine      b) 600°C gornji rub      c) 800°C uz šupljine      d) 800°C gornji rub

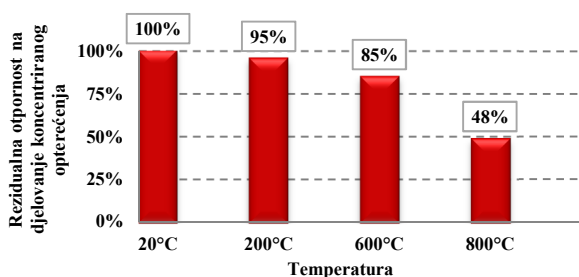
Slika 6. 14: Detalji pukotina vidljivi na bridovima stranica BlokOLa nakon izloženosti visokim temperaturama

Mehanička otpornost BlokOLa ispitana je na uzorcima nakon izlaganja visokim temperaturama, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6.2 i na slikama 6.15. do 6.17.

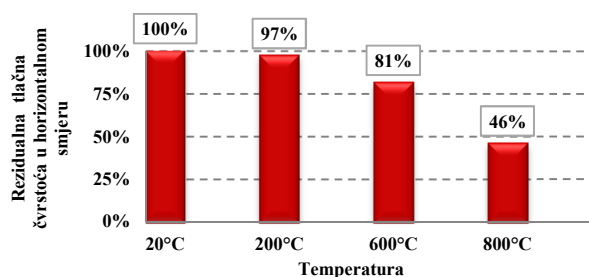
Tablica 6. 2: Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava blokova nakon izlaganja visokim temperaturama

| Temperatura | Otpornost na djelovanje koncentriranog opterećenja na blokove | Tlačna čvrstoća bloka u horizontalnom smjeru | Čvrstoća bloka pri savijanju |
|-------------|---|--|------------------------------|
|             | (kN)  | (MPa)  | (kN)                         |
| 200°C       | 6,4   | 17,5   | 12,8                         |
| 600°C       | 5,7   | 14,7   | 10,0                         |
| 800°C       | 3,2   | 7,2  | 4,8                          |

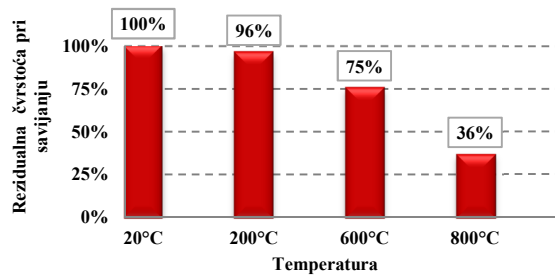
Iz rezultata ispitivanja možemo zaključiti da BlokOL ima zadovoljavajuću mehaničku otpornost i nakon izloženosti temperaturi od 200°C. Budući da su sva mehanička svojstva, osim tlačne čvrstoće u horizontalnom smjeru, trostruko veća od propisanih za polunosive i nosive blokove, pretpostavka je da će i nakon njihovog smanjenja uslijed visokih temperatura oni i dalje zadovoljavati propisane kriterije. Prema navedenoj pretpostavci, nakon izloženosti temperaturama od 600°C i 800°C, sva svojstva osim tlačne čvrstoće bloka u horizontalnom smjeru još uvijek zadovoljavaju uvjete mehaničke otpornosti propisane za blokove pri sobnoj temperaturi, tablica 6.2. i slike 6.15 do 6.17.



Slika 6. 15: Rezidualna otpornost na djelovanje koncentriranog opterećenja



Slika 6. 16: Rezidualna tlačna čvrstoća bloka u horizontalnom smjeru



Slika 6. 17: Rezidualna čvrstoća bloka pri savijanju

Iz navedenog možemo zahljučiti da je tlačna čvrstoća bloka u horizontalnom smjeru ključna pri određivanju preostale nosivosti nakon izloženosti visokim temperaturama, te je mjerodavna za naknadno utvrđivanje stanja konstrukcije nakon djelovanja požara. U poglavlju 6.4 *Dokaz nosivosti stropnog bloka nakon izlaganja visokim temperaturama* bit će prikazan proračun nosivosti te zaključci o upotrebi BlokOLa pri izloženosti visokim temperaturama.

### 6.1.3 Akustična svojstva BlokOLa

Akustična svojstva koja je potrebno provjeriti za BlokOL su zračna i udarna zvučna izolacijska svojstva. U slučaju da nisu provedena ispitivanja akustičnih svojstava prema normi HRN EN 15037-2:2009, propisana je mogućnost proračuna navedenih svojstava prema Prilogu L, norme HRN EN 15037-1:2008. Kako u ovom istraživanju nije bilo moguće eksperimentalno ispitati akustična svojstva blokova zbog nedostatka potrebne opreme, proveden je proračun navedenih svojstava prema izrazima (46) i (47) u skladu s preporukama iz Priloga L, norme HRN EN 15037-1:2008.

Zračna zvučna izolacija  $R_w$  je svojstvo sprječavanja širenja zračnog zvuka svih pregradnih konstrukcija zgrade – vertikalnih i horizontalnih, te je u nastavku prikazan proračun iste:

$$R_w = 40 \log(M_R) - 56 + \frac{3}{8} \left( \frac{M_R}{h_t} \right) [dB]$$

gdje je:

$R_w$  – vrijednost zračne zvučne izolacije, u  $dB$

$M_R$  – masa stropa, u  $kg/m^2$

$h_t$  – debljina stropa, u  $cm$  (bez uzimanja u obzir završnih slojeva stropa)

$$R_w = 40 \log(320) - 56 + \frac{3}{8} \left( \frac{320}{16} \right) = 52 \text{ dB}$$

Udarne zvučna izolacija odnosi se samo na horizontalne pregrade tj. na međukatne konstrukcije, i svojstvo je sprječavanja strukturnog zvuka. Kako je BlokOL namijenjen upotrebi u stropnim konstrukcijama prikazan je proračun njegove udarne zvučne izolacije:

$$L_{n,w} = 170 - 35 \log(M_{ep}) [dB]$$

gdje je:

$L_{n,w}$  – vrijednost udarne zvučne izolacije, u  $dB$

$M_{ep}$  – ekvivalentna masa stropa, u  $kg/m^2$

$$M_{ep} = M_R - M_r [kg/m^2]$$

$$M_r = 80 (h/H)$$

$h$  – visina BlokOLa, u  $cm$

$H$  – ukupna visina stropa, u  $cm$

$$M_{ep} = 320 - 80 \left( \frac{16}{33,8} \right) = 282,1 \text{ kg/m}^2$$

$$L_{n,w} = 170 - 35 \log(282,1) = 84 \text{ [dB]}$$

S obzirom na namjenu zgrade i funkciju pregrade (međukatna konstrukcija) normom HRN U.J6.201-1989: Akustika u građevinarstvu – Tehnički propisi za projektiranje i građenje zgrada, propisane su minimalne/maksimalne vrijednosti zračne i udarne zvučne izolacije, a rezultati proračuna i kriteriji prikazani su u tablici 6.3. Iz tablice je moguće zaključiti da stropovi od BlokOLa zadovoljavaju kriterije propisane za zračnu zvučnu izolaciju, a ne zadovoljavaju kriterije propisane za udarnu zvučnu izolaciju. Prilikom upotrebe BlokOLa preporuča se dodatna udarna zvučna izolacija od 3,0 mm, težine otprilike 2,5 kg/m<sup>2</sup>, kojom se dobiva poboljšanje od oko 17dB. Upotrebom dodatne udarne zvučne izolacije zadovoljili bi se kriteriji postavljeni normom od 68 dB, tablica 6.3.

Tablica 6. 3: Rezultati proračuna akustičnih svojstava BlokOLa

| Funkcija pregrade   | $R_{w,min}$ [dB] | $R_w$ [dB] | $L_{w,max}$ [dB] | $L_{n,w}$ [dB] |
|---|------------------|------------|------------------|----------------|
| A/ Stropovi između stanova<br>B/ Stropovi između poslovnih prostora | 52               | 52         | 68               | 84             |

#### 6.1.4 Trajnosna svojstva BlokOLa

Trajnost BlokOLa bila bi njegova sposobnost da uslijed očekivanog opterećenja iz okoliša tijekom upotrebe zadrži zahtijevanu razinu sigurnosti i uporabljivosti te odgovarajući izgled bez povećanih troškova za održavanje i popravke. Parametri koje su važni za trajnost BlokOLa su ograničenja postavljena za minimalni udio cementa, maksimalni vodocementni omjer, minimalni razred čvrstoće betona. Navedeni parametri zadovoljeni su prilikom projektiranja sastava betonske mješavine EM-BM42. Plinopropusnost, kao parametar trajnosti BlokOLa, ispitana je na razini materijala i prikazana u poglavlju 5.3.2 Svojstva betona u očvrslom stanju.

#### 6.1.5 Toplinska svojstva BlokOLa

Toplinska svojstva BlokOLa izražena su preko toplinske provodljivost materijala zajedno s geometrijom proizvoda. Toplinska provodljivost materijala određena je ispitivanjem prema normi HRN EN ISO 8302 u suhom stanju.

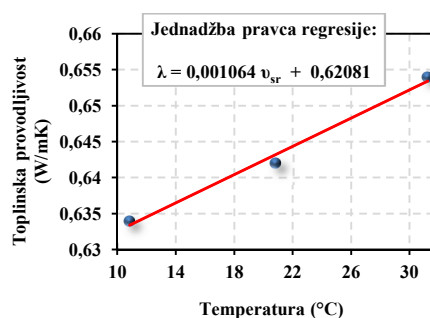
Uzorak je nakon izrade njegovan u vodi 28 dana na temperaturi 20°C ± 5°C. Nakon vađenja iz vode proveden je tretman isušivanja uzorka. Njega uzorka tretmanom isušivanja sastojala se od:

- 7 dana sušenja na sobnoj temperaturi, uzorak zamotan u polietilensku foliju,
- 3 dana sušenja u sušioniku na temperaturi od 60° C,

- isušivanje ispitnog uzorka pri temperaturi od 105° C do stalne mase (promjena mase manja od 0,1% po danu).

Nakon postizanja stalne mase uzorak je bio umotan u polietilensku foliju do trenutka ispitivanja kako bi se spriječilo upijanje vlage iz zraka. Ispitivanje toplinske provodljivosti bloka dimenzija 50 cm x 50 cm x 10 cm provedeno je nakon tretmana isušivanjem. Ispitni uzorak (u daljnjem tekstu blok) spravljen je s mješavinom betona ranije označenom s EM-BM42 i odabranom kao najboljom za izradu stropnih betonskih blokova.

Dijagram ovisnosti toplinske provodljivosti bloka, nazivne debljine 100 mm, o srednjoj temperaturi prikazan je na slici 6.18.



Slika 6. 18: Toplinska provodljivost uzorka betona

Rezultati mjerenja toplinske provodljivosti prikazani su tablicom 6.4. Iz tablice je vidljivo da je koeficijent toplinske provodljivosti ( $\lambda$ ) pri temperaturi od 10°C iznosi 0,631 W/(mK), a iz tablice 2.16, v. poglavlje 2.3.1 *Zahtjevi za predgotovljene betonske proizvode prema normi HRN EN 13369:2004*, vidljivo je da je za obične betone  $\lambda = 1,09$  W/(mK). Uspoređujući navedene vrijednosti vidljivo je da beton s opekarskim lomom ima i do 58% manji koeficijent toplinske provodljivosti od običnog što upućuje na bolja toplinska svojstva takvog betona i poboljšanu požarnu otpornost.

Tablica 6. 4: Koeficijent toplinske provodljivosti za BlokOL u suhom stanju


| Naziv veličine   | Mjerna jedinica      | Mjerna točka |       |       |
|--|----------------------|--------------|-------|-------|
|  |                      | 1.           | 2.    | 3.    |
| Gustoća materijala   | (kg/m <sup>3</sup> ) | 1910,7       |       |       |
| Izmjerena plošna masa  | (kg/m <sup>2</sup> ) | 190,4        |       |       |
| Srednja temperatura toplije strane uzorka ( $\vartheta_1$ )            | °C                   | 15,9         | 26,0  | 36,1  |
| Srednja temperatura hladnije strane uzorka ( $\vartheta_2$ )           | °C                   | 6,1          | 16,3  | 26,4  |
| Srednja temperatura uzorka ( $\vartheta_{sr}$ )                        | °C                   | 11,0         | 21,1  | 31,3  |
| Srednja temperaturna razlika ( $\vartheta_1 - \vartheta_2$ )           | K                    | 9,7          | 9,7   | 9,7   |
| Gustoća toplinskog toka ( $q$ )  | W/m <sup>2</sup>     | 30,9         | 31,3  | 31,8  |
| Srednja toplinska provodljivost ( $\lambda$ )                          | W/mK                 | 0,633        | 0,643 | 0,654 |
| Toplinska provodljivost u suhom stanju pri 10°C ( $\lambda_{10,drv}$ ) | W/mK                 | 0,631        |       |       |

Budući da su vrijednosti u tablici 6.4 dane za suhe uvjete okoliša, prilikom proračuna potrebno ih je pretvoriti u projektni koeficijent toplinske provodljivosti ovisno o stvarnom stanju vlažnosti i o primjeni BlokOLa.

### 6.1.6 Zaključak provedenih ispitivanja BlokOLa

Nakon provedenih ispitivanja svojstava BlokOLa propisanih normom HRN EN 15037-2:2009 možemo zaključiti da je moguća izrada predgotovljenih stropnih blokova s opekarskim lomom kao agregatom zadovoljavajući sve propisane zahtjeve, a njegova svojstva sumarno su prikazana na slici 6.19.

Slika 6. 19: Sumarni prikaz svojstava BlokOLa

|  |                        |
|--|------------------------|
| HRN EN 15037-2<br>Predgotovljeni betonski stropni sustavi: betonski blokovi        |                        |
| <b><i>BlokOL</i></b>   |                        |
| Tip betonskog bloka: .....   | SR                     |
| Mehanička otpornost: .....   | Razred R2              |
|  |                        |
| Dimenzije:   |                        |
| Visina x dužina x širina = 16 cm x 18 cm x 35 cm                                   |                        |
| Razred tolerancije dimenzija: .....  | Razred T1              |
| Reakcija na požar: .....   | A1                     |
| Neto obujamska masa u suhom stanju: ....   | 1995 kg/m <sup>3</sup> |
| Zračna zvučna izolacija: .....   | 52 dB                  |
| Udarna zvučna izolacija: .....   | 85 dB                  |

## 6.2 Dokaz nosivosti stropnog bloka prema HRN EN 1992-1-3: 2004

### 6.2.1 Dokaz nosivosti u fazi montaže

Normom HRN EN 1992-1-3: *Projektiranje betonskih konstrukcija 1-3. Dio: Opća pravila – Predgotovljeni betonski elementi i konstrukcije*, propisano je da se proračun treba izraditi za svaku mjerodavnu fazu građenja upotrebljavajući prikladne geometrijske podatke i svojstva materijala za tu fazu. Prema navedenim preporukama, [95-96], kako bismo mogli koristiti BlokOL kao predgotovljeni stropni element potrebno je dokazati njegovu nosivost u fazi montaže predgotovljene stropne konstrukcije i u fazi njezine uporabe.

BlokOL u fazi montaže mora zadovoljiti nosivost za sva opterećenja koja se u trenutku montaže mogu pojaviti. Pretpostavljena opterećenja su:

- vlastita težina bloka,  $G$ ,
- opterećenje radnika koji montira strop zajedno s teretom kojim rukuje iznosa od 1,2 kN.

Budući da opterećenje čovjeka s teretom ima dinamički karakter dinamički koeficijent mu je 1.9 za trenutno nanešeno opterećenje. Stropni blok je dimenzija 35 x 18 x 16 cm s utorima za nalijeganje na grede (ležajeve) i šuplinama u bloku kako je prikazano na slici 6.2., a masa mu je 12,5 kg.

Vlastita težina  $g_k = 0,125/0,35 = 0.357 \text{ kN/m'}$

Živi teret  $F_u = 1,0 + 0,2 = 1,2 \text{ kN}$

Računsko opterećenje:  $g_d = g_k \times \gamma_c = 0.357 \times 1.35 = 0.48 \text{ kN/m}$

$$F_d = 1.20 \times 1.9 = 2.28 \text{ kN}$$

Granična poprečna sila (jednaka reakciji na osloncu):

$$V_{Sd,max} = R_1 = \frac{g_d \times l}{2} + F_d = \frac{0,48 \times 0,27}{2} + 2,28 = 2,34 \text{ kN}$$

Granični moment savijanja:  $M_{Sd,max} = \frac{g_d \times l}{2} \times \frac{l}{4} + R_1 \times \frac{l}{4} = \frac{0,48 \times 0,27^2}{8} + \frac{2,341 \times 0,27}{4} = 0,16 \text{ kNm}$

$l = 0,27 \text{ m}$ ; udaljenost između ležajnih točaka,

Proračunska vlačna čvrstoća na savijanje:

$$f_{t,Sd} = \frac{160000 \times 6}{180 \times 160^2} = 0,21 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,Sd} \leq f_{t,Rd}$$

$$f_{t,Rd} = ((1/5) \times f_{ck,b}) / \gamma_c = 0,2 \times 18 / 1,5 = 2,4 \text{ N/mm}^2$$

$$0,21 \text{ N/mm}^2 < 2,4 \text{ N/mm}^2$$

Karakteristična posmična čvrstoća:

$$\tau = \frac{V_{Sd,max}}{c \times h} = \frac{1210}{180 \times 160} = 0,04 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau \leq \tau_{Rd}$$

$$\tau_{Rd} = ((1/10) \times f_{ck,b}) / \gamma_c = ((1/10) \times 18) / 1,5 = 1,2 \text{ N/mm}^2$$

$$0,04 \text{ N/mm}^2 \leq 1,2 \text{ N/mm}^2$$

Potrebna posmična čvrstoća nad osloncem na odrez:

$$\tau = \frac{V_{Sd,max}}{c \times h_1} = \frac{1210}{180 \times 85} = 0,08 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau \leq \tau_{Rd}$$

$$\tau_{Rd} = 0,26 \text{ N/mm}^2; \gamma_c = 1,5$$

$$0,08 \text{ N/mm}^2 < 0,26 \text{ N/mm}^2$$

Iz provedenog proračuna možemo zaključiti da blok zadovoljava postavljene zahtjeve.

### 6.2.2 Dokaz nosivosti u fazi uporabe

Prema zahtjevima norme HRN EN 1992-1-3: *Projektiranje betonskih konstrukcija 1-3. Dio: Opća pravila – Predgotovljeni betonski elementi i konstrukcije*, BlokOL mora zadovoljiti nosivost za sva opterećenja koja se mogu javiti tijekom uporabe. Potrebno je voditi računa o tome jesu li u trenutku opterećenja stropnog bloka postavljeni slojevi hidro izolacije, zvučne izolacije, cementnog estriha, tlačne ploče i slično, tj. je li opterećenje naneseno posredno preko slojeva poda ili je opterećenje naneseno neposredno izravno na blok.

Pri opterećenju koje djeluje neposredno javlja se:

vlastita težina bloka  $g = 0,125/0,35 = 0,357 \text{ kN/m}'$

tankoslojni mort  $0,1 \times 0,25 = 0,025 \text{ kN/m}'$

$$g_{Sd} = (0,357 + 0,025) \times 1,35 = 0,52 \text{ kN/m}'$$

Budući da je BlokOL na osloncima ukliješten u stropne grede, zbroj slomnih momenata na rubu i sredini raspona je jednak:

$$M_p = 0,52 \times 0,085 \times 0,085 \times 0,18/6 + 0,52 \times 0,16 \times 0,16 \times 0,18/6 = 0,000512 \text{ MNm}$$

od toga apsorbira vlastita težina bloka,

$$M_{gu} = \frac{0,357 \times 0,27^2}{8} = 0,003 \text{ kNm}$$

Nakon oduzimanja momenta vlastite težine za koncentriranu silu preostaje:

$$M_{fu} = M_p - M_{gu} = 0,512 - 0,003 = 0,509 \text{ kNm}$$

što odgovara graničnoj sili od

$$F_u = \frac{M_{Fu} \times 4}{l} = \frac{0,509 \times 4}{0,27} = 7,54 \text{ kN}$$

odnosno dopuštenoj sili od:

$$F = 7,54/1,5 = 5,02 \text{ kN}$$

Pri djelovanju opterećenja posredno tj. preko slojeva stropa, javlja se vlastita težina bloka i težina slojeva kao raspodijeljeno opterećenje.

Nakon odbijanja momenta vlastite težine za ostale slojeve preostaje:

$$M_{qu} = M_p - M_{gu} = 0,509 \text{ kNm}$$

što odgovara raspodijeljenom opterećenju od:

$$q_u = \frac{M_{qu} \times 8}{l^2} = \frac{0,509 \times 8}{0,27^2} = 55,86 \text{ kN/m}^2$$

Kriterij nosivosti će biti odrez bloka neposredno uz gredicu, pri čemu granična nosivost na temelju rezultata ispitivanja iznosi

$$Q_o = 0,36 \times 0,085 \times 0,18 = 0,006 \text{ MN}$$

što odgovara graničnom raspodijeljenom opterećenju od

$$q_o = \frac{Q_o \times 2}{0,27} = \frac{0,012}{0,27} = 44,44 \text{ kN/m}^2$$

odnosno dopuštenom opterećenju od

$$q = 44,4 / 1,5 = 29,6 \text{ kN/m}^2$$

Iz provedenog proračuna možemo zaključiti da će blok zadovoljiti svim posredno i neposredno nanesenim opterećenjima.

### 6.2.3 Dokaz nosivosti s rezidualnim čvrstoćama nakon izloženosti 200°C, 600°C i 800°C

Dokaz nosivosti BlokOLa nakon izloženosti temperaturama od 200°C, 600°C i 800°C proveden je uzvši u obzir mehanička svojstva blokova ispitanih u poglavlju 6.2 *Eksperimentalna ispitivanja stropnih blokova nakon izloženosti visokim temperaturama*, a prema preporukama za proračun danim u [95] i [96].

Tablica 6. 5: Rezultati proračuna nosivosti stropnog bloka s rezidualnim čvrstoćama nakon 200°C, 600°C i 800°C, prema preporukama [95] i [96]

| Temperatura  | 200°C | 600°C | 800°C |
|--|-------|-------|-------|
| Proračunska vlačna čvrstoća na savijanje, $f_{t,Rd}$       | 2,33  | 1,96  | 0,96  |
| Zadovoljava : $f_{t,Sd} = 0,21 \text{ N/mm}^2 < f_{t,Rd}$  | da    | da    | da    |
| Karakteristična posmična čvrstoća, $\tau_{Rd}$             | 1,16  | 0,98  | 0,48  |
| Zadovoljava: $\tau_{Sd} = 0,26 \text{ N/mm}^2 < \tau_{Rd}$ | da    | da    | da    |

Iz rezultata proračuna prikazanih u tablici 6.5, moguće je zaključiti kako BlokOL ima dovoljnu nosivost i nakon izloženosti visokim temperaturama. Pretpostavka je da su razlog tome visoke početne vrijednosti čvrstoća blokova, te upotreba opekarskog loma kao agregata za beton od kojih su blokovi izrađeni.

Kako bismo potvrdili navedene tvrdnje, preporuka za daljnja istraživanja jest da bi trebalo napraviti modele stropova sastavljene od betonskih nosača i BlokOLa kao ispune u mjerilu 1:1, te na njima u uvjetima realnog požarnog opterećenja eksperimentalno ispitati nosivost te time potvrditi proračunske vrijednosti nosivosti.



## **7. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA**

Pregledom stanja područja primjene opekarskog loma kao djelomične zamjene prirodnog agregata u betonu identificirano je područje istraživanja ovog rada. Identifikacijom područja zaključeno je kako je potrebno detaljno istražiti i dokazati mogućnost upotrebe betona s opekarskim lomom u izradi elementa konstrukcije – betonskom bloku, kao rezultata definiranja primjene betona s opekarskim lomom.

Prvi korak u procesu dokazivanja svojstava betona s opekarskim lomom bila su eksperimentalna ispitivanja drobljenog crijepa i drobljene opeke kojima je dokazano da se opekarski lom (drobljena opeka i drobljeni crijep) može koristiti kao potpuna ili djelomična zamjena prirodnog agregata ovisno o zahtjevanim svojstvima betona.

Kako bismo mogli optimirati mješavinu betona s drobljenim opekarskim lomom kao agregatom određena su osnovna svojstva betonskih mješavina s različitim udjelima njegovih komponenti koje bi trebale biti značajne za samu betonsku mješavinu.

Svako svojstvo optimirano je upotrebom metode odzivne površine čime smo u konačnici dobili model drugog reda definiran za sedam komponenata betona, tj. sedam faktora koji time tvore 7-dimenzionalni eksperimentalni prostor. Za svaki model pojedinog svojstva betona izračunati su parametri potrebni za model kako bi odziv što bolje odgovarao eksperimentalno dobivenim rezultatima.

Nakon provedenih eksperimentalnih ispitivanja na 62 mješavine betona, definirane planom eksperimenta, proveden je odabir prihvatljivih mješavina za izradu stropnih blokova na temelju eksperimenta. Pri odabiru prihvatljivih mješavina na temelju eksperimenta za svojstva betona, od kojih će biti izađeni stropni blokovi, uzeti su dozvoljeni rasponi vrijednosti u skladu sa zahtjevima propisanim normom za predgotovljene stropne blokove. Točnost modela procijenjena je za svako svojstvo računanjem srednje apsolutne postotne pogreške vrijednosti dobivenih modelom u odnosu na mjerene vrijednosti. Srednja apsolutna postotna pogreška od najviše 10 % uzeta je kao tehnički prihvatljiva.

Iz provedene analize eksperimentalno dobivenih rezultata ispitivanja zaključeno je da se modelom drugog reda prikazanim u radu mogu opisati samo svojstva gustoće betona u svježem i očvrslom stanju sa zadovoljavajućom točnošću na cijelom 7-dimenzionalnom eksperimentalnom prostoru. Modeli ostalih svojstava se mogu smatrati točnima samo na onim dijelovima 7-dimenzionalnog eksperimentalnog prostora u kojima je točnost modela zadovoljavajuća.

