

# Ponašanje armirano-betonskih okvira s ispunom pri djelovanju potresa

---

Zovkić, Jurko

Doctoral thesis / Disertacija

2013

*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:133:614708>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**



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

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK

**Jurko Zovkić**

**PONAŠANJE ARMIRANO-BETONSKIH OKVIRA  
S ISPUNOM PRI DJELOVANJU POTRESA**

**DOKTORSKI RAD**

Osijek, svibanj 2013.

DOKTORSKI RAD

**PONAŠANJE ARMIRANO-BETONSKIH OKVIRA  
S ISPUNOM PRI DJELOVANJU POTRESA**

**PODACI O AUTORU:**

Ime i prezime: Dr.sc. Jurko Zovkić, dipl.ing.građ.  
Mjesto, datum i godina rođenja: Vinkovci, Republika Hrvatska, 18.04.1978.  
Diplomirao: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku,  
Građevinski fakultet Osijek, 2001.  
Magistrirao: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku,  
Građevinski fakultet Osijek, 2007.  
Zaposlen: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku,  
Građevinski fakultet Osijek (od 2001.)

**PODACI O DOKTORSKOM RADU:**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti  
Znanstveno polje: Građevinarstvo  
Znanstvena grana: Nosive konstrukcije  
Mentor: Prof.dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ.

**POSTUPAK OCJENE I OBRANA:**

*Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorskog rada u sastavu*

Prof dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ., redoviti profesor u trajnom zvanju,  
Prof dr.sc. Dragan Morić, dipl.ing.građ., redoviti profesor u trajnom zvanju, i  
Prof.dr.sc. Ivica Guljaš, dipl.ing.građ., izvanredni profesor

je imenovalo Fakultetsko vijeće Građevinskog Fakulteta Osijek, na 138. redovitoj sjednici  
održanoj 13. ožujka 2012. godine.

Temu doktorskog rada prihvatilo je Fakultetsko vijeće Građevinskog Fakulteta Osijek, na  
139. redovitoj sjednici održanoj 24. travnja 2012. godine.

Za mentora je imenovan prof.dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ., redoviti profesor u  
trajnom zvanju.

***Povjerenstvo za ocjenu doktorskog rada u sastavu***

Prof.dr.sc. Ivica Guljaš, dipl.ing.građ., izvanredni profesor,

GF Osijek, predsjednik,

Prof dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ., redoviti profesor u trajnom zvanju,

GF Osijek, član i mentor, i

Prof dr.sc. Mehmed Čaušević, dipl.ing.građ., redoviti profesor u trajnom zvanju,

GF Rijeka, član

je imenovalo Fakultetsko vijeće Građevinskog Fakulteta Osijek, na 146. redovitoj sjednici održanoj 12. ožujka 2013. godine.

***Povjerenstvo za obranu doktorskog rada u sastavu***

Prof.dr.sc. Ivica Guljaš, dipl.ing.građ., izvanredni profesor,

GF Osijek, predsjednik,

Prof dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ., redoviti profesor u trajnom zvanju,

GF Osijek, član i mentor,

Prof dr.sc. Mehmed Čaušević, dipl.ing.građ., redoviti profesor u trajnom zvanju,

GF Rijeka, član, i

Prof dr.sc. Aleksandar Jurić, dipl.ing.građ., izvanredni profesor,

GF Osijek, član u zamjeni

je imenovalo Fakultetsko vijeće Građevinskog Fakulteta Osijek, na 147. redovitoj sjednici održanoj 30. travnja 2013. godine.

Mjesto i datum obrane:

Građevinski fakultet Osijek, 23. svibnja 2013.



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK

**JURKO ZOVKIĆ**

**PONAŠANJE ARMIRANO-BETONSKIH OKVIRA  
S ISPUNOM PRI DJELOVANJU POTRESA**

**DOKTORSKI RAD**

Osijek, svibanj 2013.

MENTOR RADA:

**PROF.DR.SC. VLADIMIR SIGMUND, DIPL.ING.GRAĐ.**

DOKTORSKI RAD IMA: 446 stranica,  
316 slika,  
178 tablica.

## ZAHVALA

---

Stigavši do kraja puta u ovome istraživanju, zaokružio sam još jednu fazu u svome životu. Ova stranica čini mi se premalom kako bih se zahvalio svima onima koji su mi svesrdno pomagali u tome. Zahvaljujem se našim laborantima Zlatku Krstinu, Daliboru Ercegu i Darku Dikliću koji su mi pomagali prilikom provođenja eksperimentalnih ispitivanja u laboratoriju za Eksperimentalnu mehaniku pri Građevinskom fakultetu u Osijeku. Također, zahvalu izražavam kolegicama Mr.sc. Đurđici Matošević i Tanji Kalman, kao i kolegama Dr.sc. Ivanu Radiću, Dr.sc. Davorinu Penavi i Goranu Gaziću. Isto tako, zahvaljujem se Anti Zovkiću i Mariju Gedžiću. Bez njihove velike pomoći, potpore, suradnje i strpljenja, ispitivanja ne bi bila moguća.

Zahvaljujem se dekanu Građevinskog fakulteta u Osijeku Prof.dr.sc. Damiru Markulaku, koji je imao razumijevanja za sve potrebno tijekom provođenja eksperimentalnih ispitivanja. Isto tako, zahvaljujem se prodekanici za nastavu Prof.dr.sc. Lidiji Tadić, koja mi je izlazila u susret prilagođavajući mi raspored nastave kako bih mogao provoditi eksperimentalna ispitivanja, kao i samo pisanje ovoga rada.

Posebno se zahvaljujem voditelju Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku Prof.dr.sc. Ivici Guljašu. Zahvaljujući njegovoj velikoj pomoći, savjetima, razumijevanju i prijateljstvu ovaj rad je lakše bilo privesti kraju. Hvala prijatelju!

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci koju su mi pružali tijekom cijeloga moga školovanja, a posebno tijekom pisanja ovoga rada. Hvala vam što ste me uvijek podržavali i vjerovali u mene. Bez vas ne bi bilo ove disertacije, niti bilo kojeg drugoga moga uspjeha. Hvala na strpljivom podnošenju, zanemarivanju, ohrabrenju koje ste mi pružali u trenucima malodušnosti i iskrenom radovanju svakome mome uspjehu. Ovdje se posebno zahvaljujem bratu Anti, sestrama Katici, Mariji i Josipi, kao i djevojci Marini, koja mi je pružala veliku potporu tijekom pisanja ovoga rada. Hvala ti što si stoički podnosila moje zanemarivanje i odsutnost duhom. Ovaj doktorski rad posvećujem svojim roditeljima.

I na kraju, najveću zahvalnost dugujem svome mentoru, učitelju, uzoru u znanosti i struci, Prof.dr.sc. Vladimiru Sigmundu, koji je nesebično i strpljivo, tijekom svih ovih godina, na mene prenosio svoje znanje i mudrost, a koji je i osmislio cijeli ovaj projekt, osigurao svu potrebnu opremu kao i potreban novac za ovakav projekt. Bez njegovoga povjerenja, suradnje, pomoći, strpljenja, razumijevanja, potpore i pažnje, ovaj rad sigurno ne bi bio moguć. Još jednom, hvala Vam dragi Profesore.

# ŽIVOTOPIS

---

Jurko Zovkić, rođen je 18. travnja 1978. godine u Vinkovcima. Osnovnu školu Vladimir Nazor (kasnije Fra Bernardina Tome Leakovića) završio je u Bošnjacima. Srednju Elektro–Tehničku školu pohađa i završava s izvrsnim uspjehom u Županji.

Građevinski fakultet Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku upisao je 1996. godine. Nakon završene prve godine studija dobiva stipendiju Ministarstva Znanosti i Tehnologije koju prima sve do završetka studija. Dobitnik je Rektorove nagrade za izvrstan semestralni rad iz predmeta Plošni nosači, pod nazivom "*Membranska stanja naprezanja u ljuskama*". Također, jednu godinu prima Sveučilišnu stipendiju kao jedan od 20 najboljih studenata na Sveučilištu u Osijeku. Tijekom studiranja bio je demonstrator iz više nastavnih predmeta (Matematika III, Statika I i II, Otpornost materijala I i II). Diplomirao je 26. lipnja 2001. godine čime je stekao zvanje diplomiranog inženjera građevine (smjer-konstrukcije). Diplomski rad iz predmeta Stabilnost i dinamika konstrukcija pod nazivom "*Usporedba izračuna konstrukcije objekta od 10 katova prema HRN i EC8*" obranio je s izvrsnim uspjehom pod mentorstvom Prof. dr. sc. Vladimira Sigmunda, dipl.ing.građ.

U radni odnos na Građevinski fakultet u Osijeku primljen je od 31. kolovoza 2001. godine u zvanju znanstvenog novaka, te je dio radnoga vremena sudjelovao u izvođenju nastave u sklopu Zavoda za tehničku mehaniku, a dio u radu na istraživačkim projektima. Poslijediplomski znanstveni studij, smjer nosive konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Osijeku upisao je 04. prosinca 2001. godine. Dana 14. studenog 2007. obranio je magistarski rad pod nazivom "*Identifikacija parametara konstrukcije na osnovu dinamičkih mjerenja*" pod mentorstvom Prof.dr.sc. Vladimira Sigmunda, dipl.ing.građ., čime je stekao zvanje magistra znanosti.

Od 2008. godine radi u nastavnom zvanju kao predavač na Građevinskom fakultetu u Osijeku. Kao znanstveni novak, asistent i predavač, sudjelovao je kao suradnik na više znanstvenih projekata. Trenutno, kao suradnik sudjeluje na znanstvenom projektu „*Seizmički proračun okvirnih konstrukcija s ispunom*“ čiji je voditelj i glavni istraživač Prof.dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ.

Do sada je kao autor i koautor objavio jedan udžbenik i više radova kako u domaćim i stranim časopisima, tako i na domaćim i međunarodnim konferencijama. Član je Hrvatskog društva za mehaniku i društva građevinskih inženjera Osijek. Ovlašteni je inženjer građevinarstva i član Hrvatske komore građevinskih inženjera od 2009. godine.

## SAŽETAK

---

U okviru šireg znanstvenoga projekta u ovome radu istražen je njegov dio koji se odnosi na armirano-betonske okvire ispunjene zidnim ispunom. Trenutno dostupni propisi većinom ne uzimaju u obzir zidni ispun pri proračunu takvih konstrukcija, a ako ga i uzimaju, onda je taj proračun vrlo složen. Dosadašnja znanstvena istraživanja neosporno su potvrdila da zidni ispun ima utjecaja na ponašanje armirano-betonskog okvira. Prije svega, to se odnosi na poprečnu nosivost i poprečnu krutost.

U ovom radu provedena su eksperimentalna ispitivanja na armirano-betonskim okvirima koji su naknadno ispunjeni zidnim ispunom. Model armirano-betonskog okvira dobiven je na osnovu modela prototipa koji je pravilna armirano-betonska okvirna konstrukcija tlocrtnih dimenzija 17x16m i visine prve etaže 3,75, te ostalih šest etaža po 3m. Model prototipa projektiran je sukladno važećim propisima (EC2, EC8) koji se izvodi od betona klase C30/37 i armira rebrastom armaturom B500B. Na osnovu takvog modela prototipa, dobiven je stvarni (praktičan) model jednokatnog jednorasponskog armirano-betonskog okvira u mjerilu 1:2,5 pri kojem su poštivana pravila skaliranja.

Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja zidnih elemenata, uzoraka zidnog ispuna, morta (ljepila) s kojim je zidan ispun, dobivene su osnovne mehaničke karakteristike istih, te je izvršena podjela zidnog ispuna na jaki zidni ispun (od opečnih blokova MO10), srednji zidni ispun (od opečnih blokova MO5) i meki zidni ispun (od porobetonskih blokova MO2,5). Podjela je izvršena s ciljem da se vidi kako čvrstoća zidnih elemenata, odnosno zidnoga ispuna utječe na ponašanje armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom.

Ispitano je ukupno 10 modela opterećenih vertikalnim stalnim opterećenjem na stupovima na cikličko statičko horizontalno opterećenje. Ispitana su po tri modela od svake vrste zidnoga ispuna i jedan model praznoga armirano-betonskog okvira. Također, ispitana su i osnovna mehanička svojstva betona i armature od kojih su izrađeni modeli armirano-betonskih okvira. Za takve modele armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom, dobiveni su eksperimentalni rezultati koji su detaljno obrađeni u pogledu mehanizma sloma zidnog ispuna, poprečne nosivosti, poprečne krutosti, histerezne energije (energija disipacije, energija apsorpcije i koeficijent prigušenja) i kategorizacije oštećenja zidnog ispuna.

Analitički rezultati dobiveni su na osnovu postojećih modela i postupaka proračuna armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom, te su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima.

Numerički rezultati dobiveni su primjenom numeričkog makro-modela pomoću kojeg je modeliran zidni ispun (neelastični panel element). Ulazni podatci neophodni za proračun modela, dobiveni su usklađivanjem s modelima iz eksperimenata. Numerički rezultati korišteni su za analizu utjecaja ulaznih parametara na poprečnu nosivost, poprečnu krutost, histerezne energije i sile u dijagonalama zidnog ispuna kod armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom.

Dodatna analiza provedena je na podešenom (kalibriranom) modelu. Promatrani su sljedeći parametri: geometrija armirano-betonskog okvira, geometrija tlačne dijagonale, čvrstoće dijagonale (zidnog ispuna), vertikalno opterećenje u stupovima, količine armature u stupovima, poprečni presjek stupova, broj polja te način nanošenja horizontalnoga opterećenja.

S ciljem primjene rezultata u svakodnevnoj inženjerskoj praksi, predložena je metoda linearnog proračuna armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom. Metoda analizira armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom kao sustav („okvir+zid“) i primjenjuje se za dimenzioniranje sustava. Kontrola ponašanja modela ovako modeliranih konstrukcijskih sustava pri djelovanju potresa, urađena je primjenom metode N2, tj. određivanjem ciljanog pomaka u nelinearnom statičkom području.

## ABSTRACT

---

This thesis presents results of research, performed within a larger scientific project, concerning reinforced concrete frames filled in with masonry. Currently available regulations do not, in most cases, take into account masonry infill as a factor in structural analysis design; if they do, however, the design is extremely complex. Scientific research has so far indisputably confirmed the fact that masonry infill affects the structural behaviour of reinforced concrete frames. This is primarily visible in frames' transverse load carrying capacity and stiffness.

The thesis displays experimental research of reinforced concrete frames additionally filled in with masonry. The reinforced concrete frame model has been designed based on a prototype that is a rectangular reinforced concrete frame structure with floor plan dimensions 17x16 meters and the height of first floor 3,75 meters, with upper six floors 3 meters high. The prototype model was designed according to current regulations (EC2, EC8), made out of C30/37 concrete and B500B reinforcement. According to such a prototype, a real life model of a one-story, one-span reinforced concrete frame was constructed in scale of 1:2,5, following all the scaling rules.

Based on experimental testing of masonry elements, masonry infill specimens and mortar (glue) used to build the infill, their main mechanical features were obtained and subsequently used to distribute the masonry infill into three categories; high strength infill (using brick blocks MO10), medium strength infill (using brick blocks MO5) and low strength soft infill (using aerated autoclaved concrete blocks MO2.5). The division of infills was designed aiming to find out the effect of masonry elements' (masonry infills') strength on the behaviour of reinforced concrete frames with masonry infill.

Ten models were tested applying constant vertical load on columns and cyclical static horizontal load. Three models were tested for each type of masonry infill as well as one model of a reinforced concrete frame with no infill. Main mechanical features of concrete and reinforcement used to build the models were also tested. Obtained experimental results for these models of reinforced concrete frames with masonry infills were elaborated in detail concerning the infill collapse mechanism, lateral load carrying capacity, lateral stiffness, hysteretic energy (energy dissipation, energy absorption and attenuation coefficient) and categorization of damage to masonry infill.

Analytical results, obtained based on existing models and structural analysis procedures of reinforced concrete frames with masonry infill, were compared with experimental results.

Numerical results were obtained by applying a numerical macro model that was used to design the masonry infill (non elastic panel element). Input data necessary for this model's structural analysis were defined by harmonization of experimental models' data. Numerical results were used for impact analysis of input parameters on transverse load carrying capacity, transverse stiffness, hysteretic energy and forces in the diagonals of the masonry infill within a reinforced concrete frame with masonry infill.

Additional analysis was performed on a calibrated model. Following parameters were observed: reinforced concrete frame geometry; compression diagonal geometry; diagonal strength (of the masonry infill); vertical load in the columns; quantity of reinforcement in the columns; cross-section of the columns; number of fields and methods of horizontal load application.

A method of linear structural analysis for reinforced concrete frames was proposed with the aim to apply its results in everyday engineering practice. This method analyzes the reinforced concrete frame with masonry infill as a system („frame+wall“) and it is used for the system's dimensioning. The behavior of such structural systems' models under earthquake action was controlled performing the N2 method, namely, by determining target displacement in the nonlinear static field.



---

**SADRŽAJ**


---

<b>PODACI O AUTORU, PODACI O DOKTORSKOM RADU, POSTUPAK OCJENE I OBRANA</b> .....	I
<b>NASLOVNI LIST</b> .....	III
<b>MENTOR I OPSEG DOKTORSKOGA RADA</b> .....	IV
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	V
<b>ZAHVALA</b> .....	VI
<b>SAŽETAK</b> .....	VII
<b>ABSTRACT</b> .....	IX
<b>SADRŽAJ</b> .....	XI
<b>POPIS SLIKA</b> .....	XVII
<b>POPIS TABLICA</b> .....	XXVII
<b>POPIS SIMBOLA</b> .....	XXXIII
<b>POGLAVLJE 1: UVOD</b> .....	1
1.1 DOSADAŠNJE SPOZNAJE.....	1
1.2 CILJEVI ISTRAŽIVANJA.....	3
1.3 ZNANSTVENE METODE, METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA.....	3
<b>POGLAVLJE 2: PROTOTIP</b> .....	5
2.1 UVOD .....	5
2.2 ULAZNI PODATCI O PROTOTIPU.....	5
2.3 MATEMATIČKI MODEL PROTOTIPA .....	7
2.3.1 Uvod.....	7
2.3.2 Ulazni podatci .....	7
2.3.3 Analiza opterećenja .....	10
2.3.4 Proračun vlastitih vrijednosti.....	11
2.3.5 Seizmička analiza .....	14
2.3.6 Kombinacije opterećenja.....	16
2.3.7 Prikaz unutarnjih sila.....	17
2.3.8 Prikaz potrebne armature u elementima prototipa.....	18
2.3.9 Prikaz odabrane armature u elementima prototipa .....	19
2.4 ZAKLJUČAK POGLAVLJA .....	21
<b>POGLAVLJE 3: MATERIJALI</b> .....	23
3.1 UVOD .....	23
3.2 MORT .....	23
3.2.1 Vrste mortova.....	24
3.2.2 Tlačna čvrstoća morta .....	24
3.3 ZIDNI ELEMENTI.....	24

3.3.1	Vrste zidnih elemenata .....	24
3.3.2	Svojstva zidnih elemenata .....	26
3.3.3	Ispitivanje zidnih elemenata .....	26
3.3.4	Eksperimentalno ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata.....	28
3.3.4.1	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata BLOK OPEKE</i> .....	29
3.3.4.2	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata EUROTERMA</i> .....	30
3.3.4.3	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata BETONSKOG BLOKA</i> .....	31
3.3.4.4	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata YTONGA</i> .....	33
3.3.5	Usporedba rezultata .....	34
3.4	ZIDNI ISPUN .....	35
3.4.1	Mehanička svojstva zidnog ispuna .....	35
3.4.1.1	<i>Mehanizmi sloma zidnog ispuna pod tlačnim naprezanjem</i> .....	35
3.4.2	Ostali čimbenici koji utječu na čvrstoću i nosivost zidnog ispuna .....	36
3.4.3	Karakteristična tlačna čvrstoća zidnog ispuna.....	37
3.4.3.1	<i>Modul elastičnosti i posmični modul</i> .....	38
3.4.3.2	<i>Računsko određivanje karakteristične tlačne čvrstoće zidnog ispuna iz tlačne čvrstoće zidnih elemenata i morta</i> .....	39
3.4.4	Karakteristična posmična čvrstoća zidnog ispuna .....	40
3.4.4.1	<i>Računsko određivanje karakteristične posmične čvrstoće zidnog ispuna</i> .....	41
3.4.5	Eksperimentalno ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna.....	42
3.4.5.1	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od BLOK OPEKE</i> .....	44
3.4.5.2	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od EUROTERMA</i> .....	47
3.4.5.3	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od BETONSKOG BLOKA</i> .....	50
3.4.5.4	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od YTONGA</i> .....	53
3.4.5.5	<i>Usporedba rezultata</i> .....	56
3.4.6	Eksperimentalno ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna.....	61
3.4.6.1	<i>Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od BLOK OPEKE</i> .....	62
3.4.6.2	<i>Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od EUROTERMA</i> .....	64
3.4.6.3	<i>Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od BETONSKOG BLOKA</i> .....	66
3.4.6.4	<i>Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od YTONGA</i> .....	68
3.4.6.5	<i>Usporedba rezultata</i> .....	70
3.4.7	Klasifikacija zidnog ispuna .....	71
3.5	ZAKLJUČAK POGLAVLJA .....	72
	<b>POGLAVLJE 4: ISPITIVANJE MODELA</b> .....	<b>73</b>
4.1	UVOD .....	73
4.2	ULAZNI PODACI O MODELIMA.....	74
4.2.1	Armirano-betonski okvir modela.....	74
4.2.1.1	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće betona</i> .....	77
4.2.1.2	<i>Ispitivanje tlačne čvrstoće armature</i> .....	79

9.3.2	Zidni ispun modela.....	80
4.2.2.1	<i>Ispitivanje morta za zidanje zidnog ispuna od opečnih blokova MO10.....</i>	82
4.2.2.2	<i>Ispitivanje morta za zidanje zidnog ispuna od opečnih blokova MO5.....</i>	82
4.2.2.3	<i>Ispitivanje ljepila za zidanje zidnog ispuna od porobetonskih blokova MO2,5.....</i>	82
4.2.2.4	<i>Ispitivanje zidnog ispuna .....</i>	83
4.3	OZNAKE MODELA .....	84
4.4	ISPITIVANJE MODELA .....	87
4.4.1	Uvod.....	87
4.4.2	Mjerni instrumenti na modelima .....	88
4.4.2.1	<i>Karakteristike mjernih instrumenata .....</i>	92
4.4.3	Opterećenje modela.....	94
4.4.3.1	<i>Vertikalno opterećenje .....</i>	94
4.4.3.2	<i>Horizontalno opterećenje.....</i>	94
4.4.3.3	<i>Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELIMA .....</i>	94
4.5	REZULTATI ISPITIVANJA.....	99
4.5.1	Opis nastajanja pukotina i mehanizma (načina) sloma.....	99
4.5.1.1	<i>Uvod.....</i>	99
4.5.1.2	<i>Modeli GRUPE I (opečni blokovi MO10).....</i>	104
4.5.1.3	<i>Modeli GRUPE II (opečni blokovi MO5) .....</i>	109
4.5.1.4	<i>Modeli GRUPE III (porobetonski blokovi MO2,5).....</i>	113
4.5.1.5	<i>Model GRUPE IV (prazan armirano-betonski okvir).....</i>	117
4.5.2	Histerežno ponašanje modela.....	118
4.5.2.1	<i>Optimalizacija rezultata ispitivanja modela .....</i>	129
4.5.3	Poprečna nosivost modela.....	140
4.5.4	Idealizacija eksperimentalnih rezultata .....	145
4.5.5	Poprečna krutost modela .....	150
4.5.6	Histerezne energije modela .....	153
4.5.7	Kategorizacija oštećenja.....	159
4.5.7.1	<i>Metode utvrđivanja oštećenja .....</i>	161
4.5.7.2	<i>Utvrđivanje oštećenja zidnog ispuna .....</i>	162
4.6	ZAKLJUČAK POGLAVLJA .....	164
<b>POGLAVLJE 5: ANALITIČKI MODEL.....</b>		<b>169</b>
5.1	UVOD .....	169
5.2	NOSIVOST ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA ISPUNJENOG ZIDNIM ISPUNOM .....	169
5.2.1	Nosivost armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom prema Slovenskim istraživanjima .....	169
5.2.1.1	<i>Određivanje nosivosti modela GRUPE I, II i III.....</i>	175
5.3	USPOREDBA ANALITIČKIH I EKSPERIMENTALNIH REZULTATA.....	177
5.3.1	Osvrt na širinu tlačne dijagonale .....	180

5.4	ZAKLJUČAK POGLAVLJA .....	182
<b>POGLAVLJE 6: NUMERIČKI MODEL (MAKRO-MODEL)..... 183</b>		
6.1	UVOD .....	183
6.2	MODELI PONAŠANJA ZIDNOG ISPUNA..... 183	
6.2.1	Model ekvivalentne tlačne dijagonale .....	184
6.2.2.1	<i>Određivanje širine ekvivalentne tlačne dijagonale</i> .....	185
6.2.2	Krutost zidnog ispuna (ekvivalentne tlačne dijagonale).....	194
6.2.3	Čvrstoća zidnog ispuna (ekvivalentne tlačne dijagonale).....	195
6.2.4	Teorijski modeli nelinearnog ponašanja zidnog ispuna.....	196
6.2.4.1	<i>Model po Klingneru i Berteru (1976)</i> .....	196
6.2.4.2	<i>Model po Decaniniu (1993)</i> .....	197
6.2.4.3	<i>Model po Panagiotakosu i Fardisu (1996)</i> .....	199
6.2.4.4	<i>Model po Dolseku i Fajfaru (2008)</i> .....	201
6.3	NUMERIČKI MODEL AB OKVIRA SA ZIDNIM ISPUNOM .....	203
6.3.1	Materijalna nelinearnost .....	203
6.3.2	Vrsta proračuna (analiza).....	204
6.3.3	Materijal .....	205
6.3.4	Poprečni presjek .....	206
6.3.5	Neelastični elementi okvira .....	206
6.3.5.1	<i>Neelastični elementi okvira – infrmFB, infrmDB</i> .....	206
6.3.6	Model zidnog ispuna - neelastični panel element.....	208
6.3.6.1	<i>Neelastični panel element</i> .....	208
6.4	MODELIRANJE ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA SA ZIDNI ISPUNOM POMOĆU USVOJENOG MAKRO-MODELA.....	217
6.4.1	Ulazni podaci o armirano-betonskom okviru .....	217
6.4.2	Ulazni podaci o zidnom ispunu .....	220
6.4.3	Zadani rubni uvjeti i ograničenja.....	223
6.4.4	Zadavanje opterećenja .....	225
6.5	REZULTATI NUMERIČKIH MODELA.....	227
6.5.1	Poprečna nosivost modela .....	227
6.5.2	Poprečna krutost modela .....	232
6.5.3	Histerezne energije modela (energije apsorpcije).....	235
6.5.4	Ponašanje dijagonala zidnog ispuna .....	237
6.6	ZAKLJUČAK POGLAVLJA .....	241
<b>POGLAVLJE 7: USPOREDBA EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH REZULTATA .....</b>		
7.1	UVOD .....	245
7.2	USPOREDBA REZULTATA POPREČNE NOSIVOSTI.....	245
7.3	USPOREDBA REZULTATA POPREČNE KRUTOSTI.....	249

7.4	USPOREDBA REZULTATA ENERGIJE APSORPCIJE .....	251
7.5	ZAKLJUČAK POGLAVLJA .....	253
<b>POGLAVLJE 8: PARAMETARSKA ANALIZA .....</b>		<b>255</b>
8.1	UVOD .....	255
8.2	UTJECAJ GEOMETRIJE ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA .....	256
	8.2.1 Numerički rezultati utjecaja geometrije .....	257
8.3	UTJECAJ ŠIRINE TLAČNE DIJAGONALE.....	261
	8.3.1 Numerički rezultati utjecaja širine tlačne dijagonale.....	261
8.4	UTJECAJ ČVRSTOĆE DIJAGONALE.....	264
	8.4.1 Numerički rezultati utjecaja čvrstoće dijagonale.....	265
8.5	UTJECAJ VERTIKALNOG OPTEREĆENJA .....	267
	8.5.1 Numerički rezultati utjecaja vertikalnog opterećenja .....	268
8.6	UTJECAJ KOLIČINE ARMATURE U STUPOVIMA ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA.....	271
	8.6.1 Numerički rezultati utjecaja količine armature u stupovima armirano-betonskog okvira.....	272
8.7	UTJECAJ OBLIKA POPREČNOG PRESJEKA STUPOVA ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA.....	275
	8.7.1 Numerički rezultati utjecaja oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira.....	275
8.8	UTJECAJ BROJA POLJA ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA .....	278
	8.8.1 Numerički rezultati utjecaja broja polja armirano-betonskog okvira .....	279
8.9	UTJECAJ METODE ANALIZE (PRORAČUNA).....	282
	8.9.1 Numerički rezultati utjecaja metode analize .....	282
8.10	REKAPITULACIJA REZULTATA.....	285
8.11	ZAKLJUČAK POGLAVLJA .....	286
<b>POGLAVLJE 9: PRIJEDLOG METODE PRORAČUNA .....</b>		<b>289</b>
9.1	UVOD .....	289
9.2	PRIJEDLOG METODE PRORAČUNA .....	289
9.3	PRIMJENA PREDLOŽENE METODE PRORAČUNA.....	293
	9.3.1 Odabir zidnog ispuna .....	294
	9.3.2 Numerički modeli.....	294
	9.3.2.1 <i>Ulazni podaci</i> .....	294
	9.3.2.2 <i>Proračun vlastitih vrijednosti</i> .....	300
	9.3.2.3 <i>Seizmička analiza</i> .....	302
	9.3.2.4 <i>Rekapitulacija horizontalnih potresnih sila</i> .....	318
	9.3.2.5 <i>Kombinacije opterećenja</i> .....	319
	9.3.3 Sile u zamjenskim dijagonalama.....	319
	9.3.4 Nosivost dijagonala za odabrani zidni ispun .....	322
	9.3.5 Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala .....	323
	9.3.6 Dimenzioniranje elemenata armirano-betonskih okvira.....	329
9.4	PROVJERA METODE PRORAČUNA METODOM N2 – METODA PROCJENE SEIZMIČKOG	

PONAŠANJA ZGRADA .....	337
9.4.1 Uvod .....	337
9.4.2 Metoda N2 .....	337
9.4.2.1 Kratak prikaz metode N2 – jednostavna varijanta u obliku ubrzanje – pomak .....	337
9.4.2.2 Primjena metode N2 .....	341
9.4.3 Primjena metode N2 na numeričke modele .....	345
9.4.3.1 Prazan armirano-betonski okvir – 4. kata .....	347
9.4.3.2 Armirano betonski okvir sa zidnim ispunom – 4. kata .....	356
9.4.3.3 Usporedba rezultata praznih armirano-betonskih okvira i armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom – 4. kata .....	364
9.4.3.4 Prazan armirano-betonski okvir – 7. katova .....	365
9.4.3.5 Armirano betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova .....	372
9.4.3.6 Usporedba rezultata praznih armirano-betonskih okvira i armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom – 7. katova .....	378
9.4.3.7 Prazan armirano-betonski okvir – 10. katova .....	379
9.4.3.8 Armirano betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova .....	386
9.4.3.9 Usporedba rezultata praznih armirano-betonskih okvira i armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom – 10. katova .....	392
9.4.3.10 Prikaz oštećenja zidnog ispuna na numeričkim modelima .....	393
9.5 ZAKLJUČAK POGLAVLJA .....	396
<b>POGLAVLJE 10: OSVRT, ZAKLJUČAK I PREPORUKE .....</b>	<b>399</b>
10.1 OSVRT .....	399
10.2 ZAKLJUČAK .....	401
10.3 PREPORUKE .....	403
10.3.1 Preporuke za armiranje stupova armirano-betonskog okvira .....	403
10.3.2 Preporuke za ograničenje međukatnih pomaka .....	404
10.3.3 Preporuke za daljnji rad .....	404
<b>LITERATURA .....</b>	<b>405</b>

# POPIS SLIKA

## POGLAVLJE 1:

Nema slika

## POGLAVLJE 2:

<b>Slika 2.1</b> Model prototipa.....	5
<b>Slika 2.2</b> Prostorni proračunski model prototipa i karakteristični okvir.....	7
<b>Slika 2.3</b> Tlocrt karakteristične etaže .....	8
<b>Slika 2.4</b> Dispozicija točkastih ležajeva.....	8
<b>Slika 2.5</b> Dispozicija armiranobetonskih okvira .....	9
<b>Slika 2.6</b> Karakteristični okvir (H_1 do H_3).....	9
<b>Slika 2.7</b> Karakteristični okvir (V_1 do V_4).....	9
<b>Slika 2.8</b> Raspodjela stalnog opterećenja po krovnoj ploči.....	10
<b>Slika 2.9</b> Raspodjela korisnog opterećenja po krovnoj ploči .....	10
<b>Slika 2.10</b> Raspodjela stalnog opterećenja po stropnim pločama 1.-5. kata .....	11
<b>Slika 2.11</b> Raspodjela korisnog opterećenja po stropnim pločama 1.-5. kata .....	11
<b>Slika 2.12</b> Prikaz osciliranja 1. tona konstrukcije prototipa.....	13
<b>Slika 2.13</b> Prikaz osciliranja 2. tona konstrukcije prototipa.....	13
<b>Slika 2.14</b> Prikaz osciliranja 3. tona konstrukcije prototipa.....	13
<b>Slika 2.15</b> Unutarnje uzdužne sile u srednjem okviru (H_2) .....	17
<b>Slika 2.16</b> Uzdužna armatura u elementima karakterističnog okvira (H_2) .....	18
<b>Slika 2.17</b> Poprečna armatura u elementima karakterističnog okvira (H_2).....	18
<b>Slika 2.18</b> Odabrana uzdužna armatura u elementima karakterističnog okvira (H_2).....	19
<b>Slika 2.19</b> Odabrana poprečna armatura u elementima karakterističnog okvira (H_2).....	19
<b>Slika 2.20</b> Odabrana armatura u stupovima (PRESJEK 1-1).....	20
<b>Slika 2.21</b> Odabrana armatura u gredama na ležaju (PRESJEK 2-2) i u polju (PRESJEK 3-3) .....	20

## POGLAVLJE 3:

<b>Slika 3.1</b> Blok opeka, euroterm, betonski blok i ytong .....	27
<b>Slika 3.2</b> Ispitivanje tlačne čvrstoće blok opeke, euroterma, betonskog bloka i ytonga .....	28
<b>Slika 3.3</b> Ispitivanje cementnog morta.....	28
<b>Slika 3.4</b> Grafički prikaz usporedbe tlačnih čvrstoća zidnih elemenata.....	34
<b>Slika 3.5</b> Ispitivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti .....	38
<b>Slika 3.6</b> Dijagram naprezanje – relativna deformacija za tlačno opterećen zidni ispun .....	38
<b>Slika 3.7</b> Ispitivanje posmične čvrstoće .....	41
<b>Slika 3.8</b> Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke i euroterma .....	42
<b>Slika 3.9</b> Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka i ytonga.....	43
<b>Slika 3.10</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 1 zidnog ispuna od blok opeke .....	45
<b>Slika 3.11</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 2 zidnog ispuna od blok opeke .....	45

<b>Slika 3.12</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 3 zidnog ispuna od blok opeke .....	46
<b>Slika 3.13</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 1 zidnog ispuna od euroterma.....	48
<b>Slika 3.14</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 2 zidnog ispuna od euroterma.....	48
<b>Slika 3.15</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 3 zidnog ispuna od euroterma.....	49
<b>Slika 3.16</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 1 zidnog ispuna od betonskog bloka.....	51
<b>Slika 3.17</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 2 zidnog ispuna od betonskog bloka.....	51
<b>Slika 3.18</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 3 zidnog ispuna od betonskog bloka.....	52
<b>Slika 3.19</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 1 zidnog ispuna od ytonga.....	54
<b>Slika 3.20</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 2 zidnog ispuna od ytonga.....	54
<b>Slika 3.21</b> Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 3 zidnog ispuna od ytonga.....	55
<b>Slika 3.22</b> Grafički prikaz usporedbe tlačnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata .....	56
<b>Slika 3.23</b> Grafički prikaz usporedbe modula elastičnosti zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata .....	58
<b>Slika 3.24</b> Prikaz utjecaja tlačne čvrstoće zidnog elementa na tlačnu čvrstoću zidnog ispuna .....	59
<b>Slika 3.25</b> Prikaz utjecaja tlačne čvrstoće morta na tlačnu čvrstoću zidnog ispuna .....	60
<b>Slika 3.26</b> Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke i euroterma.....	61
<b>Slika 3.27</b> Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka i ytonga .....	61
<b>Slika 3.28</b> Ocjena rezultata posmične čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke.....	62
<b>Slika 3.29</b> Ocjena rezultata posmične čvrstoće zidnog ispuna od euroterma .....	64
<b>Slika 3.30</b> Ocjena rezultata posmične čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka .....	66
<b>Slika 3.31</b> Ocjena rezultata posmične čvrstoće zidnog ispuna od ytonga .....	68
<b>Slika 3.32</b> Grafički prikaz usporedbe posmičnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata .....	70
.....	
<b>POGLAVLJE 4:</b>	
<b>Slika 4.1</b> Prikaz MODELA .....	73
<b>Slika 4.2</b> Prikaz dimenzija i nacрта armature armirano-betonskog okvira modela .....	75
<b>Slika 4.3</b> Prikaz izrade i dopreme armirano-betonskih okvira modela.....	76
<b>Slika 4.4</b> Prikaz odnosa sile i pomaka za karakteristični uzorak armature.....	79
<b>Slika 4.4</b> Prikaz zidanja zidnog ispuna od opečnih blokova MO10 .....	81
<b>Slika 4.5</b> Prikaz zidanja zidnog ispuna od opečnih blokova MO5 .....	81
<b>Slika 4.6</b> Prikaz zidanja zidnog ispuna od porobetonskih blokova MO2,5 .....	81
<b>Slika 4.7</b> Stroj za rezanje zidnih elemenata.....	81
<b>Slika 4.8</b> Prikaz MODELA 7, 8, 9 – <b>GRUPA I</b> .....	85
<b>Slika 4.9</b> Prikaz MODELA 4, 5, 6 – <b>GRUPA II</b> .....	85
<b>Slika 4.10</b> Prikaz MODELA 1, 2, 3 – <b>GRUPA III</b> .....	86
<b>Slika 4.11</b> Prikaz MODELA 10 – <b>GRUPA IV</b> .....	86
<b>Slika 4.12</b> Prikaz zatvorenog čeličnog okvira i mjernih instrumenata na modelu.....	87
<b>Slika 4.13</b> Prikaz instrumenata za unos horizontalne i vertikalne sile.....	88
<b>Slika 4.14</b> Prikaz horizontalni i vertikalni LVDT_a za mjerenje pomaka.....	89
<b>Slika 4.15</b> Prikaz LVDT_a za mjerenje produljenja odnosno skraćanja dijagonala.....	89
<b>Slika 4.16</b> Prikaz deformetara za mjerenje deformacija na gredi i stupovima .....	90