U svrhu odabira prihvatljive mješavine na temelju modela, 7-dimenzionalni eksperimentalni prostor podijeljen je na deset jednakih dijelova za svaki od sedam faktora, te je onda za dobivenih  $11^7$  točaka podijeljenog eksperimentalnog prostora (tj. za  $11^7$  mogućih mješavina) provjeravano je li za najbližu točku eksperimentalnog prostora cjelobrojnih normiranih iznosa faktora provedeno eksperimentalno ispitivanje. Utvrđeno je da je od ukupno  $11^7$  točaka podijeljenog eksperimentalnog prostora u slučaju 1 023 125 točaka provedeno mjerenje za njima najbližu točku eksperimentalnog prostora. Od toga zahtijevanu točnost od 10 %, te raspone vrijednosti definirane normom za predgotovljene stropne betonske blokove zadovoljava 12 točaka, tj. mješavina.

Ovime ukupan broj prihvatljivih mješavina iznosi 23, od čega je 12 dobivenih na temelju modela i 11 na temelju eksperimenta. U sljedećem koraku odabrane su optimalne mješavine na temelju metode višekriterijskog odlučivanja.

Odabir optimalne mješavine je proveden koristeći mješavine koje su prihvatljive na temelju eksperimenta te na temelju mješavina koje su prihvatljive na temelju modela. Pritom su se kao kriteriji uzimala svojstva gustoće očvrstlog betona u 28. i 56. danu starosti betona i normirani iznosi postotaka udjela recikliranog crijeva i opeke primjenjujući metodu ponderiranog zbroja za dobivanje jednoznačnog pokazatelja optimalnosti mješavine. Dvije mješavine s najvišom optimalnosti su odabrane mješavine na kojima su detaljno biti ispitana mehanička, trajnosna i toplinska svojstva te uspoređena međusobno i s trećom referentnom mješavinom spravljenom s prirodnim agregatom.

Iz provedenih eksperimentalnih ispitivanja na optimalnim mješavinama i referentnoj mješavini u svježem stanju zaključeno je da je mješavina betona definirana kao optimalna na temelju eksperimenta (označena kao EM-BM42) po svojstvima betona u svježem stanju vrlo bliska mješavini definiranoj kao optimalnoj na temelju matematičkog modela (označena kao MM-B10). Usporedbom mješavina EM-BM42 i MM-B10 u odnosu na referentnu mješavinu (označena kao RM), zaključeno ja da mješavine betona s opekarskim lomom zadovoljavaju tražena svojstva u pogledu konzistencije betona i poroznosti. Gustoće betonskih mješavina EM-BM 42 i MM-B10 su 11% do 14% manje od gustoće RM.

Nakon provedenih eksperimentalnih ispitivanja uzoraka EM-BM42, MM-B10 i RM u očvrstlom stanju pri sobnoj temperaturi zaključeno je da uzorci s opekarskim lomom kao agregatom u odnosu na referentne uzorke s prirodnim agregatom imaju prosječno 27% manju tlačnu čvrstoću, 16% manju vlačnu čvrstoću, 19% manju gustoću u očvrstlom stanju, 50% manji modul elastičnosti, 20% manju brzinu prolaska ultrazvučnog impulsa, 18% veću plinopropusnost, 28% manje deformacije uslijed skupljanja.

Iz provedenih ispitivanja mješavina u očvrstlom stanju, s obzirom na izmjerena svojstva, zaključeno je da je moguća upotreba betona s opekarskim lomom u stropnim betonskim blokovima. Također je zaključeno da je potrebno posebnu pozornost posvetiti ugradbi ovakvog betona horizontalne i vertikalne elemente konstrukcije (stupove i grede) s obzirom na mali modul elastičnosti i mogućnost pojave povećanih deformacija elemenata.

Uzimajući općenito u obzir vrijednosti dobivene eksperimentalno u odnosu na one dobivene matematičkim modelom možemo zaključiti da su vrijednosti dobivene eksperimentalno veće od onih predviđenih matematičkim modelom do 30%. Budući da se vrijednosti dobivene eksperimentalno u preliminarnoj fazi ispitivanja i fazi ispitivanja optimalnih mješavina također razlikuju, možemo zaključiti sljedeće:

- promjenom granulometrijskih krivulja i dodatkom filera odabrane optimalne mješavine EM-BM42 i MM-B10, s obzirom na svojstva u očvrstlom stanju, pokazale su se boljima od mješavina s najvišom optimalnosti dobivenih na temelju eksperimenta, odnosno na temelju matematičkog modela,

- mješavina definirana Box-Behnken planom eksperimenta EM-BM42 pokazala se prihvatljivijom za izradu stropnih betonskih blokova od mješavine MM-B10 definirane matematičkim modelom prvenstveno iz razloga većeg udjela opekarskog loma u sastavu mješavine, a optimalnih svojstava koja zadovoljavaju uvjete propisane normom HRN EN 12390.

Iz provedenih eksperimentalnih laboratorijskih ispitivanja na optimalnim mješavinama EM-BM42 i MM-B10 nakon izlaganja temperaturama 20°C, 200°C, 600°C, 800°C i 1000°C, te njihovom usporedbom s referentnom mješavinom RM pri istim uvjetima izloženosti visokim temperaturama proizlazi konačni zaključak:

- mješavina EM-BM42 ima najbolja fizikalno-mehanička, trajnosna i požarna svojstva obzirom na primjenu takvog betona u izradi predgotovljenih stropnih blokova.

Budući da je glavni cilj definirati sastav betonske mješavine sa što većim udjelom opekarskog loma kao zamjene za prirodni agregat, a zadovoljavajućih mehaničkih, trajnosnih i toplinskih svojstava, za izradu stropnog bloka odabrana je optimalna mješavina odabrana na temelju eksperimenta sa 50%-tnom zamjenom sitne i 75%-tnom zamjenom krupne frakcije prirodnog agregata s opekarskim lomom.

Na temelju rezultata provedenih eksperimentalnih ispitivanja i odabrane mješavine EM-BM42 kao optimalne za primjenu u stropnim betonskim blokovima provedena su eksperimentalna ispitivanja betonskih stropnih blokova.

Geometrijska i mehanička svojstva betonskih stropnih blokova s opekarskim lomom kao agregatom (**BlokOL**) ispitana su na sobnoj temperaturi te nakon izloženosti temperaturama 200°C, 600°C, 800°C. Zaključeno je također da je moguće procijeniti stanje oštećenosti stropnih blokova na temelju vizualnih i geometrijskih karakteristika blokova nakon izlaganja visokim temperaturama. Osim geometrijskih i mehaničkih svojstava BlokOLa analizirana su i njegova akustična, trajnosna i toplinska svojstva.

Nakon provedenih eksperimentalnih ispitivanja *BlokOLa* zaključeno je da *BlokOL* zadovoljava zahtjeve propisane normom HRN EN 15037-2:2009 te ga je moguće koristiti u svrhu polunosivog stropnog bloka predgotovljene stropne konstrukcije - SR, razreda mehaničke otpornosti - R2, razreda tolerancije dimenzija - T1, reakcije na požar - A1, neto obujamske mase u suhom stanju 1995kg/m<sup>3</sup>, zvučne izolacije 52 dB i udarne zvučne izolacije 85dB. Također je zaključeno da BlokOL ima zadovoljavajuća mehanička svojstva i nakon izloženosti visokim temperaturama.

Iz proračuna dokaza nosivosti BlokOLa prema normi HRN EN 1992-1-3:2004, u fazi montaže, fazi uporabe te s rezidualnim čvrstoćama nakon izlaganja visokim temperaturama, zaključeno je da zadovoljava uvjete nosivosti propisane normom. Također je zaključeno da u fazi montaže BlokOL predstavlja samonosivi element, odnosno da može podnijeti vlastitu težinu i težinu tereta čovjeka s blokom koji montira strop.

Nakon provedenih detaljnih istraživanja postavljenog znanstvenog problema doktorske disertacije možemo zaključiti da su potvrđene postavljene hipoteze doktorske disertacije u obliku sljedećih znanstvenih doprinosa:

- *definirani su modeli drugog reda koji opisuju svojstva betona s opekarskim lomom kao agregatom u ovisnosti o komponentama betona,*
- *procijenjena je točnost matematičkih modela,*
- *određeni su kriteriji za upotrebu opekarskog loma u betonskim mješavinama povećane požarne otpornosti,*
- *određeni su kriteriji za upotrebu opekarskog loma kao agregata za stropne betonske blokove temeljeni na rezultatima eksperimentalnih istraživanja,*
- *dokazana je mogućnost postizanja traženih fizikalno-mehaničkih, trajnosnih i toplinskih svojstava betona s opekarskim lomom,*
- *višekriterijskim odlučivanjem odabrane su mješavine betona optimalne po svom sastavu i svojstvima za izradu stropnih betonskih blokova na temelju odabranog plana eksperimenta i tako dobivenog modela,*
- *dokazana je mogućnost postizanja zahtjevanih geometrijskih, mehaničkih, termičkih, trajnosnih i akustičkih svojstava blokova s opekarskim lomom,*
- *dokazana je mogućnost izrade predgotovljenih stropnih blokova ispune sa 50% zamjenom sitne i 75% zamjenom krupne frakcije prirodnog agregata s opekarskim lomom, za predgotovljene stropne konstrukcije povećane požarne otpornosti kao rezultata definiranja primjene ovakvog betona u elementima ispune polumontažne stropne konstrukcije.*

Nakon provedenih istraživanja i donešenih zaključaka preporuke za daljnja istraživanja su:

- *potrebno je dodatno istražiti modele višeg reda radi povećanja točnosti modela na cijelom 7-dimenzionalnom prostoru,*
- *ispitati različite režime njege i zaštitu od isušivanja blokova u svrhu brže proizvodnje predgotovljenih stropnih blokova,*
- *razraditi način ugradbe ove vrste betona u primjeni,*
- *na modelima stropa u mjerilu 1:1 dokazati nosivost i deformabilnost stropnog sustava sastavljenog od nosača i blokova s opekarskim lomom, uključujući i realne uvjete djelovanja požara na konstrukciju.*

## Literatura

1. Beslać, J., Bjegović, D., Rosković, R., *Inovativni materijali i tehnologije u građenju i održavanju betonskih konstrukcija* Građevinar, 2005. **4**: p. 247-255.
2. Cullum-Kenyon, S., *Market development study for recycled aggregate products, Report to Waste reduction advisory committee*, 2001, Thurber Engineering Ltd.: Calgary. p. 1-32.
3. Sveučilište u Zagrebu, *Strategija gospodarenja mineralnim sirovinama Republike Hrvatske*, 2008, Rudarsko geološko naftni fakultet: Zagreb.
4. *Projekt LIFE05 TCY/CRO/000114 CONWAS: Development of sustainable construction and demolition waste management system for Croatia, 2006-2008*. [cited December 2009.; Available from: <<http://www.igh.hr/conwas/>>.
5. *Narodne novine, 23/2007., Pravilnik o gospodarenju otpadom*
6. Kesegić, I., Bjegović, D., Netinger, I., *Potential applications of crushed brick*, in *15th International Conference on Composite Structures ICCS 15*, A.J.M. Ferreira, Editor 2009, FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
7. Moropoulou, A., Cakmak, A.S., Biscontin, G., Bakolas, A., Zendri, E., *Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed bricklime mortars of Justinian's Hagia Sophia*. *Construction and Building Materials*, 2002. **vol. 16**: p. 543-552.
8. Hansen, T.C., *Recycling of demolished concrete and masonry*. RILEM Rep. 6. 1992., London: E&FN Spon.
9. Bektas, F., Wang, K., Ceylan, H., *Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability*. *Construction and Building Materials*, 2009. **vol. 23**: p. 1909-1914.
10. Sherwood, P.T., *Alternative materials in road construction*. 1995., London: Thomas Telford.
11. Khalaf, F.M., DeVenny, A. S., *Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete: Review*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004. **vol. 16**: p. 331-340.
12. Janković, K. *Using recycled brick as concrete aggregate*. in *5th Triennial Int. Conf. on Challenges in Concrete Construction*. 2002. Dundee.
13. Rosković, R., Halavanja, I., Jelavić, T. *Građevni otpad kao obnovljivi agregat za betone*. in *Sabor hrvatskih graditelja 2008*. 2008. Dubrovnik, Croatia.
14. Kesegić, I., Netinger, I., Bjegović, D., *Crushed clay brick and tiles as an aggregate in mortar and concrete*, in *Networks for sustainable environment and high quality of life*, J. Radić, Bleiziffer, J., 2008, Structural Engineering Conferences - SECON, Croatia. p. 365-372.
15. Khaloo, A.R., *Crushed Tile Coarse Aggregate Concrete*. *Cement, Concrete and Aggregates*, 1995. **vol. 17**: p. 119-125.
16. Khalaf, F.M., *Using Crushed Clay Brick as Aggregate in Concrete*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006. **vol. 18**: p. 518-526.

17. Kesegić, I., Bjegović, D., Netinger, I., *Reciklirana opeka kao agregat*. Građevinar, 2009. **61**(1): p. 15-22.
18. Debieb, F.K., S., *The use of coarse and crushed bricks as aggregate in concrete*. Construction and Building Materials, 2008. **vol. 22**: p. 886-893.
19. Rühl, M., Atkinson, G., *The influence of recycled aggregate on stress-strain relation of concrete*. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt Concrete, 1999. **vol. 14**.
20. Khatib, J.M., *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*. Cement and Concrete Research, 2005. **vol. 35**: p. 763-769.
21. Cachim, P.B., *Mechanical properties of brick aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2009. **vol. 23**: p. 1292-1297.
22. Poon, C.-S., Chan, D., *The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong*. Resources, Conservation and Recycling, 2007. **vol. 50**: p. 293-305.
23. Poon, C.-S., Chan, D., *Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials, 2007. **vol. 21**: p. 164-175.
24. Suzuki, M., Seddik Meddah, M., Sato, R., *Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete*. Cement and Concrete Research, 2009. **vol. 39**: p. 373-381.
25. Jones, N., Soutsos, M.N., Millard, S.G., Bungey, J.H., Tickell, R.G. *Developing precast concrete products made with recycled construction and demolition waste*. in *International conference on sustainable waste management and recycling: construction and demolition waste*. 2004. London: Kingston University.
26. Topçu, I.B.a.C., M., *Utilization of crushed tile as aggregate in concrete*. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, 2002. **vol. 31**: p. 561-565.
27. Klemt, K., *Bearing and deformation performance of concrete with recycled aggregates*. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt Concrete, 1997. **vol. 12**.
28. Grübl, P., Rühl, M., Bühner, M., *Evaluation of elasticity of concrete with recycled aggregate*. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt Concrete, 1999. **vol. 14**.
29. Bretschneider, A.R., M., *The influence of the recycled aggregate on the compressive strength and the elastic modulus of concrete*. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt Concrete, 1998. **vol. 13**.
30. Janković, K., *Drobljena opeka kao agregat za beton*. 2001., Beograd: Zadužbina Andrejević.
31. Bjegović, D., Kesegić, I., Netinger, I., *Reciklaža opekarskih proizvoda i mogućnost ponovne upotrebe u proizvodnom procesu*, in *Sabor hrvatskih graditelja 2008*, V. Simović, Editor 2008, Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera: Cavtat, Croatia. p. 201- 213.
32. Urainczyk, V., *Beton: struktura, svojstva, tehnologije*. 1994., Zagreb: Alcor.

33. Correia, J.R., de Britto, J., Pereira, A.S., *Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates*. Materials and Structures, 2006. **vol. 39**: p. 169-177.
34. De Britto, J., Pereira, A.S., Correia, J.R., *Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates*. Cement & Concrete Composites, 2005. **vol. 27**: p. 429-433.
35. Drpić, M., Janković, K. *Thermal conductivity of concrete with recycled bricks as aggregate*. in *International Congress "Creating with concrete"* 1999. Dundee.
36. Netinger, I., Bjegović, D., Kesegic, I., *Concrete of improved fire resistance*, in *Non - Traditional Cement & Concrete*, V. Bilek, Keršner, Z., Editor 2008, Brno University of Technology: Brno, Czech Republic. p. 498-507.
37. Khalaf, F.M., DeVenny, A. S., *Performance of Brick Aggregate Concrete at High Temperatures*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004. **vol. 16**: p. 556-565.
38. Netinger, I., Kesegic, I., Guljas, I. , *The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates*. Fire Safety Journal, 2011. **46**(7): p. 425-430.
39. Kesegić, I., Netinger, I., Bjegović, D., *Recycled clay brick as an aggregate for concrete: overview*. Tehnički vjesnik, 2008. **15**(3): p. 35-41.
40. Netinger, I., Bjegović, D., Kesegic, I. , *Požarna otpornost mikrobetona*. Građevinar, 2008. **60**(9): p. 779-786.
41. Grandić, D., Sorić, Z., *Ispitivanje polumontažnih stropova od prednapetih gredica*. Građevinar, 2002. **vol.54**: p. 705-716.
42. Crnogorac, M., Gukov, I., Galić, B., Župan, M., *Stropne konstrukcije u standardnoj visokogradnji*. Građevinar, 2000. **vol. 52**: p. 271-277.
43. Peulić, Đ., *Konstruktivni elementi zgrada prvi i drugi dio*. 2002, Zagreb: CROATIANKJIGA.
44. Tomičić, I., *Betonske konstrukcije*. 1996., Zagreb: Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora.
45. Trogrlić, B. *Zidane konstrukcije, multimedijalna skripta*. 2009. [cited November 2009.; Available from: <[http://www.gradst.hr/katedre/konstr/Zidane\\_konstrukcije\\_web.pdf](http://www.gradst.hr/katedre/konstr/Zidane_konstrukcije_web.pdf)>
46. *HRN EN 15037-1:2008 Predgotovljeni betonski proizvodi -- Stropni sustavi sastavljeni od nosača i blokova (ispune), 1. dio: Nosači (EN 15037-1:2008)* Hrvatski zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb.
47. Vrančić, T., *Bijeli strop*. Građevinar, 2008. **vol. 60**: p. 467-469.
48. Elliot, K.S., *Precast Concrete Structures*. 2002., Oxford: Elsevier Science.
49. Collins, R.J., Harris, D.J., Sparkes, W., *Blocks with recycled aggregate: beam and block floors, BRE Report IP 14/98*, 1998., Building Research Establishment: United Kingdom.
50. Poon, C.S., Lam, C.S., *The effect of aggregate to cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks*. Cement & Concrete Composites, 2008. **vol. 30**: p. 283-289.

51. suradnici, R.J.i., *Betonske konstrukcije priručnik*. 2006., Zagreb: Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet-Adris.
52. *Tehnički propis za betonske konstrukcije*, in *Prilog G*, Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva »Narodne novine« br. 175/03. i 100/04
53. *HRN EN 13369 Opća pravila za predgotovljene betonske proizvode in (EN 13369:2001) Common rules for precast concrete products, pp. 1-60*, Hrvatski zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb
54. *HRN ENV 1992-1-3:2004, Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija, dio 1-3: Opća pravila – Predgotovljeni betonski elementi i konstrukcije*, Hrvatski zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb
55. *HRN EN 15037-2:2009 Predgotovljeni betonski proizvodi -- Stropni sustavi sastavljeni od nosača i blokova (ispune), 2. dio: Betonski blokovi (EN 15037-2:2009)*, Hrvatski zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb.
56. Stipanović, I., Bjegović, D., Planinc, M. , *Betoni specijalnih namjena - betoni povećane požarne otpornosti na požar*. Materijali i tehnološki razvoj, ed. T. Filetin. 2002., Zagreb: Akademija tehničkih znanosti Hrvatske.
57. Wetzig, V., *Destruction Mechanisms in Concrete Material*. Tunnel Management, 2002. 5(1): p. 41-46.
58. *HRN ENV 1992-1-2 : Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -1-2. dio: opća pravila - proračun konstrukcija na požarno djelovanje* Hrvatski zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb.
59. *Fire design of concrete structures – structural behaviour and assessment - State of art report, CEB-FIP*, 2008: Ostfildern-Kemnat, Germany.
60. *EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – General rules – Structural fire design*, 2005.
61. *EN 1992-1-2*, in *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. p. 1-97.
62. Cajner, H., *Višeteorijsko adaptivno oblikovanje planova pokusa*, 2011, Sveučilište u Zagrebu: Zagreb. p. 156.
63. Hinkelman, K., Kempthorne, O., *Design and Analysis of Experiments*. Second ed. Vol. 1. 2008, New Jersey: Wiley&Sons.
64. Krstić, Ž., *Upoznavanje sa planiranjem eksperimenata*, in 33. *Nacionalna konferencija o kvalitetu, Festival kvaliteta 2006*.2006., Asocijacija za kvalitet i standardizaciju Srbije: Kragujevac. p. A105 - A108
65. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. Student Solutions Manual. Vol. 5th ed. 2002., New York: John Wiley & Sons.

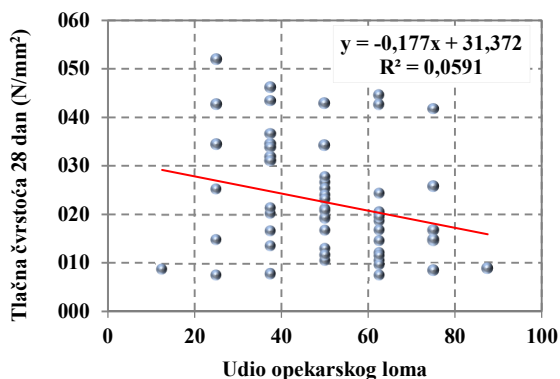


66. Fisher, R.A., *The Design of Experiments*. 9 ed. 1971., Edinburgh, Scotland: Oliver & Boyd.
67. Telford, J.K., *A Brief Introduction to Design of Experiments*. John Hopkins Apl. Technical Digest, 2007. **27**(3): p. 224-232.
68. Čirić, J. *Metodologija znanosti*. 2003. 5.9.2011.]; Available from: <http://personal.unizd.hr/~jciric/tekst/metznan.pdf>.
69. Berredo, R.C., Canha, L.N., Ekel,P.Ya., Ferreira, L.C.A., Maciel, M.V.C., *Experimental Design and Models of Power System Optimization and Control*. WSEAS Transactions on Systems and Control, 2008. **3**(1): p. 40-49.
70. Lazić, L., Mastorakis, N.E., *Integrated Intelligent Modeling, Simulation and Design of Experiments for Software Testing Process*. Latest Trends on Computers (Volume II),14th International Conference on Computers, 2010. **II**: p. 555-567.
71. Briano, E., Caballini, C., Giribone, P., Revetria, R., *Design of Experiment and Montecarlo Simulation as Support for Gas Turbine Power Plant Availabilty Estimation*. Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation, 2010.: p. 223-230.
72. Antony, J., *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. 2003.: Elsevier Science & Technology Books
73. Fulgosi, A., *Faktorska analiza, Treće dopunjeno izdanje*. 1988, Zagreb: Školska knjiga
74. Pfaff, S., Salopek, B., *Primjena planiranja eksperimenata u oplemenjivanju mineralnih sirovina*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 2004. **16**: p. 97-106.
75. Gorsuch, R.L., *Factor analysis, Second edition*. 1983, London: Lawrence Erlbaum Associates, LEA.
76. Miličević, I., Štirmer, N., Bjegović, D. , *Optimizing the Concrete Mixture with Racycled Aggregate Using Experiment Design*, in *RECENT ADVANCES in FLUID MECHANICS and HEAT&MASS TRANSFER*, M.B. Lazard, A. ; Shmaliy, Y.S. ; Revetria, R. ; Mastorakis, N. , Editor 2011, WSEAS Press, [www.wseas.org](http://www.wseas.org): Florence, Italy. p. 110-115.
77. Dean, A., Vos, D., *Design and Analysis of Experiments*, ed. G. Casella, Fienberg, S., Olkin, I. 1999, New York: Springer.
78. Mason, R.L., Gunst, R. F., Hess, J. L., *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. 2 ed. 2003.: John Wiley & Sons, Inc.
79. Ukrainczyk, M., *Planiranje pokusa u industriji*. Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam, 2010. **5**: p. 96-105.
80. Matlab, *Product Help, Version 7.7.0.471 (R2008b), September 17, 2008*.
81. Box, G.E.P., Draper,N.R., *Empirical model-building and response surfaces*. 1987, New York: Wiley&Sons.

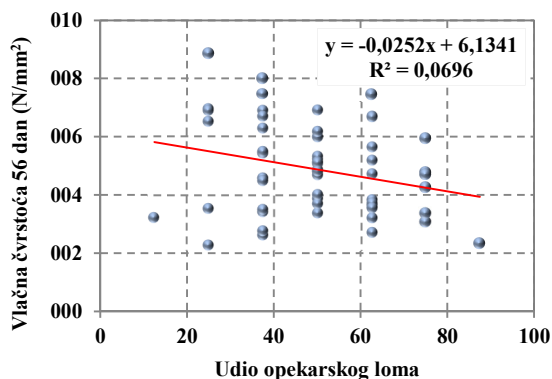
82. Kraus, I., Paradžiković, M., Miličević, I., *Utjecaj ispuna od betona s opekarskim lomom kao agregatom na potresni odziv kratkih stupova*. Elektronički časopis Građevinskog fakulteta Osijek e-GFOS 2012. **5**: p. 43-51.
83. Walpole, R.E., et al., *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. Pearson Education International, 2007.
84. *Deskriptivna statistika*. [cited 2013 20.4.]; Available from: <http://people.etf.unsa.ba/~ksokolija/c/ug/pees/definicije.html>.
85. Petz, B., *Osnovne statističke metode*. 1974.: Izdavački zavod Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti. 310.
86. *Regstats - Regression diagnostics*. [cited 2013 3.6.]; Available from: <http://www.mathworks.com/help/stats/regstats.html>.
87. E. Triantaphyllou, B.S., S. N. Sanchez, and T.Ray, *Multi-Criteria Decision Making: An Operations Research Approach*. Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, (J.G. Webster, Ed.), John Wiley & Sons, New York, 1998. **Vol. 15**: p. pp. 175-186.
88. *RILEM TC 200 HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperature – Modeling and Applications*. Materials and Structures, 2005. **38**: p. 913-919.
89. Zaina, M.F.M., Safiuddina, Md., Mahmud., H. , *Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder ratios*. Cement and concrete research 2000. **30**: p. 1501-1505.
90. Chen, B., Li, C., Chen., L. , *Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age*. Fire Safety Journal 2009. **44**: p. 997-1002
91. Behnood, A., Ghandehari., M. , *Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures*. Fire Safety Journal 2009. **44**: p. 1015-1022.
92. Savva , A., Manita, P., Sideris, K.K. , *Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates*. Cement & Concrete Composites 2005. **27**: p. 239-248.
93. Xing, Z., Beaucour, A.-L., Hebert, R., Noumowe, A., Ledesert, B., *Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature*. Cement and Concrete Research 2011. **41**: p. 392-402.
94. *RILEM TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability, Recommendations Tests for gas permeability of concrete*. Materials and Structures, 1999. **32**: p. 174-179.
95. HRN EN 1992-1-3: *Projektiranje betonskih konstrukcija 1-3. Dio: Opća pravila – Predgotovljeni betonski elementi i konstrukcije*, Hrvatski zavod za norizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb.
96. Mihanović, A.: *Priručnik za projektiranje i izvođenje-sustav konstrukcija bijeli strop*, Split, travanj 2010., 3-57.