<b>Slika 4.17</b> Prikaz sustava za prikupljanje podataka .....	90
<b>Slika 4.18</b> Prikaz mikroure za kontrolu klizanja na modelima (GRUPAMA).....	91
<b>Slika 4.19</b> Prikaz mjernih instrumenata na modelima (GRUPAMA) .....	91
<b>Slika 4.20</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 7 ( <b>GRUPA I</b> ).....	95
<b>Slika 4.21</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 8 ( <b>GRUPA I</b> ).....	95
<b>Slika 4.22</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 9 ( <b>GRUPA I</b> ).....	95
<b>Slika 4.23</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 4 ( <b>GRUPA II</b> ).....	95
<b>Slika 4.24</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 5 ( <b>GRUPA II</b> ).....	96
<b>Slika 4.25</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 6 ( <b>GRUPA II</b> ).....	96
<b>Slika 4.26</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 1 ( <b>GRUPA III</b> ).....	96
<b>Slika 4.27</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 2 ( <b>GRUPA III</b> ).....	96
<b>Slika 4.28</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 3 ( <b>GRUPA III</b> ).....	97
<b>Slika 4.29</b> Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 10 ( <b>GRUPA IV</b> ).....	97
<b>Slika 4.30</b> Djelovanje vertikalnog (N) i horizontalnog (H) opterećenja na MODELIMA ( <b>GRUPAMA</b> ) .....	98
<b>Slika 4.31</b> Mehanizmi sloma zidnog ispuna; a) dijagonalni slom, b) slom u uglovima zidnog ispuna, c) stepeničasti posmični slom, d) horizontalni posmični slom .....	101
<b>Slika 4.32</b> Mehanizmi sloma armirano-betonskog okvira; a) vlačni slom, b) posmični slom, c) slom u spoju elemenata armirano-betonskog okvira .....	103
<b>Slika 4.33</b> Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 7 (kod 1,10% katnog pomaka).....	106
<b>Slika 4.34</b> Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 8 (kod 0,98% katnog pomaka).....	107
<b>Slika 4.35</b> Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 9 (kod 1,34% katnog pomaka).....	108
<b>Slika 4.36</b> Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 4 (kod 0,84% katnog pomaka).....	110
<b>Slika 4.37</b> Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 5 (kod 0,51% katnog pomaka).....	111
<b>Slika 4.38</b> Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 6 (kod 1,68% katnog pomaka).....	112
<b>Slika 4.39</b> Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 1 (kod 0,80% katnog pomaka).....	114
<b>Slika 4.40</b> Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 2 (kod 0,81% katnog pomaka).....	115
<b>Slika 4.41</b> Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 3 (kod 0,83% katnog pomaka).....	116
<b>Slika 4.42</b> Prikaz pukotina na MODELU 10.....	117
<b>Slika 4.43</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 7, b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 7.....	119
<b>Slika 4.44</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 8, b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 8.....	120
<b>Slika 4.45</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 9, b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 9.....	121
<b>Slika 4.46</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 4, b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 4.....	122
<b>Slika 4.47</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 5, b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 5.....	123
<b>Slika 4.48</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 6, b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 6.....	124

<b>Slika 4.49</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 1, b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 1 .....	125
<b>Slika 4.50</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 2, b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 2 .....	126
<b>Slika 4.51</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 3, b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 3 .....	127
<b>Slika 4.52</b> a) Krivulja horizontalna sila – pomak praznog armirano-betonskog okvira (MODEL 10), b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira za MODEL 10 .....	128
<b>Slika 4.53</b> Primarne krivulje modela GRUPE I i optimalizirana primarna krivulja modela GRUPE I .....	130
<b>Slika 4.54</b> Primarne krivulje modela GRUPE II i optimalizirana primarna krivulja modela GRUPE II .....	131
<b>Slika 4.55</b> Primarne krivulje modela GRUPE III i optimalizirana primarna krivulja modela GRUPE III .....	132
<b>Slika 4.56</b> Primarne krivulje modela GRUPE IV i optimalizirana primarna krivulja modela GRUPE IV .....	133
<b>Slika 4.57</b> Krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE I i optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE I .....	134
<b>Slika 4.58</b> Krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE II i optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE II .....	135
<b>Slika 4.59</b> Krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE III i optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE III .....	136
<b>Slika 4.60</b> Krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE IV i optimalizirana krivulja deformacija dijagonala modela GRUPE IV .....	137
<b>Slika 4.61</b> Optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE I, preklopljene .....	138
<b>Slika 4.62</b> Optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE II, preklopljene .....	138
<b>Slika 4.63</b> Optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE III, prekloplje .....	139
<b>Slika 4.64</b> Optimalizirana krivulja deformacije dijagonala modela GRUPE IV .....	139
<b>Slika 4.65</b> Primarne krivulje (krivulje nosivosti) modela GRUPE I, II, III i GRUPE IV .....	140
<b>Slika 4.66</b> Opadanje poprečne nosivosti u odnosu na model GRUPE IV .....	142
<b>Slika 4.67</b> Deformacije dijagonala i izračun relativni posmičnih deformacija .....	143
<b>Slika 4.68</b> Odnos izmjerenih poprečnih sila i ekvivalentnih relativnih posmičnih deforma. ....	144
<b>Slika 4.69</b> Idealizacija eksperimentalnog histereznog ponašanja modela GRUPE I .....	145
<b>Slika 4.70</b> Idealizacija eksperimentalnog histereznog ponašanja modela GRUPE II .....	146
<b>Slika 4.71</b> Idealizacija eksperimentalnog histereznog ponašanja modela GRUPE III .....	146
<b>Slika 4.72</b> Idealizacija eksperimentalnog histereznog ponašanja modela GRUPE IV .....	147
<b>Slika 4.73</b> Ovisnost koeficijenta duktilnosti o horizontalnom odnosno katnom pomaku .....	149
<b>Slika 4.74</b> Ovisnost faktora ponašanja o horizontalnom odnosno katnom pomaku tj. koeficijentu duktilnosti ..	149
<b>Slika 4.75</b> Opadanje krutosti modela po GRUPAMA u odnosu na početnu krutost .....	150
<b>Slika 4.76</b> Opadanje krutosti modela po GRUPAMA pri istom katnom pomaku .....	151
<b>Slika 4.77</b> Opadanje krutosti u odnosu na referentni model (GRUPU IV) pri istom katnom pomaku .....	152
<b>Slika 4.78</b> Krivulje histereze i optimalizirane primarne krivulje pojedinih GRUPA modela .....	153
<b>Slika 4.79</b> Izračun apsorpcije i disipirane energije, a) Energija apsorpcije (primanja), b) Energija disipacije (trošenja) .....	154

<b>Slika 4.80</b> Količine apsorbirane energije pojedinih GRUPA modela .....	154
<b>Slika 4.81</b> Opadanje apsorbirane energije modela GRUPE I, II i III u odnosu na referentni model (GRUPA IV) .....	155
<b>Slika 4.82</b> Količine disipirane energije pojedinih GRUPA modela .....	156
<b>Slika 4.83</b> Opadanje disipirane energije modela GRUPE I, II i III u odnosu na referentni model (GRUPA IV) ... ..	157
<b>Slika 4.84</b> Ovisnost koeficijenta prigušenja o horizontalnom odnosno katnom pomaku.....	158
<b>Slika 4.85</b> Stupanj oštećenja zidnog ispuna u ovisnosti o katnom pomaku i poprečnoj nosivosti .....	162
.....	
<b>POGLAVLJE 5:</b>	
<b>Slika 5.1</b> Linearna idealizacija ponašanja armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom .....	170
<b>Slika 5.2</b> Model mehanizma sloma armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom.....	171
<b>Slika 5.3</b> a) Skica armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom, b) Idealizirana naprezanja u uglovima tlačne dijagonale.....	173
<b>Slika 5.4</b> Usporedba poprečne nosivosti dobivene eksperimentalno i analitički za GRUPU I.....	178
<b>Slika 5.5</b> Usporedba poprečne nosivosti dobivene eksperimentalno i analitički za GRUPU II.....	178
<b>Slika 5.6</b> Usporedba poprečne nosivosti dobivene eksperimentalno i analitički za GRUPU III.....	179
<b>Slika 5.7</b> a) Ovisnost širine i duljine tlačne dijagonale o kutu nagiba tlačne dijagonale, b) Ovisnost poprečne nosivosti o odnosu širinu i duljinu tlačne dijagonale.....	181
.....	
<b>POGLAVLJE 6:</b>	
<b>Slika 6.1</b> Makro-model zidnog ispuna kroz ekvivalentne tlačne dijagonale .....	184
<b>Slika 6.2</b> Model ekvivalentne tlačne dijagonale.....	184
<b>Slika 6.3</b> Prikaz odnosa širine i duljine tlačne dijagonale prema raznim autorima.....	193
<b>Slika 6.4</b> Krivulja odnosa sila-pomak prema modelu Klingnera i Bertera (1976).....	196
<b>Slika 6.5</b> Krivulja odnosa sila-pomak prema modelu Decaninia (1993).....	198
<b>Slika 6.6</b> Krivulja odnosa sila-pomak prema modelu Panagiotakosu i Fardisu (1996).....	200
<b>Slika 6.7</b> Krivulja odnosa sila-pomak prema modelu Dolseka i Fajfara (2008) .....	202
<b>Slika 6.8</b> Podjela poprečnog presjeka na vlakna s definiranjem jedoosnog ponašanja materijala .....	203
<b>Slika 6.9</b> Prikaz odnosa naprezanje-deformacija za model betona prema Manderu .....	205
<b>Slika 6.10</b> Prikaz odnosa naprezanje-deformacija za model čelika prema Menegotto-Pinto.....	205
<b>Slika 6.11</b> Prikaz karakterističnih poprečnih presjeka stupa i grede na ležaju i u polju.....	206
<b>Slika 6.12</b> Štapni elementi s oznakama lokalnih osi i unutarnjih sila .....	207
<b>Slika 6.13</b> Neelastični panel element, a) tlačne/vlačne dijagonale, b) posmična dijagonala.....	208
<b>Slika 6.14</b> Model histereznog ponašanja dijagonale zidnog ispuna na tlak i smanjenje površine ekvivalentne tlačne dijagonale uslijed pukotina .....	212
<b>Slika 6.15</b> Model histereznog ponašanja dijagonale zidnog ispuna na posmik.....	215
<b>Slika 6.16</b> Dimenzije armirano-betonskog okvira.....	217
<b>Slika 6.17</b> Prikaz elemenata armirano-betonskog okvira.....	219
<b>Slika 6.18</b> Prikaz i dimenzije zidnog ispuna - panel elemenata .....	223
<b>Slika 6.19</b> Gap element, a) gap krivulja, b) linearna krivulja.....	224
<b>Slika 6.20</b> Prikaz rubni uvjeta i ograničenja na modelu armirano-betonskog okvira.....	224

<b>Slika 6.21</b> Prikaz opterećenja na numeričkom modelu .....	225
<b>Slika 6.22</b> Prikaz djelovanja opterećenja na modelu kod statičke pushover analize .....	226
<b>Slika 6.23</b> Prikaz djelovanja opterećenja na modelu kod statičke time-history analize .....	226
<b>Slika 6.24</b> Primarne krivulje modela GRUPE I.....	227
<b>Slika 6.25</b> Primarne krivulje modela GRUPE II .....	228
<b>Slika 6.26</b> Primarne krivulje modela GRUPE III.....	228
<b>Slika 6.27</b> Primarna krivulja modela GRUPE IV .....	229
<b>Slika 6.28</b> Primarne krivulje (krivulje nosivosti) modela GRUPE I, II, III i GRUPE IV .....	230
<b>Slika 6.29</b> Opadanje poprečne nosivosti u odnosu na model GRUPE IV .....	231
<b>Slika 6.30</b> Opadanje krutosti modela po GRUPAMA u odnosu na početnu krutost.....	232
<b>Slika 6.31</b> Opadanje krutosti modela po GRUPAMA pri istom katnom pomaku.....	233
<b>Slika 6.32</b> Opadanje krutosti u odnosu na referentni model (GRUPU IV) pri istom katnom pomaku.....	234
<b>Slika 6.33</b> Količine apsorbirane energije pojedinih GRUPA modela .....	235
<b>Slika 6.34</b> Opadanje apsorbirane energije modela GRUPE I, II i III u odnosu na referentni model (GRUPA IV).....	236
<b>Slika 6.35</b> Prikaz sila u dijagonalama zidnog ispuna za modele GRUPE I.....	237
<b>Slika 6.36</b> Prikaz sila u dijagonalama zidnog ispuna za modele GRUPE II.....	238
<b>Slika 6.37</b> Prikaz sila u dijagonalama zidnog ispuna za modele GRUPE III .....	238
<b>Slika 6.38</b> Prikaz uzdužne sile u dijagonalama zidnog ispuna za modele GRUPE I, II i III.....	239
<b>Slika 6.39</b> Prikaz posmične sile u dijagonalama za modele GRUPE I, II i III .....	240
.....	
<b>POGLAVLJE 7:</b>	
<b>Slika 7.1</b> Eksperimentalnih i numerički rezultati poprečne nosivosti za modele GRUPE I.....	246
<b>Slika 7.2</b> Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne nosivosti za modele GRUPE II.....	246
<b>Slika 7.3</b> Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne nosivosti za modele GRUPE III .....	247
<b>Slika 7.4</b> Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne nosivosti za modele GRUPE IV .....	247
<b>Slika 7.5</b> Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata poprečne nosivosti za modele GRUPE I, II, III i IV .....	248
<b>Slika 7.6</b> Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne krutosti za modele GRUPE I, II, III i IV .....	249
<b>Slika 7.7</b> Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata poprečne krutosti za modele GRUPE I, II, III i IV .....	250
<b>Slika 7.8</b> Eksperimentalni i numerički rezultati energije apsorpcije za modele GRUPE I, II, III i IV .....	251
<b>Slika 7.9</b> Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata energije apsorpcije za modele GRUPE I, II, III i IV .....	252
.....	
<b>POGLAVLJE 8:</b>	
<b>Slika 8.1</b> Model ekvivalentne tlačne dijagonale.....	255
<b>Slika 8.2</b> Prikaz numeričkih MODELA u ovisnosti o geometriji.....	256
<b>Slika 8.3</b> Utjecaj geometrije armirano-betonskog okvira na poprečnu nosivost .....	258
<b>Slika 8.4</b> Utjecaj geometrije armirano-betonskog okvira na silu u tlačnoj dijagonali.....	258
<b>Slika 8.5</b> Utjecaj geometrije armirano-betonskog okvira na silu u posmičnoj dijagonali .....	259

<b>Slika 8.6</b> Utjecaj širine tlačne dijagonale na poprečnu nosivost .....	262
<b>Slika 8.7</b> Utjecaj širine tlačne dijagonale na silu u tlačnoj dijagonali .....	262
<b>Slika 8.8</b> Utjecaj širine tlačne dijagonale na silu u posmičnoj dijagonali .....	263
<b>Slika 8.9</b> Utjecaj čvrstoće dijagonale na poprečnu nosivost .....	265
<b>Slika 8.10</b> Utjecaj čvrstoće dijagonale na silu u tlačnoj dijagonali .....	266
<b>Slika 8.11</b> Utjecaj čvrstoće dijagonale silu u posmičnoj dijagonali .....	266
<b>Slika 8.12</b> Utjecaj vertikalnog opterećenja na poprečnu nosivost.....	268
<b>Slika 8.13</b> Utjecaj vertikalnog opterećenja na silu u tlačnoj dijagonali .....	270
<b>Slika 8.14</b> Utjecaj vertikalnog opterećenja na silu u posmičnoj dijagonali.....	271
<b>Slika 8.15</b> Utjecaj količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira na poprečnu nosivost .	272
<b>Slika 8.16</b> Utjecaj količine uzdužne armature na silu u tlačnoj dijagonali.....	273
<b>Slika 8.17</b> Utjecaj količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira na silu u posmičnoj dijagonali.....	274
<b>Slika 8.18</b> Prikaz numeričkih MODELA u ovisnosti o obliku poprečnog presjeka stupova .....	275
<b>Slika 8.19</b> Utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova okvira na poprečnu nosivost.....	276
<b>Slika 8.20</b> Utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira na silu u tlačnoj dijagonali	276
<b>Slika 8.21</b> Utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira na silu u posmičnoj dijagonali.....	277
<b>Slika 8.22</b> Prikaz numeričkih MODELA u ovisnosti o broju polja .....	278
<b>Slika 8.23</b> Utjecaj broja polja armirano-betonskog okvira na poprečnu nosivost.....	279
<b>Slika 8.24</b> Utjecaj broja polja armirano-betonskog okvira na silu u tlačnoj dijagonali.....	280
<b>Slika 8.25</b> Utjecaj broja polja armirano-betonskog okvira na silu u posmičnoj dijagonali.....	280
<b>Slika 8.26</b> Utjecaj metode analize (proračuna) na poprečnu nosivost.....	282
<b>Slika 8.27</b> Utjecaj metode analize (proračuna) na silu u tlačnoj dijagonali .....	283
<b>Slika 8.28</b> Utjecaj metode analize (proračuna) na silu u posmičnoj dijagonali.....	284
.....	
<b>POGLAVLJE 9:</b>	
<b>Slika 9.1 a)</b> Dijagram toka prijedloga metode proračuna ab okvira sa zidnim ispunom .....	289
b) Dijagram toka numeričkog modela sa zamjenskim tlačnim dijagonalama .....	290
<b>Slika 9.2</b> Numerički model - 4. kata .....	295
<b>Slika 9.3</b> Numerički model - 7. katova .....	296
<b>Slika 9.4</b> Numerički model - 10. katova.....	297
<b>Slika 9.5</b> Raspodjela vertikalnog stalnog i korisnog opterećenja na modelu - 4. kata .....	298
<b>Slika 9.6</b> Raspodjela vertikalnog stalnog i korisnog opterećenja na modelu - 7. katova .....	298
<b>Slika 9.7</b> Raspodjela vertikalnog stalnog i korisnog opterećenja na modelu - 10. katova .....	299
<b>Slika 9.8</b> Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun.....	306
<b>Slika 9.9</b> Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na praznim armirano-betonskim okvirima – 4. kata....	307
<b>Slika 9.10</b> Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun.....	308
<b>Slika 9.11</b> Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na armirano-betonskim okvirima sa zidnim ispunom – 4. kata .....	309

<b>Slika 9.12</b> Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun.....	310
<b>Slika 9.13</b> Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na praznim armirano-betonskim okvirima – 7. kat....	311
<b>Slika 9.14</b> Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun.....	312
<b>Slika 9.15</b> Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na armirano-betonskim okvirima sa zidnim ispunom – 7. katova.....	313
<b>Slika 9.16</b> Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun.....	314
<b>Slika 9.17</b> Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na praznim armirano-betonskim okvirima – 10. kat..	315
<b>Slika 9.18</b> Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun.....	316
<b>Slika 9.19</b> Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na armirano-betonskim okvirima sa zidnim ispunom – 10. katova.....	317
<b>Slika 9.20</b> Prikaz uzdužnih tlačnih sila u zamjenskim dijagonalama – 4. kata .....	319
<b>Slika 9.21</b> Prikaz uzdužnih tlačnih sila u zamjenskim dijagonalama – 7. katova .....	320
<b>Slika 9.22</b> Prikaz uzdužnih tlačnih sila u zamjenskim dijagonalama – 10. katova.....	321
<b>Slika 9.23</b> Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 4. kata ( $a_g=0,1g$ ) .....	329
<b>Slika 9.24</b> Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 4. kata ( $a_g=0,2g$ ) .....	330
<b>Slika 9.25</b> Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 4. kata ( $a_g=0,3g$ ) .....	330
<b>Slika 9.26</b> Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 7. katova ( $a_g=0,1g$ ) .....	331
<b>Slika 9.27</b> Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 7. katova ( $a_g=0,2g$ ) .....	332
<b>Slika 9.28</b> Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 7. katova ( $a_g=0,3g$ ) .....	333
<b>Slika 9.29</b> Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 10. katova ( $a_g=0,1g$ ) .....	334
<b>Slika 9.30</b> Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 10. katova ( $a_g=0,2g$ ) .....	335
<b>Slika 9.31</b> Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 10. katova ( $a_g=0,3g$ ) .....	336
<b>Slika 9.32</b> Idealizacija krivulje kapaciteta praznog armirano-betonskog okvira.....	346
<b>Slika 9.33</b> Idealizacija krivulje kapaciteta armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom.....	346
<b>Slika 9.34</b> Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar - $a_g=0,1g$ .....	347
<b>Slika 9.35</b> Spektri zahtjeva u obliku AD - $a_g=0,1g$ .....	348
<b>Slika 9.36</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) - $a_g=0,1g$ .....	349
<b>Slika 9.37</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,1g$ .....	349
<b>Slika 9.38</b> Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar - $a_g=0,2g$ .....	350
<b>Slika 9.39</b> Spektri zahtjeva u obliku AD - $a_g=0,2g$ .....	350

<b>Slika 9.40</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) - $a_g=0,2g$ .....	352
<b>Slika 9.41</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,2g$ .....	352
<b>Slika 9.42</b> Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka - $a_g=0,2g$ .....	353
<b>Slika 9.43</b> Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar - $a_g=0,3g$ .....	353
<b>Slika 9.44</b> Spektri zahtjeva u obliku AD - $a_g=0,3g$ .....	353
<b>Slika 9.45</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) - $a_g=0,3g$ .....	355
<b>Slika 9.46</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,3g$ .....	355
<b>Slika 9.47</b> Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka - $a_g=0,3g$ .....	356
<b>Slika 9.48</b> Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar - $a_g=0,1g$ .....	356
<b>Slika 9.49</b> Spektri zahtjeva u obliku AD - $a_g=0,1g$ .....	357
<b>Slika 9.50</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) - $a_g=0,1g$ .....	358
<b>Slika 9.51</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,1g$ .....	358
<b>Slika 9.52</b> Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar - $a_g=0,2g$ .....	359
<b>Slika 9.53</b> Spektri zahtjeva u obliku AD - $a_g=0,2g$ .....	359
<b>Slika 9.54</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) - $a_g=0,2g$ .....	359
<b>Slika 9.55</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,2g$ .....	361
<b>Slika 9.56</b> Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar - $a_g=0,3g$ .....	361
<b>Slika 9.57</b> Spektri zahtjeva u obliku AD - $a_g=0,3g$ .....	362
<b>Slika 9.58</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) - $a_g=0,3g$ .....	363
<b>Slika 9.59</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,3g$ .....	363
<b>Slika 9.60</b> Horizontalni pomaci i međukatni pomaci za zahtijevane pomake .....	364
<b>Slika 9.61</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) - $a_g=0,1g$ .....	366
<b>Slika 9.62</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,1g$ .....	366
<b>Slika 9.63</b> Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka - $a_g=0,1g$ .....	367
<b>Slika 9.64</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) - $a_g=0,2g$ .....	368
<b>Slika 9.65</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,2g$ .....	368
<b>Slika 9.66</b> Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka - $a_g=0,2g$ .....	369
<b>Slika 9.67</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) - $a_g=0,3g$ .....	370
<b>Slika 9.68</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,3g$ .....	371
<b>Slika 9.69</b> Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka - $a_g=0,3g$ .....	371
<b>Slika 9.70</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) - $a_g=0,1g$ .....	372

<b>Slika 9.71</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,1g$ .....	372
<b>Slika 9.72</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) - $a_g=0,2g$ .....	375
<b>Slika 9.73</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,2g$ .....	375
<b>Slika 9.74</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) - $a_g=0,3g$ .....	377
<b>Slika 9.75</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,3g$ .....	377
<b>Slika 9.76</b> Horizontalni pomaci i međukatni pomaci za zahtijevane pomake .....	378
<b>Slika 9.77</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) - $a_g=0,1g$ .....	380
<b>Slika 9.78</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,1g$ .....	380
<b>Slika 9.79</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) - $a_g=0,2g$ .....	382
<b>Slika 9.80</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,2g$ .....	382
<b>Slika 9.81</b> Redoslijed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka - $a_g=0,2g$ .....	383
<b>Slika 9.82</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) - $a_g=0,3g$ .....	384
<b>Slika 9.83</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,3g$ .....	385
<b>Slika 9.84</b> Redoslijed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka - $a_g=0,3g$ .....	385
<b>Slika 9.85</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) - $a_g=0,1g$ .....	387
<b>Slika 9.86</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,1g$ .....	387
<b>Slika 9.87</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) - $a_g=0,2g$ .....	389
<b>Slika 9.88</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,2g$ .....	389
<b>Slika 9.89</b> Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) - $a_g=0,3g$ .....	390
<b>Slika 9.90</b> Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model - $a_g=0,3g$ .....	391
<b>Slika 9.91</b> Horizontalni pomaci i međukatni pomaci za zahtijevane pomake .....	392
<b>Slika 9.92</b> Oštećenje zidnog ispuna za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu – 4. kata .....	393
<b>Slika 9.93</b> Oštećenje zidnog ispuna za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu – 7. katova .....	394
<b>Slika 9.94</b> Oštećenje zidnog ispuna za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu – 10. katova .....	395
.....	
<b>POGLAVLJE 10:</b>	
<b>Slika 10.1</b> Provođenje eksperimentalnog ispitivanja.....	399



# POPIS TABLICA

## POGLAVLJE 1:

Nema tablica

## POGLAVLJE 2:

<b>Tablica 2.1</b> Opterećenje na prototipu.....	6
<b>Tablica 2.2</b> Shema nivoa .....	7
<b>Tablica 2.3</b> Tablica materijala .....	8
<b>Tablica 2.4</b> Oznake ploča .....	8
<b>Tablica 2.5</b> Oznake greda i stupova.....	8
<b>Tablica 2.6</b> Oznake točkastih ležajeva.....	8
<b>Tablica 2.7</b> Faktori opterećenja za proračun masa.....	11
<b>Tablica 2.8</b> Raspored masa po visini objekta .....	12
<b>Tablica 2.9</b> Periodi osciliranja konstrukcije .....	12
<b>Tablica 2.10</b> Faktori pravca potresa.....	14
<b>Tablica 2.11</b> Horizontalne seizmičke sile za pravac_x (potres_x).....	14
<b>Tablica 2.12</b> Horizontalne seizmičke sile za pravac_y (potres_y).....	15
<b>Tablica 2.13</b> Faktori participacije .....	15
<b>Tablica 2.14</b> Lista slučajeva opterećenja .....	16
<b>Tablica 2.15</b> Prikaz uzdužnih sila u unutarnjim stupovima 1. kata srednjeg okvira (H <sub>2</sub> ) .....	17

## POGLAVLJE 3:

<b>Tablica 3.1</b> Volumni sastav morta prema EC6 .....	24
<b>Tablica 3.2</b> Geometrijski uvjeti za grupe zidnih elemenata.....	25
<b>Tablica 3.3</b> Vrijednosti faktora oblika, $\delta$ .....	26
<b>Tablica 3.4</b> Klase odstupanja dimenzija .....	27
<b>Tablica 3.5</b> Grupe zidnih elemenata .....	27
<b>Tablica 3.6</b> Izmjere ispitanih uzoraka.....	29
<b>Tablica 3.7</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za izravnavanje blok opeke .....	29
<b>Tablica 3.8</b> Tlačne čvrstoće zidnih elemenata blok opeke .....	30
<b>Tablica 3.9</b> Izmjere ispitanih uzoraka.....	30
<b>Tablica 3.10</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za izravnavanje euroterma.....	30
<b>Tablica 3.11</b> Tlačne čvrstoće zidnih elemenata euroterma .....	31
<b>Tablica 3.12</b> Izmjere ispitanih uzoraka.....	31
<b>Tablica 3.13</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za izravnavanje betonskog bloka .....	32
<b>Tablica 3.14</b> Tlačne čvrstoće zidnih elemenata betonskog bloka .....	32
<b>Tablica 3.15</b> Izmjere ispitanih uzoraka.....	33
<b>Tablica 3.16</b> Tlačne čvrstoće zidnih elemenata ytonga .....	33

<b>Tablica 3.17</b> Usporedba tlačnih čvrstoća zidnih elemenata .....	34
<b>Tablica 3.18</b> Vrijednosti koeficijenta, $K$ , ovisno o vrsti morta .....	40
<b>Tablica 3.19</b> Granične vrijednosti karakteristične posmične čvrstoće, $f_{vko}$ .....	41
<b>Tablica 3.20</b> Izmjere ispitanih uzoraka .....	44
<b>Tablica 3.21</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje uzoraka .....	44
<b>Tablica 3.22</b> Tlačne čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke .....	46
<b>Tablica 3.23</b> Modul elastičnosti zidnog ispuna od blok opeke .....	46
<b>Tablica 3.24</b> Izmjere ispitanih uzoraka .....	47
<b>Tablica 3.25</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje uzoraka .....	47
<b>Tablica 3.26</b> Tlačne čvrstoće zidnog ispuna od euroterma .....	49
<b>Tablica 3.27</b> Modul elastičnosti zidnog ispuna od euroterma .....	49
<b>Tablica 3.28</b> Izmjere ispitanih uzoraka .....	50
<b>Tablica 3.29</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje uzoraka .....	50
<b>Tablica 3.30</b> Tlačne čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka .....	52
<b>Tablica 3.31</b> Modul elastičnosti zidnog ispuna od betonskog bloka .....	52
<b>Tablica 3.32</b> Izmjere ispitanih uzoraka .....	53
<b>Tablica 3.33</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje uzoraka .....	53
<b>Tablica 3.34</b> Tlačne čvrstoće zidnog ispuna od ytonga .....	55
<b>Tablica 3.35</b> Modul elastičnosti zidnog ispuna od ytonga .....	55
<b>Tablica 3.36</b> Usporedba tlačnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata .....	57
<b>Tablica 3.37</b> Usporedba modula elastičnosti zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata .....	58
<b>Tablica 3.38</b> Izmjere ispitanih uzoraka .....	62
<b>Tablica 3.39</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje uzoraka .....	62
<b>Tablica 3.40</b> Posmične čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke .....	63
<b>Tablica 3.41</b> Izmjere ispitanih uzoraka .....	64
<b>Tablica 3.42</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje uzoraka .....	64
<b>Tablica 3.43</b> Posmične čvrstoće zidnog ispuna od euroterma .....	65
<b>Tablica 3.44</b> Izmjere ispitanih uzoraka .....	66
<b>Tablica 3.45</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje uzoraka .....	66
<b>Tablica 3.46</b> Posmične čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka .....	67
<b>Tablica 3.47</b> Izmjere ispitanih uzoraka .....	68
<b>Tablica 3.48</b> Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje uzoraka .....	68
<b>Tablica 3.49</b> Posmične čvrstoće zidnog ispuna od ytonga .....	69
<b>Tablica 3.50</b> Usporedba posmičnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata .....	71
<b>Tablica 3.51</b> Granične vrijednosti posmičnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata .....	71
.....	
<b>POGLAVLJE 4:</b>	
<b>Tablica 4.1</b> Skaliranje dimenzija prototipa .....	74
<b>Tablica 4.2</b> Datumi izrade armirano-betonskih okvira modela .....	77
<b>Tablica 4.3</b> Tlačna čvrstoća betona armirano-betonskih okvira modela .....	77

<b>Tablica 4.4</b> Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti betona armirano-betonskih okvira modela .....	78
<b>Tablica 4.5</b> Granica popuštanja, vlačna čvrstoća i modul elastičnosti rebraste armature .....	79
<b>Tablica 4.6</b> Datumi zidanja zidnog ispuna.....	80
<b>Tablica 4.7</b> Dimenzije skaliranih zidnih elemenata .....	80
<b>Tablica 4.8</b> Tlačne čvrstoće morta za zidanje zidnog ispuna od opečnih blokova MO10 .....	82
<b>Tablica 4.9</b> Tlačne čvrstoće morta za zidanje zidnog ispuna od opečnih blokova MO5 .....	82
<b>Tablica 4.10</b> Tlačne čvrstoće ljepila za zidanje zidnog ispuna od porobetonkih blokova MO2,5 .....	83
<b>Tablica 4.11</b> Eksperimentalni rezultati ispitivanja zidnog ispuna .....	83
<b>Tablica 4.12</b> Oznake i ispitivanje modela.....	84
<b>Tablica 4.13</b> Karakteristike mjernih instrumenata.....	92
<b>Tablica 4.14</b> Prikaz zamjenjujućeg vertikalnog opterećenja na stupovima modela .....	94
<b>Tablica 4.15</b> Prikaz ostvarenog zamjenjujućeg vertikalnog opterećenja na stupovima modela .....	97
<b>Tablica 4.16</b> Mehanizmi sloma u ovisnosti o relativnoj čvrstoći armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna (Murty, 2000).....	100
<b>Tablica 4.17</b> Horizontalne sile u trenutku pojave pukotina u zidnom ispunu.....	104
<b>Tablica 4.18</b> Horizontalne sile u trenutku pojave prvih pukotina u zidnom ispunu .....	109
<b>Tablica 4.19</b> Horizontalne sile u trenutku pojave prvih pukotina u zidnom ispunu .....	113
<b>Tablica 4.20</b> Poprečna nosivost, $H$ [kN], pri određenim katnim pomacima .....	141
<b>Tablica 4.21</b> Poprečne sile u trenutku graničnih stanja idealiziranih eksperimentalnih krivulja nosivosti.....	147
<b>Tablica 4.22</b> Pregled koeficijenata duktilnosti i faktora ponašanja za GRUPE modela .....	148
<b>Tablica 4.23</b> Pregled koeficijenata duktilnosti i faktora ponašanja pri različitim katnim pomacima za GRUPE modela .....	148
<b>Tablica 4.24</b> Pregled koeficijenata duktilnosti i koeficijenata prigušenja ( $\xi_c$ [%]) pri različitim katnim pomacima za GRUPE modela .....	158
<b>Tablica 4.25</b> Fizikalna interpretacija koeficijenata oštetljivosti .....	159
<b>Tablica 4.26</b> Vrijednosti koeficijenata oštetljivosti povezane s EMS98.....	159
<b>Tablica 4.27</b> Vrijednosti katnih pomaka povezanih s EMS98.....	163
.....	
<b>POGLAVLJE 5:</b>	
<b>Tablica 5.1</b> Ulazni podaci i nosivost modela svake GRUPE.....	175-177
<b>Tablica 5.2</b> Prikaz analitičkih i eksperimentalno dobivenih poprečnih nosivosti.....	180
<b>Tablica 5.3</b> Usporedba analitičkih i eksperimentalno dobivenih krutosti.....	180
.....	
<b>POGLAVLJE 6:</b>	
<b>Tablica 6.1</b> Vrijednosti koeficijenata $k_1$ i $k_2$ .....	190
<b>Tablica 6.2</b> Parametri za definiranje odnosa naprezanje-deformacija modela betona prema Manderu.....	218
<b>Tablica 6.3</b> Parametri za definiranje odnosa naprezanje-deformacija modela čelika prema Menegotto-Pinto ..	218
<b>Tablica 6.4</b> Parametri za definiranje neelastičnog panel elementa prema Crisafulliu .....	220-222
<b>Tablica 6.5</b> Prikaz vrijednosti opterećenja na modelima .....	225
<b>Tablica 6.6</b> Poprečna nosivost, $H$ [kN], pri određenim katnim pomacima .....	231
.....	

**POGLAVLJE 7:**

Nema tablica

**POGLAVLJE 8:**

<b>Tablica 8.1</b> Vrijednosti odnosa visine i duljine armirano-betonskog okvira.....	256
<b>Tablica 8.2</b> Vrijednosti širine tlačne dijagonale.....	257
<b>Tablica 8.3</b> Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju geometrije .....	259
<b>Tablica 8.4</b> Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR) .....	260
<b>Tablica 8.5</b> Vrijednosti širine tlačne dijagonale prema raznim autorima.....	261
<b>Tablica 8.6</b> Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila u ovisnosti o utjecaju širine dijagonale .....	263
<b>Tablica 8.7</b> Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR) .....	264
<b>Tablica 8.8</b> Prikaz vrijednosti čvrstoće dijagonale .....	264
<b>Tablica 8.9</b> Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju čvrstoće dijagonale .....	265
<b>Tablica 8.10</b> Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR) .....	267
<b>Tablica 8.11</b> Iznosi vertikalnog opterećenja u stupovima armirano-betonskog okvira.....	268
<b>Tablica 8.12</b> Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju vertikalnog opterećenja u stupovima armirano-betonskog okvira .....	269
<b>Tablica 8.13</b> Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR) .....	270
<b>Tablica 8.14</b> Količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira.....	271
<b>Tablica 8.15</b> Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira.....	273
<b>Tablica 8.16</b> Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR) .....	274
<b>Tablica 8.17</b> Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira .....	275
<b>Tablica 8.18</b> Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR) .....	277
<b>Tablica 8.19</b> Vrijednosti pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju broja polja armirano-betonskog okvira .....	279
<b>Tablica 8.20</b> Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR) .....	281
<b>Tablica 8.20</b> Utjecaji pojedinih utjecaja na poprečnu nosivost, poprečnu krutost, sile u dijagonalama zidnog ispuna i unutarnje sile u stupovima .....	285

**POGLAVLJE 9:**

<b>Tablica 9.1</b> Svojstva zidnog elementa, morta i zidnog ispuna.....	294
<b>Tablica 9.2</b> Poprečni presjeci tlačnih štapova (tlačnih dijagonala).....	296
<b>Tablica 9.3</b> Raspored masa po visini modela – 4. kata.....	300
<b>Tablica 9.4</b> Raspored masa po visini modela – 7. katova.....	300
<b>Tablica 9.5</b> Raspored masa po visini modela – 10. katova.....	301
<b>Tablica 9.6</b> Osnovni periodi analitičkih modela za prvi oblik osciliranja konstrukcije.....	301
<b>Tablica 9.7</b> Vrijednosti parametara koje opisuju preporučeni elastični spektar odziva tipa 1.....	303
<b>Tablica 9.8</b> Potresna poprečna sila u podnožju.....	306
<b>Tablica 9.9</b> Raspodjela horizontalnih potresnih sila.....	306
<b>Tablica 9.10</b> Potresna poprečna sila u podnožju.....	308
<b>Tablica 9.11</b> Raspodjela horizontalnih potresnih sila.....	308
<b>Tablica 9.12</b> Potresna poprečna sila u podnožju.....	310
<b>Tablica 9.13</b> Raspodjela horizontalnih potresnih sila.....	310
<b>Tablica 9.14</b> Potresna poprečna sila u podnožju.....	312
<b>Tablica 9.15</b> Raspodjela horizontalnih potresnih sila.....	312
<b>Tablica 9.16</b> Potresna poprečna sila u podnožju.....	314
<b>Tablica 9.17</b> Raspodjela horizontalnih potresnih sila.....	314
<b>Tablica 9.18</b> Potresna poprečna sila u podnožju.....	316
<b>Tablica 9.19</b> Raspodjela horizontalnih potresnih sila.....	316
<b>Tablica 9.20</b> Usporedba horizontalnih potresnih sila u podnožju.....	318
<b>Tablica 9.21</b> Lista slučajeva opterećenja.....	319
<b>Tablica 9.22</b> Čvrstoće dijagonale za odabrani zidni ispun, $f_{mi}$ .....	322
<b>Tablica 9.23</b> Nosivosti dijagonala za odabrani zidni ispun, $R_c$ .....	322
<b>Tablica 9.24</b> Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 4. kata.....	323
<b>Tablica 9.25</b> Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 7. katova.....	323
<b>Tablica 9.26</b> Svojstva zidnog elementa (izmijenjena), morta i zidnog ispuna.....	324
<b>Tablica 9.27</b> Čvrstoće dijagonale za izmijenjeni zidni ispun, $f_{mi}$ .....	324
<b>Tablica 9.28</b> Nosivosti dijagonala za izmijenjeni zidni ispun, $R_c$ .....	324
<b>Tablica 9.29</b> Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 7. katova.....	325
<b>Tablica 9.30</b> Poprečni presjeci tlačnih štapova (tlačnih dijagonala) za izmijenjeni zidni ispun.....	325
<b>Tablica 9.31</b> Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 10. katova.....	326
<b>Tablica 9.32</b> Čvrstoće dijagonale za izmijenjeni zidni ispun, $f_{mi}$ .....	326
<b>Tablica 9.33</b> Nosivosti dijagonala za izmijenjeni zidni ispun, $R_c$ .....	327
<b>Tablica 9.34</b> Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 10. katova.....	327
<b>Tablica 9.35</b> Poprečni presjeci tlačnih štapova (tlačnih dijagonala) za izmijenjeni zidni ispun.....	328
<b>Tablica 9.36</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,1g$ .....	348
<b>Tablica 9.37</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,2g$ .....	351
<b>Tablica 9.38</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,3g$ .....	354
<b>Tablica 9.39</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,1g$ .....	357

<b>Tablica 9.40</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,2g$ .....	359
<b>Tablica 9.41</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,3g$ .....	362
<b>Tablica 9.42</b> Usporedba rezultata – 4. kata .....	364
<b>Tablica 9.43</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,1g$ .....	365
<b>Tablica 9.44</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,2g$ .....	367
<b>Tablica 9.45</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,3g$ .....	369
<b>Tablica 9.46</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,1g$ .....	372
<b>Tablica 9.47</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,2g$ .....	374
<b>Tablica 9.48</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,3g$ .....	376
<b>Tablica 9.49</b> Usporedba rezultata – 7. katova .....	378
<b>Tablica 9.50</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,1g$ .....	379
<b>Tablica 9.51</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,2g$ .....	381
<b>Tablica 9.52</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,2g$ .....	384
<b>Tablica 9.53</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,1g$ .....	386
<b>Tablica 9.54</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,2g$ .....	388
<b>Tablica 9.55</b> Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir – $a_g=0,3g$ .....	390
<b>Tablica 9.56</b> Usporedba rezultata – 10. katova .....	392

.....