## Prilozi

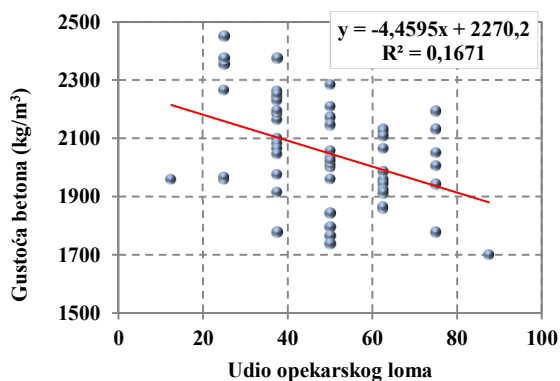
### Prilog P.1: Dijagrami korelacija



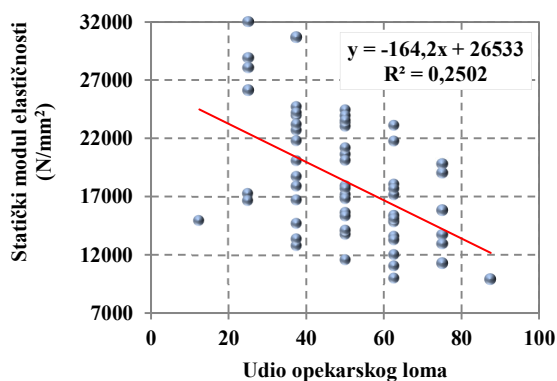
Slika P.1. 1: Korelacija između udjela opearskog loma i tlačne čvrstoće betona 28 dan



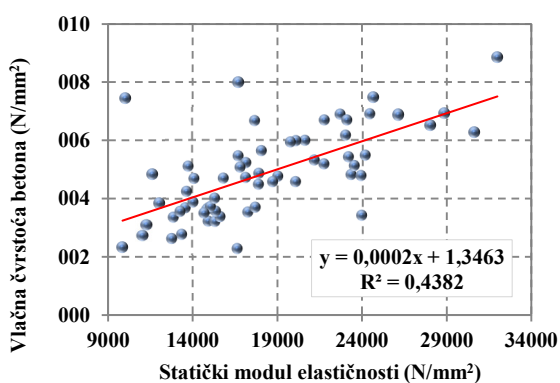
Slika P.1. 2: Korelacija između udjela opearskog loma i vlačne čvrstoće betona 56 dan



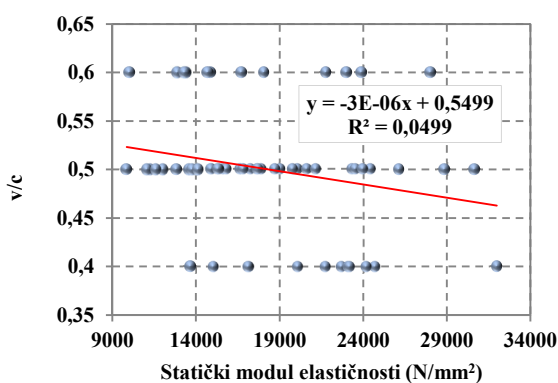
Slika P.1. 3: Korelacija između udjela opearskog loma i gustoće betona u očvrslom stanju



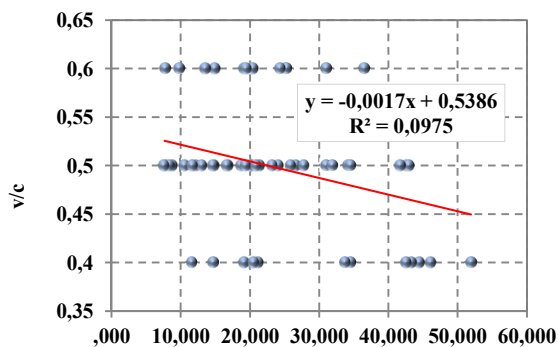
Slika P.1. 4: Korelacija između udjela opearskog loma i statičkog modula elastičnosti



Slika P.1. 5: Korelacija između statičkog modula elastičnosti i vlačne čvrstoće betona

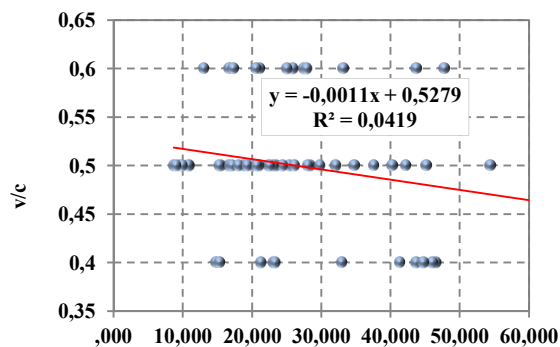


Slika P.1. 6: Korelacija između Statičkog modula elastičnosti i vodocementnog omjera



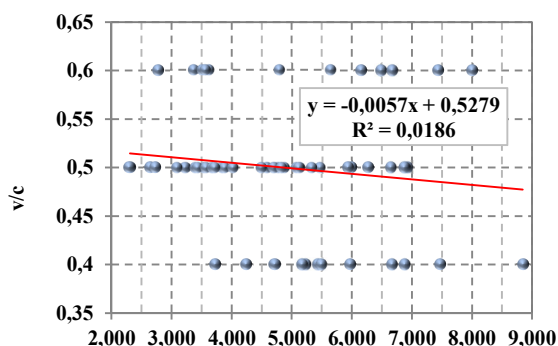
Tlačna čvrstoća 28 dan (N/mm<sup>2</sup>)

Slika P.1. 7: Korelacija između tlačne čvrstoće betona 28 dan i vodocementnog omjera



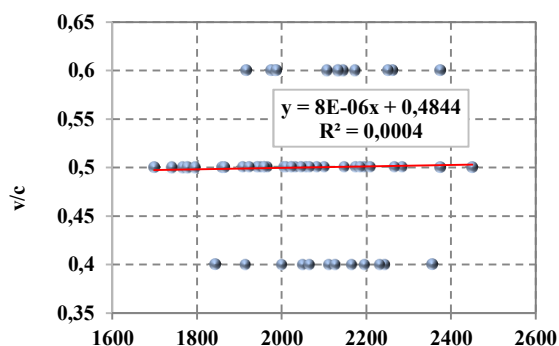
Tlačna čvrstoća 56 dan (N/mm<sup>2</sup>)

Slika P.1. 8: Korelacija između tlačne čvrstoće betona 56 dan i vodocementnog omjera



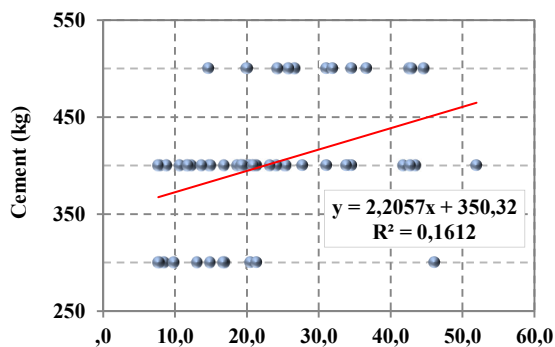
Vlačna čvrstoća 56 dan (N/mm<sup>2</sup>)

Slika P.1. 9: Korelacija između vlačne čvrstoće i vodocementnog omjera



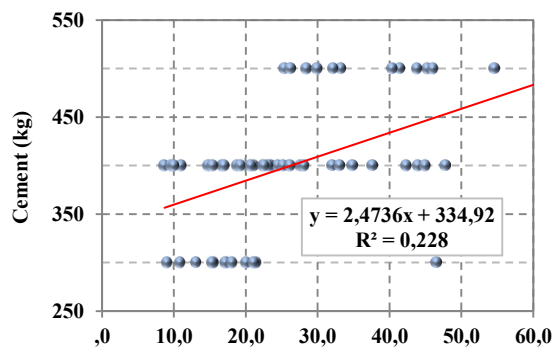
Gustoća (kg/m<sup>3</sup>)

Slika P.1. 10: Korelacija između gustoće i vodocementnog omjera



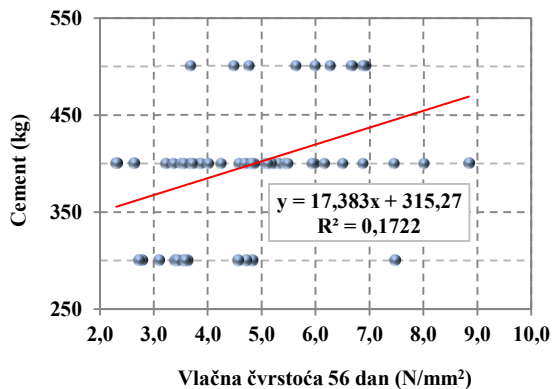
Tlačna čvrstoća 28 dan (N/mm<sup>2</sup>)

Slika P.1. 11: Korelacija između tlačne čvrstoće 28 dan i količine cementa

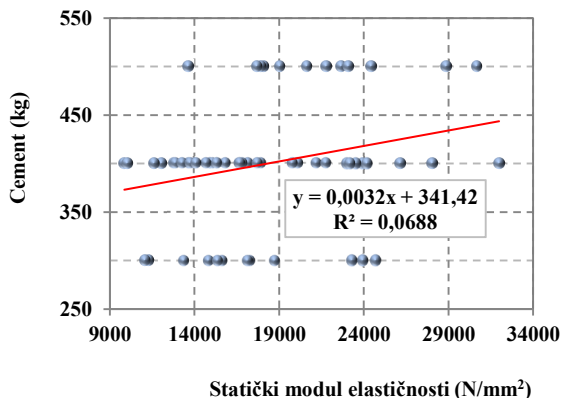


Tlačna čvrstoća 56 dan (N/mm<sup>2</sup>)

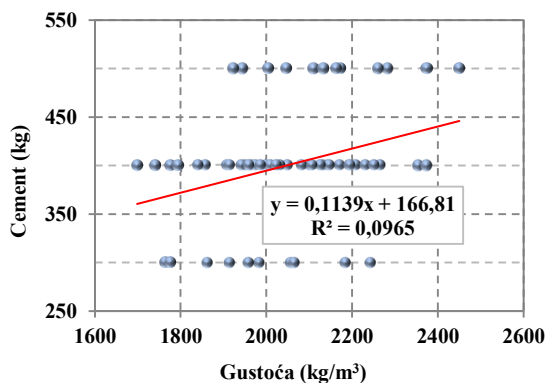
Slika P.1. 12: Korelacija između tlačne čvrstoće 56 dan i količine cementa



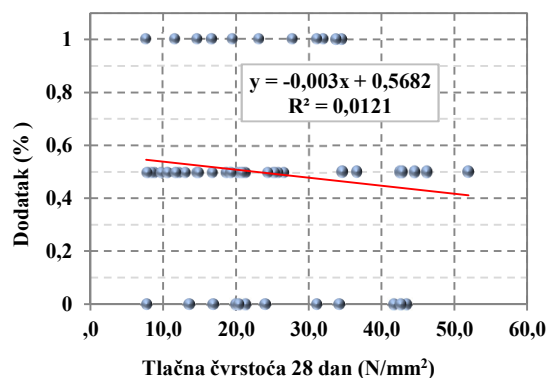
Slika P.1. 13: Korelacija između vlačne čvrstoće i količine cementa



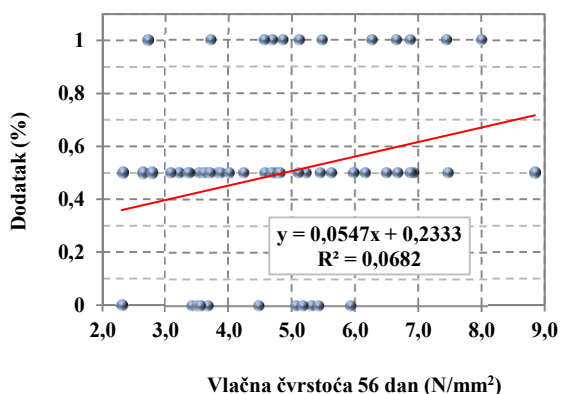
Slika P.1. 14: Korelacija između statičkog modula elastičnosti i količine cementa



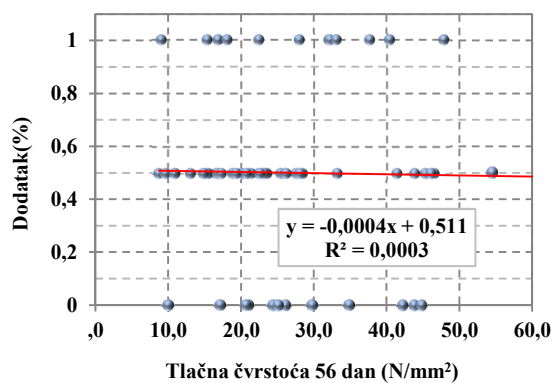
Slika P.1. 15: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i količine cementa



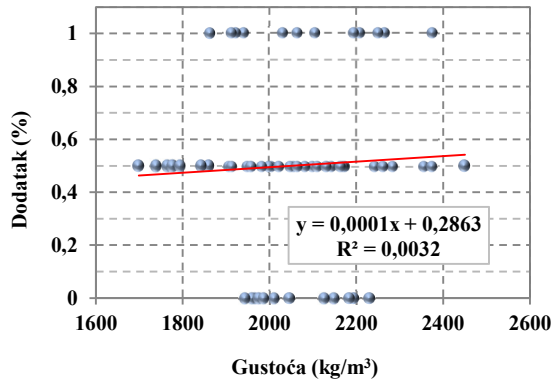
Slika P.1. 16: Korelacija između tlačne čvrstoće 28 dan i količine dodatka



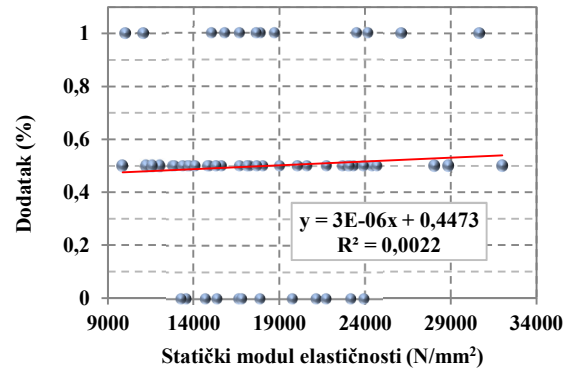
Slika P.1. 17: Korelacija između vlačne čvrstoće 56 dan i količine dodatka



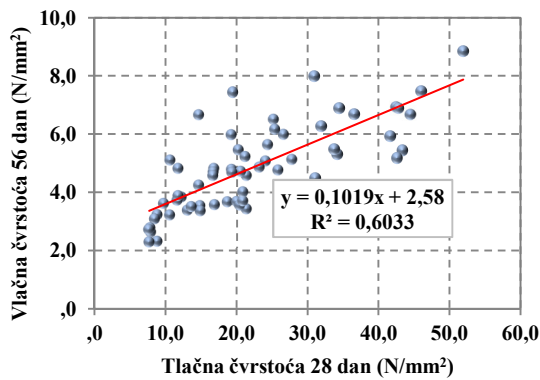
Slika P.1. 18: Korelacija između tlačne čvrstoće 56 dan i količine dodatka



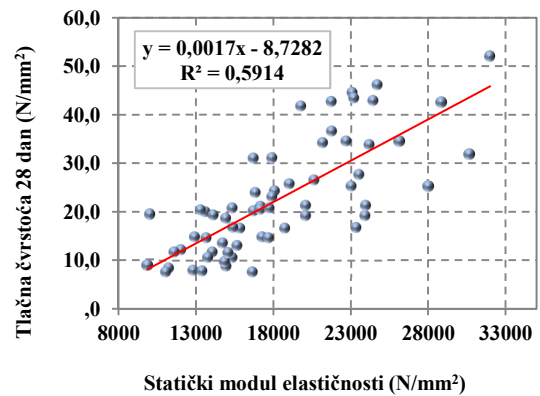
Slika P.1. 19: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i količine dodatka



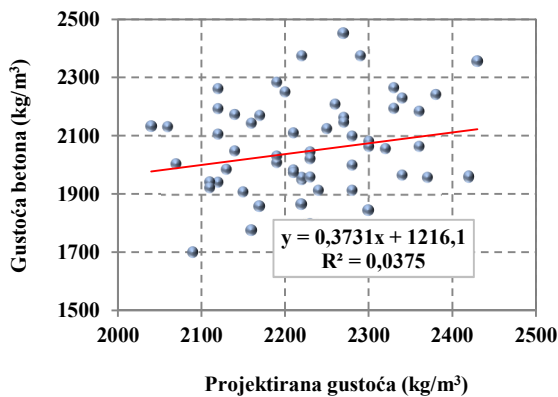
Slika P.1. 20: Korelacija između statičkog modula elastičnosti i količine dodatka



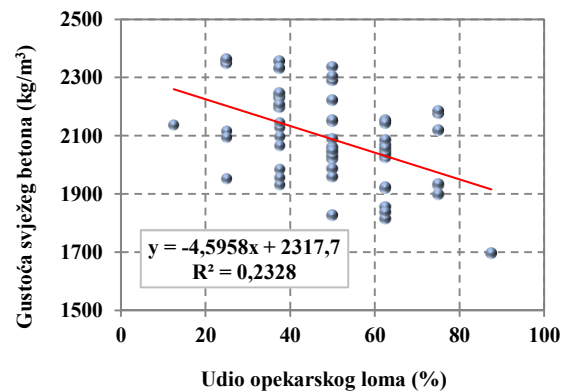
Slika P.1. 21: Korelacija između tlačne čvrstoće betona 28 dan i vlačne čvrstoće betona 56 dan



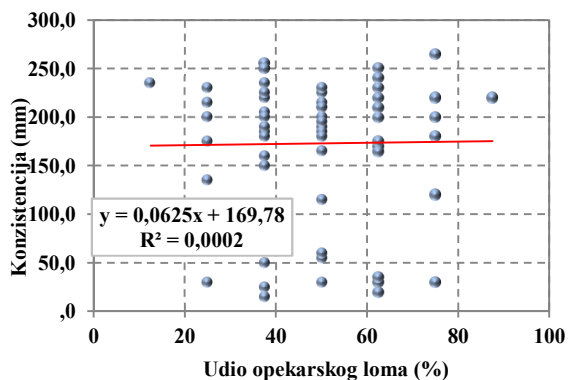
Slika P.1. 22: Korelacija između statičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće 28 dan



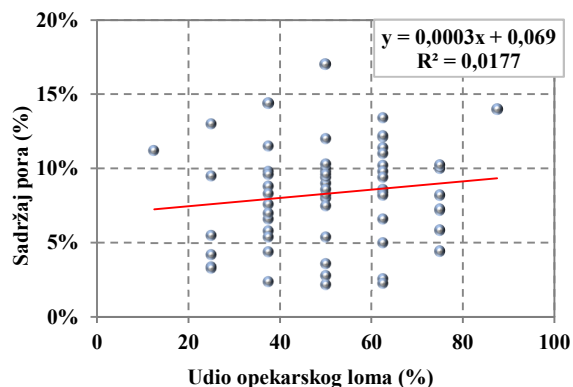
Slika P.1. 23: Korelacija između projektirane gustoće i gustoće betona u očvrslom stanju



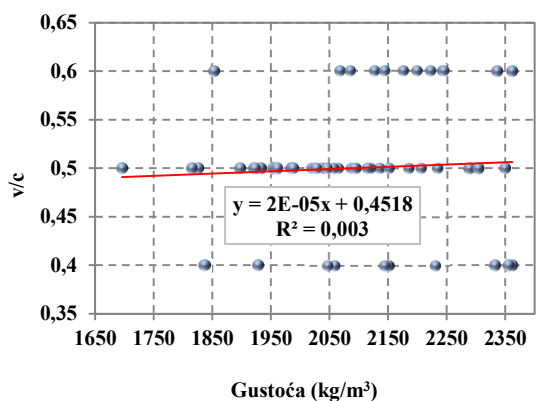
Slika P.1. 24: Korelacija između udjela opearskog loma i gustoće svježeg betona



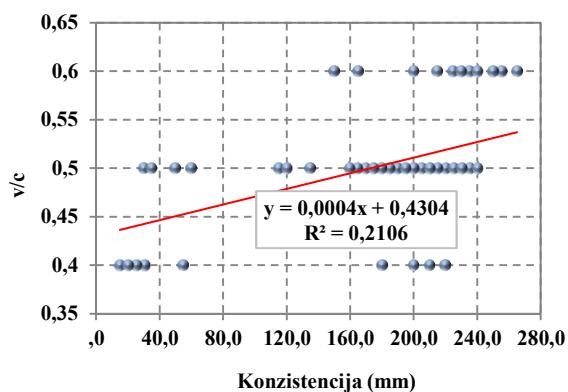
Slika P.1. 25: Korelacija između udjela opekarskog loma i konzistencije betona



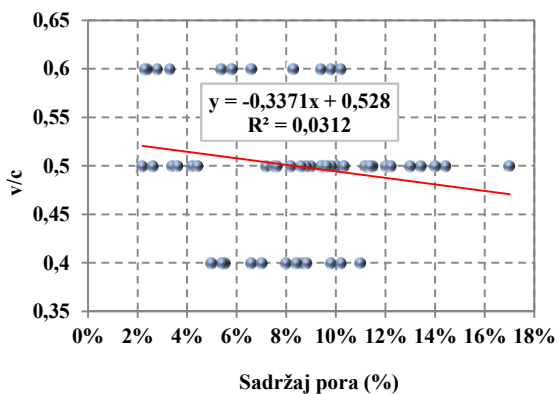
Slika P.1. 26: Korelacija između udjela opekarskog loma i sadržaja pora



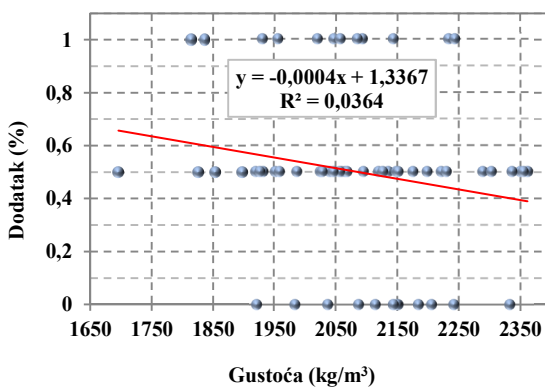
Slika P.1. 27: Korelacija između gustoće u svježem stanju i vodocementnog omjera



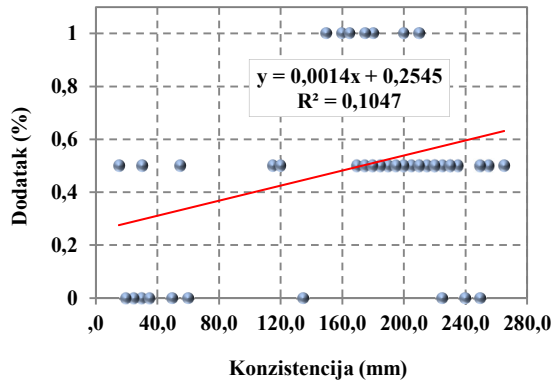
Slika P.1. 28: Korelacija između konzistencije i vodocementnog omjera



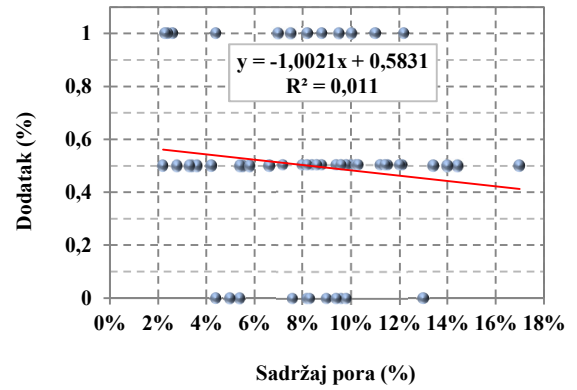
Slika P.1. 29: Korelacija između sadržaja pora i vodocementnog omjera



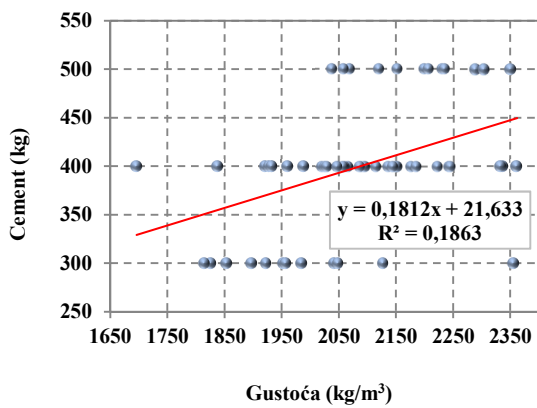
Slika P.1. 30: Korelacija između gustoće u svježem stanju i količine dodatka