**POGLAVLJE 10:**

**Nema tablica**

## POPIS SIMBOLA

### VELIKA LATINIČNA SLOVA

$A_b$	ploština poprečnog presjeka grede armirano-betonskog okvira
$A_d$	ploština presjeka tlačne dijagonale
$A_e$	ploština horizontalnog presjeka zidnog ispuna zajedno s armirano-betonskim okvirom
$A_{g,u}$	ploština uzorka zidnog elementa
$A_f$	ploština presjeka armirano-betonskog okvira (stupa)
$A_i$	ploština opterećenog poprečnog presjeka i-tog uzorka zidnog ispuna na tlak
$A_m$	ploština horizontalnog presjeka zidnog ispuna
$A_{m'}$	ploština poprečnog presjeka stupa modela
$A_{pi}$	ploština pod normalnom silom uzorka zidnog ispuna (kod određivanja posmične čvrstoće)
$A_p$	ploština poprečnog presjeka stupa modela prototipa
$A_{vi}$	ploština opterećena na posmik uzorka zidnog ispuna (kod određivanja posmične čvrstoće)
$A_s$	vlačna armatura u stupu armirano-betonskog okvira
B	kategorija tla
$C_E$	faktor utjecaja stupa armirano-betonskog okvira na krutost zidnog ispuna
$C_R$	koeficijent kakvoće zidanja
$D^*$	zahtjev pomaka SDOF sustava
$D_y^*$	pomak pri sili popuštanja SDOF sustava
$D_t$	horizontalni pomak MDOF sustava
E	modul elastičnosti zidnog ispuna (materijala)
$E_A$	energija apsorpcije
$E_D$	energija disipacije
$E_f=E_i$	modul elastičnosti armirano-betonskog okvira (betona $=E_{cm}$ )
$F_b$	potresna poprečna sila u podnožju
$F_i$	horizontalna sila na $i$ -tom katu
$F_{i,max}$	maksimalna tlačna sila i-tog uzorka zidnog ispuna određena ispitivanjem
$F_m$	sila sloma uzorka morta (zidnog elementa) pri tlaku
$F_{mt}$	sila sloma uzorka morta pri savijanju
$F_{pi}$	normalna sila na uzorku zidnog ispuna kod određivanja posmične čvrstoće
$F_{puk}$	tlačna sila pri pojavi prve pukotine (kod ispitivanja tlačne čvrstoće zidnog ispuna)
$F^u$	tlačna sila sloma (kod ispitivanja tlačne čvrstoće zidnog ispuna)
$F_y^*$	sila popuštanja SDOF sustava
G	modul posmika materijala
$G_f$	modul posmika armirano-betonskog okvira
$G_i$	modul posmika zidnog ispuna
$G_{k,j}$	stalno djelovanje
$G_p$	modul posmika zidnog ispuna u stanju manjeg oštećenja
H	horizontalna sila (kod ispitivanja MODELA), poprečna nosivost

$H_{cr,n}$	horizontalna sila u trenutku pojave pukotina u zidnom ispunu (kod ispitivanja MODELA)
$H_m$	čvrstoća tlačne dijagonale odnosno sila u dijagonali
$H_{max}$	maksimalna poprečna nosivost
$H_u$	granična poprečna nosivost
$H_{Rcr}$	posmična otpornost ab okvira ispunjenog zidnim ispunom u trenutku pojave prvih pukotina
$H_{Re}$	posmična otpornost ab okvira sa zidnim ispunom u trenutku odvajanja zidnog ispuna od ab okvira
$H_{Rf}$	granična sila otpora armirano-betonskog okvira (bez zidnog ispuna)
$H_{Ru}$	granična poprečna sila tj. nosivost armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom
$I$	moment tromosti horizontalnog presjeka zidnog ispuna
$I_b$	moment tromosti grede armirano-betonskog okvira
$I_e$	računski moment tromosti horizontalnog presjeka zidnog ispuna zajedno s armirano-betonskim okvirom
$I_f$	moment tromosti stupa armirano-betonskog okvira
$K$	sekantna krutost (poprečna krutost)
$K^*$	krutost SDOF sustava
$K_0$	početna krutost
$K_e$	krutost ab okvira ispunjenog zidnim ispunom u trenutku odvajanja zidnog ispuna od ab okvira
$K_i$	početna krutost armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom
$K_m$	računska krutost zidnog ispuna (horizontalna krutost tlačne dijagonale)
$K_s$	početna krutost tlačne dijagonale
$K_u$	krutost armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom kod dosezanja nosivosti
$M_R$	granični moment savijanja za armirano-betonski okvir
$N$	vertikalna sila koju preuzima zidni ispun
$N_f$	vertikalna sila u stupu armirano-betonskog okvira ( $N_f=N_{mi,d}$ )
$N_m$	uzdužna sila na modelu
$N_{mi}$	projektirana uzdužna sila na modelu
$N_{mi,d}$	ostvarena srednja uzdužna sila na modelu
$N_p$	uzdužna unutarnja sila u stupovima modela prototipa
$P_i$	horizontalna sila na $i$ -tom katu
$R_d$	sila u zamjenskim dijagonalama
$R_c$	nosivost dijagonale za odabrani zidni ispun
$R_\mu$	faktor umanjenja zbog duktilnosti
$S$	standardno odstupanje (faktor tla)
$S_a$	neelastični spektar ubrzanja
$S_{ae}$	elastični spektar ubrzanja (elastično ubrzanje)
$S_{ay}$	ubrzanje na granici popuštanja
$S_d$	neelastični spektar pomaka
$S_d(T)$	proračunski elastični spektar odziva
$S_{de}$	elastični spektar pomaka
$S_e(T)$	elastični spektar odziva
$T$	osnovni period konstrukcije



$T^*$	elastični period SDOF sustava
$T_B$	donja granica perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja
$T_C$	gornja granica perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja
$T_D$	vrijednost koja definira početak konstantnog raspona odziva u spektru pomaka
$V$	poprečna sila MDOF sustava
$Q_{k,i}$	korisno djelovanje

### MALA LATINIČNA SLOVA

$a$	koeficijent prijenosa vertikalnog opterećenja na zidni ispun
$a_g$	proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu
$a_{gR}$	poredbeno vršno ubrzanje temeljnog tla
$b$	parametar odnosa posmičnih čvrstoća u zidnom ispunu
$d$	horizontalni pomak (kod ispitivanja MODELA)
$d_1$	udaljenost težišta vlačne armature do bližeg ruba presjeka
$d_{cr}$	pomak pri kojem nastaju prve pukotine
$d_e$	pomak u trenutku odvajanja zidnog ispuna od armirano-betonskog okvira
$d_u$	pomak kod granične sile popuštanja
$f$	frekvencija konstrukcije
$f_b=f_{mc,norm}$	normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa
$f_{b,sr}=f_{mc,sr}$	srednja tlačna čvrstoća zidnog elementa
$f_{c,cr}$	naprezanje pri pojavi prve pukotine (kod ispitivanja tlačne čvrstoće zidnog ispuna)
$f_{c,w}$	tlačna čvrstoća zidnog ispuna (kod ispitivanja tlačne čvrstoće zidnog ispuna)
$f_{ck}$	karakteristična tlačna čvrstoća betona dobivena ispitivanjem
$f_{ck,t}$	tlačna čvrstoća betona nakon 365 dana
$f_{ct,m}$	vlačna čvrstoća betona
$f_{cw,sr}$	srednja vrijednost tlačne čvrstoće zidnog ispuna (dobivena ispitivanjem)
$f_{cwk}$	karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće zidnog ispuna (dobivena ispitivanjem)
$f_k$	karakteristična tlačna čvrstoća zidnog ispuna
$f_m$	nazivna tlačna čvrstoća morta
$(f_m)_{min}$	minimalna čvrstoća dijagonale
$f_{mc}$	tlačna čvrstoća zidnog elementa
$f_{m,sr}$	srednja tlačna čvrstoća morta
$f_{mt}$	vlačna čvrstoća morta pri savijanju
$f_{mt,sr}$	srednja vlačna čvrstoća morta pri savijanju
$f_{pi}$	normalno naprezanje na uzorku zidnog ispuna kod određivanja posmične čvrstoće
$f_t$	referentna vlačna čvrstoća zidnog ispuna
$f_u$	ispitivanjem dobivena srednja vrijednost vlačne čvrstoće armature
$f_{vk}$	karakteristična posmična čvrstoća zidnog ispuna
$f_{vko}$	karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće kada je $\sigma_d=0$
$f_{vo}$	srednja vrijednost početne posmične čvrstoće (kod ispitivanja posmične čvrstoće zidnog ispuna)

$f_{voi}$	početna posmična čvrstoća (kod ispitivanja posmične čvrstoće zidnog ispuna)
$f_x$	čvrstoća zidnog ispuna pri savijanju
$f_y$	ispitivanjem dobivena srednja vrijednost granice popuštanja armature
$f_{ws}$	posmična čvrstoća zidnog ispuna dobivena iz dijagonalno tlačnog ispitivanja
$g$	ubrzanje ( $g=9,81 [m/s^2]$ )
$g^{(i)}$	jednoliko površinsko stalno vertikalno opterećenje
$g'$	jednoliko raspodijeljeno linijsko stalno vertikalno opterećenje (vlt. zidnog ispuna)
$h$	visina zidnog ispuna
$h'$	osna visina stupa armirano-betonskog okvira
$h_b$	ukupna visina grede armirano-betonskog okvira iznad zidnog ispuna
$h_u$	visina uzorka zidnog elementa
$h_1, h_2$	efektivne visine armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna
$k$	koeficijent ovisan o vrsti morta
$k_w$	faktor kojim se uzima prevladavajući oblik sloma
$l$	duljina zidnog ispuna
$l'$	osna duljina grede armirano-betonskog okvira
$l_d$	duljina tlačne dijagonale zidnog ispuna
$l_c$	stranica (uzdužna, tj. u pravcu duljine zidnog ispuna) presjeka stupa armirano- betonskog okvira
$l_u$	duljina uzorka zidnog elementa
$m_i, m_j$	mase katova
$m$	ukupna masa zgrade iznad temelja
$m^*$	ekvivalentna masa SDOF sustava
$t$	debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna)
$t_c$	stranica presjeka stupa okomito na smjer duljine zidnog ispuna
$z_i, z_j$	visina masa $m_i, m_j$
$w$	širina tlačne dijagonale zidnog ispuna
$w_u$	širina uzorka zidnog elementa
$q$	faktor ponašanja
$q_0$	osnovni faktor ponašanja
$q^{(i)}$	jednoliko površinsko korisno vertikalno opterećenje
$q'$	jednoliko raspodijeljeno linijsko korisno vertikalno opterećenje (vlt. ograde)
$x$	visina tlačnog područja presjeka stupa armirano-betonskog okvira

### VELIKA GRČKA SLOVA

$\Delta T/\Delta C$	produljenje/skraćenje dijagonala (kod ispitivanja MODELA)
$\Phi_i$	oblik pomaka
$\Gamma$	faktor sudjelovanja

**MALA GRČKA SLOVA**

$\alpha$	vrijednost kuta unutarnjeg trenja (kod ispitivanja posmične čvrstoće zidnog ispuna)
$\alpha_1$	kontaktna duljina zidnog ispuna i grede armirano-betonskog okvira
$\alpha_h$	kontaktna duljina zidnog ispuna i stupa armirano-betonskog okvira
$\alpha_k$	karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja (kod ispitivanja posmične čvrstoće zidnog ispuna)
$\beta$	donja vrijednost faktora horizontalnog spektra odziva
$\delta$	faktor oblika zidnog elementa
$\varepsilon$	normalna deformacija
$\varepsilon_{1/3}$	pripadna relativna deformacija
$\gamma$	ekvivalentna relativna posmična deformacija
$\gamma_I$	relativna posmična deformacija armirano-betonskog okvira (kategorija značaja)
$\gamma_{II}$	relativna posmična deformacija zidnog ispuna
$\eta$	faktor korekcije prigušenja uz poredbenu vrijednost $\eta=1,00$ za 5%-tno viskozno prigušenje
$\varphi$	kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu
$\lambda$	relativna krutost
$\lambda_b$	relativna krutost grede armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna
$\mu$	koeficijent duktilnosti
$\sigma$	normalno naprezanje
$\sigma_d$	računsko vertikalno tlačno naprezanje u zidu
$\sigma_m$	normalno naprezanje u stupovima modela
$\sigma_{mi,d}$	ostvareno normalno naprezanje u stupovima modela
$\sigma_p$	normalno naprezanje u stupovima modela prototipa
$\xi$	omjer viskoznog prigušenja konstrukcije
$\xi_e$	koeficijent prigušenja
$\psi_{E,i}$	faktor kombinacije za promjenjivo djelovanje
$\theta_1, \theta_2$	nagibi dijagonale armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna u odnosu na horizontalnu liniju modela



## POGLAVLJE 1: UVOD

---

### 1.1 DOSADAŠNJE SPOZNAJE

Primjena armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom izvedenim nakon očvršćivanja okvira, tradicionalna je pri izvedbi niskih i srednje visokih objekata i čini većinu građevina u Republici Hrvatskoj, a i u cijeloj Jugoistočnoj Europi. Zidnim ispunom najčešće se ostvaruje arhitektonska namjena objekta, a konstruktivni doprinos zanemaruje se, što podrazumijeva odvajanje zidnoga ispuna od okvira. Takva izvedba rijetka je i najčešće se zidni ispun izvodi tik uz okvir ili se, čak, koristi kao oplata okvira.

Međutim, još uvijek se njihovo zajedničko djelovanje rijetko uzima u obzir, što otvara potrebu za daljnjim istraživanjima utjecaja zidnoga ispuna [51]. Stoga je razumljiva i poprilična istraživačka aktivnost u tome području, a to pokazuju i brojna eksperimentalna ispitivanja dostupna u nedavno objavljenoj literaturi [5, 35, 40]. Pri tome se, između ostalog, najčešće ukazuje na povećanje krutosti, čvrstoće i kapaciteta trošenja energije, te ujedno na smanjivanje veličina zahtijevanih pomaka u učinke 2. reda. Do tada se, pri projektiranju novih sustava „okvir+zid“, kao što se to i navodi u EN 1998-1 [26], prvenstveno pozornost pridavala izbjegavanju mogućih nepovoljnih učinaka ispuna uz zanemarivanje njegovoga povoljnog djelovanja. Dapače, dokaz sigurnosti postojećih objekata, kako se to navodi u EN 1998-3 [27], također ne uzima u obzir njihovo konstrukcijsko sudjelovanje niti daje ikakve smjernice u tome pogledu kod ojačanja i sanacija. Stoga se, sukladno analiziranim primjerima iz literature, i u ovome radu, prilikom dimenzioniranja okvira na djelovanje poprečnih sila zanemarivao utjecaj zidnoga ispuna.

Jedan od glavnih doprinosa ovoga rada očituje se upravo u uključivanju zidnoga ispuna u nosivi konstrukcijski sustav „okvir+zid“ s ciljem definiranja postupka zadovoljavajuće pouzdanosti i metoda ocjena ponašanja [43]. Složene „okvir+zid“ konstrukcije kompoziti su sastavljeni od armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna. Često se dijele u jake i slabe, a da pri tome nisu jasno definirani parametri njihove ocjene. Jaki okvir uobičajeno se odnosi na prazan okvir dokazane potresne otpornosti sa sljedećim karakteristikama: dimenzioniranje po principu jaki stup-slaba greda, smanjen razmak poprečne armature u stupovima, gredama i pogotovo njihovim spojevima te većom zahtijevanom tlačnom čvrstoćom betona.

Čvrstoća zidnoga ispuna gotovo se uvijek povezuje s njegovom tlačnom čvrstoćom, temeljem koje se, uvjetno, može podijeliti na meku, srednju i jaku ispunu. Mehanizam sloma, te duktilnost takvih objekata, međutim, ovisi i o dodatnim faktorima poput geometrije (odnosa raspona i visine), relativnog omjera krutosti i čvrstoća okvira i zidnoga ispuna, rješenja detalja okvira sukladno principima duktilnosti, te rasporeda zidova kako po tlorisu, tako i po visini cjelokupnoga objekta. Ako su krti neelastični učinci spriječeni (to znači izostanak velikih oštećenja zidnog ispuna, popuštanja prionjivosti i posmičnog sloma elemenata okvira), opadanje krutosti i smanjenje čvrstoće pri djelovanju cikličkog opterećenja mogu se smatrati prihvatljivim [31, 56].

Izvješća s potresom pogođenih područja pokazala su kako postoji međudjelovanje armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna, te da se doprinos zidnoga ispuna ne smije zanemariti jer može uzrokovati neočekivane mehanizme sloma. Danas je svijest o tome uvelike prisutna, što je vidljivo i iz postojećih normativa za projektiranje građevina, ali još uvijek ne postoji dovoljno istraživačkoga iskustva. Dosadašnje spoznaje o utjecaju zidnoga ispuna oprečne su, stoga, smjernice za projektiranje pretežno uzimaju u obzir njegov negativni utjecaj, dok se pozitivni doprinos zanemaruje. Nepovoljni utjecaj zidnoga ispuna posljedica je nejednolike raspodjele u tlocrtu ili po visini na razini cijeloga objekta, dok se na razini okvira očituje u stvaranju koncentriranih sila na okvir i nastanku nepovoljnih i/ili nepredviđenih konstruktivnih sustava. Zanemarivanjem zidnoga ispuna konstrukcija ima drukčiji odgovor od očekivanoga te objekt može doći u neželjeno stanje. Uzimanjem u obzir zidnoga ispuna realnije se predstavlja stvarno ponašanje građevine, a moguće su i racionalizacije u dimenzioniranju.

U okviru doktorskoga rada istražen je utjecaj različitih zidnih ispuna na seizmički odgovor armirano-betonskog okvira dimenzioniranog prema Eurokodovima [24, 25, 26, 27]. Istraživanje će se sastojati iz eksperimentalnog i analitičkog dijela s ciljem iznalaženja prikladnih metoda proračuna armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom. Problemi proizlaze iz razmatranja kompozitnog sustava armirano-betonskog okvira i zidnoga ispuna, koji je zbog složenosti međudjelovanja s armirano-betonskim okvirom te anizotropije gradiva, nedovoljno istražen. Okviri su visoko fleksibilne i duktilne konstrukcije. Zidni ispun je krut i krt materijal koji ne podnosi velike deformacije. Okvir sa zidnim ispunom pri djelovanju potresa ponaša se između ziđa i okvira.

Suvremenim projektiranjem seizmički otpornih građevina nastoji se s određenom pouzdanošću procijeniti stupanj oštećenja objekta pri djelovanju potresa, uz uvjete ograničenog oštećenja pri slabim i srednje jakim, te sprječavanje rušenja pri jakim potresima. Težnja je, da se s obzirom na zahtjeve korisnika, objekt izvede i projektira racionalno i ekonomično s određenom pouzdanošću, zbog čega će ovo istraživanje doprinijeti boljem razumijevanju međudjelovanja armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom.

## 1.2 CILJEVI ISTRAŽIVANJA

U okviru istraživanja razmatran je utjecaj različitih vrsta zidnoga ispuna na seizmički odgovor armirano-betonskih okvira. Ciljevi istraživanja su: eksperimentalno ispitivanje okvira sa zidnim ispunom, utvrđivanje primjenjivosti različitih modela za analizu ponašanja okvira sa zidnim ispunom, proširenje saznanja na okvire različitih dimenzija, usporedba numeričkih rezultata s ispitivanjem okvira sa zidnim ispunom u stvarnoj veličini, mogućnost projektantski primjenjivog modela za okvire sa zidnim ispunom kao kompozitnog sustava. To će omogućiti projektiranje koje uzima u obzir doprinos zidnoga ispuna.

## 1.3 ZNANSTVENE METODE, METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA

Rad na disertaciji obuhvaća eksperimentalni dio izveden u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Građevinskog fakulteta Osijek, te numerički dio izveden primjenom različitih računalnih programa. Kratki prikaz metodologije istraživanja čine:

1. Izbor modelne okvirne zgrade (modela prototipa).
2. Izrada modela armirano-betonskog okvira u mjerilu 1:2,5 s potpunom sličnošću;
3. Ispitivanje svojstava materijala zidnoga ispuna: 4 vrste blok ispuna, 1 vrsta morta, 1 vrsta ljepila, 3 vrste zidnog ispuna.
4. Ispitivanje armirano-betonskih okvira bez zidnoga ispuna i s 3 vrste (jaki, srednji i meki) zidnog ispuna pri konstantnoj vertikalnoj i ciklički promjenjivoj horizontalnoj sili i mjerenjem globalnih i lokalnih parametara ponašanja. Ukupno je ispitano 10 modela radi statističke pouzdanosti rezultata.
5. Obrada eksperimentalnih rezultata s ciljem analize mehanizma sloma, histereznog ponašanja, anvelopa krivulja odgovora, duktilnosti i faktora ponašanja.
6. Numerički (analitički) dio koji se sastoji od:
  - 6.1. pregleda metoda proračuna pomoću zamjenjujuće dijagonale (numerički

- makro-model),
- 6.2. podešavanja numeričkog dijela prema rezultatima eksperimenta,
- 6.3. proširivanja eksperimentalnih rezultata numeričkim primjenjujući ih na različite dimenzije armirano-betonskog okvira.
- 7. Usporedba eksperimentalnih rezultata s numeričkim rezultatima.
- 8. Parametarska analiza što se tiče geometrije armirano-betonskoga okvira, geometrije tlačne dijagonale, čvrstoće dijagonale (zidnog ispuna), vertikalnog opterećenja u stupovima, količine armature u stupovima, poprečnog presjeka stupova, broja polja, te načina nanošenja horizontalnog opterećenja.
- 9. Prijedlog metode proračuna armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom;
- 10. Osvrt, zaključak i preporuke.



## POGLAVLJE 2: PROTOTIP

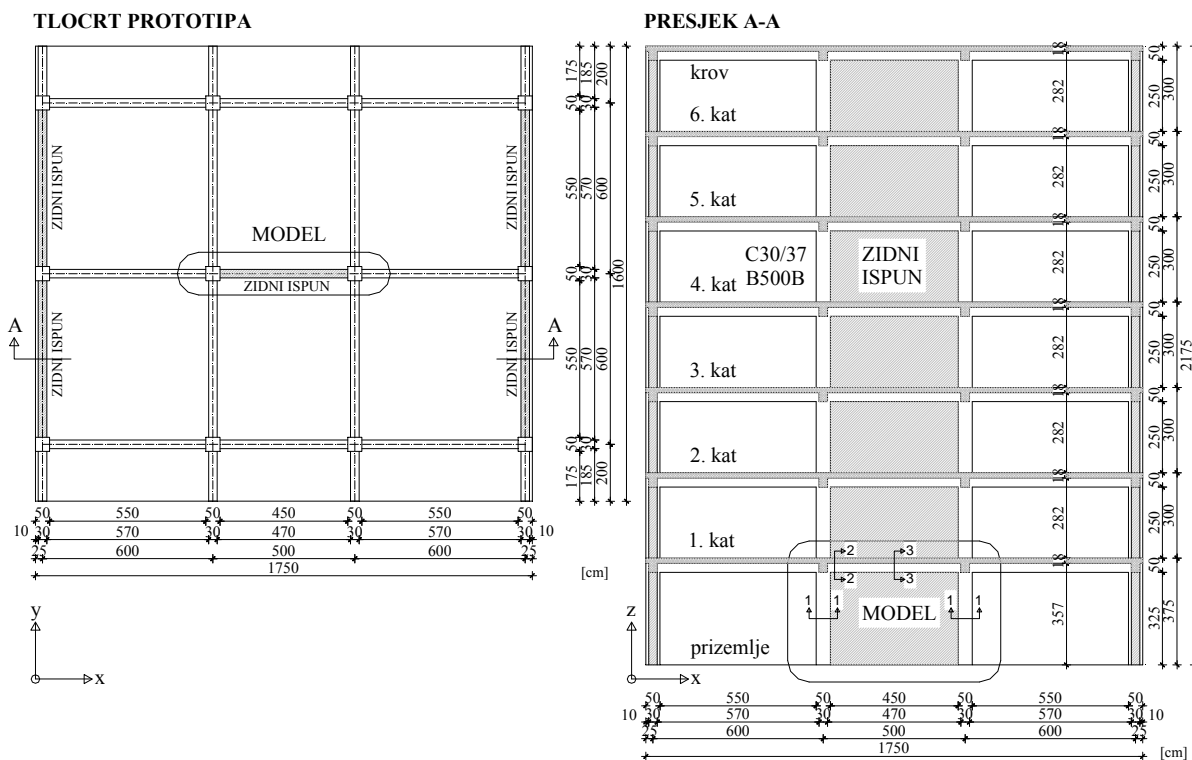
### 2.1 UVOD

Kako bi se dobio MODEL armiranobetonskog okvira za ispitivanje korištena je standardna armiranobetonska okvirna konstrukcija (prototip). Ovaj prototip odabran je kako bi se dobile dimenzije poprječnih presjeka (stupova i grede), raspon, visina i na kraju potrebna, odnosno odabrana armatura u stupovima, ili gredi MODELA. Isto tako, stvarne dimenzije prototipa skalirane su u određenome mjerilu kako bismo dobili MODEL za ispitivanje.

Prototip je pravilnoga oblika po tlocrtu i po visini. Zidni ispun na prototipu simetričnog je rasporeda po tlocrtu kao i po visini, nema dodatne torzije, odnosno koncentracije deformacija uslijed nejednolike raspodjele zidnoga ispuna po visini.

### 2.2 ULAZNI PODATCI O PROTOTIPU

Prototip je standardna armiranobetonska okvirna konstrukcija tlocrtnih dimenzija 16,00x17,50m, visine prizemlja 3,75m i visine katova 3m. Sastoji se od prizemlja i šest katova. Tlocrt i karakteristični poprječni presjek prototipa prikazani su na *slici 2.1*.



Slika 2.1 Model prototipa

Prototip se sastoji od tri armirano betonska okvira u uzdužnom x-smjeru i četiri armirano betonska okvira u poprečnom y-smjeru. Armirano betonski okviri su na nivoima etaže ukrućeni armirano betonskim stropnim pločama debljine 18cm. Poprječni presjeci stupova su 50/50cm, dok su grede 30/50cm. Zidni ispun debljine je 30cm, nalazi se u dvama krajnjim armirano betonskim okvirima u poprečnom smjeru i u srednjem polju srednjega armirano-betonskog okvira u uzdužnom smjeru. Prototip je projektiran za izvođenje od betona klase C30/37 i armature kvalitete B500B.

Opterećenje na prototipu uzeto je sa vrijednostima koje su prikazane u **tablici 2.1**. Zamjenjujuće linijsko opterećenje zidnoga ispuna zadano je prema tlocrtu prototipa (gdje se zidni ispun nalazi). Raspodjela površinskoga korisnog opterećenja vršena je pravilom šahovskog polja. Korisno linijsko opterećenje od ograde (1,00kN/m) zadano je po konzolnim rubovima armiranobetonske ploče. Vlastita težina svih konstruktivnih elemenata (stupovi, grede, ploče) generirana je računalnim programom u prostornom proračunskome modelu. Vlastita težina zidnoga ispuna na katovima uzeta je ovisno o vrsti zidnog ispuna, sa sljedećim vrijednostima:

- Blok opeka:  $g' = 0,30 \times 2,50 \times 16 = 12,00 \text{ kN/m}$ ;
- Euroterm:  $g' = 0,30 \times 2,50 \times 11 = 8,25 \text{ kN/m}$ ;
- Ytong:  $g' = 0,30 \times 2,50 \times 5 = 3,75 \text{ kN/m}$ .

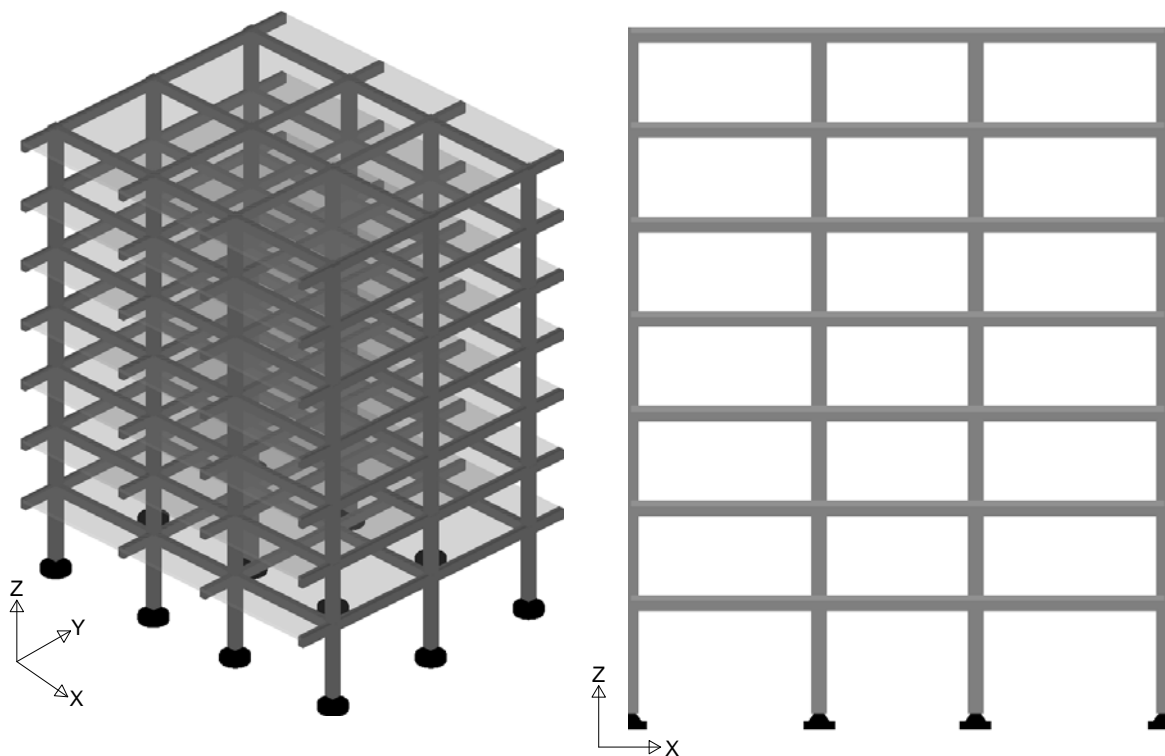
**Tablica 2.1** Opterećenje na prototipu

Kat	Opterećenje	Stalno+vlt		Korisno1		Korisno2		Korisno3		Korisno4	
	Ispun	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m']	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m']	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m']	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m']	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m']
krov	BLOK OPEKA	2,00	-	1,25	-	1,25	-	-	-	-	-
	EUROTERM	2,00	-	1,25	-	1,25	-	-	-	-	-
	YTOG	2,00	-	1,25	-	1,25	-	-	-	-	-
6.-1.	BLOK OPEKA	1,75	12,00	-	-	-	-	3,00	1,00	3,00	1,00
	EUROTERM	1,75	8,25	-	-	-	-	3,00	1,00	3,00	1,00
	YTOG	1,75	3,75	-	-	-	-	3,00	1,00	3,00	1,00

## 2.3 MATEMATIČKI MODEL PROTOTIPA

### 2.3.1 Uvod

Prostorni proračunski model prototipa za dobivanje unutarnjih sila, odnosno dimenzioniranje armirano-betonskih elemenata, modeliran je u programskom paketu Tower5, a koji je prikazan na *slici 2.2*. Proračun vlastitih vrijednosti, seizmička analiza i dimenzioniranje armirano betonskih elemenata rađeni su sukladno EC2 [24] i EC8 [26] normama.



Slika 2.2 Prostorni proračunski model prototipa i karakteristični okvir

### 2.3.2 Ulazni podatci

Ulazni podatci prototipa, koji su zadani u programskom paketu Tower5, dani su u tablicama kako slijedi.

Tablica 2.2 Shema nivoa

Naziv	z [m]	h [m]
krov	21.75	3.00
6 kat	18.75	3.00
5 kat	15.75	3.00
4 kat	12.75	3.00
3 kat	9.75	3.00
2 kat	6.75	3.00
1 kat	3.75	3.75
pod	0.00	

**Tablica 2.3** Tablica materijala

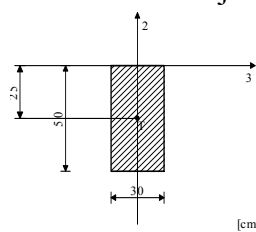
No	Naziv materijala	$E[\text{kN/m}^2]$	$\mu$	$\gamma[\text{kN/m}^3]$	$\alpha_t[1/\text{C}]$	$E_m[\text{kN/m}^2]$	$\mu_m$
1	Beton C30/37	3.350e+7	0.2	25.00	1.000e-5	3.350e+7	0.2

**Tablica 2.4** Oznake ploča

No	d[m]	e[m]	Materijal	Tip proračuna	Ortotropija	$E_2[\text{kN/m}^2]$	$G[\text{kN/m}^2]$	$\alpha$
<1>	0.180	0.000	1	Tanka ploča	Izotropna			

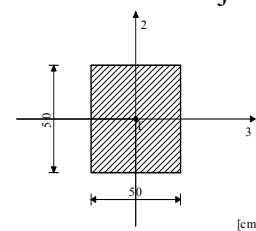
**Tablica 2.5** Oznake greda i stupova

Oznaka: 1 Presjek: Pravokutni



Mat.	P/Z	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1		1.500e-1	1.250e-1	1.250e-1	2.817e-3	1.125e-3	3.125e-3

Oznaka: 2 Presjek: Pravokutni



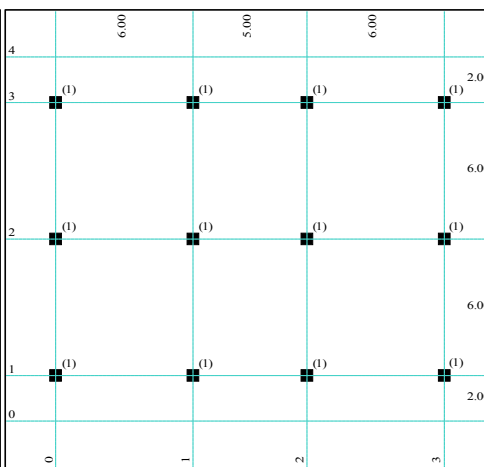
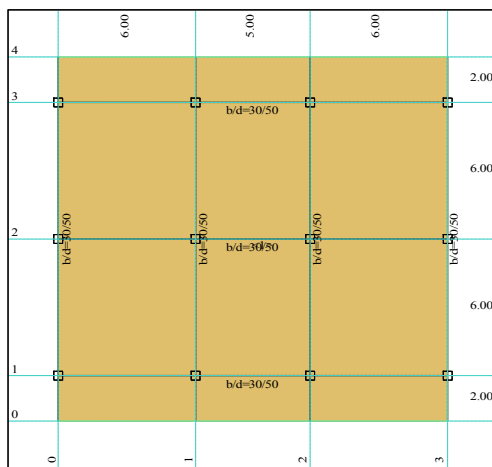
Mat.	P/Z	A1	A2	A3	I1	I2	I3
1		2.500e-1	2.083e-1	2.083e-1	8.802e-3	5.208e-3	5.208e-3

**Tablica 2.6** Oznake točkastih ležajeva

Oznaka	K,R1	K,R2	K,R3	Os 1			Os 2		
	K,M1	K,M2	K,M3	x	y	z	x	y	z
1	1.000e+10	1.000e+10	1.000e+10	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
	1.000e+10	1.000e+10	1.000e+10						

Karakteristična etaža prostornog modela ista je na svim nivoima i prikazana je na *slici*

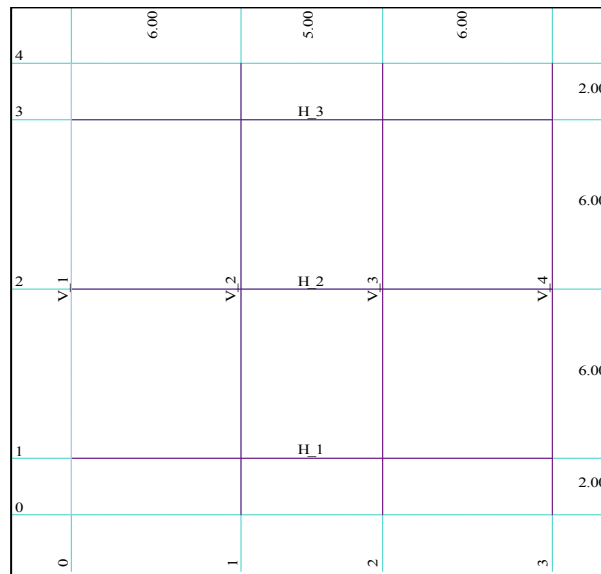
2.3. Dispozicija točkastih ležajeva dana je na *slici* 2.4.



**Slika 2.3** Tlocrt karakteristične etaže

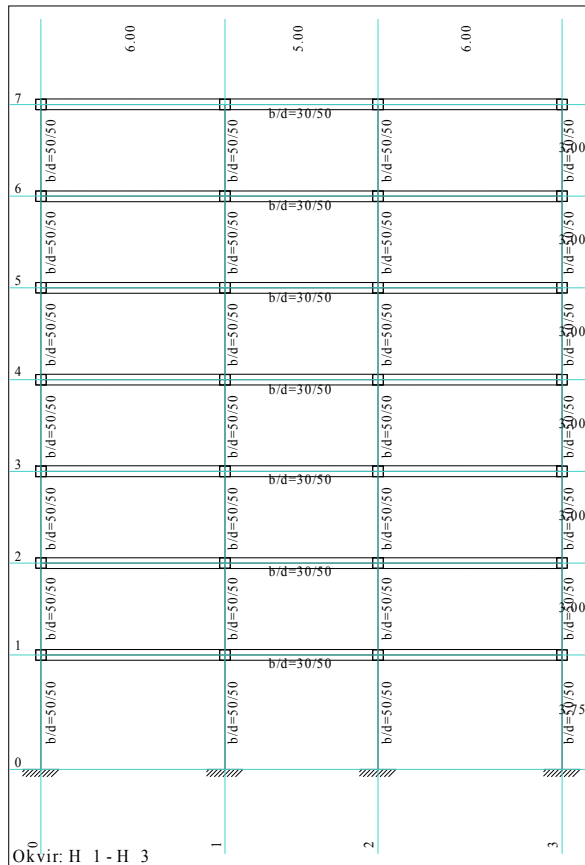
**Slika 2.4** Dispozicija točkastih ležajeva

Na *slici 2.5* nalazi se dispozicija armiranobetonskih okvira u uzdužnom x-smjeru (okviri H\_1 do H\_3) i poprečnom y-smjeru (V\_1 do V\_4).

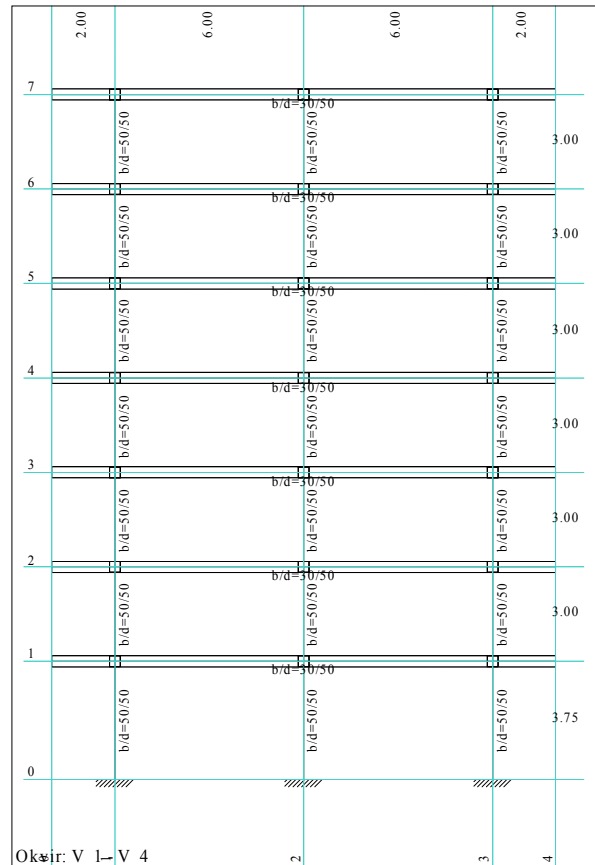


**Slika 2.5** Dispozicija armiranobetonskih okvira

Karakteristični okviri prema dispoziciji prikazani su na *slici 2.6* i *slici 2.7*. Okviri u uzdužnom x-smjeru (okviri H\_1 do H\_3) isti su kao i u poprečnom y-smjeru (V\_1 do V\_4).