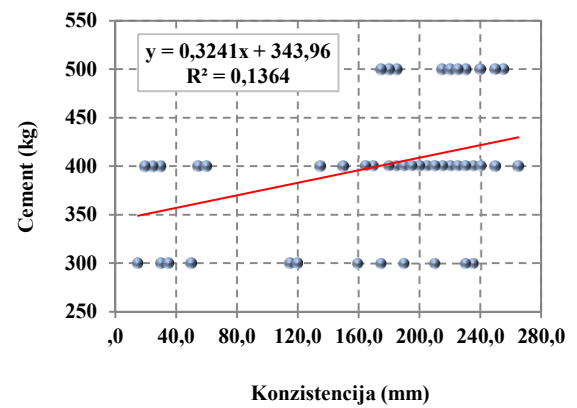
Slika P.1. 31: Korelacija između konzistencije i količine dodatka



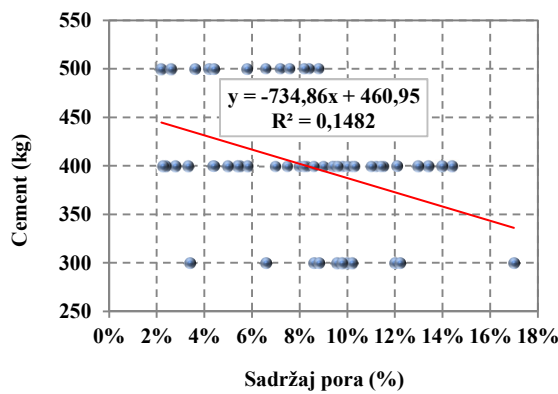
Slika P.1. 32: Korelacija između sadržaja pora i količine dodatka



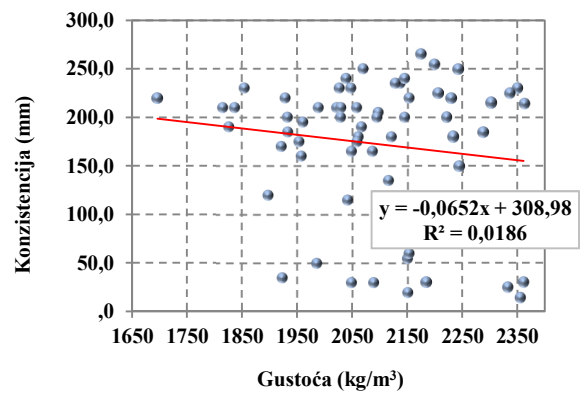
Slika P.1. 33: Korelacija između gustoće betona u svježem stanju i količine cementa



Slika P.1. 34: Korelacija između konzistencije i količine cementa

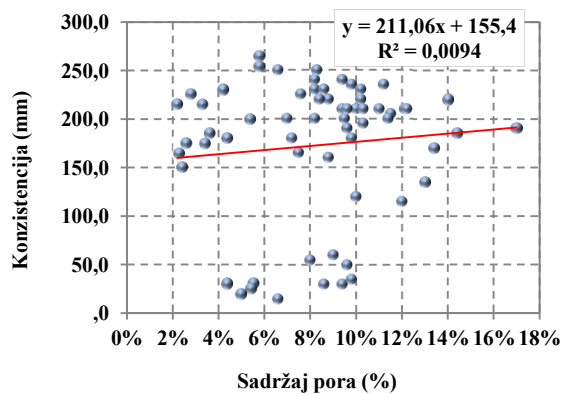


Slika P.1. 35: Korelacija između sadržaja pora i količine cementa

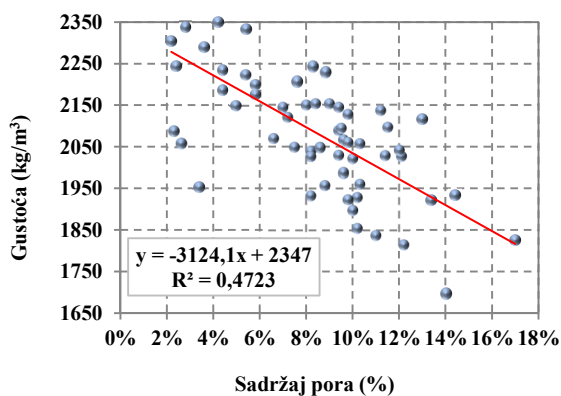


Slika P.1. 36: Korelacija između gustoće u svježem stanju i konzistencije

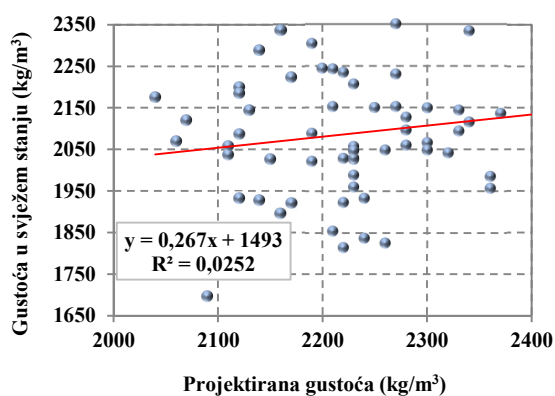




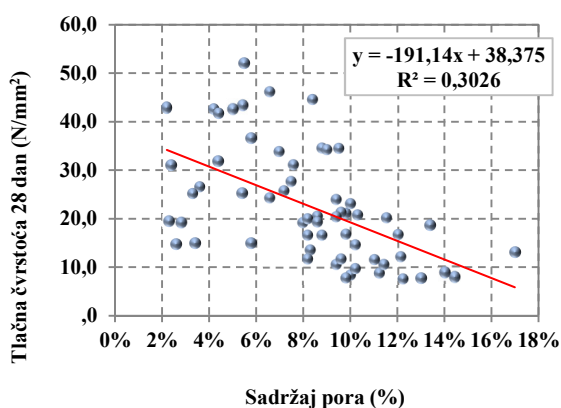
Slika P.1. 37: Korelacija između sadržaja pora i konzistencije



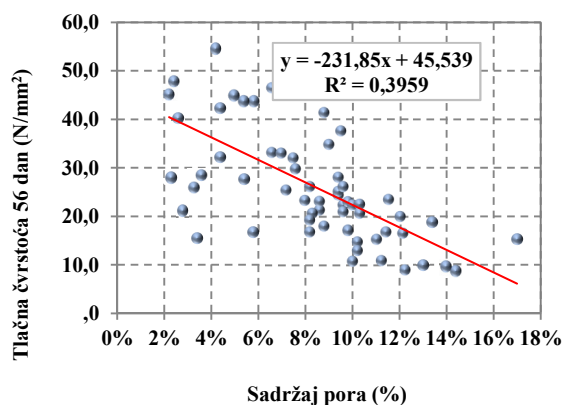
Slika P.1. 38: Korelacija između sadržaja pora i gustoće u svježem stanju



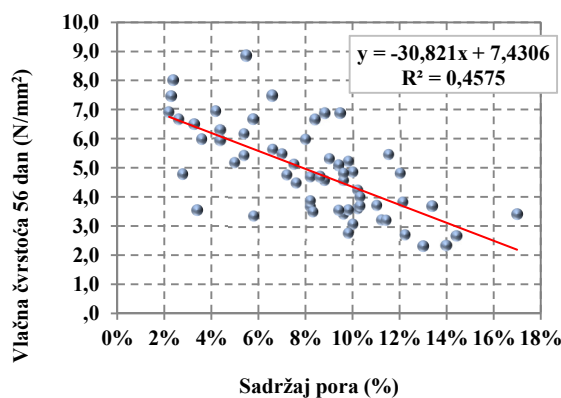
Slika P.1. 39: Korelacija između projektirane gustoće i gustoće u svježem stanju



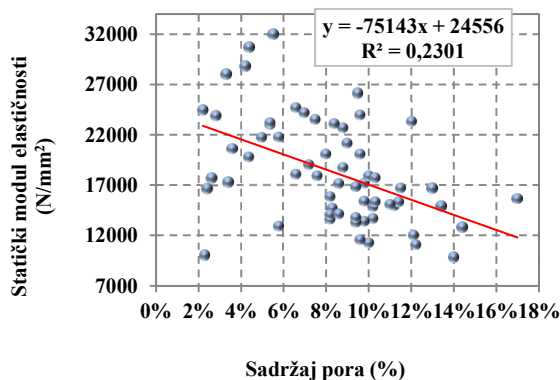
Slika P.1. 40: Korelacija između sadržaja pora i tlačne čvrstoće 28 dan



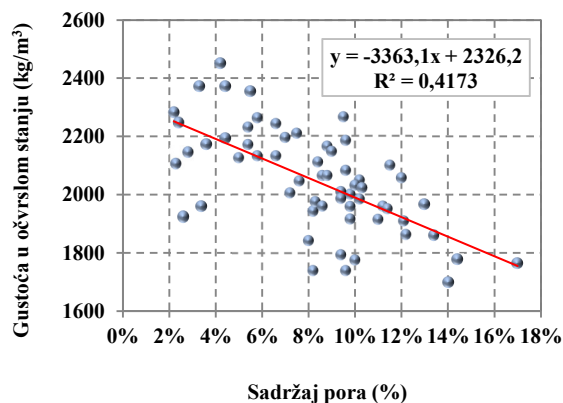
Slika P.1. 41: Korelacija između sadržaja pora i tlačne čvrstoće 56 dan



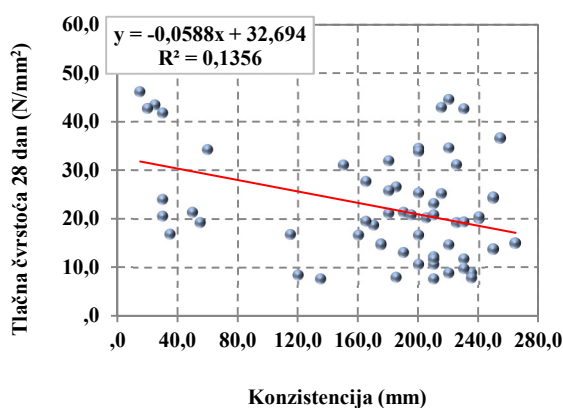
Slika P.1. 42: Korelacija između sadržaja pora i vlačne čvrstoće betona 56 dan



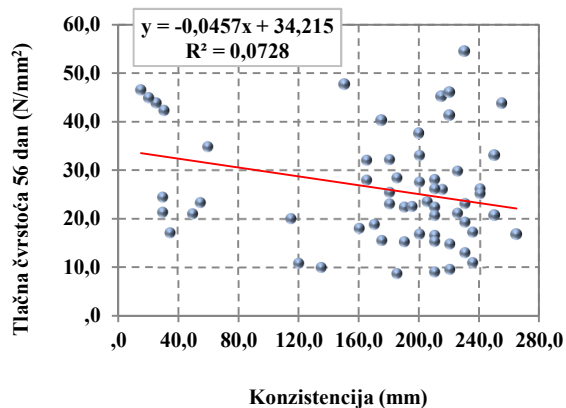
Slika P.1. 43: Korelacija između sadržaja pora i statičkog modula elastičnosti



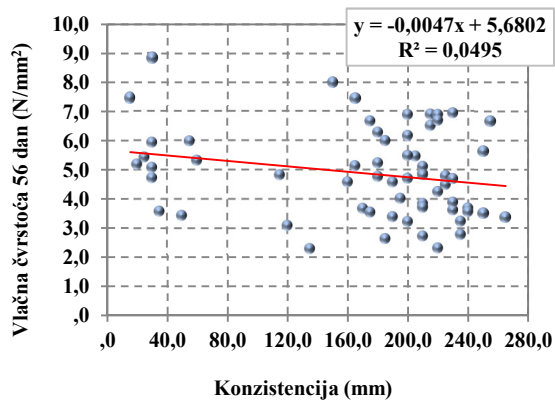
Slika P.1. 44: Korelacija između sadržaja pora i gustoće u očvrslom stanju



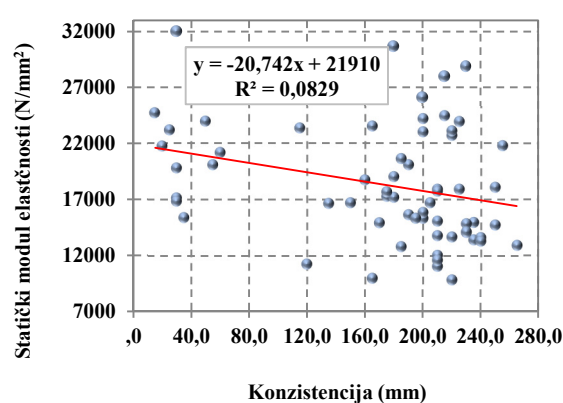
Slika P.1. 45: Korelacija između konzistencije i tlačne čvrstoće 28 dan



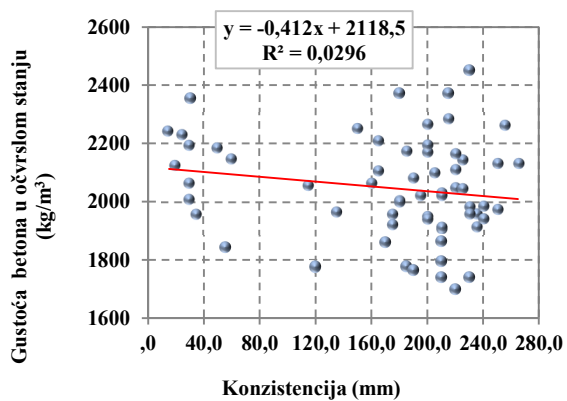
Slika P.1. 46: Korelacija između konzistencije i tlačne čvrstoće 56 dan



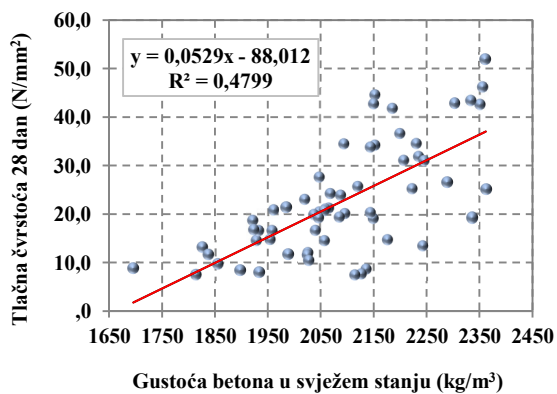
Slika P.1. 47: Korelacija između konzistencije i vlačne čvrstoće



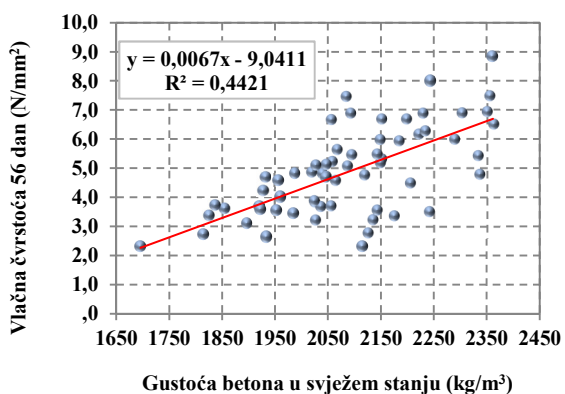
Slika P.1. 48: Korelacija između konzistencije i statičkog modula elastičnosti



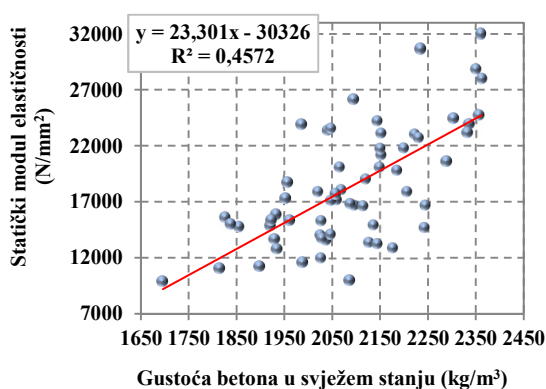
Slika P.1. 49: Korelacija između konzistencije i gustoće betona u očvrslom stanju



Slika P.1. 50: Korelacija između gustoće betona u svježem stanju i tlačne čvrstoće 28 dan



Slika P.1. 51: Korelacija između gustoće betona u svježem stanju i vlačne čvrstoće 56 dan



Slika P.1. 52: Korelacija između gustoće betona u svježem stanju i statičkog modula elastičnosti