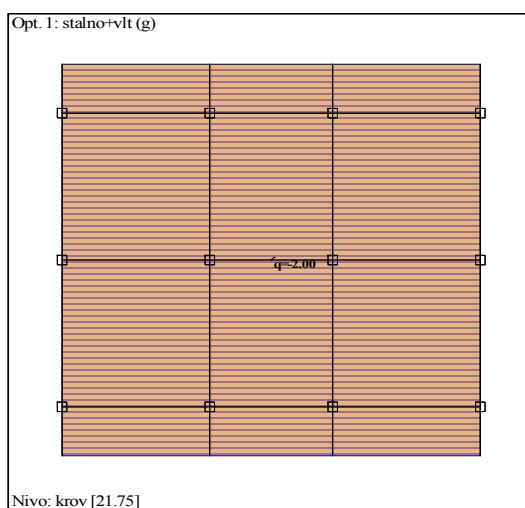
**Slika 2.6** Karakteristični okvir (H\_1 do H\_3)



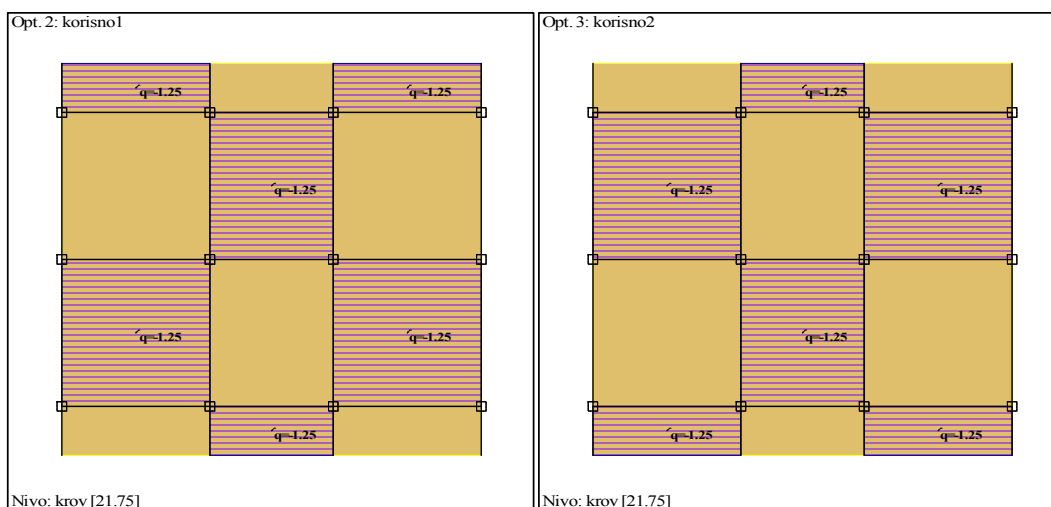
**Slika 2.7** Karakteristični okvir (V\_1 do V\_4)

### 2.3.3 Analiza opterećenja

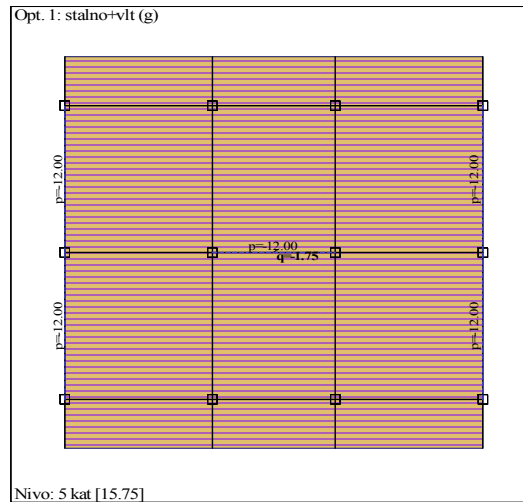
Opterećenje na prototipu uzeto je, kako je navedeno u ulaznim podacima o prototipu. Treba spomenuti kako je stalno opterećenje zadano kao površinsko opterećenje u iznosu od  $g_1=2,00\text{kN/m}^2$  na krovnoj ploči i  $g_2=1,75\text{kN/m}^2$  po katovima. Raspodjela korisnog opterećenje vršena je po šahovskom polju u iznosu od  $q_1=1,25\text{kN/m}^2$  na krovnoj ploči i  $q_2=3,00\text{kN/m}^2$  po katovima. Zamjenjujuće stalno linijsko opterećenje zidnoga ispuna (blok opeka) iznosi  $g'=12,00\text{kN/m}'$ , dok zamjenjujuće korisno linijsko opterećenje od ograde iznosi  $q'=1,00\text{kN/m}'$ . Raspodjela stalnog i korisnog opterećenja prikazana je na **slikama 2.8-2.11**. Korisna opterećenja krovne ploče zadavana su kao novi slučajevi opterećenja u odnosu na ostale stropne ploče radi modalne analize.



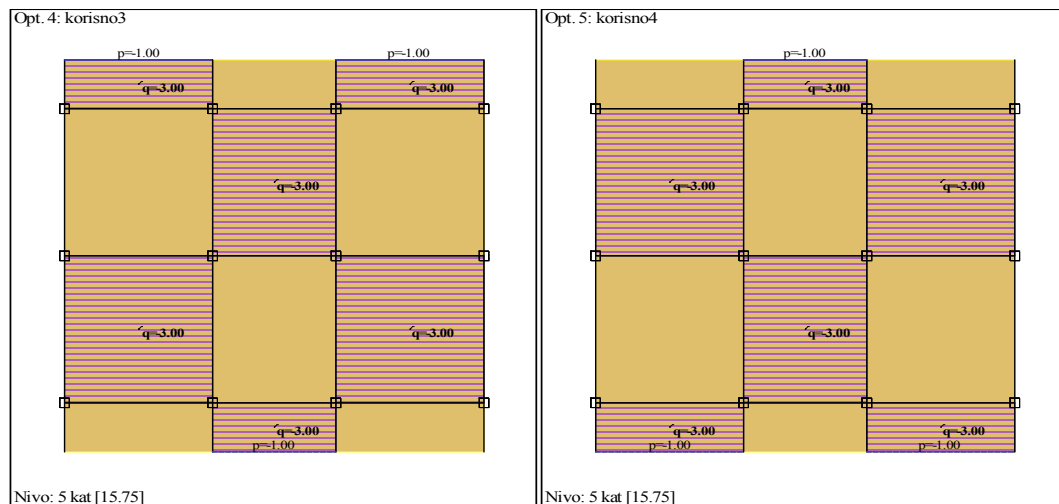
Slika 2.8 Raspodjela stalnog opterećenja po krovnoj ploči



Slika 2.9 Raspodjela korisnog opterećenja po krovnoj ploči



Slika 2.10 Raspodjela stalnog opterećenja po stropnim pločama 1.-6. kata



Slika 2.11 Raspodjela korisnog opterećenja po stropnim pločama 1.-6. kata

### 2.3.4 Proračun vlastitih vrijednosti

Proračun vlastitih vrijednosti prototipa napravljen je u programskom paketu Tower5 korištenjem mreže konačnih elemenata. Faktori opterećenja za proračun masa računaju se prema Eurocode 8 [26] i njihove vrijednosti dane su u **tablici 2.7**. Također, raspored masa po visini objekta nalaze se u **tablici 2.8**.

Tablica 2.7 Faktori opterećenja za proračun masa

No	Naziv	Koeficijent
1	stalno+vlt (g)	1.00
2	korisno1	0.30
3	korisno2	0.30
4	korisno3	0.15
5	korisno4	0.15

**Tablica 2.8** Raspored masa po visini objekta

Nivo	Z [m]	Masa [T]
krov	21.75	246.13
6 kat	18.75	301.76
5 kat	15.75	288.76
4 kat	12.75	288.76
3 kat	9.75	288.76
2 kat	6.75	288.76
1 kat	3.75	291.63
pod	0.00	14.34
	$\Sigma=$	2008.89

Nakon što su zadani faktori opterećenja za dobivanje masa kao i njihov raspored po visini, dobiveni su osnovni periodi konstrukcije, odnosno frekvencije za 21 ton (za svaku masu zadana su po tri tona, budući da svaka masa ima tri stupnja slobode). Njihove vrijednosti nalaze se u *tablici 2.9*, a prva tri tona osciliranja konstrukcije prikazani su na *slikama 2.12-2.14*.

**Tablica 2.9** Periodi osciliranja konstrukcije

No	T [s]	f [Hz]
1	0.9214	1.0853
2	0.8739	1.1443
3	0.7899	1.2660
4	0.2982	3.3532
5	0.2842	3.5186
6	0.2569	3.8931
7	0.1692	5.9107
8	0.1629	6.1393
9	0.1481	6.7503
10	0.1155	8.6572
11	0.1122	8.9131
12	0.1018	9.8245
13	0.0868	11.5258
14	0.0851	11.7467
15	0.0770	12.9815
16	0.0701	14.2609
17	0.0695	14.3946
18	0.0627	15.9587
19	0.0611	16.3685
20	0.0610	16.4027
21	0.0548	18.2326

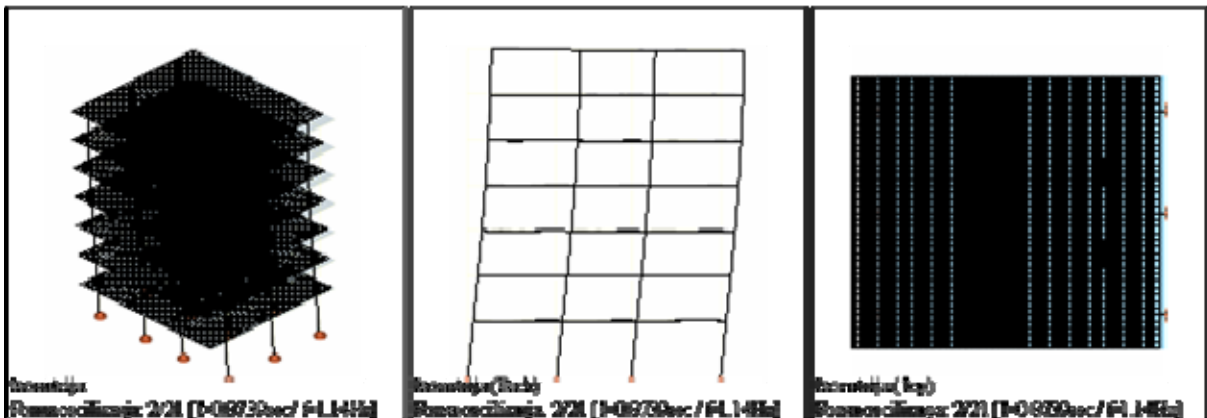
Prvi ton osciliranja konstrukcije prikazan je na *slici 2.12*, odnosi se na prvi oblik osciliranja modela (konstrukcije) prototipa u poprečnom smjeru (smjer\_y).





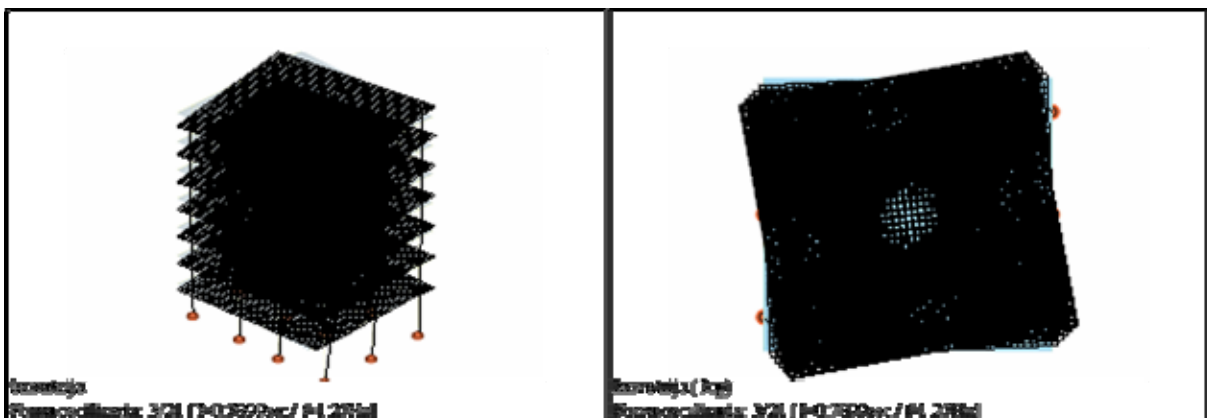
Slika 2.12 Prikaz osciliranja 1. oblika konstrukcije prototipa

Drugi ton osciliranja konstrukcije prikazan je na *slici 2.13*, odnosi se na prvi oblik osciliranja modela (konstrukcije) prototipa u uzdužnom smjeru (smjer\_x).



Slika 2.13 Prikaz osciliranja 2. oblika konstrukcije prototipa

Treći ton osciliranja konstrukcije prikazan je na *slici 2.14*, odnosi se na torzioni oblik osciliranja modela (konstrukcije) prototipa.



Slika 2.14 Prikaz osciliranja 3. oblika konstrukcije prototipa

### 2.3.5 Seizmička analiza

Nakon što smo napravili proračun vlastitih vrijednosti konstrukcije tj., dobili osnovne periode osciliranja konstrukcije, možemo izračunati horizontalne seizmičke sile. Za izračun horizontalnih seizmičkih sila prema Eurocode 8 [26] zadani su sljedeći parametri:

Kategorija tla:	<b>B;</b>
Kategorija značaja:	<b>II;</b>
Odnos $a_g/g$ ( $\alpha$ ):	<b>0,20;</b>
Faktor ponašanja ( $q$ ):	<b>3,90.</b>

Faktori pravca potresa u kombinacijama horizontalnih komponenta potresnog djelovanja prema Eurocodeu 8 [26] zadaju se prema **tablici 2.10**.

**Tablica 2.10** Faktori pravca potresa

Naziv	K <sub>x</sub>	K <sub>y</sub>	K <sub>z</sub>
potres_x	1.000	0.300	0.000
potres_y	0.300	1.000	0.000

Linearno-elastičnim proračunom, tj. seizmičkim proračunom po Eurocodeu 8 [26] zasnovanom na multimodalnoj analizi konstrukcije, pri čemu se u obzir uzima utjecaj svih proračunatih tonova iz proračuna vlastitih vrijednosti, izračunate su horizontalne seizmičke sile po visini objekta, kao i ukupna horizontalna seizmička sila za model prototipa u oba smjera (pravca), te su prikazane u **tablici 2.11** i **2.12**.

**Tablica 2.11** Horizontalne seizmičke sile za pravac\_x (potres\_x)

Nivo	Z [m]	Svi tonovi		
		P <sub>x</sub> [kN]	P <sub>y</sub> [kN]	P <sub>z</sub> [kN]
krov	21.75	264.10	75.44	0.00
6 kat	18.75	333.10	95.41	-0.00
5 kat	15.75	332.92	95.94	0.00
4 kat	12.75	346.94	100.85	-0.00
3 kat	9.75	356.87	104.95	0.00
2 kat	6.75	369.47	108.98	0.00
1 kat	3.75	432.05	127.75	0.00
pod	0.00	0.00	0.00	-0.00
	$\Sigma=$	<b>2435.4</b>	<b>709.32</b>	<b>0.00</b>

**Tablica 2.12** Horizontalne seizmičke sile za pravac *y* (potres *y*)

Nivo	Z [m]	Svi tonovi		
		Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]
krov	21.75	79.23	251.46	0.00
6 kat	18.75	99.93	318.05	-0.00
5 kat	15.75	99.88	319.80	0.00
4 kat	12.75	104.08	336.17	-0.00
3 kat	9.75	107.06	349.82	0.00
2 kat	6.75	110.84	363.28	0.00
1 kat	3.75	129.61	425.82	0.00
pod	0.00	0.00	0.00	-0.00
	<b>Σ=</b>	<b>730.63</b>	<b>2364.4</b>	<b>0.00</b>

Faktori participacije prikazani u *tablici 2.13* govore nam koliko se mase objekta aktiviralo po pojedinim oblicima i ukupno kako bi se dobile horizontalne seizmičke sile. Eurocode 8 [26] zahtijeva da zbroj proračunskih modalnih masa za oblike, koji su uzeti u obzir, iznosi najmanje 90% ukupne mase konstrukcije. U našem slučaju vidimo kako ispunjavamo traženi zahtjev jer se u svim oblicima osciliranja konstrukcije aktiviralo 99,04% mase konstrukcije.

**Tablica 2.13** Faktori participacije

Ton	UX (%)	UY (%)	UZ (%)	ΣUX (%)	ΣUY (%)	ΣUZ (%)
1	0.00	85.67	0.00	0.00	85.67	0.00
2	86.39	0.00	0.00	86.39	85.67	0.00
3	0.00	0.00	0.00	86.39	85.67	0.00
4	0.00	9.22	0.00	86.39	94.89	0.00
5	8.94	0.00	0.00	95.33	94.89	0.00
6	0.00	0.00	0.00	95.33	94.89	0.00
7	0.00	2.59	0.00	95.33	97.48	0.00
8	2.47	0.00	0.00	97.80	97.48	0.00
9	0.00	0.00	0.00	97.80	97.48	0.00
10	0.00	0.98	0.00	97.80	98.46	0.00
11	0.91	0.00	0.00	98.72	98.46	0.00
12	0.00	0.00	0.00	98.72	98.46	0.00
13	0.00	0.40	0.00	98.72	98.86	0.00
14	0.36	0.00	0.00	99.08	98.86	0.00
15	0.00	0.00	0.00	99.08	98.86	0.00
16	0.00	0.15	0.00	99.08	99.01	0.00
17	0.13	0.00	0.00	99.21	99.01	0.00
18	0.00	0.00	0.00	99.21	99.01	0.00
19	0.00	0.03	0.00	99.21	99.04	0.00
20	0.03	0.00	0.00	99.24	99.04	0.00
21	0.00	0.00	0.00	99.24	99.04	0.00

### 2.3.6 Kombinacije opterećenja

Za dobivanje proračunskih vrijednosti napravljene su kombinacije opterećenja, koje su prikazane u *tablici 2.14*, i to za:

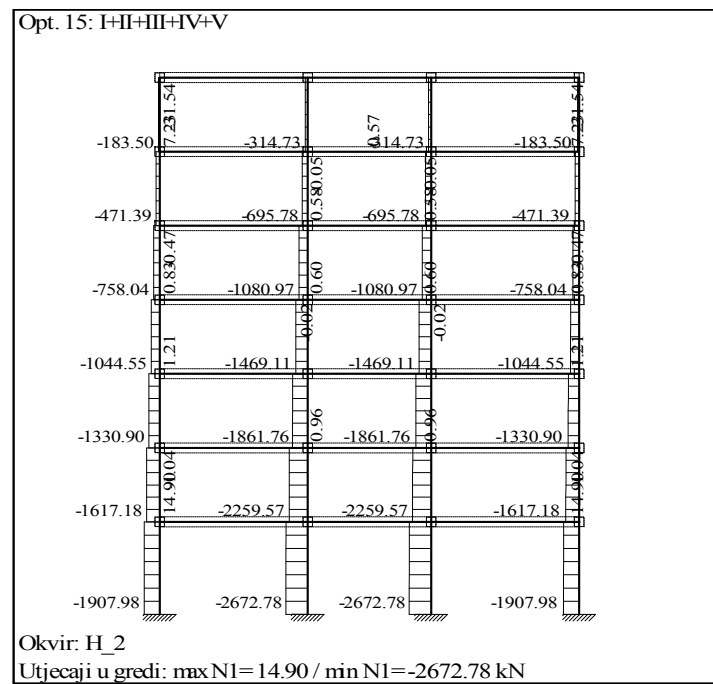
- 1) Stalnu ili prolaznu proračunsku situaciju,
- 2) Izvanrednu proračunsku situaciju i
- 3) Seizmičku proračunsku situaciju.