**Prilog P.2: Izmjerene vrijednosti temperatura u peći i u uzorcima**

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 1               | 26,2         | 29,0        | 30,0        | 30,5        | 1               | 26,9          | 31,0        | 31,5        | 31,7        |
| 2               | 26,8         | 31,0        | 31,5        | 31,7        | 2               | 26,8          | 31,0        | 31,5        | 31,7        |
| 3               | 26,8         | 31,1        | 31,5        | 31,8        | 3               | 26,8          | 31,1        | 31,5        | 31,8        |
| 4               | 26,9         | 31,1        | 31,5        | 31,8        | 4               | 26,9          | 31,1        | 31,5        | 31,8        |
| 5               | 26,9         | 31,2        | 31,6        | 31,8        | 5               | 26,9          | 31,2        | 31,6        | 31,8        |
| 6               | 26,9         | 31,2        | 31,6        | 31,8        | 6               | 26,9          | 31,2        | 31,6        | 31,8        |
| 7               | 27,0         | 31,2        | 31,7        | 31,8        | 7               | 27,0          | 31,2        | 31,7        | 31,8        |
| 8               | 27,0         | 31,2        | 31,7        | 31,8        | 8               | 27,0          | 31,2        | 31,7        | 31,8        |
| 9               | 27,0         | 31,2        | 31,7        | 31,8        | 9               | 27,0          | 31,2        | 31,7        | 31,8        |
| 10              | 27,0         | 31,2        | 31,7        | 31,8        | 10              | 27,0          | 31,2        | 31,7        | 31,8        |
| 11              | 27,1         | 31,1        | 31,7        | 31,7        | 11              | 27,1          | 31,1        | 31,7        | 31,7        |
| 12              | 27,0         | 31,0        | 31,6        | 31,7        | 12              | 27,0          | 31,0        | 31,6        | 31,7        |
| 13              | 35,1         | 31,1        | 31,7        | 31,5        | 13              | 35,1          | 31,1        | 31,7        | 31,5        |
| 14              | 47,2         | 31,4        | 31,6        | 31,6        | 14              | 47,2          | 31,4        | 31,6        | 31,6        |
| 15              | 45,3         | 31,7        | 31,8        | 31,8        | 15              | 45,3          | 31,7        | 31,8        | 31,8        |
| 16              | 45,2         | 32,0        | 32,1        | 32,1        | 16              | 45,2          | 32,0        | 32,1        | 32,1        |
| 17              | 48,4         | 32,4        | 32,4        | 32,4        | 17              | 48,4          | 32,4        | 32,4        | 32,4        |
| 18              | 51,3         | 32,8        | 32,7        | 32,7        | 18              | 51,3          | 32,8        | 32,7        | 32,7        |
| 19              | 54,0         | 33,2        | 33,1        | 33,2        | 19              | 54,0          | 33,2        | 33,1        | 33,2        |
| 20              | 56,9         | 33,7        | 33,6        | 33,6        | 20              | 56,9          | 33,7        | 33,6        | 33,6        |
| 21              | 59,5         | 34,2        | 34,1        | 34,2        | 21              | 59,5          | 34,2        | 34,1        | 34,2        |
| 22              | 62,1         | 34,8        | 34,6        | 34,8        | 22              | 62,1          | 34,8        | 34,6        | 34,8        |
| 23              | 64,9         | 35,5        | 35,2        | 35,4        | 23              | 64,9          | 35,5        | 35,2        | 35,4        |
| 24              | 67,4         | 36,2        | 35,9        | 36,1        | 24              | 67,4          | 36,2        | 35,9        | 36,1        |
| 25              | 70,0         | 37,0        | 36,6        | 36,9        | 25              | 70,0          | 37,0        | 36,6        | 36,9        |
| 26              | 72,6         | 37,8        | 37,3        | 37,7        | 26              | 72,6          | 37,8        | 37,3        | 37,7        |
| 27              | 75,2         | 38,6        | 38,2        | 38,6        | 27              | 75,2          | 38,6        | 38,2        | 38,6        |
| 28              | 77,7         | 39,6        | 39,1        | 39,5        | 28              | 77,7          | 39,6        | 39,1        | 39,5        |
| 29              | 80,5         | 40,5        | 40,0        | 40,5        | 29              | 80,5          | 40,5        | 40,0        | 40,5        |
| 30              | 82,9         | 41,5        | 41,0        | 41,5        | 30              | 82,9          | 41,5        | 41,0        | 41,5        |
| 31              | 85,6         | 42,6        | 42,0        | 42,6        | 31              | 85,6          | 42,6        | 42,0        | 42,6        |
| 32              | 88,1         | 43,7        | 43,0        | 43,7        | 32              | 88,1          | 43,7        | 43,0        | 43,7        |
| 33              | 90,7         | 44,9        | 44,2        | 44,9        | 33              | 90,7          | 44,9        | 44,2        | 44,9        |
| 34              | 93,4         | 46,1        | 45,3        | 46,1        | 34              | 93,4          | 46,1        | 45,3        | 46,1        |
| 35              | 95,9         | 47,3        | 46,6        | 47,4        | 35              | 95,9          | 47,3        | 46,6        | 47,4        |
| 36              | 98,6         | 48,6        | 47,8        | 48,7        | 36              | 98,6          | 48,6        | 47,8        | 48,7        |
| 37              | 101,2        | 49,9        | 49,1        | 50,0        | 37              | 101,2         | 49,9        | 49,1        | 50,0        |
| 38              | 103,8        | 51,3        | 50,4        | 51,4        | 38              | 103,8         | 51,3        | 50,4        | 51,4        |
| 39              | 106,2        | 52,7        | 51,8        | 52,9        | 39              | 106,2         | 52,7        | 51,8        | 52,9        |
| 40              | 108,8        | 54,2        | 53,2        | 54,4        | 40              | 108,8         | 54,2        | 53,2        | 54,4        |
| 41              | 111,4        | 55,7        | 54,7        | 55,9        | 41              | 111,4         | 55,7        | 54,7        | 55,9        |
| 42              | 114,0        | 57,2        | 56,2        | 57,5        | 42              | 114,0         | 57,2        | 56,2        | 57,5        |
| 43              | 116,4        | 58,8        | 57,8        | 59,0        | 43              | 116,4         | 58,8        | 57,8        | 59,0        |
| 44              | 118,9        | 60,4        | 59,3        | 60,7        | 44              | 118,9         | 60,4        | 59,3        | 60,7        |
| 45              | 121,6        | 62,0        | 60,9        | 62,3        | 45              | 121,6         | 62,0        | 60,9        | 62,3        |
| 46              | 124,3        | 63,7        | 62,5        | 64,0        | 46              | 124,3         | 63,7        | 62,5        | 64,0        |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 47              | 126,7        | 65,4        | 64,2        | 65,7        | 47              | 126,7         | 65,4        | 64,2        | 65,7        |
| 48              | 129,3        | 67,2        | 65,9        | 67,5        | 48              | 129,3         | 67,2        | 65,9        | 67,5        |
| 49              | 131,9        | 68,9        | 67,6        | 69,3        | 49              | 131,9         | 68,9        | 67,6        | 69,3        |
| 50              | 134,6        | 70,7        | 69,3        | 71,1        | 50              | 134,6         | 70,7        | 69,3        | 71,1        |
| 51              | 137,0        | 72,5        | 71,1        | 72,9        | 51              | 137,0         | 72,5        | 71,1        | 72,9        |
| 52              | 139,5        | 74,4        | 72,9        | 74,8        | 52              | 139,5         | 74,4        | 72,9        | 74,8        |
| 53              | 142,3        | 76,3        | 74,8        | 76,7        | 53              | 142,3         | 76,3        | 74,8        | 76,7        |
| 54              | 144,8        | 78,2        | 76,7        | 78,6        | 54              | 144,8         | 78,2        | 76,7        | 78,6        |
| 55              | 147,4        | 80,2        | 78,6        | 80,6        | 55              | 147,4         | 80,2        | 78,6        | 80,6        |
| 56              | 150,0        | 82,1        | 80,4        | 82,5        | 56              | 150,0         | 82,1        | 80,4        | 82,5        |
| 57              | 152,4        | 84,1        | 82,4        | 84,5        | 57              | 152,4         | 84,1        | 82,4        | 84,5        |
| 58              | 155,1        | 86,2        | 84,4        | 86,6        | 58              | 155,1         | 86,2        | 84,4        | 86,6        |
| 59              | 157,8        | 88,2        | 86,4        | 88,6        | 59              | 157,8         | 88,2        | 86,4        | 88,6        |
| 60              | 160,4        | 90,3        | 88,4        | 90,7        | 60              | 160,4         | 90,3        | 88,4        | 90,7        |
| 61              | 162,9        | 92,4        | 90,4        | 92,7        | 61              | 162,9         | 92,4        | 90,4        | 92,7        |
| 62              | 165,4        | 94,6        | 92,5        | 94,9        | 62              | 165,4         | 94,6        | 92,5        | 94,9        |
| 63              | 167,9        | 96,7        | 94,6        | 97,0        | 63              | 167,9         | 96,7        | 94,6        | 97,0        |
| 64              | 170,5        | 98,9        | 96,7        | 99,2        | 64              | 170,5         | 98,9        | 96,7        | 99,2        |
| 65              | 173,1        | 101,1       | 98,8        | 101,3       | 65              | 173,1         | 101,1       | 98,8        | 101,3       |
| 66              | 175,8        | 103,3       | 100,9       | 103,5       | 66              | 175,8         | 103,3       | 100,9       | 103,5       |
| 67              | 178,5        | 105,6       | 103,1       | 105,7       | 67              | 178,5         | 105,6       | 103,1       | 105,7       |
| 68              | 180,6        | 107,9       | 105,2       | 108,0       | 68              | 180,6         | 107,9       | 105,2       | 108,0       |
| 69              | 183,4        | 110,2       | 107,5       | 110,3       | 69              | 183,4         | 110,2       | 107,5       | 110,3       |
| 70              | 186,0        | 112,4       | 109,7       | 112,5       | 70              | 186,0         | 112,4       | 109,7       | 112,5       |
| 71              | 188,6        | 114,8       | 111,9       | 114,8       | 71              | 188,6         | 114,8       | 111,9       | 114,8       |
| 72              | 191,1        | 117,1       | 114,2       | 117,1       | 72              | 191,1         | 117,1       | 114,2       | 117,1       |
| 73              | 193,8        | 119,5       | 116,4       | 119,4       | 73              | 193,8         | 119,5       | 116,4       | 119,4       |
| 74              | 196,4        | 121,8       | 118,7       | 121,6       | 74              | 196,4         | 121,8       | 118,7       | 121,6       |
| 75              | 199,0        | 124,2       | 121,0       | 123,9       | 75              | 199,0         | 124,2       | 121,0       | 123,9       |
| 76              | 201,4        | 126,5       | 123,2       | 126,2       | 76              | 201,4         | 126,5       | 123,2       | 126,2       |
| 77              | 203,9        | 128,9       | 125,5       | 128,5       | 77              | 203,9         | 128,9       | 125,5       | 128,5       |
| 78              | 206,4        | 131,3       | 127,7       | 130,8       | 78              | 206,4         | 131,3       | 127,7       | 130,8       |
| 79              | 208,8        | 133,6       | 130,0       | 133,1       | 79              | 208,8         | 133,6       | 130,0       | 133,1       |
| 80              | 211,3        | 136,0       | 132,2       | 135,4       | 80              | 211,3         | 136,0       | 132,2       | 135,4       |
| 81              | 213,8        | 138,3       | 134,5       | 137,7       | 81              | 213,8         | 138,3       | 134,5       | 137,7       |
| 82              | 216,3        | 140,7       | 136,7       | 140,0       | 82              | 216,3         | 140,7       | 136,7       | 140,0       |
| 83              | 218,7        | 143,0       | 139,0       | 142,3       | 83              | 218,7         | 143,0       | 139,0       | 142,3       |
| 84              | 221,2        | 145,4       | 141,2       | 144,6       | 84              | 221,2         | 145,4       | 141,2       | 144,6       |
| 85              | 223,7        | 147,8       | 143,5       | 146,9       | 85              | 223,7         | 147,8       | 143,5       | 146,9       |
| 86              | 226,1        | 150,1       | 145,7       | 149,2       | 86              | 226,1         | 150,1       | 145,7       | 149,2       |
| 87              | 228,6        | 152,5       | 148,0       | 151,5       | 87              | 228,6         | 152,5       | 148,0       | 151,5       |
| 88              | 231,1        | 154,8       | 150,2       | 153,8       | 88              | 231,1         | 154,8       | 150,2       | 153,8       |
| 89              | 233,5        | 157,2       | 152,5       | 156,1       | 89              | 233,5         | 157,2       | 152,5       | 156,1       |
| 90              | 236,0        | 159,5       | 154,7       | 158,4       | 90              | 236,0         | 159,5       | 154,7       | 158,4       |
| 91              | 238,5        | 161,9       | 157,0       | 160,7       | 91              | 238,5         | 161,9       | 157,0       | 160,7       |
| 92              | 240,9        | 164,3       | 159,2       | 163,0       | 92              | 240,9         | 164,3       | 159,2       | 163,0       |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 93              | 243,4        | 166,6       | 161,5       | 165,3       | 93              | 243,4         | 166,6       | 161,5       | 165,3       |
| 94              | 245,9        | 169,0       | 163,7       | 167,6       | 94              | 245,9         | 169,0       | 163,7       | 167,6       |
| 95              | 248,3        | 171,3       | 166,0       | 169,9       | 95              | 248,3         | 171,3       | 166,0       | 169,9       |
| 96              | 250,8        | 173,7       | 168,2       | 172,2       | 96              | 250,8         | 173,7       | 168,2       | 172,2       |
| 97              | 253,3        | 176,0       | 170,5       | 174,5       | 97              | 253,3         | 176,0       | 170,5       | 174,5       |
| 98              | 255,7        | 178,4       | 172,7       | 176,8       | 98              | 255,7         | 178,4       | 172,7       | 176,8       |
| 99              | 258,2        | 180,7       | 175,0       | 179,1       | 99              | 258,2         | 180,7       | 175,0       | 179,1       |
| 100             | 260,7        | 183,1       | 177,2       | 181,4       | 100             | 260,7         | 183,1       | 177,2       | 181,4       |
| 101             | 263,1        | 185,5       | 179,5       | 183,7       | 101             | 263,1         | 185,5       | 179,5       | 183,7       |
| 102             | 265,6        | 187,8       | 181,7       | 186,0       | 102             | 265,6         | 187,8       | 181,7       | 186,0       |
| 103             | 268,1        | 190,2       | 184,0       | 188,3       | 103             | 268,1         | 190,2       | 184,0       | 188,3       |
| 104             | 270,5        | 192,5       | 186,2       | 190,6       | 104             | 270,5         | 192,5       | 186,2       | 190,6       |
| 105             | 273,0        | 194,9       | 188,5       | 192,9       | 105             | 273,0         | 194,9       | 188,5       | 192,9       |
| 106             | 275,5        | 197,2       | 190,7       | 195,2       | 106             | 275,5         | 197,2       | 190,7       | 195,2       |
| 107             | 277,9        | 199,6       | 193,0       | 197,5       | 107             | 277,9         | 199,6       | 193,0       | 197,5       |
| 108             | 280,4        | 202,0       | 195,2       | 199,8       | 108             | 280,4         | 202,0       | 195,2       | 199,8       |
| 109             | 282,9        | 204,3       | 197,5       | 202,1       | 109             | 282,9         | 204,3       | 197,5       | 202,1       |
| 110             | 285,3        | 206,7       | 199,7       | 204,4       | 110             | 285,3         | 206,7       | 199,7       | 204,4       |
| 111             | 287,8        | 209,0       | 202,0       | 206,7       | 111             | 287,8         | 209,0       | 202,0       | 206,7       |
| 112             | 290,4        | 211,3       | 205,3       | 215,8       | 112             | 290,4         | 211,3       | 205,3       | 215,8       |
| 113             | 292,6        | 214,1       | 207,9       | 218,6       | 113             | 292,6         | 214,1       | 207,9       | 218,6       |
| 114             | 295,1        | 216,8       | 210,5       | 221,4       | 114             | 295,1         | 216,8       | 210,5       | 221,4       |
| 115             | 297,9        | 219,6       | 213,2       | 224,1       | 115             | 297,9         | 219,6       | 213,2       | 224,1       |
| 116             | 300,2        | 222,3       | 215,8       | 226,9       | 116             | 300,2         | 222,3       | 215,8       | 226,9       |
| 117             | 302,8        | 225,1       | 218,5       | 229,7       | 117             | 302,8         | 225,1       | 218,5       | 229,7       |
| 118             | 305,7        | 227,8       | 221,1       | 232,6       | 118             | 305,7         | 227,8       | 221,1       | 232,6       |
| 119             | 307,9        | 230,6       | 223,8       | 235,4       | 119             | 307,9         | 230,6       | 223,8       | 235,4       |
| 120             | 310,3        | 233,5       | 226,6       | 238,2       | 120             | 310,3         | 233,5       | 226,6       | 238,2       |
| 121             | 312,9        | 236,2       | 229,3       | 241,1       | 121             | 312,9         | 236,2       | 229,3       | 241,1       |
| 122             | 315,1        | 239,0       | 232,1       | 243,9       | 122             | 315,1         | 239,0       | 232,1       | 243,9       |
| 123             | 317,5        | 241,8       | 234,9       | 246,7       | 123             | 317,5         | 241,8       | 234,9       | 246,7       |
| 124             | 320,3        | 244,6       | 237,6       | 249,6       | 124             | 320,3         | 244,6       | 237,6       | 249,6       |
| 125             | 322,9        | 247,4       | 240,3       | 252,5       | 125             | 322,9         | 247,4       | 240,3       | 252,5       |
| 126             | 325,5        | 250,2       | 243,1       | 255,4       | 126             | 325,5         | 250,2       | 243,1       | 255,4       |
| 127             | 327,5        | 253,0       | 245,9       | 258,3       | 127             | 327,5         | 253,0       | 245,9       | 258,3       |
| 128             | 330,4        | 255,8       | 248,7       | 261,2       | 128             | 330,4         | 255,8       | 248,7       | 261,2       |
| 129             | 333,0        | 258,6       | 251,5       | 264,1       | 129             | 333,0         | 258,6       | 251,5       | 264,1       |
| 130             | 335,4        | 261,4       | 254,3       | 267,0       | 130             | 335,4         | 261,4       | 254,3       | 267,0       |
| 131             | 337,5        | 264,3       | 257,1       | 269,9       | 131             | 337,5         | 264,3       | 257,1       | 269,9       |
| 132             | 340,1        | 267,1       | 259,9       | 272,9       | 132             | 340,1         | 267,1       | 259,9       | 272,9       |
| 133             | 342,6        | 269,9       | 262,8       | 275,8       | 133             | 342,6         | 269,9       | 262,8       | 275,8       |
| 134             | 345,2        | 272,8       | 265,6       | 278,8       | 134             | 345,2         | 272,8       | 265,6       | 278,8       |
| 135             | 347,4        | 275,7       | 268,5       | 281,8       | 135             | 347,4         | 275,7       | 268,5       | 281,8       |
| 136             | 350,1        | 278,5       | 271,3       | 284,7       | 136             | 350,1         | 278,5       | 271,3       | 284,7       |
| 137             | 352,9        | 281,4       | 274,2       | 287,7       | 137             | 352,9         | 281,4       | 274,2       | 287,7       |
| 138             | 355,0        | 284,3       | 277,1       | 290,7       | 138             | 355,0         | 284,3       | 277,1       | 290,7       |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 139             | 357,2        | 287,2       | 280,1       | 293,7       | 139             | 357,2         | 287,2       | 280,1       | 293,7       |
| 140             | 360,2        | 290,1       | 283,0       | 296,7       | 140             | 360,2         | 290,1       | 283,0       | 296,7       |
| 141             | 362,8        | 293,0       | 285,9       | 299,6       | 141             | 362,8         | 293,0       | 285,9       | 299,6       |
| 142             | 365,4        | 295,9       | 288,9       | 302,5       | 142             | 365,4         | 295,9       | 288,9       | 302,5       |
| 143             | 367,8        | 298,8       | 291,8       | 305,4       | 143             | 367,8         | 298,8       | 291,8       | 305,4       |
| 144             | 370,7        | 301,7       | 294,8       | 308,4       | 144             | 370,7         | 301,7       | 294,8       | 308,4       |
| 145             | 372,8        | 304,6       | 297,7       | 311,3       | 145             | 372,8         | 304,6       | 297,7       | 311,3       |
| 146             | 374,9        | 307,5       | 300,6       | 314,3       | 146             | 374,9         | 307,5       | 300,6       | 314,3       |
| 147             | 377,5        | 310,3       | 303,5       | 317,2       | 147             | 377,5         | 310,3       | 303,5       | 317,2       |
| 148             | 380,2        | 313,1       | 306,4       | 320,1       | 148             | 380,2         | 313,1       | 306,4       | 320,1       |
| 149             | 382,8        | 316,0       | 309,3       | 323,0       | 149             | 382,8         | 316,0       | 309,3       | 323,0       |
| 150             | 385,1        | 318,9       | 312,1       | 325,9       | 150             | 385,1         | 318,9       | 312,1       | 325,9       |
| 151             | 387,6        | 321,7       | 315,0       | 328,8       | 151             | 387,6         | 321,7       | 315,0       | 328,8       |
| 152             | 389,8        | 324,5       | 317,8       | 331,8       | 152             | 389,8         | 324,5       | 317,8       | 331,8       |
| 153             | 393,1        | 327,4       | 320,7       | 334,6       | 153             | 393,1         | 327,4       | 320,7       | 334,6       |
| 154             | 395,4        | 330,3       | 323,4       | 337,5       | 154             | 395,4         | 330,3       | 323,4       | 337,5       |
| 155             | 397,7        | 333,1       | 326,3       | 340,5       | 155             | 397,7         | 333,1       | 326,3       | 340,5       |
| 156             | 400,0        | 336,1       | 329,2       | 343,3       | 156             | 400,0         | 336,1       | 329,2       | 343,3       |
| 157             | 402,9        | 338,8       | 332,0       | 346,2       | 157             | 402,9         | 338,8       | 332,0       | 346,2       |
| 158             | 405,4        | 341,5       | 334,8       | 348,9       | 158             | 405,4         | 341,5       | 334,8       | 348,9       |
| 159             | 407,8        | 344,2       | 337,7       | 351,7       | 159             | 407,8         | 344,2       | 337,7       | 351,7       |
| 160             | 410,3        | 347,0       | 340,4       | 354,4       | 160             | 410,3         | 347,0       | 340,4       | 354,4       |
| 161             | 412,6        | 349,8       | 343,2       | 357,3       | 161             | 412,6         | 349,8       | 343,2       | 357,3       |
| 162             | 415,3        | 352,6       | 346,0       | 360,1       | 162             | 415,3         | 352,6       | 346,0       | 360,1       |
| 163             | 417,5        | 355,4       | 348,7       | 362,9       | 163             | 417,5         | 355,4       | 348,7       | 362,9       |
| 164             | 419,8        | 358,2       | 351,5       | 365,7       | 164             | 419,8         | 358,2       | 351,5       | 365,7       |
| 165             | 422,4        | 360,9       | 354,2       | 368,5       | 165             | 422,4         | 360,9       | 354,2       | 368,5       |
| 166             | 425,3        | 363,6       | 357,0       | 371,2       | 166             | 425,3         | 363,6       | 357,0       | 371,2       |
| 167             | 428,3        | 366,4       | 359,7       | 374,0       | 167             | 428,3         | 366,4       | 359,7       | 374,0       |
| 168             | 430,2        | 369,1       | 362,5       | 376,8       | 168             | 430,2         | 369,1       | 362,5       | 376,8       |
| 169             | 432,6        | 371,9       | 365,3       | 379,6       | 169             | 432,6         | 371,9       | 365,3       | 379,6       |
| 170             | 435,9        | 374,7       | 368,0       | 382,3       | 170             | 435,9         | 374,7       | 368,0       | 382,3       |
| 171             | 438,1        | 377,4       | 370,7       | 385,2       | 171             | 438,1         | 377,4       | 370,7       | 385,2       |
| 172             | 440,0        | 380,2       | 373,5       | 388,0       | 172             | 440,0         | 380,2       | 373,5       | 388,0       |
| 173             | 442,7        | 382,9       | 376,2       | 390,8       | 173             | 442,7         | 382,9       | 376,2       | 390,8       |
| 174             | 444,8        | 385,7       | 379,0       | 393,6       | 174             | 444,8         | 385,7       | 379,0       | 393,6       |
| 175             | 447,8        | 388,4       | 381,7       | 396,4       | 175             | 447,8         | 388,4       | 381,7       | 396,4       |
| 176             | 449,7        | 391,2       | 384,5       | 399,1       | 176             | 449,7         | 391,2       | 384,5       | 399,1       |
| 177             | 452,4        | 393,9       | 387,3       | 401,9       | 177             | 452,4         | 393,9       | 387,3       | 401,9       |
| 178             | 454,7        | 396,6       | 390,0       | 404,6       | 178             | 454,7         | 396,6       | 390,0       | 404,6       |
| 179             | 457,3        | 399,3       | 392,7       | 407,4       | 179             | 457,3         | 399,3       | 392,7       | 407,4       |
| 180             | 459,8        | 402,0       | 395,5       | 410,2       | 180             | 459,8         | 402,0       | 395,5       | 410,2       |
| 181             | 462,5        | 404,6       | 398,2       | 413,0       | 181             | 462,5         | 404,6       | 398,2       | 413,0       |
| 182             | 465,5        | 407,3       | 400,8       | 415,8       | 182             | 465,5         | 407,3       | 400,8       | 415,8       |
| 183             | 467,5        | 409,9       | 403,5       | 418,6       | 183             | 467,5         | 409,9       | 403,5       | 418,6       |
| 184             | 469,5        | 412,6       | 406,1       | 421,3       | 184             | 469,5         | 412,6       | 406,1       | 421,3       |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 185             | 472,6        | 415,2       | 408,8       | 424,2       | 185             | 472,6         | 415,2       | 408,8       | 424,2       |
| 186             | 474,8        | 417,9       | 411,4       | 427,0       | 186             | 474,8         | 417,9       | 411,4       | 427,0       |
| 187             | 477,4        | 420,5       | 414,0       | 429,8       | 187             | 477,4         | 420,5       | 414,0       | 429,8       |
| 188             | 480,1        | 423,1       | 416,7       | 432,6       | 188             | 480,1         | 423,1       | 416,7       | 432,6       |
| 189             | 481,9        | 425,9       | 419,3       | 435,4       | 189             | 481,9         | 425,9       | 419,3       | 435,4       |
| 190             | 485,2        | 428,6       | 421,9       | 438,2       | 190             | 485,2         | 428,6       | 421,9       | 438,2       |
| 191             | 487,0        | 431,3       | 424,7       | 441,1       | 191             | 487,0         | 431,3       | 424,7       | 441,1       |
| 192             | 490,1        | 434,0       | 427,5       | 443,9       | 192             | 490,1         | 434,0       | 427,5       | 443,9       |
| 193             | 492,3        | 436,7       | 430,2       | 446,7       | 193             | 492,3         | 436,7       | 430,2       | 446,7       |
| 194             | 495,1        | 439,5       | 433,0       | 449,5       | 194             | 495,1         | 439,5       | 433,0       | 449,5       |
| 195             | 497,0        | 442,3       | 435,8       | 452,3       | 195             | 497,0         | 442,3       | 435,8       | 452,3       |
| 196             | 499,6        | 445,1       | 438,7       | 455,0       | 196             | 499,6         | 445,1       | 438,7       | 455,0       |
| 197             | 502,1        | 447,9       | 441,5       | 457,7       | 197             | 502,1         | 447,9       | 441,5       | 457,7       |
| 198             | 504,8        | 450,6       | 444,4       | 460,4       | 198             | 504,8         | 450,6       | 444,4       | 460,4       |
| 199             | 508,4        | 453,4       | 447,2       | 463,0       | 199             | 508,4         | 453,4       | 447,2       | 463,0       |
| 200             | 510,0        | 456,1       | 450,1       | 465,7       | 200             | 510,0         | 456,1       | 450,1       | 465,7       |
| 201             | 512,7        | 458,9       | 452,8       | 468,3       | 201             | 512,7         | 458,9       | 452,8       | 468,3       |
| 202             | 514,4        | 461,6       | 455,6       | 470,9       | 202             | 514,4         | 461,6       | 455,6       | 470,9       |
| 203             | 517,0        | 464,3       | 458,4       | 473,5       | 203             | 517,0         | 464,3       | 458,4       | 473,5       |
| 204             | 520,8        | 467,0       | 461,1       | 476,1       | 204             | 520,8         | 467,0       | 461,1       | 476,1       |
| 205             | 521,9        | 469,6       | 463,8       | 478,6       | 205             | 521,9         | 469,6       | 463,8       | 478,6       |
| 206             | 525,7        | 472,3       | 466,4       | 481,2       | 206             | 525,7         | 472,3       | 466,4       | 481,2       |
| 207             | 527,9        | 474,9       | 469,1       | 483,8       | 207             | 527,9         | 474,9       | 469,1       | 483,8       |
| 208             | 530,5        | 477,5       | 471,7       | 486,3       | 208             | 530,5         | 477,5       | 471,7       | 486,3       |
| 209             | 533,0        | 480,1       | 474,2       | 488,9       | 209             | 533,0         | 480,1       | 474,2       | 488,9       |
| 210             | 535,4        | 482,7       | 476,8       | 491,4       | 210             | 535,4         | 482,7       | 476,8       | 491,4       |
| 211             | 537,2        | 485,3       | 479,4       | 493,9       | 211             | 537,2         | 485,3       | 479,4       | 493,9       |
| 212             | 540,0        | 487,8       | 481,8       | 496,3       | 212             | 540,0         | 487,8       | 481,8       | 496,3       |
| 213             | 543,2        | 490,3       | 484,4       | 498,8       | 213             | 543,2         | 490,3       | 484,4       | 498,8       |
| 214             | 544,8        | 492,8       | 486,9       | 501,2       | 214             | 544,8         | 492,8       | 486,9       | 501,2       |
| 215             | 548,8        | 495,3       | 489,3       | 503,7       | 215             | 548,8         | 495,3       | 489,3       | 503,7       |
| 216             | 550,4        | 497,7       | 491,8       | 506,1       | 216             | 550,4         | 497,7       | 491,8       | 506,1       |
| 217             | 552,1        | 500,2       | 494,3       | 508,6       | 217             | 552,1         | 500,2       | 494,3       | 508,6       |
| 218             | 556,2        | 502,7       | 496,7       | 511,1       | 218             | 556,2         | 502,7       | 496,7       | 511,1       |
| 219             | 557,6        | 505,2       | 499,2       | 513,6       | 219             | 557,6         | 505,2       | 499,2       | 513,6       |
| 220             | 561,7        | 507,8       | 501,7       | 516,2       | 220             | 561,7         | 507,8       | 501,7       | 516,2       |
| 221             | 563,6        | 510,4       | 504,2       | 518,7       | 221             | 563,6         | 510,4       | 504,2       | 518,7       |
| 222             | 565,1        | 513,0       | 506,8       | 521,3       | 222             | 565,1         | 513,0       | 506,8       | 521,3       |
| 223             | 569,6        | 515,6       | 509,3       | 523,9       | 223             | 569,6         | 515,6       | 509,3       | 523,9       |
| 224             | 570,1        | 518,2       | 511,8       | 526,5       | 224             | 570,1         | 518,2       | 511,8       | 526,5       |
| 225             | 573,3        | 520,9       | 514,3       | 529,1       | 225             | 573,3         | 520,9       | 514,3       | 529,1       |
| 226             | 575,8        | 523,4       | 516,9       | 531,7       | 226             | 575,8         | 523,4       | 516,9       | 531,7       |
| 227             | 578,7        | 526,1       | 519,4       | 534,3       | 227             | 578,7         | 526,1       | 519,4       | 534,3       |
| 228             | 581,1        | 528,7       | 521,9       | 536,9       | 228             | 581,1         | 528,7       | 521,9       | 536,9       |
| 229             | 583,4        | 531,2       | 524,5       | 539,4       | 229             | 583,4         | 531,2       | 524,5       | 539,4       |
| 230             | 585,1        | 533,8       | 527,0       | 541,8       | 230             | 585,1         | 533,8       | 527,0       | 541,8       |



| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 231             | 589,7        | 536,3       | 529,5       | 544,4       | 231             | 589,7         | 536,3       | 529,5       | 544,4       |
| 232             | 590,8        | 538,8       | 532,0       | 546,9       | 232             | 590,8         | 538,8       | 532,0       | 546,9       |
| 233             | 593,7        | 541,3       | 534,5       | 549,5       | 233             | 593,7         | 541,3       | 534,5       | 549,5       |
| 234             | 597,0        | 543,8       | 537,0       | 552,0       | 234             | 597,0         | 543,8       | 537,0       | 552,0       |
| 235             | 598,3        | 546,2       | 539,5       | 554,6       | 235             | 598,3         | 546,2       | 539,5       | 554,6       |
| 236             | 600,3        | 509,4       | 495,3       | 504,6       | 236             | 601,5         | 548,7       | 542,0       | 557,1       |
| 237             | 600,3        | 513,3       | 498,9       | 508,2       | 237             | 605,0         | 551,1       | 544,5       | 559,7       |
| 238             | 600,3        | 517,2       | 502,5       | 511,8       | 238             | 605,8         | 553,5       | 546,9       | 562,1       |
| 239             | 600,3        | 520,5       | 505,8       | 515,4       | 239             | 610,0         | 555,9       | 549,4       | 564,4       |
| 240             | 600,3        | 524,1       | 509,1       | 518,7       | 240             | 610,8         | 558,3       | 551,8       | 566,7       |
| 241             | 600,3        | 527,4       | 512,4       | 522         | 241             | 614,8         | 560,6       | 554,2       | 569,0       |
| 242             | 600,3        | 530,7       | 515,4       | 525,3       | 242             | 615,8         | 563,0       | 556,6       | 571,3       |
| 243             | 600,3        | 534         | 518,4       | 528,3       | 243             | 619,3         | 565,3       | 558,8       | 573,5       |
| 244             | 600,3        | 537         | 521,4       | 531,3       | 244             | 623,4         | 567,6       | 561,0       | 575,8       |
| 245             | 600,3        | 539,7       | 524,1       | 534         | 245             | 624,1         | 569,8       | 563,2       | 578,2       |
| 246             | 600,3        | 542,1       | 526,5       | 536,7       | 246             | 626,7         | 572,1       | 565,6       | 580,5       |
| 247             | 600,3        | 543,6       | 528,6       | 538,8       | 247             | 629,3         | 574,4       | 567,7       | 582,9       |
| 248             | 600,3        | 544,8       | 530,4       | 540,6       | 248             | 633,1         | 576,6       | 570,0       | 585,2       |
| 249             | 600,3        | 545,4       | 531,9       | 541,8       | 249             | 634,4         | 578,8       | 572,3       | 587,5       |
| 250             | 600,3        | 545,7       | 532,8       | 542,7       | 250             | 635,9         | 580,9       | 574,8       | 589,8       |
| 251             | 600,3        | 545,7       | 533,4       | 543,3       | 251             | 639,5         | 583,0       | 577,0       | 592,1       |
| 252             | 600,3        | 545,7       | 533,7       | 543,3       | 252             | 642,9         | 585,2       | 579,3       | 594,5       |
| 253             | 600,3        | 545,1       | 534         | 543,3       | 253             | 644,7         | 587,3       | 581,6       | 596,9       |
| 254             | 600,3        | 544,5       | 534         | 543         | 254             | 648,0         | 589,4       | 583,8       | 599,4       |
| 255             | 600,3        | 543,9       | 533,7       | 542,4       | 255             | 650,6         | 591,6       | 586,1       | 601,8       |
| 256             | 600,3        | 543         | 533,4       | 541,8       | 256             | 652,3         | 593,7       | 588,4       | 604,3       |
| 257             | 600,3        | 542,1       | 532,8       | 540,9       | 257             | 654,4         | 595,9       | 590,8       | 606,7       |
| 258             | 600,3        | 540,9       | 532,2       | 540         | 258             | 657,0         | 598,0       | 592,9       | 609,1       |
| 259             | 600,3        | 539,7       | 531,3       | 538,8       | 259             | 658,5         | 600,2       | 595,4       | 611,6       |
| 260             | 600,3        | 538,5       | 530,4       | 537,6       | 260             | 663,2         | 602,3       | 597,5       | 614,0       |
| 261             | 600,3        | 537,3       | 529,5       | 536,4       | 261             | 665,5         | 604,4       | 599,8       | 616,4       |
| 262             | 600,3        | 535,8       | 528,6       | 534,9       | 262             | 668,3         | 606,6       | 602,1       | 618,8       |
| 263             | 600,3        | 534,3       | 527,4       | 533,7       | 263             | 669,0         | 608,8       | 604,5       | 621,3       |
| 264             | 600,3        | 532,8       | 526,5       | 532,2       | 264             | 671,2         | 611,0       | 606,8       | 623,6       |
| 265             | 600,3        | 531,3       | 525,3       | 530,4       | 265             | 674,5         | 613,1       | 608,9       | 626,0       |
| 266             | 600,3        | 529,8       | 523,8       | 528,9       | 266             | 676,7         | 615,3       | 611,3       | 628,3       |
| 267             | 600,3        | 528,3       | 522,6       | 527,4       | 267             | 679,2         | 617,5       | 613,5       | 630,7       |
| 268             | 600,3        | 526,5       | 521,4       | 525,6       | 268             | 681,5         | 619,6       | 615,7       | 633,0       |
| 269             | 594,9        | 525         | 519,9       | 524,1       | 269             | 685,1         | 621,8       | 617,8       | 635,3       |
| 270             | 585,6        | 523,2       | 518,4       | 522,3       | 270             | 687,4         | 624,0       | 620,2       | 637,6       |
| 271             | 577,2        | 521,4       | 517,2       | 520,5       | 271             | 689,7         | 626,1       | 622,2       | 639,9       |
| 272             | 569,4        | 519,9       | 515,7       | 518,7       | 272             | 692,3         | 628,2       | 624,7       | 642,2       |
| 273             | 562,2        | 518,1       | 514,2       | 517,2       | 273             | 694,4         | 630,3       | 626,7       | 644,4       |
| 274             | 556,5        | 516,3       | 512,7       | 515,4       | 274             | 697,0         | 632,4       | 629,1       | 646,7       |
| 275             | 550,8        | 514,5       | 511,2       | 513,6       | 275             | 699,3         | 634,4       | 631,2       | 648,9       |
| 276             | 545,4        | 512,7       | 509,4       | 511,5       | 276             | 702,5         | 636,4       | 633,3       | 651,1       |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 277             | 540,3        | 510,9       | 507,9       | 509,7       | 277             | 706,0         | 638,4       | 634,8       | 653,3       |
| 278             | 535,5        | 509,1       | 506,4       | 508,2       | 278             | 708,0         | 640,3       | 637,4       | 655,5       |
| 279             | 531          | 507,6       | 504,9       | 506,4       | 279             | 710,0         | 642,2       | 639,0       | 657,6       |
| 280             | 526,8        | 505,8       | 503,4       | 504,6       | 280             | 713,6         | 644,0       | 640,7       | 659,8       |
| 281             | 522,9        | 504         | 501,6       | 502,5       | 281             | 717,1         | 645,8       | 642,7       | 661,8       |
| 282             | 519,3        | 502,2       | 500,1       | 500,7       | 282             | 719,9         | 647,5       | 644,5       | 663,9       |
| 283             | 515,7        | 500,4       | 498,6       | 498,9       | 283             | 722,8         | 649,2       | 646,4       | 666,0       |
| 284             | 512,4        | 498,6       | 496,8       | 497,4       | 284             | 725,9         | 650,9       | 648,2       | 668,1       |
| 285             | 496,5        | 489,3       | 488,4       | 487,8       | 285             | 737,9         | 659,0       | 657,8       | 678,8       |
| 286             | 488,1        | 483,9       | 483,3       | 482,4       | 286             | 747,0         | 662,9       | 662,2       | 684,3       |
| 287             | 485,7        | 482,4       | 481,8       | 480,6       | 287             | 749,7         | 664,1       | 664,8       | 686,0       |
| 288             | 483,3        | 480,9       | 480,3       | 479,1       | 288             | 751,7         | 665,3       | 665,9       | 687,7       |
| 289             | 481,2        | 479,1       | 478,8       | 477,3       | 289             | 754,5         | 666,3       | 666,7       | 689,2       |
| 290             | 479,1        | 477,6       | 477,3       | 475,8       | 290             | 757,9         | 667,3       | 667,7       | 690,7       |
| 291             | 476,7        | 475,8       | 475,8       | 474,3       | 291             | 761,2         | 668,3       | 668,9       | 692,2       |
| 292             | 474,6        | 474,3       | 474,3       | 472,5       | 292             | 761,9         | 669,3       | 670,2       | 693,6       |
| 293             | 472,5        | 472,8       | 472,8       | 471         | 293             | 764,2         | 670,2       | 671,4       | 695,0       |
| 294             | 470,7        | 471,3       | 471,3       | 469,2       | 294             | 767,6         | 671,2       | 673,8       | 696,4       |
| 295             | 468,6        | 469,5       | 469,8       | 467,7       | 295             | 769,7         | 672,1       | 674,5       | 697,9       |
| 296             | 466,8        | 468         | 468,3       | 466,2       | 296             | 773,5         | 672,9       | 675,0       | 699,4       |
| 297             | 464,7        | 466,5       | 466,8       | 464,7       | 297             | 776,9         | 673,8       | 676,2       | 700,9       |
| 298             | 462,9        | 465         | 465,3       | 463,2       | 298             | 778,9         | 674,7       | 677,4       | 702,5       |
| 299             | 461,1        | 463,5       | 464,1       | 461,7       | 299             | 779,8         | 675,6       | 678,6       | 704,2       |
| 300             | 459,6        | 462         | 462,6       | 460,2       | 300             | 784,4         | 676,5       | 681,4       | 706,0       |
| 301             | 457,8        | 460,5       | 461,1       | 458,7       | 301             | 785,7         | 677,3       | 681,7       | 707,9       |
| 302             | 456          | 459,3       | 459,6       | 457,2       | 302             | 789,3         | 678,1       | 682,2       | 709,8       |
| 303             | 454,2        | 457,8       | 458,4       | 455,7       | 303             | 792,3         | 678,9       | 683,5       | 711,9       |
| 304             | 452,7        | 456,3       | 456,9       | 454,5       | 304             | 793,0         | 679,8       | 684,7       | 713,9       |
| 305             | 450,9        | 454,8       | 455,4       | 453         | 305             | 794,0         | 680,6       | 686,0       | 716,1       |
| 306             | 449,4        | 453,6       | 454,2       | 451,5       | 306             | 799,2         | 681,5       | 689,0       | 718,4       |
| 307             | 447,9        | 452,1       | 452,7       | 450,3       | 307             | 801,9         | 682,3       | 689,4       | 720,7       |
| 308             | 446,1        | 450,9       | 451,5       | 448,8       | 308             | 804,8         | 683,1       | 691,0       | 723,0       |
| 309             | 444,9        | 449,4       | 450,3       | 447,3       | 309             | 807,6         | 684,0       | 692,5       | 725,4       |
| 310             | 443,4        | 448,2       | 448,8       | 446,1       | 310             | 810,5         | 684,8       | 694,0       | 727,7       |
| 311             | 441,6        | 446,7       | 447,6       | 444,6       | 311             | 813,4         | 685,7       | 695,5       | 730,1       |
| 312             | 440,4        | 445,5       | 446,1       | 443,4       | 312             | 816,3         | 686,5       | 697,0       | 732,4       |
| 313             | 438,9        | 444         | 444,9       | 441,9       | 313             | 819,2         | 687,4       | 698,5       | 734,8       |
| 314             | 437,4        | 442,8       | 443,7       | 440,7       | 314             | 822,1         | 688,2       | 700,0       | 737,1       |
| 315             | 436,2        | 441,6       | 442,5       | 439,2       | 315             | 825,0         | 689,1       | 701,6       | 739,5       |
| 316             | 434,7        | 440,4       | 441         | 438         | 316             | 827,9         | 689,9       | 703,1       | 741,8       |
| 317             | 433,5        | 438,9       | 439,8       | 436,8       | 317             | 830,8         | 690,8       | 704,6       | 744,1       |
| 318             | 432          | 437,7       | 438,6       | 435,6       | 318             | 833,7         | 691,6       | 706,1       | 746,5       |
| 319             | 430,8        | 436,5       | 437,4       | 434,4       | 319             | 836,6         | 692,4       | 707,6       | 748,8       |
| 320             | 429,3        | 435,3       | 436,2       | 433,2       | 320             | 839,4         | 693,3       | 709,1       | 751,2       |
| 321             | 428,1        | 434,1       | 435         | 432         | 321             | 842,3         | 694,1       | 710,6       | 753,5       |
| 322             | 426,9        | 432,9       | 433,8       | 430,8       | 322             | 845,2         | 695,0       | 712,2       | 755,9       |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 323             | 425,7        | 431,7       | 432,6       | 429,6       | 323             | 848,1         | 695,8       | 713,7       | 758,2       |
| 324             | 424,5        | 430,5       | 431,7       | 428,4       | 324             | 851,0         | 696,7       | 715,2       | 760,6       |
| 325             | 423,3        | 429,3       | 430,5       | 427,2       | 325             | 853,9         | 697,5       | 716,7       | 762,9       |
| 326             | 422,1        | 428,4       | 429,3       | 426         | 326             | 856,8         | 698,4       | 718,2       | 765,3       |
| 327             | 420,9        | 427,2       | 428,1       | 425,1       | 327             | 859,7         | 699,2       | 719,7       | 767,6       |
| 328             | 419,4        | 426         | 426,9       | 423,9       | 328             | 862,6         | 700,1       | 721,2       | 769,9       |
| 329             | 418,2        | 425,1       | 426         | 422,7       | 329             | 865,5         | 700,9       | 722,7       | 772,3       |
| 330             | 417,3        | 423,9       | 424,8       | 421,8       | 330             | 868,4         | 701,7       | 724,3       | 774,6       |
| 331             | 416,1        | 422,7       | 423,6       | 420,6       | 331             | 871,2         | 702,6       | 725,8       | 777,0       |
| 332             | 414,9        | 421,5       | 422,7       | 419,4       | 332             | 874,1         | 703,4       | 727,3       | 779,3       |
| 333             | 414          | 420,6       | 421,5       | 418,2       | 333             | 877,0         | 704,3       | 728,8       | 781,7       |
| 334             | 412,8        | 419,4       | 420,6       | 417,3       | 334             | 879,9         | 705,1       | 730,3       | 784,0       |
| 335             | 411,6        | 418,2       | 419,4       | 416,1       | 335             | 882,8         | 706,0       | 731,8       | 786,4       |
| 336             | 410,7        | 417,3       | 418,2       | 415,2       | 336             | 885,7         | 706,8       | 733,3       | 788,7       |
| 337             | 409,5        | 416,4       | 417,3       | 414,3       | 337             | 888,6         | 707,7       | 734,9       | 791,1       |
| 338             | 408,3        | 415,2       | 416,4       | 413,1       | 338             | 891,5         | 708,5       | 736,4       | 793,4       |
| 339             | 407,4        | 414,3       | 415,2       | 411,9       | 339             | 894,4         | 709,4       | 737,9       | 795,7       |
| 340             | 406,2        | 413,1       | 414,3       | 411         | 340             | 897,3         | 710,2       | 739,4       | 798,1       |
| 341             | 405,3        | 412,2       | 413,1       | 410,1       | 341             | 900,2         | 711,0       | 740,9       | 800,4       |
| 342             | 404,1        | 411,3       | 412,2       | 408,9       | 342             | 903,0         | 711,9       | 742,4       | 802,8       |
| 343             | 403,2        | 410,1       | 411,3       | 408         | 343             | 905,9         | 712,7       | 743,9       | 805,1       |
| 344             | 402          | 409,2       | 410,1       | 407,1       | 344             | 908,8         | 713,6       | 745,5       | 807,5       |
| 345             | 401,1        | 408         | 409,2       | 405,9       | 345             | 911,7         | 714,4       | 747,0       | 809,8       |
| 346             | 399,9        | 407,1       | 408         | 405         | 346             | 914,6         | 715,3       | 748,5       | 812,2       |
| 347             | 399          | 406,2       | 407,1       | 404,1       | 347             | 917,5         | 716,1       | 750,0       | 814,5       |
| 348             | 398,1        | 405,3       | 406,2       | 402,9       | 348             | 920,4         | 717,0       | 751,5       | 816,9       |
| 349             | 396,9        | 404,1       | 405,3       | 402         | 349             | 923,3         | 717,8       | 753,0       | 819,2       |
| 350             | 396          | 403,2       | 404,4       | 401,1       | 350             | 926,2         | 718,7       | 754,5       | 821,5       |
| 351             | 395,1        | 402,3       | 403,2       | 400,2       | 351             | 929,1         | 719,5       | 756,0       | 823,9       |
| 352             | 393,9        | 401,4       | 402,3       | 399         | 352             | 932,0         | 720,3       | 757,6       | 826,2       |
| 353             | 393          | 400,5       | 401,4       | 398,1       | 353             | 934,8         | 721,2       | 759,1       | 828,6       |
| 354             | 392,1        | 399,3       | 400,5       | 397,2       | 354             | 937,7         | 722,0       | 760,6       | 830,9       |
| 355             | 391,2        | 398,4       | 399,3       | 396,3       | 355             | 940,6         | 722,9       | 762,1       | 833,3       |
| 356             | 390          | 397,5       | 398,4       | 395,4       | 356             | 943,5         | 723,7       | 763,6       | 835,6       |
| 357             | 389,1        | 396,6       | 397,5       | 394,5       | 357             | 946,4         | 724,6       | 765,1       | 838,0       |
| 358             | 388,2        | 395,7       | 396,6       | 393,6       | 358             | 949,3         | 725,4       | 766,6       | 840,3       |
| 359             | 387,3        | 394,8       | 395,7       | 392,7       | 359             | 952,2         | 726,3       | 768,2       | 842,7       |
| 360             | 386,4        | 393,9       | 394,8       | 391,8       | 360             | 955,1         | 727,1       | 769,7       | 845,0       |
| 361             | 385,2        | 393         | 393,9       | 390,9       | 361             | 958,0         | 728,0       | 771,2       | 847,3       |
| 362             | 384,6        | 392,1       | 393         | 390         | 362             | 960,9         | 728,8       | 772,7       | 849,7       |
| 363             | 383,7        | 391,2       | 392,1       | 389,1       | 363             | 963,8         | 729,6       | 774,2       | 852,0       |
| 364             | 382,8        | 390,3       | 391,2       | 388,2       | 364             | 966,6         | 730,5       | 775,7       | 854,4       |
| 365             | 381,9        | 389,4       | 390,3       | 387,3       | 365             | 969,5         | 731,3       | 777,2       | 856,7       |
| 366             | 381          | 388,5       | 389,4       | 386,4       | 366             | 972,4         | 732,2       | 778,8       | 859,1       |
| 367             | 380,1        | 387,6       | 388,5       | 385,5       | 367             | 975,3         | 733,0       | 780,3       | 861,4       |
| 368             | 379,2        | 386,7       | 387,6       | 384,6       | 368             | 978,2         | 733,9       | 781,8       | 863,8       |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 369             | 378,3        | 385,8       | 386,7       | 384         | 369             | 981,1         | 734,7       | 783,3       | 866,1       |
| 370             | 377,4        | 385,2       | 386,1       | 383,1       | 370             | 984,0         | 735,6       | 784,8       | 868,5       |
| 371             | 376,8        | 384,3       | 384,9       | 382,2       | 371             | 986,9         | 736,4       | 786,3       | 870,8       |
| 372             | 375,9        | 383,4       | 384,3       | 381,6       | 372             | 989,8         | 737,3       | 787,8       | 873,1       |
| 373             | 375          | 382,5       | 383,4       | 380,7       | 373             | 992,7         | 738,1       | 789,3       | 875,5       |
| 374             | 374,4        | 381,9       | 382,5       | 379,8       | 374             | 995,6         | 738,9       | 790,9       | 877,8       |
| 375             | 373,5        | 381         | 381,9       | 378,9       | 375             | 998,4         | 739,8       | 792,4       | 880,2       |
| 376             | 372,6        | 380,1       | 381         | 378,3       | 376             | 1000,5        | 631,5       | 615,0       | 629,5       |
| 377             | 371,7        | 379,5       | 380,1       | 377,4       | 377             | 1000,5        | 643,5       | 626,5       | 641,5       |
| 378             | 370,8        | 378,6       | 379,5       | 376,8       | 378             | 1000,5        | 656         | 637,5       | 653         |
| 379             | 369,9        | 377,7       | 378,6       | 375,9       | 379             | 1000,5        | 668         | 649,5       | 665         |
| 380             | 369,3        | 377,1       | 377,7       | 375         | 380             | 1000,5        | 680,5       | 661         | 677         |
| 381             | 368,4        | 376,2       | 377,1       | 374,1       | 381             | 1000,5        | 693         | 673         | 688,5       |
| 382             | 367,8        | 375,6       | 376,2       | 373,5       | 382             | 1000,5        | 705         | 684,5       | 700         |
| 383             | 366,9        | 374,7       | 375,6       | 372,6       | 383             | 1000,5        | 717         | 696         | 712         |
| 384             | 366          | 374,1       | 374,7       | 372         | 384             | 1000,5        | 729         | 707,5       | 723,5       |
| 385             | 365,4        | 373,2       | 373,8       | 371,1       | 385             | 1000,5        | 740         | 718,5       | 734,5       |
| 386             | 364,5        | 372,3       | 373,2       | 370,5       | 386             | 1000,5        | 751         | 729,5       | 745,5       |
| 387             | 363,6        | 371,7       | 372,3       | 369,6       | 387             | 1000,5        | 761,5       | 739,5       | 756         |
| 388             | 363          | 370,8       | 371,7       | 369         | 388             | 1000,5        | 771,5       | 749,5       | 766         |
| 389             | 362,1        | 370,2       | 370,8       | 368,4       | 389             | 1000,5        | 781         | 759,5       | 776         |
| 390             | 361,5        | 369,3       | 369,9       | 367,5       | 390             | 1000,5        | 790,5       | 768,5       | 785         |
| 391             | 360,6        | 368,7       | 369,3       | 366,9       | 391             | 1000,5        | 799         | 777,5       | 793,5       |
| 392             | 360          | 368,1       | 368,7       | 366         | 392             | 1000,5        | 808         | 785,5       | 801,5       |
| 393             | 359,1        | 367,2       | 367,8       | 365,1       | 393             | 1000,5        | 816         | 793,5       | 809,5       |
| 394             | 358,2        | 366,6       | 367,2       | 364,5       | 394             | 1000,5        | 823,5       | 801,5       | 817         |
| 395             | 357,6        | 365,7       | 366,3       | 363,9       | 395             | 1000,5        | 831         | 808,5       | 824,5       |
| 396             | 357          | 365,1       | 365,7       | 363         | 396             | 1000,5        | 838,5       | 815,5       | 831         |
| 397             | 356,1        | 364,2       | 364,8       | 362,4       | 397             | 1000,5        | 845,5       | 822         | 837,5       |
| 398             | 355,5        | 363,6       | 364,2       | 361,5       | 398             | 1000,5        | 852         | 828,5       | 844         |
| 399             | 354,6        | 362,7       | 363,6       | 360,9       | 399             | 1000,5        | 858,5       | 834,5       | 850         |
| 400             | 354          | 362,1       | 362,7       | 360,3       | 400             | 1000,5        | 864,5       | 840,5       | 856         |
| 401             | 353,1        | 361,5       | 362,1       | 359,4       | 401             | 1000,5        | 870,5       | 846         | 861,5       |
| 402             | 352,5        | 360,9       | 361,2       | 358,8       | 402             | 1000,5        | 876,5       | 851         | 867         |
| 403             | 351,6        | 360         | 360,6       | 358,2       | 403             | 1000,5        | 882         | 856,5       | 872,5       |
| 404             | 351          | 359,4       | 359,7       | 357,6       | 404             | 1000,5        | 887         | 861,5       | 877,5       |
| 405             | 350,4        | 358,8       | 359,1       | 356,7       | 405             | 1000,5        | 892,5       | 866         | 883         |
| 406             | 349,8        | 357,9       | 358,5       | 356,1       | 406             | 1000,5        | 897         | 871         | 887,5       |
| 407             | 348,9        | 357,3       | 357,9       | 355,2       | 407             | 1000,5        | 901,5       | 875,5       | 892         |
| 408             | 348,3        | 356,7       | 357         | 354,6       | 408             | 1000,5        | 904,5       | 879,5       | 896         |
| 409             | 347,4        | 355,8       | 356,4       | 354         | 409             | 993           | 907         | 882,5       | 899,5       |
| 410             | 346,8        | 355,2       | 355,8       | 353,4       | 410             | 976,5         | 908,5       | 885         | 902         |
| 411             | 346,2        | 354,6       | 355,2       | 352,8       | 411             | 963           | 909,5       | 887         | 904         |
| 412             | 345,3        | 354         | 354,3       | 351,9       | 412             | 950           | 909,5       | 888,5       | 905         |
| 413             | 344,7        | 353,1       | 353,7       | 351,3       | 413             | 938           | 909,5       | 889,5       | 905,5       |
| 414             | 344,1        | 352,5       | 353,1       | 350,7       | 414             | 928           | 909         | 890         | 905,5       |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 415             | 343,2        | 351,9       | 352,2       | 350,1       | 415             | 918,5         | 908         | 890         | 905,5       |
| 416             | 342,6        | 351,3       | 351,6       | 349,2       | 416             | 909,5         | 907         | 889,5       | 904,5       |
| 417             | 342          | 350,4       | 351         | 348,6       | 417             | 901           | 906         | 889         | 903,5       |
| 418             | 341,4        | 349,8       | 350,4       | 348         | 418             | 893           | 904         | 888,5       | 902,5       |
| 419             | 340,5        | 349,2       | 349,5       | 347,4       | 419             | 885,5         | 902,5       | 887,5       | 901         |
| 420             | 339,9        | 348,6       | 348,9       | 346,8       | 420             | 878,5         | 900,5       | 886,5       | 899         |
| 421             | 339,3        | 348         | 348,3       | 346,2       | 421             | 872           | 899         | 885         | 897         |
| 422             | 338,7        | 347,4       | 347,7       | 345,6       | 422             | 866           | 896,5       | 883,5       | 895         |
| 423             | 338,1        | 346,8       | 347,1       | 344,7       | 423             | 860           | 894,5       | 882         | 893         |
| 424             | 337,5        | 346,2       | 346,2       | 344,1       | 424             | 854,5         | 892         | 880         | 890,5       |
| 425             | 336,6        | 345,3       | 345,9       | 343,5       | 425             | 849           | 889,5       | 878,5       | 888         |
| 426             | 336          | 344,7       | 345         | 342,9       | 426             | 844           | 887         | 876,5       | 885,5       |
| 427             | 335,4        | 344,1       | 344,4       | 342,3       | 427             | 839           | 884,5       | 874,5       | 883         |
| 428             | 334,8        | 343,5       | 343,8       | 341,7       | 428             | 834           | 882         | 872         | 880,5       |
| 429             | 334,2        | 342,9       | 343,2       | 341,1       | 429             | 829,5         | 879         | 870         | 877,5       |
| 430             | 333,3        | 342,3       | 342,6       | 340,5       | 430             | 825           | 876,5       | 867,5       | 875         |
| 431             | 332,7        | 341,7       | 342         | 339,6       | 431             | 821           | 873,5       | 865,5       | 872         |
| 432             | 332,1        | 341,1       | 341,4       | 339         | 432             | 816,5         | 870,5       | 863         | 869         |
| 433             | 331,5        | 340,5       | 340,8       | 338,4       | 433             | 812,5         | 868         | 860,5       | 866         |
| 434             | 330,6        | 339,6       | 339,9       | 337,8       | 434             | 808,5         | 865         | 858         | 863,5       |
| 435             | 330          | 339         | 339,3       | 337,2       | 435             | 804,5         | 862         | 855,5       | 860,5       |
| 436             | 329,7        | 338,4       | 338,7       | 336,6       | 436             | 801           | 859         | 853,5       | 857,5       |
| 437             | 329,1        | 337,8       | 338,1       | 336         | 437             | 797           | 856,5       | 850,5       | 854,5       |
| 438             | 328,2        | 337,2       | 337,5       | 335,4       | 438             | 793,5         | 853         | 848         | 851,5       |
| 439             | 327,9        | 336,6       | 336,9       | 334,8       | 439             | 790           | 850,5       | 845,5       | 848,5       |
| 440             | 327          | 336         | 336,3       | 334,2       | 440             | 786,5         | 847,5       | 843         | 845,5       |
| 441             | 326,4        | 335,4       | 335,7       | 333,6       | 441             | 783,5         | 844,5       | 840         | 842,5       |
| 442             | 325,8        | 334,8       | 335,1       | 333         | 442             | 780           | 841,5       | 837,5       | 839,5       |
| 443             | 325,2        | 334,2       | 334,5       | 332,4       | 443             | 776,5         | 838,5       | 835         | 836,5       |
| 444             | 324,6        | 333,6       | 333,9       | 331,8       | 444             | 773,5         | 835,5       | 832,5       | 833,5       |
| 445             | 324          | 333         | 333,3       | 331,2       | 445             | 770,5         | 832,5       | 829,5       | 830,5       |
| 446             | 323,4        | 332,4       | 332,7       | 330,6       | 446             | 767,5         | 830         | 827         | 827,5       |
| 447             | 322,8        | 331,8       | 332,1       | 330         | 447             | 764,5         | 827         | 824,5       | 824,5       |
| 448             | 322,2        | 331,2       | 331,5       | 329,7       | 448             | 762           | 824         | 821,5       | 821,5       |
| 449             | 321,6        | 330,6       | 330,9       | 329,1       | 449             | 759           | 821         | 819         | 818,5       |
| 450             | 321          | 330         | 330,3       | 328,2       | 450             | 756           | 818,5       | 816,5       | 816         |
| 451             | 320,4        | 329,4       | 329,7       | 327,9       | 451             | 753,5         | 815,5       | 814         | 813         |
| 452             | 319,8        | 328,8       | 329,1       | 327,3       | 452             | 751           | 812,5       | 811         | 810         |
| 453             | 319,2        | 328,2       | 328,5       | 326,7       | 453             | 748           | 810         | 808,5       | 807         |
| 454             | 318,6        | 327,9       | 327,9       | 326,1       | 454             | 745,5         | 807         | 806         | 804,5       |
| 455             | 318          | 327,3       | 327,3       | 325,5       | 455             | 743           | 804         | 803,5       | 801,5       |
| 456             | 317,4        | 326,7       | 326,7       | 324,9       | 456             | 740,5         | 801,5       | 801         | 798,5       |
| 457             | 316,8        | 326,1       | 326,1       | 324,3       | 457             | 738           | 799         | 798,5       | 796         |
| 458             | 316,2        | 325,5       | 325,5       | 323,7       | 458             | 735,5         | 796         | 795,5       | 793,5       |
| 459             | 315,6        | 324,9       | 325,2       | 323,1       | 459             | 733           | 793,5       | 793         | 790,5       |
| 460             | 315          | 324,3       | 324,6       | 322,5       | 460             | 730,5         | 791         | 790,5       | 788         |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 461             | 314,4        | 323,7       | 324         | 322,2       | 461             | 728,5         | 788         | 788         | 785,5       |
| 462             | 313,8        | 323,1       | 323,4       | 321,6       | 462             | 726           | 785,5       | 785,5       | 783         |
| 463             | 313,2        | 322,5       | 322,8       | 321         | 463             | 724           | 783         | 783         | 780         |
| 464             | 312,6        | 322,2       | 322,2       | 320,4       | 464             | 721,5         | 780,5       | 780,5       | 777,5       |
| 465             | 312,3        | 321,6       | 321,6       | 319,8       | 465             | 719,5         | 778         | 778,5       | 775         |
| 466             | 311,4        | 321         | 321         | 319,2       | 466             | 717           | 775,5       | 776         | 772,5       |
| 467             | 311,1        | 320,4       | 320,4       | 318,6       | 467             | 715           | 773         | 773,5       | 770         |
| 468             | 310,2        | 319,8       | 320,1       | 318,3       | 468             | 713           | 770,5       | 771         | 767,5       |
| 469             | 309,9        | 319,2       | 319,5       | 317,7       | 469             | 710,5         | 768         | 769         | 765         |
| 470             | 309,3        | 318,6       | 318,9       | 317,1       | 470             | 709           | 765,5       | 766,5       | 762,5       |
| 471             | 308,7        | 318,3       | 318,3       | 316,5       | 471             | 706,5         | 763         | 764         | 760         |
| 472             | 308,1        | 317,7       | 317,7       | 315,9       | 472             | 704,5         | 761         | 762         | 757,5       |
| 473             | 307,5        | 317,1       | 317,1       | 315,3       | 473             | 702,5         | 758,5       | 759,5       | 755         |
| 474             | 307,2        | 316,5       | 316,5       | 315         | 474             | 700,5         | 756         | 757,5       | 753         |
| 475             | 306,6        | 315,9       | 316,2       | 314,4       | 475             | 698,5         | 754         | 755         | 750,5       |
| 476             | 306          | 315,6       | 315,6       | 313,8       | 476             | 697           | 751,5       | 753         | 748         |
| 477             | 305,4        | 315         | 315         | 313,2       | 477             | 695           | 749,5       | 750,5       | 746         |
| 478             | 304,8        | 314,4       | 314,4       | 312,6       | 478             | 693           | 747         | 748,5       | 743,5       |
| 479             | 304,2        | 313,8       | 313,8       | 312,3       | 479             | 691           | 745         | 746         | 741,5       |
| 480             | 303,6        | 313,2       | 313,2       | 311,7       | 480             | 689           | 742,5       | 744         | 739         |
| 481             | 303          | 312,9       | 312,9       | 311,1       | 481             | 687,5         | 740,5       | 742         | 737         |
| 482             | 302,7        | 312,3       | 312,3       | 310,5       | 482             | 685,5         | 738         | 739,5       | 735         |
| 483             | 302,1        | 311,7       | 311,7       | 310,2       | 483             | 683,5         | 736         | 737,5       | 732,5       |
| 484             | 301,5        | 311,1       | 311,1       | 309,6       | 484             | 682           | 734         | 735,5       | 730,5       |
| 485             | 300,9        | 310,8       | 310,8       | 309         | 485             | 680           | 732         | 733,5       | 728,5       |
| 486             | 300,6        | 310,2       | 310,2       | 308,4       | 486             | 678           | 730         | 731         | 726,5       |
| 487             | 300          | 309,6       | 309,6       | 308,1       | 487             | 676,5         | 728         | 729,5       | 724,5       |
| 488             | 299,4        | 309         | 309         | 307,5       | 488             | 675           | 726         | 727,5       | 722         |
| 489             | 298,8        | 308,7       | 308,7       | 306,9       | 489             | 673           | 724         | 725,5       | 720,5       |
| 490             | 298,5        | 308,1       | 308,1       | 306,3       | 490             | 671,5         | 722         | 723,5       | 718,5       |
| 491             | 297,9        | 307,5       | 307,5       | 306         | 491             | 669,5         | 720         | 721,5       | 716,5       |
| 492             | 297,3        | 306,9       | 306,9       | 305,4       | 492             | 667,5         | 718         | 719,5       | 714,5       |
| 493             | 296,7        | 306,6       | 306,6       | 305,1       | 493             | 666           | 716         | 717,5       | 712,5       |
| 494             | 296,4        | 306         | 306         | 304,5       | 494             | 664,5         | 714         | 715,5       | 710,5       |
| 495             | 295,8        | 305,4       | 305,4       | 303,9       | 495             | 662,5         | 712         | 714         | 708,5       |
| 496             | 295,2        | 305,1       | 304,8       | 303,3       | 496             | 661           | 710,5       | 712         | 707         |
| 497             | 294,9        | 304,5       | 304,5       | 303         | 497             | 659,5         | 708,5       | 710         | 705         |
| 498             | 294,3        | 303,9       | 303,9       | 302,4       | 498             | 658           | 706,5       | 708,5       | 703         |
| 499             | 293,7        | 303,6       | 303,3       | 301,8       | 499             | 656           | 705         | 706,5       | 701         |
| 500             | 293,4        | 303         | 303         | 301,5       | 500             | 654,5         | 703         | 704,5       | 699         |
| 501             | 292,8        | 302,4       | 302,4       | 300,9       | 501             | 653           | 701         | 703         | 697,5       |
| 502             | 292,2        | 301,8       | 301,8       | 300,3       | 502             | 651,5         | 699,5       | 701         | 696         |
| 503             | 291,6        | 301,5       | 301,5       | 300         | 503             | 649,5         | 697,5       | 699         | 694         |
| 504             | 291          | 300,9       | 300,9       | 299,4       | 504             | 648           | 696         | 697,5       | 692         |
| 505             | 290,7        | 300,3       | 300,3       | 298,8       | 505             | 646,5         | 694         | 696         | 690,5       |
| 506             | 290,1        | 300         | 299,7       | 298,5       | 506             | 645           | 692         | 694         | 688,5       |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 507             | 289,8        | 299,4       | 299,4       | 297,9       | 507             | 643,5         | 690,5       | 692         | 687         |
| 508             | 289,2        | 298,8       | 298,8       | 297,6       | 508             | 641,5         | 689         | 690,5       | 685,5       |
| 509             | 288,6        | 298,5       | 298,5       | 297         | 509             | 640,5         | 687         | 689         | 683,5       |
| 510             | 288,3        | 297,9       | 297,9       | 296,4       | 510             | 639           | 685,5       | 687         | 682         |
| 511             | 287,7        | 297,6       | 297,6       | 296,1       | 511             | 637,5         | 684         | 685,5       | 680         |
| 512             | 287,1        | 297         | 297         | 295,5       | 512             | 636           | 682         | 684         | 678,5       |
| 513             | 286,8        | 296,4       | 296,4       | 294,9       | 513             | 634,5         | 680,5       | 682         | 677         |
| 514             | 286,2        | 296,1       | 296,1       | 294,6       | 514             | 633           | 679         | 680,5       | 675         |
| 515             | 285,6        | 295,5       | 295,5       | 294         | 515             | 631,5         | 677         | 679         | 673,5       |
| 516             | 285,3        | 295,2       | 294,9       | 293,7       | 516             | 630           | 675,5       | 677         | 672         |
| 517             | 284,7        | 294,6       | 294,3       | 293,1       | 517             | 628,5         | 674         | 675,5       | 670,5       |
| 518             | 284,1        | 294         | 294         | 292,5       | 518             | 627,5         | 672,5       | 674         | 668,5       |
| 519             | 283,8        | 293,7       | 293,7       | 292,2       | 519             | 626           | 670,5       | 672,5       | 667         |
| 520             | 283,2        | 293,1       | 293,1       | 291,6       | 520             | 624,5         | 669         | 670,5       | 665,5       |
| 521             | 282,9        | 292,5       | 292,5       | 291,3       | 521             | 623           | 667,5       | 669         | 664         |
| 522             | 282,3        | 292,2       | 292,2       | 290,7       | 522             | 622           | 666         | 667,5       | 662,5       |
| 523             | 281,7        | 291,9       | 291,6       | 290,1       | 523             | 620,5         | 664,5       | 666         | 660,5       |
| 524             | 281,4        | 291,3       | 291,3       | 289,8       | 524             | 619           | 663         | 664,5       | 659         |
| 525             | 280,8        | 290,7       | 290,7       | 289,5       | 525             | 617,5         | 661,5       | 663         | 657,5       |
| 526             | 280,5        | 290,4       | 290,1       | 288,9       | 526             | 616           | 659,5       | 661,5       | 656         |
| 527             | 279,9        | 289,8       | 289,8       | 288,3       | 527             | 615           | 658         | 659,5       | 654,5       |
| 528             | 279,6        | 289,5       | 289,2       | 288         | 528             | 613,5         | 656,5       | 658         | 653         |
| 529             | 279          | 288,9       | 288,6       | 287,4       | 529             | 612,5         | 655         | 656,5       | 651,5       |
| 530             | 278,4        | 288,3       | 288,3       | 287,1       | 530             | 611           | 653,5       | 655,5       | 650         |
| 531             | 278,1        | 288         | 288         | 286,5       | 531             | 610           | 652         | 653,5       | 648,5       |
| 532             | 277,5        | 287,4       | 287,4       | 286,2       | 532             | 608,5         | 650,5       | 652         | 647         |
| 533             | 277,2        | 287,1       | 286,8       | 285,6       | 533             | 607           | 649,5       | 650,5       | 645,5       |
| 534             | 276,6        | 286,5       | 286,5       | 285,3       | 534             | 605,5         | 648         | 649         | 644,5       |
| 535             | 276          | 286,2       | 285,9       | 284,7       | 535             | 604,5         | 646,5       | 648         | 643         |
| 536             | 275,7        | 285,6       | 285,6       | 284,1       | 536             | 603           | 645         | 646         | 641,5       |
| 537             | 275,4        | 285,3       | 285         | 283,8       | 537             | 602           | 643,5       | 645         | 640         |
| 538             | 274,8        | 284,7       | 284,7       | 283,2       | 538             | 600,5         | 642         | 643,5       | 638,5       |
| 539             | 274,5        | 284,1       | 284,1       | 282,9       | 539             | 599,5         | 640,5       | 642         | 637         |
| 540             | 273,9        | 283,8       | 283,8       | 282,3       | 540             | 598           | 639,5       | 640,5       | 636         |
| 541             | 273,6        | 283,5       | 283,2       | 282         | 541             | 597           | 638         | 639,5       | 634,5       |
| 542             | 273          | 282,9       | 282,6       | 281,7       | 542             | 595,5         | 636,5       | 638         | 633         |
| 543             | 272,4        | 282,3       | 282,3       | 281,1       | 543             | 594,5         | 635         | 636,5       | 632         |
| 544             | 272,1        | 282         | 282         | 280,5       | 544             | 593           | 634         | 635         | 630,5       |
| 545             | 271,8        | 281,7       | 281,4       | 280,2       | 545             | 592           | 632,5       | 634         | 629         |
| 546             | 271,2        | 281,1       | 281,1       | 279,9       | 546             | 590,5         | 631,5       | 632,5       | 628         |
| 547             | 270,6        | 280,8       | 280,5       | 279,3       | 547             | 589,5         | 630         | 631         | 626,5       |
| 548             | 270,3        | 280,2       | 280,2       | 279         | 548             | 588           | 628,5       | 629,5       | 625         |
| 549             | 270          | 279,9       | 279,6       | 278,4       | 549             | 587           | 627,5       | 628,5       | 624         |
| 550             | 269,4        | 279,3       | 279,3       | 278,1       | 550             | 586           | 626         | 627         | 622,5       |
| 551             | 269,1        | 279         | 278,7       | 277,5       | 551             | 585           | 624,5       | 626         | 621,5       |
| 552             | 268,5        | 278,4       | 278,4       | 277,2       | 552             | 583,5         | 623,5       | 624,5       | 620         |

| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 553             | 267,9        | 278,1       | 277,8       | 276,6       | 553             | 582,5         | 622         | 623,5       | 619         |
| 554             | 267,6        | 277,5       | 277,5       | 276,3       | 554             | 581           | 621         | 622         | 617,5       |
| 555             | 267          | 277,2       | 276,9       | 276         | 555             | 580           | 619,5       | 620,5       | 616,5       |
| 556             | 266,7        | 276,6       | 276,6       | 275,4       | 556             | 578,5         | 618,5       | 619,5       | 615         |
| 557             | 266,4        | 276,3       | 276         | 275,1       | 557             | 577,5         | 617         | 618         | 614         |
| 558             | 265,8        | 275,7       | 275,7       | 274,5       | 558             | 576,5         | 616         | 617         | 612,5       |
| 559             | 265,5        | 275,4       | 275,4       | 274,2       | 559             | 575,5         | 614,5       | 615,5       | 611,5       |
| 560             | 264,9        | 274,8       | 274,8       | 273,6       | 560             | 574           | 613,5       | 614,5       | 610         |
| 561             | 264,6        | 274,5       | 274,5       | 273,3       | 561             | 573           | 612         | 613,5       | 609         |
| 562             | 264          | 274,2       | 273,9       | 272,7       | 562             | 572           | 611         | 612         | 607,5       |
| 563             | 263,7        | 273,6       | 273,6       | 272,4       | 563             | 570,5         | 610         | 611         | 606,5       |
| 564             | 263,4        | 273,3       | 273         | 272,1       | 564             | 569,5         | 608,5       | 609,5       | 605,5       |
| 565             | 262,8        | 272,7       | 272,7       | 271,5       | 565             | 568,5         | 607,5       | 608,5       | 604         |
| 566             | 262,5        | 272,4       | 272,1       | 271,2       | 566             | 567,5         | 606         | 607         | 603         |
| 567             | 261,9        | 272,1       | 271,8       | 270,6       | 567             | 566           | 605         | 606         | 602         |
| 568             | 261,6        | 271,5       | 271,2       | 270,3       | 568             | 565           | 603,5       | 604,5       | 600,5       |
| 569             | 261          | 270,9       | 270,9       | 270         | 569             | 564           | 602,5       | 603,5       | 599,5       |
| 570             | 260,7        | 270,6       | 270,6       | 269,4       | 570             | 563           | 601,5       | 602,5       | 598         |
| 571             | 260,4        | 270,3       | 270         | 269,1       | 571             | 562           | 600         | 601         | 597         |
| 572             | 259,8        | 269,7       | 269,7       | 268,5       | 572             | 561           | 599         | 600         | 596         |
| 573             | 259,5        | 269,4       | 269,1       | 268,2       | 573             | 560           | 598         | 598,5       | 594,5       |
| 574             | 258,9        | 268,8       | 268,8       | 267,6       | 574             | 558,5         | 597         | 598         | 593,5       |
| 575             | 258,6        | 268,5       | 268,2       | 267,3       | 575             | 557,5         | 595,5       | 596,5       | 592,5       |
| 576             | 258          | 267,9       | 267,9       | 266,7       | 576             | 556,5         | 594,5       | 595,5       | 591,5       |
| 577             | 257,7        | 267,6       | 267,3       | 266,4       | 577             | 555,5         | 593,5       | 594         | 590         |
| 578             | 257,4        | 267         | 267         | 265,8       | 578             | 554,5         | 592,5       | 593         | 589         |
| 579             | 256,8        | 266,7       | 266,7       | 265,5       | 579             | 553           | 591         | 592         | 588         |
| 580             | 256,5        | 266,1       | 266,1       | 265,2       | 580             | 552           | 590         | 590,5       | 586,5       |
| 581             | 256,2        | 265,8       | 265,8       | 264,6       | 581             | 551           | 589         | 589,5       | 585,5       |
| 582             | 255,6        | 265,2       | 265,2       | 264,3       | 582             | 550           | 587,5       | 588,5       | 584,5       |
| 583             | 255,3        | 264,9       | 264,6       | 263,7       | 583             | 549           | 586,5       | 587,5       | 583,5       |
| 584             | 255          | 264,3       | 264,3       | 263,4       | 584             | 548           | 585,5       | 586         | 582,5       |
| 585             | 254,4        | 263,7       | 264         | 262,8       | 585             | 547           | 584,5       | 585         | 581,5       |
| 586             | 254,1        | 263,4       | 263,4       | 262,5       | 586             | 546           | 583,5       | 584         | 580,5       |
| 587             | 253,5        | 262,8       | 263,1       | 261,9       | 587             | 544,5         | 582,5       | 583         | 579         |
| 588             | 252,9        | 262,5       | 262,5       | 261,6       | 588             | 543,5         | 581         | 581,5       | 578         |
| 589             | 252,3        | 261,9       | 262,2       | 261,3       | 589             | 542,5         | 580         | 580,5       | 577         |
| 590             | 252          | 261,6       | 261,6       | 260,7       | 590             | 542           | 579         | 580         | 576         |
| 591             | 251,4        | 261         | 261,3       | 260,4       | 591             | 540,5         | 578         | 578,5       | 575         |
| 592             | 250,8        | 260,7       | 260,7       | 260,1       | 592             | 539,5         | 577         | 577,5       | 573,5       |
| 593             | 250,5        | 260,1       | 260,4       | 259,5       | 593             | 538,5         | 575,5       | 576,5       | 572,5       |
| 594             | 249,9        | 259,8       | 260,1       | 259,2       | 594             | 537,5         | 575         | 575,5       | 571,5       |
| 595             | 249,3        | 259,5       | 259,5       | 258,6       | 595             | 536,5         | 573,5       | 574         | 570,5       |
| 596             | 249          | 258,9       | 259,2       | 258         | 596             | 535,5         | 572,5       | 573         | 569,5       |
| 597             | 248,4        | 258,3       | 258,6       | 257,7       | 597             | 534,5         | 571,5       | 572         | 568,5       |
| 598             | 248,1        | 258         | 258,3       | 257,4       | 598             | 533,5         | 570,5       | 571         | 567,5       |



| <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>  | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>RANGE:</b>   | <b>NiCr</b>   | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> | <b>NiCr</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>COMMENT:</b> | <b>600°C</b> |             |             |             | <b>COMMENT:</b> | <b>1000°C</b> |             |             |             |
| <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b> | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   | <b>TIME:</b>    | <b>Kontr</b>  | <b>RM</b>   | <b>MM</b>   | <b>EM</b>   |
| 599             | 247,5        | 257,7       | 258         | 256,8       | 599             | 532,5         | 569,5       | 570         | 566,5       |
| 600             | 246,9        | 257,1       | 257,4       | 256,5       | 600             | 531,5         | 568,5       | 569         | 565,5       |
| 601             | 246,6        | 256,8       | 256,8       | 256,2       | 601             | 530,5         | 567,5       | 568         | 564,5       |
| 602             | 246          | 256,2       | 256,5       | 255,6       | 602             | 530           | 566,5       | 567         | 563,5       |
| 603             | 245,7        | 255,9       | 256,2       | 255,3       | 603             | 528,5         | 565,5       | 566         | 562,5       |
| 604             | 245,4        | 255,3       | 255,6       | 254,7       | 604             | 527,5         | 564,5       | 565         | 561         |
| 605             | 244,8        | 255         | 255,3       | 254,4       | 605             | 526,5         | 563,5       | 564         | 560         |
| 606             | 244,5        | 254,4       | 254,7       | 254,1       | 606             | 525,5         | 562,5       | 562,5       | 559,5       |
| 607             | 244,2        | 254,1       | 254,4       | 253,5       | 607             | 524,5         | 561         | 561,5       | 558,5       |
| 608             | 243,6        | 253,8       | 254,1       | 253,2       | 608             | 524           | 560         | 560,5       | 557         |
| 609             | 243          | 253,2       | 253,5       | 252,9       | 609             | 523           | 559,5       | 559,5       | 556         |
| 610             | 242,7        | 252,9       | 253,2       | 252,3       | 610             | 522           | 558         | 558,5       | 555         |
| 611             | 242,4        | 252,3       | 252,6       | 252         | 611             | 521           | 557         | 557,5       | 554,5       |
| 612             | 241,8        | 252         | 252,3       | 251,4       | 612             | 520           | 556         | 556,5       | 553,5       |
| 613             | 241,5        | 251,4       | 252         | 251,1       | 613             | 519           | 555         | 555,5       | 552         |
| 614             | 240,9        | 251,1       | 251,4       | 250,5       | 614             | 518           | 554         | 554,5       | 551         |
| 615             | 240,6        | 250,5       | 251,1       | 250,2       | 615             | 517           | 553         | 553,5       | 550         |
| 616             | 240,3        | 250,2       | 250,5       | 249,9       | 616             | 516,5         | 552         | 552,5       | 549,5       |
| 617             | 239,7        | 249,9       | 250,2       | 249,6       | 617             | 515           | 551         | 551,5       | 548,5       |
| 618             | 239,4        | 249,6       | 249,9       | 249         | 618             | 514           | 550,5       | 550,5       | 547,5       |
| 619             | 238,8        | 249         | 249,3       | 248,7       | 619             | 513           | 549,5       | 549,5       | 546,5       |
| 620             | 238,5        | 248,7       | 249         | 248,4       | 620             | 512,5         | 548,5       | 548,5       | 545,5       |
| 621             | 238,2        | 248,4       | 248,4       | 247,8       | 621             | 511,5         | 547,5       | 547,5       | 544,5       |
| 622             | 237,6        | 247,8       | 248,1       | 247,5       | 622             | 510,5         | 546,5       | 546,5       | 543,5       |
| 623             | 237,3        | 247,5       | 247,8       | 246,9       | 623             | 509,5         | 545,5       | 546         | 542,5       |
| 624             | 236,7        | 246,9       | 247,5       | 246,6       | 624             | 508,5         | 544,5       | 544,5       | 541,5       |
| 625             | 236,4        | 246,6       | 246,9       | 246,3       | 625             | 508           | 543,5       | 544         | 540,5       |
| 626             | 236,1        | 246,3       | 246,6       | 245,7       | 626             | 507           | 542,5       | 542,5       | 540         |
| 627             | 235,8        | 245,7       | 246         | 245,4       | 627             | 505,5         | 541,5       | 542         | 539         |
| 628             | 235,2        | 245,4       | 245,7       | 245,1       | 628             | 505           | 540,5       | 541         | 538         |
| 629             | 234,9        | 244,8       | 245,4       | 244,5       | 629             | 504           | 539,5       | 540         | 537         |
| 630             | 234,3        | 244,5       | 244,8       | 244,2       | 630             | 503           | 539         | 539         | 536         |
| 631             | 234          | 244,2       | 244,5       | 243,9       | 631             | 502           | 538         | 538         | 535         |
| 632             | 233,7        | 243,6       | 244,2       | 243,3       | 632             | 501,5         | 537         | 537         | 534         |
| 633             | 233,1        | 243,3       | 243,6       | 243         | 633             | 500,5         | 536         | 536         | 533         |
| 634             | 232,8        | 243         | 243,3       | 242,7       | 634             | 499,5         | 535         | 535         | 532,5       |
| 635             | 232,5        | 242,4       | 243         | 242,4       | 635             | 499           | 534         | 534,5       | 531,5       |
| 636             | 232,2        | 242,1       | 242,4       | 241,8       | 636             | 498           | 533,5       | 533,5       | 530,5       |
| 637             | 231,6        | 241,8       | 242,1       | 241,5       | 637             | 497           | 532,5       | 532,5       | 529,5       |
| 638             | 231,3        | 241,5       | 241,8       | 240,9       | 638             | 496,5         | 531,5       | 531,5       | 528,5       |
| 639             | 231          | 240,9       | 241,2       | 240,6       | 639             | 495           | 530,5       | 530,5       | 527,5       |
| 640             | 230,4        | 240,6       | 240,9       | 240,3       | 640             | 494,5         | 529,5       | 530         | 526,5       |
| 641             | 230,1        | 240         | 240,6       | 240         | 641             | 493,5         | 528,5       | 529         | 526         |
| 642             | 229,5        | 239,7       | 240         | 239,4       | 642             | 492,5         | 528         | 528         | 525         |
| 643             | 229,2        | 239,4       | 239,7       | 239,1       | 643             | 492           | 527         | 527         | 524         |
| 644             | 228,9        | 239,1       | 239,4       | 238,8       | 644             | 490,5         | 526         | 526         | 523         |

## **Popis slika**

### **Poglavlje 1**

Slika 1. 1: Sastav građevinskog otpada, [4] .....8

### **Poglavlje 2**

Slika 2. 1: Tlačna čvrstoća betona s drobljenom opekom kao funkcija udjela cementa, [8] .....21

Slika 2. 2: Razvoj tlačne čvrstoće u ovisnosti o postotku zamjene prirodnog agregata s drobljenom opekom, [18] ..22

Slika 2. 3: Tlačne čvrstoće betona, [18] .....22

Slika 2. 4: Dinamički modul elastičnosti, vlačna i tlačna čvrstoća betona s drobljenim crijepom, [26] .....25

Slika 2. 5: Ovisnost tlačne čvrstoće betona s drobljenom opekom i tlačne čvrstoće opeke, [16] .....25

Slika 2. 6: Shema površina loma za različite agregate, [27] .....28

Slika 2. 7: Deformacije betona pod maksimalnim naprezanjem, [19] .....29

Slika 2. 8: Skupljanje betona sa sitnom frakcijom reciklirane opeke, [18] .....31

Slika 2. 9: Skupljanje betona s krupnom frakcijom reciklirane opeke, [18] .....31

Slika 2. 10: Skupljanje betona sa sitnom frakcijom reciklirane opeke, [20] .....31

Slika 2. 11: Skupljanje betona sa sitnom i krupnom frakcijom reciklirane opeke, [18] .....31

Slika 2. 12: Statički modul elastičnosti betona s recikliranom .....32

Slika 2. 13: Apsorpcija vode betona za različite mješavine betona s recikliranom opekom\*, [18] .....33

Slika 2. 14: Vodopropusnost za različite mješavine betona\*, [18] .....33

Slika 2. 15: Broj ciklusa smrzavanja/odmrzavanja koje su izdržali uzorci .....34

Slika 2. 16: Redukcija tlačne čvrstoće betona normalne početne čvrstoće pri izlaganju visokim temperaturama, [37] .....36

Slika 2. 17: Redukcija tlačne čvrstoće betona visoke početne čvrstoće pri izlaganju visokim temperaturama, [37] ..36

Slika 2. 18: Redukcija tlačne čvrstoće betona s dodatkom aeranta .....36

Slika 2. 19: Strop u obliku obrnutog korita ojačan dijafragmama .....40

Slika 2. 20: Međusobno povezivanje susjednih ploča .....40

Slika 2. 21: Strop u obliku obrnutog korita ojačan dijafragmama .....40

Slika 2. 22: Stropni sustavi s in-situ ugrađenim gornjim betonskim slojem i s .....42

Slika 2. 23: Stropni sustavi s kompozitnim gornjim slojem betona i s .....42

Slika 2. 24: Stropni sustavi s djelomičnom ugradnjom gornjeg sloja betona .....42

Slika 2. 25: Montažni stropni sustavi sastavljeni od nosača i blokova, [46] .....42

|  |    |
|--|----|
| Slika 2. 26: Sivi strop – osnovni tipovi .....   | 43 |
| Slika 2. 27: Poprečni presjek bijelog stropa, [47].....  | 43 |
| Slika 2. 28: Poprečni presjek fert stropa.....   | 45 |
| Slika 2. 29: Nazivne vrijednosti razmaka šipki armature .....  | 53 |
| Slika 2. 30: Pozicioniranje armaturnih petlji i rešetkastog čeličnog nosača.....   | 53 |
| Slika 2. 31: Definicije dimenzija nosača, [46].....  | 54 |
| Slika 2. 32: Dimenzije stope pojasnice, [46].....  | 54 |
| Slika 2. 33: Primjeri položaja točaka za podizanje nosača, [46] .....  | 57 |
| Slika 2. 34: Zadržani preostali profil, [46] .....   | 58 |
| Slika 2. 35: Ekvivalentna debljina betona, [46].....   | 58 |
| Slika 2. 36: Definicija efektivnih bridova, $b_j$ , na spojnim površinama, [46] .....  | 62 |
| Slika 2. 37: Definicija razine provjere za armirane i prearmirane nosače .....   | 68 |
| Slika 2. 38: Primjer polunosivog bloka, [55].....  | 70 |
| Slika 2. 39: Primjeri nosivih blokova, [55] .....  | 70 |
| Slika 2. 40: Primjer blokova s horizontalnim i vertikalnim šupljinama, [55].....   | 70 |
| Slika 2. 41: Prikaz oznaka i dimenzija betonskih blokova, [55].....  | 71 |
| Slika 2. 42: Minimalne debljine gornje plohe nosivih betonskih blokova, [55].....  | 71 |
| Slika 2. 43: Shema opterećenja i uvjeti oslanjanja pri ispitivanju bloka opterećenog koncentriranim opterećenjem, [55].....                      | 72 |
| Slika 2. 44: Nosivi i polunosivi blokovi za ispitivanje horizontalne tlačne čvrstoće blokova, [55].....  | 73 |
| Slika 2. 45: Metoda nanošenja opterećenja pri ispitivanju horizontalne tlačne čvrstoće, [55].....  | 73 |
| Slika 2. 46: Shema opterećenja i uvjeti oslanjanja pri ispitivanju čvrstoće pri savijanju blokova, [55].....                                     | 74 |
| Slika 2. 47: Shema opterećenja i uvjeti oslanjanja pri ispitivanju čvrstoće u vertikalnom smjeru, [55] .....                                     | 75 |
| Slika 2. 48: Model odnosa tlačnog naprezanja i deformacije betona sa silicijskim i vapnenačkim agregatom pri povišenim temperaturama, [58].....  | 79 |
| Slika 2. 49: Parametri odnosa naprezanje-deformacija za beton pri povišenim temperaturama prema slici 2.48 i tablici 2.29, [58] .....            | 79 |
| Slika 2. 50: Odnos naprezanje-deformacija za beton sa silicijskim agregatom pri jednoosnom tlaku kod povišenih temperatura, [58, 60] .....       | 80 |
| Slika 2. 51: Koeficijent $kc\theta$ kojim se uzima u obzir umanjenje vlačne čvrstoće betona, $f_{ctk}$ , pri povišenim temperaturama, [58] ..... | 80 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 2. 52: Ukupno toplinsko produljenje.....  | 81 |
| Slika 2. 53: Specifična toplina betona, [58] .....  | 81 |
| Slika 2. 54: Toplinska vodljivost betona, [58] .....  | 82 |
| Slika 2. 55: Gustoća betona pri visokim temperaturama, [60] .....   | 82 |
| Slika 2. 56: Koeficijent, $ks(\theta)$ , umanjenja karakteristične čvrstoće betonskog čelika, $fyk$ , pri povišenim temperaturama, [58] ..... | 83 |
| Slika 2. 57: Model ovisnosti naprezanje-deformacija za betonski čelik pri povišenim temperaturama, [58] .....                                 | 84 |
| Slika 2. 58: Toplinsko produljenje čelika, [58] .....   | 84 |
| Slika 2. 59: Specifična toplina čelika, [60].....   | 85 |
| Slika 2. 60: Toplinska vodljivost, [60].....  | 85 |
| Slika 2. 61: Ovisnost $\eta fi$ o odnosu $Qk1/Gk$ za različite $\psi_{1,1}$ , [58] .....  | 91 |

### **Poglavlje 3**

|  |     |
|--|-----|
| Slika 3. 1: Osnovni koraci u procesu znanstvenog eksperimentiranja, [62, 63].....  | 95  |
| Slika 3. 2: Opći model postupka provođenja eksperimentalnog ispitivanja, [62, 65] .....  | 96  |
| Slika 3. 3: Primjer odzivne površine (dva faktora sa po deset razina).....   | 101 |
| Slika 3. 4: Eksperimentalni prostor za potpuni faktorski plan sa dva faktora na tri razine .....   | 103 |
| Slika 3. 5: Eksperimentalni prostor za djelomični faktorski plan - dva faktora po tri razine, jedan definirajući kontrast ( $n = 3, k = 2, m = 1$ )..... | 104 |
| Slika 3. 6: Primjer centralno kompozitnog plana eksperimenta ( $k=2$ ).....  | 104 |
| Slika 3. 7: Primjer Box-Behnkenovog dizajna ( $k=3$ ).....   | 106 |

### **Poglavlje 4**

|  |     |
|--|-----|
| Slika 4. 1: Krivulje prosijavanja agregata .....   | 112 |
| Slika 4. 2: Korelacija između gustoće betona u svježem i očvrslom stanju .....                             | 133 |
| Slika 4. 3: Korelacija između gustoće u svježem stanju i tlačne čvrstoće (56 dan) .....                    | 133 |
| Slika 4. 4: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i tlačne čvrstoće (28 dan) .....            | 133 |
| Slika 4. 5: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i tlačne čvrstoće (56 dan) .....            | 133 |
| Slika 4. 6: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i vlačne čvrstoće savijanjem (56 dan) ..... | 133 |
| Slika 4. 7: Korelacija između gustoće betona u očvrslom stanju i statičkog modula elastičnosti .....       | 133 |
| Slika 4. 8: Korelacija između tlačne čvrstoće 28 dan i tlačne čvrstoće 56 dan .....                        | 133 |
| Slika 4. 9: Korelacija između tlačne čvrstoće statičkog modula elastičnosti .....                          | 133 |
| Slika 4. 10: Korelacija između tlačne i vlačne čvrstoće savijanjem.....                                    | 133 |

|  |     |
|--|-----|
| Slika 4. 11: Postotne pogreške za svojstva A do I.....                                   | 140 |
| <b>Poglavlje 5</b>   |     |
| Slika 5. 1: Drobilica za opeku .....   | 145 |
| Slika 5. 2: Pokretna drobilica za crijep.....  | 145 |
| Slika 5. 3: Granulometrijski .....   | 146 |
| Slika 5. 4: Granulometrijski .....   | 146 |
| Slika 5. 5: Granulometrijski .....   | 146 |
| Slika 5. 6: Mješalica za izradu.....   | 149 |
| Slika 5. 7 a): Izgled mješavine .....  | 149 |
| Slika 5. 7 b): Detalj mješavine .....  | 149 |
| Slika 5. 8: Konzistencija slijeganjem RM .....   | 150 |
| Slika 5. 9: Konzistencija slijeganjem EM-B42 .....                                       | 150 |
| Slika 5. 10: Konzistencija slijeganjem MM-B10 .....                                      | 150 |
| Slika 5. 11: Uzorci u kalupima .....   | 152 |
| Slika 5. 12: Njega uzoraka .....   | 152 |
| Slika 5. 13: Mjerenje dimenzija uzoraka .....  | 153 |
| Slika 5. 14: Mjerenje mase uzoraka .....   | 153 |
| Slika 5. 15: Ispitivanje brzine .....  | 153 |
| Slika 5. 16: Tlačna čvrstoća na.....   | 153 |
| Slika 5. 17: Ispitivanje vlačne .....  | 153 |
| Slika 5. 18: Uzorci za ispitivanje plinopropusnosti .....                                | 153 |
| Slika 5. 19: Oblik tlačnog sloma uzoraka.....  | 153 |
| Slika 5. 20: Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem.....                    | 153 |
| Slika 5. 21: Volumne deformacije mješavine RM.....                                       | 156 |
| Slika 5. 22: Volumne deformacije mješavine EM-BM42 .....                                 | 156 |
| Slika 5. 23: Volumne deformacije mješavine MM- B10.....                                  | 157 |
| Slika 5. 24: Usporedba volumnih deformacija mješavina RM, EM-BM42 i MM-B10 .....         | 157 |
| Slika 5. 25: Usporedba svojstava betona u očvrslom stanju mješavina BM42 i EM-BM42 ..... | 158 |
| Slika 5. 26: Usporedba svojstava u očvrslom stanju mješavina B10 i MM-B10.....           | 158 |
| Slika 5. 27: Električna peć.....   | 160 |
| Slika 5. 28: Raspored uzoraka .....  | 160 |

|   |     |
|---|-----|
| Slika 5. 29: Priključak termosondi .....  | 160 |
| Slika 5. 30: Režim zagrijavanja i hlađenja peći, 200°C i 600°C .....                          | 160 |
| Slika 5. 31: Režim zagrijavanja i hlađenja peći, 800°C i 1000°C .....                         | 160 |
| Slika 5. 32: Režim zagrijavanja i hlađenja uzoraka, 200°C .....                               | 161 |
| Slika 5. 33a): Režim zagrijavanja i hlađenja uzoraka, 800°C .....                             | 161 |
| Slika 5. 33b): Detalj A - zagrijavanje i hlađenje uzoraka, 725°C – 745°C .....                | 161 |
| Slika 5. 34 Masa uzoraka nakon izlaganja visokim.....   | 162 |
| Slika 5. 35 Gubitak mase nakon zagrijavanja .....   | 162 |
| Slika 5. 36 Volumen uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama.....                        | 162 |
| Slika 5. 37 Relativni volumen uzoraka kao funkcija povišenih temperatura .....                | 162 |
| Slika 5. 38 Tlačna čvrstoća betona nakon izlaganja visokim temperaturama .....                | 163 |
| Slika 5. 39 Rezidualna tlačna čvrstoća .....  | 163 |
| Slika 5. 40 Vlačna čvrstoća betona nakon izlaganja visokim temperaturama.....                 | 164 |
| Slika 5. 41 Rezidualna vlačna čvrstoća .....  | 164 |
| Slika 5. 42: Modul elastičnosti nakon izlaganja visokim temperaturama .....                   | 165 |
| Slika 5. 43: Rezidualni modul elastičnosti .....  | 165 |
| Slika 5. 44: Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa nakon izlaganja visokim temperaturama ..... | 165 |
| Slika 5. 45: Rezidualna brzina prolaza ultrazvučnog impulsa.....                              | 165 |
| Slika 5. 46: Plinopropusnost betona nakon izlaganja visokim temperaturama .....               | 166 |
| Slika 5. 47: Izgled površine betona nakon izlaganja visokim temperaturama.....                | 167 |
| Slika 5. 48: Promjena boje betona nakon izlaganja visokim temperaturama .....                 | 168 |
| Slika 5. 49: Izgled površine odlamanja betona nakon izloženosti temperaturi od 1000°C .....   | 168 |

## **Poglavlje 6**

|   |     |
|---|-----|
| Slika 6. 1: Izgled kalupa za izradu blokova.....                      | 169 |
| Slika 6. 2: Dimenzije blokova .....                                   | 169 |
| Slika 6. 3: Izrada BlokOLa.....                                       | 170 |
| Slika 6. 4: Izgled gotovih BlokOLa.....                               | 170 |
| Slika 6. 5: Priprema uzoraka za ispitivanje .....                     | 170 |
| Slika 6. 6: Ispitivanje otpornosti na koncentrirano opterećenje ..... | 170 |
| Slika 6. 7: Ispitivanje tlačne čvrstoće u horizontalnom smjeru .....  | 171 |
| Slika 6. 8: Ispitivanje čvrstoće pri savijanju.....                   | 171 |

|  |     |
|--|-----|
| Slika 6. 9: Masa bloka prije i nakon izlaganja visokim .....                     | 172 |
| Slika 6. 10: Rezidualne mase blokova nakon zagrijavanja.....                     | 172 |
| Slika 6. 11: Volumen blokova nakon izlaganja visokim temperaturama .....         | 173 |
| Slika 6. 12: Relativni volumen blokova kao funkcija povišenih temperatura .....  | 173 |
| Slika 6. 13: Gornja ploha blokova nakon izlaganja visokim temperaturama .....    | 173 |
| Slika 6. 14: Detalji pukotina vidljivi na bridovima stranica BlokOLa .....       | 174 |
| Slika 6. 15: Rezidualna otpornost na djelovanje koncentriranog opterećenja ..... | 174 |
| Slika 6. 16: Rezidualna tlačna čvrstoća bloka u horizontalnom smjeru .....       | 174 |
| Slika 6. 17: Rezidualna čvrstoća bloka pri savijanju .....                       | 175 |
| Slika 6. 18: Toplinska provodljivost uzorka betona .....                         | 177 |
| Slika 6. 19: Sumarni prikaz svojstava BlokOLa.....                               | 178 |

## **Popis tablica**

### **Poglavlje 1**

|  |   |
|--|---|
| Tablica 1. 1: Europski podaci o proizvodnji i primjeni recikliranog agregata .....   | 5 |
| Tablica 1. 2: Prikaz proizvodnje, uvoza, izvoza i potrošnje prirodnih sirovina u Republici Hrvatskoj za 2006. godinu, [3]..... | 6 |
| Tablica 1. 3: Prikaz proizvodnje kamenih agregata u zemljama Europske unije i Republici Hrvatskoj u 2006. godini, [3].....     | 7 |
| Tablica 1. 4: Procijenjena količina građevinskog otpada u Hrvatskoj, [5].....  | 8 |

### **Poglavlje 2**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 2. 1: Maksimalne dozvoljene vrijednosti udjela štetnih sastojaka u recikliranom agregatu, [11] .....  | 17 |
| Tablica 2. 2: Upotreba recikliranog agregata za beton prema regulativi u RH .....   | 19 |
| Tablica 2. 3: Zakonska regulativa za reciklirani agregat.....   | 20 |
| Tablica 2. 4: Rezultati ispitivanja svojstava recikliranog agregata, [13].....  | 20 |
| Tablica 2. 5: Tlačna čvrstoća betona s prirodnim agregatom, drobljenom i recikliranom opekom .....  | 23 |
| Tablica 2. 6: Tipovi i tlačne čvrstoće opeka upotrijebljenih u proizvodnji betona, [16].....  | 25 |
| Tablica 2. 7: Rezultati ispitivanja betona s drobljenom opekom i s dodatkom aeranta, [16].....  | 26 |
| Tablica 2. 8: Čvrstoća betona pri savijanju s različitim udjelima drobljene opeke i prirodnog agregata .....  | 26 |
| Tablica 2. 9: Modul elastičnosti betona s recikliranom opekom i prirodnim agregatom .....   | 29 |
| Tablica 2. 10: Svojstva betona s recikliranom opekom kao agregatom i s dodatkom polimera, [30] .....  | 31 |
| Tablica 2. 11: Smanjenje čvrstoće uzoraka izloženih smrzavanju, [30].....   | 34 |
| Tablica 2. 12: Vrijednosti laboratorijskog i računskog koeficijenta toplinske provodljivosti betona od drobljene opeke sa i bez dodatka polimera, [30].....                                       | 35 |
| Tablica 2. 13: Minimalne vrijednosti tlačne čvrstoće betona na kraju procesa njege u ovisnosti o razredu izloženosti okolišu u kojemu će se predgotovljeni betonski proizvod nalaziti, [53] ..... | 48 |
| Tablica 2. 14: Ovisnost maksimalne temperature zagrijavanja betona o okolišu u kojemu će se nalaziti predgotovljeni betonski proizvod, [53] .....   | 48 |
| Tablica 2. 15: Dopušteno odstupanje izmjera poprečnog presjeka predgotovljenoga betonskog proizvoda te položaja nenapete i napete armature unutar poprečnog presjeka, [53] .....                  | 49 |
| Tablica 2. 16: Koeficijent toplinske provodljivosti za proizvod u suhom stanju pri temperaturi 10°C, [53].....  | 50 |
| Tablica 2. 17: Razredba uvjeta okoliša za predgotovljene betonske proizvode, [53].....  | 51 |



|   |    |
|---|----|
| Tablica 2. 18: Minimalni zaštitni sloj (mm) za predgotovljene betonske proizvode, [53] .....  | 51 |
| Tablica 2. 19: Parcijalni koeficijenti sigurnosti za beton $\gamma_c$ , [53, 54] .....  | 56 |
| Tablica 2. 20: Parcijalni koeficijenti sigurnosti za armaturu $\gamma_s$ , [53, 54] .....   | 56 |
| Tablica 2. 21: Razredi požarne otpornosti za različite stropne sustave (bez gipsanog morta s donje strane), [46] .....  | 59 |
| Tablica 2. 22: Nadzor proizvodnog postupka, [46] .....  | 59 |
| Tablica 2. 23: Nadzor završenog proizvoda, [46] .....   | 60 |
| Tablica 2. 24: Tipovi betonskih blokova, [55] .....   | 72 |
| Tablica 2. 25: Kriteriji potvrđivanja karakteristične otpornosti bloka na djelovanje koncentrirane sile, [55] .....   | 72 |
| Tablica 2. 26: Kriterij potvrđivanja karakteristične tlačne čvrstoće betonskog bloka u horizontalnom smjeru, [55] .....   | 73 |
| Tablica 2. 27: Broj uzoraka bloka za ispitivanje, [55] .....  | 76 |
| Tablica 2. 28: Nadzor završenog proizvoda, [55] .....   | 76 |
| Tablica 2.29: Vrijednosti glavnih parametara odnosa naprezanje-deformacije betona sa silicijskim i vapnenačkim agregatom pri povišenim temperaturama (područje I na slici 2.48), [58] ..... | 79 |
| Tablica 2. 30: Preporučene vrijednosti za $\epsilon_{c1}(\theta)$ i $\epsilon_{cu}(\theta)$ i dopušteno područje $\epsilon_{c1}(\theta)$ , [58] .....                                       | 80 |
| Tablica 2. 31: Okvirne vrijednosti najmanjih debljina nenosivih (pregradnih) zidova .....   | 92 |
| Tablica 2. 32: Okvirne vrijednosti najmanjih izmjera i osnih razmaka za nosive armiranobetonske zidove, [58] .....  | 92 |
| Tablica 2. 33: Okvirne vrijednosti najmanjih izmjera i osnih razmaka za armiranobetonske stupove, [58] .....  | 93 |
| Tablica 2. 34: Okvirne vrijednosti najmanjih izmjera i osnih razmaka za slobodno oslonjene armiranobetonske i prednapete grede, [58] .....  | 93 |

### **Poglavlje 3**

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 3. 1: Svojstva eksperimentalnih planova: CCC, CCI, CCF i Box-Behnkenovog plana ..... | 106 |
|--|-----|

### **Poglavlje 4**

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 4. 1: Sumarni prikaz potrebnih ispitivanja i njihovih troškova .....                             | 107 |
| Tablica 4. 2: Granice faktora .....  | 108 |
| Tablica 4. 3: Broj eksperimentalnih ispitivanja obzirom na vrstu plana eksperimenta .....                | 109 |
| Tablica 4. 4: Sastav betonskih mješavina prema Box-Behnkenovom planu eksperimenta .....                  | 109 |
| Tablica 4. 5: Popis ispitivanja svojstava betona u preliminarnoj fazi eksperimentalnog ispitivanja ..... | 111 |
| Tablica 4. 6: Razredi agregata prema HRN EN 12620 .....  | 113 |
| Tablica 4. 7: Razred indeksa oblika zrna .....   | 113 |
| Tablica 4. 8: Sadržaj sitnih čestica .....   | 114 |
| Tablica 4. 9: Nasipna gustoća i postotak šupljina .....  | 114 |

|   |     |
|---|-----|
| Tablica 4. 10: Gustoća zrna i upijanje vode .....   | 115 |
| Tablica 4. 11: Kemijska analiza opeke i crijepa.....  | 116 |
| Tablica 4. 12: Otpornost na drobljenje krupnog agregata .....   | 116 |
| Tablica 4. 13: Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje - ispitivanje magnezijevim sulfatom .....                  | 117 |
| Tablica 4. 14: Karakteristične vrijednosti svojstava za cement CEM I 42,5 N.....                                | 118 |
| Tablica 4. 15: Sastav betonskih mješavina.....  | 119 |
| Tablica 4. 16: Svojstva svježeg betona .....  | 127 |
| Tablica 4. 17: Svojstva betona u očvrslom stanju .....  | 128 |
| Tablica 4. 18: Kriteriji za koeficijent korelacije.....   | 131 |
| Tablica 4. 19: Matrica korelacije komponenti betona, svojstava svježeg betona i svojstava očvrsllog betona..... | 132 |
| Tablica 4. 20: Dozvoljeni rasponi vrijednosti ispitivanih svojstava .....                                       | 137 |
| Tablica 4. 21: Mješavine koje zadovoljavaju uvjete B, D, E, F i H iz tablice 4.20.....                          | 137 |
| Tablica 4. 22: Parametri modela drugog reda .....   | 138 |
| Tablica 4. 23: Pokazatelji točnosti modela.....   | 141 |
| Tablica 4. 24: Primjer određivanja najbliže točke eksperimentalnog prostora.....                                | 142 |
| Tablica 4. 25: Mješavine prihvatljive na temelju modela .....   | 142 |
| Tablica 4. 26: Izračunate vrijednosti svojstava .....   | 142 |
| Tablica 4. 27: Izračunate optimalnosti mješavina .....  | 143 |
| Tablica 4. 28: Mješavine za blok s najvišom optimalnosti.....   | 144 |

## **Poglavlje 5**

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 5. 1: Razred indeksa oblika zrna .....   | 145 |
| Tablica 5. 2: Gustoća zrna i upijanje vode prema HRN EN 1097-6 .....                                     | 146 |
| Tablica 5. 3: Granulometrijski sastav dolomitnog punila.....   | 147 |
| Tablica 5. 4: Tehnički podatci za ViscoCrete - 20 Gold .....   | 147 |
| Tablica 5. 5: Sastav referentne betonske mješavine, <b>RM</b> .....                                      | 148 |
| Tablica 5. 6: Sastav optimalne betonske mješavine odabrane na temelju eksperimenta, <b>EM-BM42</b> ..... | 148 |
| Tablica 5. 7: Sastav optimalne betonske mješavine na temelju matematičkog modela, <b>MM-B10</b> .....    | 148 |
| Tablica 5. 8: Pregled ispitivanja betona pri sobnoj temperaturi .....                                    | 149 |
| Tablica 5. 9: Pregled ispitivanja betona nakon izlaganja uzoraka 200°C, 600°C i 1000°C. ....             | 149 |
| Tablica 5. 10: Svojstva svježeg betona za mješavine RM, EM-BM42, i MM-B10 .....                          | 150 |

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 5. 11: Usporedba rezultata mješavina B10 i MM-B10 .....                                    | 150 |
| Tablica 5. 12: Usporedba eksperimentalno ispitanih mješavina.....                                  | 151 |
| Tablica 5. 13: Dimenzije uzoraka za ispitivanje svojstava očvrsllog betona.....                    | 152 |
| Tablica 5. 14: Svojstva očvrsllog betona pri starosti uzoraka od 28 dana .....                     | 154 |
| Tablica 5. 15: Svojstva očvrsllog betona pri starosti uzoraka od 56 dana .....                     | 154 |
| Tablica 5. 16: Razlika vrijednosti izmjerenih svojstava mješavina BM42 i EM-BM42 .....             | 158 |
| Tablica 5. 17: Razlika vrijednosti izmjerenih i izračunatih svojstava mješavina B10 i MM-B10 ..... | 159 |

## **Poglavlje 6**

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 6. 1: Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava blokova.....  | 171 |
| Tablica 6. 2: Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava blokova nakon izlaganja visokim temperaturama .....                                       | 174 |
| Tablica 6. 3: Rezultati proračuna akustičnih svojstava BlokOLa.....  | 176 |
| Tablica 6. 4: Koeficijent toplinske provodljivosti za BlokOL u suhom stanju.....   | 177 |
| Tablica 6. 5: Rezultati proračuna nosivosti stropnog bloka s rezidualnim čvrstoćama nakon 200°C, 600°C i 800°C, prema preporukama [95] i [96]..... | 181 |