**Tablica 2.14** Lista slučajeva opterećenja

No	Naziv
1	stalno+vlt (g) (I)
2	korisno1 (II)
3	korisno2 (III)
4	korisno3 (IV)
5	korisno4 (V)
6	potres_x (VI)
7	potres_y (VII)
8	Kombinacija: $1.35xI+1.5xII+1.5xIII$
9	Kombinacija: $1.35xI+1.5xIV+1.5xV$
10	Kombinacija: $1.35xI+1.5xII+1.5xIII+1.5xIV+1.5xV$
11	Kombinacija: $I+0.3xII+0.3xIII+0.3xIV+0.3xV+VI$
12	Kombinacija: $I+0.3xII+0.3xIII+0.3xIV+0.3xV+1x(-VI)$
13	Kombinacija: $I+0.3xII+0.3xIII+0.3xIV+0.3xV+VII$
14	Kombinacija: $I+0.3xII+0.3xIII+0.3xIV+0.3xV+1x(-VII)$
15	Kombinacija: $I+II+III+IV+V$

### 2.3.7 Prikaz unutarnjih sila

Od unutarnjih sila prikazane su samo uzdužne unutarnje sile u srednjem uzdužnom okviru. Iznos tih sila (u stupovima) potreban nam je za zamjenjujuće vertikalno opterećenje na MODELU. Sile su dobivene od sume stalnog i korisnog opterećenja tj., od kombinacije 15., te su prikazane na *slici 2. 15*.



**Slika 2.15** Unutarnje uzdužne sile u srednjem okviru (H\_2)

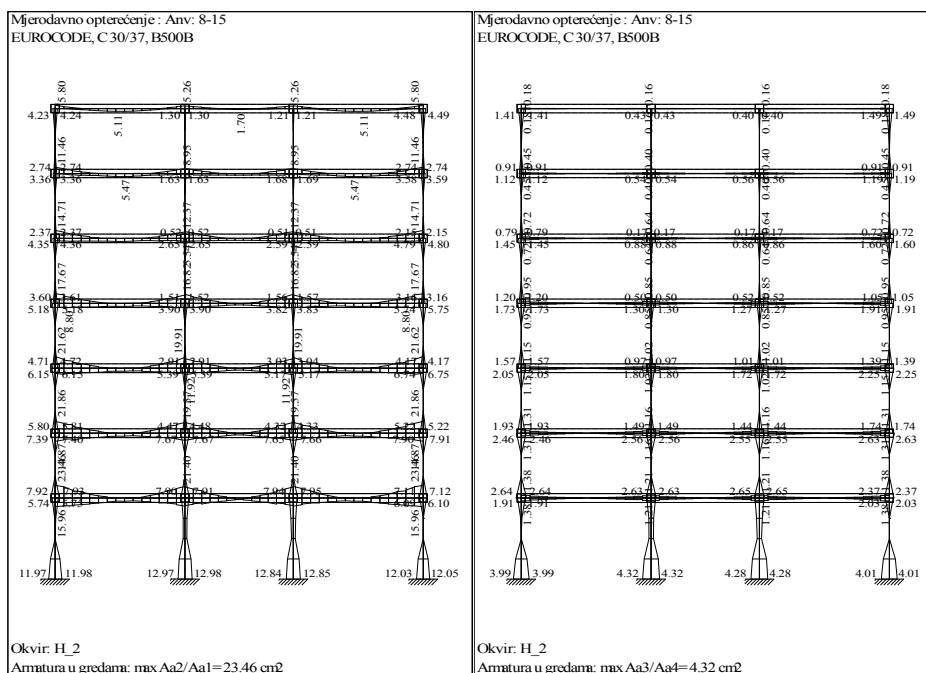
Kako je u *točki 2.2* napisano da imamo zamjenjujuće linijsko opterećenje zidnog ispuna različitih težina, te se unutarnje uzdužne sile razlikuju u različitoj težini ispune. Iznosi unutarnjih uzdužnih sila u unutarnjim stupovima 1. kata srednjeg okvira prikazani su u *tablici 2.15*. Proračun vlastitih vrijednosti, seizmička analiza i dimenzioniranje napravljeni su za slučaj najtežeg zidnoga ispuna ( $g'=12,00\text{kN/m}'$ ) pa nije potrebna provjera za ostale težine zidnoga ispuna. Razlike koje se pojave u konačnici (dimenzioniranju), zanemarive su.

**Tablica 2.15** Prikaz uzdužnih sila i naprezanja u unutarnjim stupovima 1. kata srednjeg okvira (H\_2)

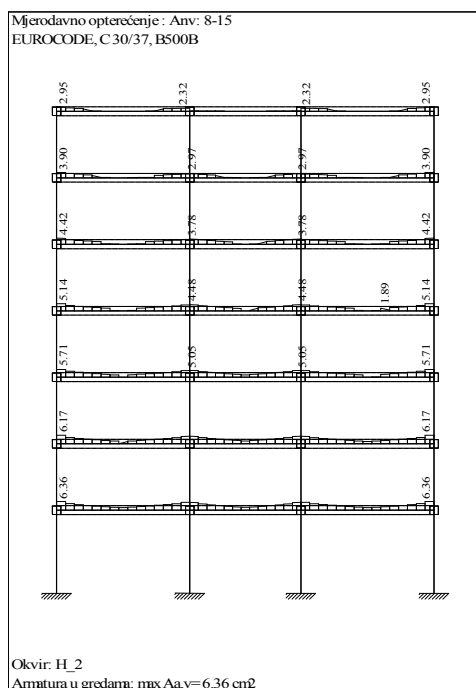
Vrsta zidnog ispuna	Zamjenjujuće linijsko opterećenje $g'$ [kN/m']	Uzdužna sila $N_p$ [kN]	Normalno naprezanje $\sigma_p=N_p/A_p$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Blok opeka	12,00	2259,57	9,04
Euroterm	8,25	2214,01	8,86
Ytong	3,75	2159,24	8,64
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>8,00</b>	<b>2210,94</b>	<b>8,84</b>

### 2.3.8 Prikaz potrebne armature u elementima prototipa

Dimenzioniranje armirano-betonskih elemenata rađeno je za anvelopu od kombinacija opterećenja 8-15. Dimenzioniranje je u svemu napravljeno prema Eurocode 2 [24], te je dana potrebna uzdužna armatura u armirano-betonskim elementima prototipa oko jedne i druge osi, kao i poprečna armatura. Njihove vrijednosti prikazane su na *slikama 2.16 i 2.17*.



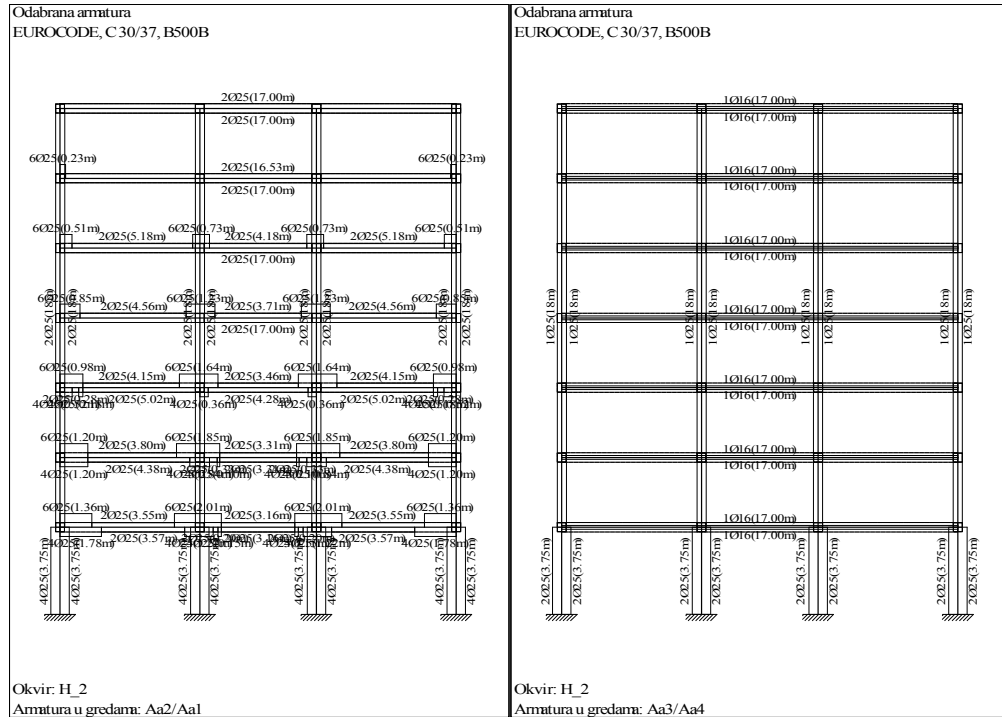
**Slika 2.16** Uzdužna armatura u elementima karakterističnog okvira (H<sub>2</sub>)



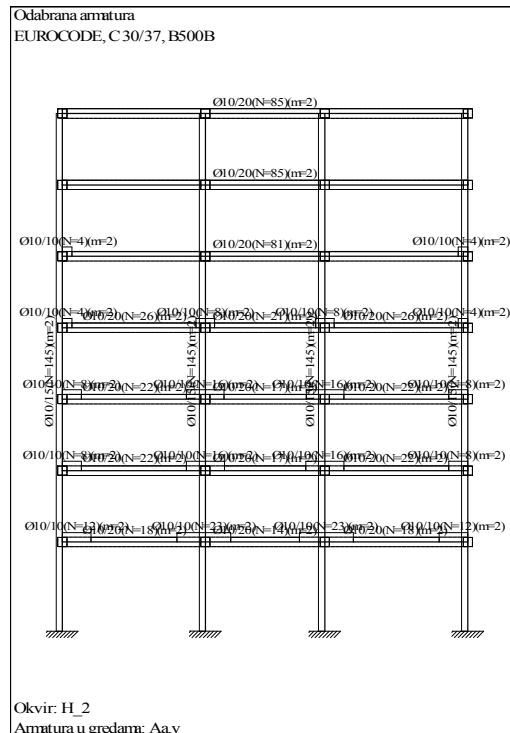
**Slika 2.17** Poprečna armatura u elementima karakterističnog okvira (H<sub>2</sub>)

### 2.3.9 Prikaz odabrane armature u elementima prototipa

Na osnovu potrebne armature iz prethodnoga naslova, odabrana je armatura u armirano betonskim elementima, koja je prikazana na *slikama 2.18 i 2.19*.

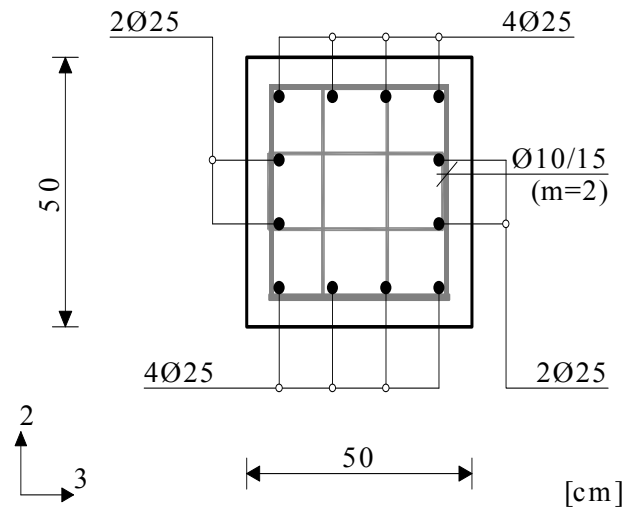


Slika 2.18 Odabrana uzdužna armatura u elementima karakterističnog okvira (H<sub>2</sub>)

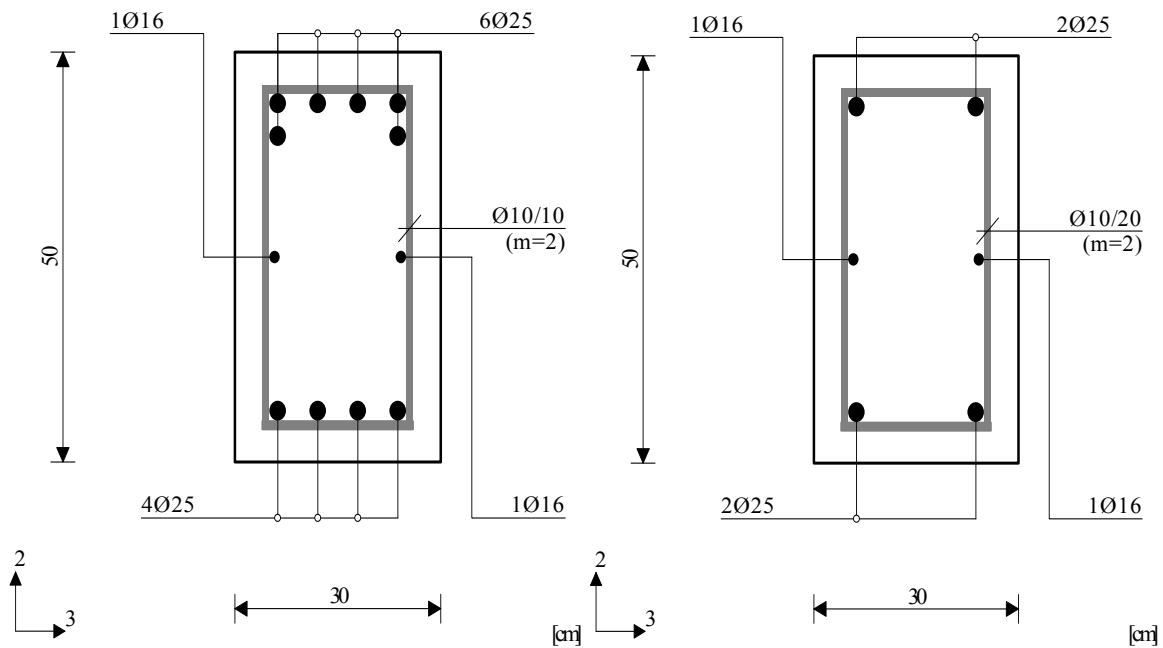


Slika 2.19 Odabrana poprečna armatura u elementima karakterističnog okvira (H<sub>2</sub>)

Na *slikama 2.20 i 2.21* možemo vidjeti odabranu armaturu u karakterističnim presjecima srednjih stupova prizemlja (prema *slici 2.1*), kao i gredu koja povezuje te stupove.



**Slika 2.20** Odabrana armatura u stupovima (PRESJEK 1-1 prema *slici 2.1*)



**Slika 2.21** Odabrana armatura u gredama na ležaju (PRESJEK 2-2 prema *slici 2.1*) i u polju (PRESJEK 3-3 prema *slici 2.1*)



## 2.4 ZAKLJUČAK POGLAVLJA

Kako bismo dobili MODEL armirano betonskog okvira za ispitivanje, bilo je potrebno odabrati model prototipa. Za odabir modela prototipa možemo navesti sljedeće:

- Pravilnog je oblika po tlocrtu i visini.
- Simetričnog je rasporeda zidnog ispuna po tlocrtu i visini.
- Osciliranje konstrukcije je pravilno, prvi ton je prvi oblik osciliranja konstrukcije u poprečnom smjeru (smjer\_y), drugi ton je prvi oblik osciliranja konstrukcije u uzdužnom smjeru (smjer\_x), a treći ton je torzija i tako redom za sve ostale oblike;
- Ukupna horizontalna seizmička sila iznosi 12,10% u smjeru\_y i 11,80% u smjeru\_x od ukupnoga vertikalnog opterećenja.
- Težine zidnog ispuna ne utječu bitno na ponašanje konstrukcije glede modalne i seizmičke analize.
- Odabrana armatura u stupovima prizemlja je 2,36% od površine poprečnog presjeka, u gredama na ležaju je 3,27% od površine poprečnog presjeka, a u gredama u polju 1,31% od površine poprečnog presjeka.
- Na osnovu odabrane armature, vidimo kako se radi o jako armiranim armirano betonskim okvirima (okviru).



---

## POGLAVLJE 3: MATERIJALI

---

### 3.1 UVOD

Tehnički propis za zidane konstrukcije donesen je u Hrvatskoj 2007. godine. Njime se propisuju tehnička svojstva i drugi zahtjevi za zidni ispun zidanih konstrukcija, za zidne elemente, mort, veziva, cement, agregat, vodu, čelik za armiranje i prednapinjanje, pomoćne dijelove, projektiranje, izvođenje i održavanje zidanih konstrukcija. Pri tome se, između ostaloga, zahtijeva i određivanje tehničkih svojstava zidnoga ispuna i projektiranje zidanih konstrukcija u skladu s HRN ENV 1996-1-:2007 Eurocod 6 [25], te cijelim nizom ostalih europskih normi. S obzirom na oskudnost do sada u Hrvatskoj važećih propisa za zidane konstrukcije, pokušali smo istražiti stvarno stanje i situaciju na području regije Istočne Hrvatske, kako u smislu kvalitete i usklađenosti postojeće proizvodnje zidnih elemenata, tako i u smislu određivanja mehaničkih karakteristika zidnoga ispuna. Ograničili smo se na nekoliko osnovnih tehničkih i mehaničkih karakteristika:

- određivanje klase odstupanja izmjera od deklariranih vrijednosti i klasifikacija prema grupama;
- određivanje normalizirane tlačne čvrstoće zidnih elemenata;
- određivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti zidnoga ispuna;
- određivanje posmične čvrstoće zidnoga ispuna.

Kod odabira vrste zidnih elemenata nasumce su odabrani glineni šuplji blokovi (kvalitete MO10 i MO5), betonski blok i blok od porobetona. Svi su klasificirani u grupe i ispitani u skladu s EC6 [25]. Od istih su blokova ozidani uzorci zidnoga ispuna u produžnom vapnenom mortu, te je ispitana tlačna i posmična čvrstoća kao i modul elastičnosti zidnoga ispuna. Mortovi za zidanje i izradu izravnavajućih slojeva izrađeni su, njegovani i ispitani prema HRN EN 1015-11:2000 EN.

### 3.2 MORT

Mort je materijal koji se sastoji od mješavine anorganskog veziva, agregata i vode, a može sadržavati i dodatke. Mort za zidanje razvrstava se prema sastojcima i prema mehaničkim svojstvima.

### 3.2.1. Vrste mortova

U gradnji najčešće se rabi jedna od sljedećih vrsta mortova: cementni mort, cementno-vapneni mort, vapneni mort, tankoslojni mort (1 do 3mm), unaprijed pripremljeni mort, lakoagregatni mort. Mort se klasificira prema svojoj računskoj tlačnoj čvrstoći, a označava se slovom  $M$ , nakon kojeg slijedi broj koji predstavlja tlačnu čvrstoću u  $N/mm^2$ . U većini propisa u svijetu, odnos komponenti morta određuje se volumenski. No, ističe se kako su omjeri po težini (masi) svakako točniji nego volumenski. Sastavi morta prema EC6 [25] prikazani su u **tablici 3.1**.

**Tablica 3.1** Volumni sastav morta prema EC6 [25, 64]

Vrsta morta	Najmanja tlačna čvrstoća nakon 28 dana [ $N/mm^2$ ]	cement	hidratizirano vapno	pijesak
M 20	20	treba odrediti ispitivanjem		
M 15	15	1	0 - 1/4	3
M 10	10	1	1/4 - 1/2	4 - 4 1/4
M 5	5	1	1/2 - 1 1/4	5 - 6
M 2	2	1	1 1/4 - 2 1/2	8 - 9

### 3.2.2. Tlačna čvrstoća morta

Tlačna čvrstoća morta,  $f_m$ , mora se ispitati u skladu s normom ISO/DIS 9652-4 ili prEN 1055-11 [25, 64]. U slučajevima kada je tlačna čvrstoća manja ili značajno veća nego ona u **tablici 3.1**, dopušteno je mijenjanje omjera cementa, vapna i pijeska, kako bi se postigla zahtijevana čvrstoća. Drugačiji omjeri ovih sastojaka mogu se upotrebljavati ako je to dokazano ispitivanjem. Laboratorijska ispitivanja takvih mješavina trebaju dati čvrstoću na tlak, najmanje, 20% veću od one iz **tablice 3.1**, ali druga svojstva kao što su prionjivost, obradljivost i trajnost, također mogu biti važna. Uzorci za ispitivanje su prizme 160x40x40mm ili kocke sa stranicom 70,7mm ili 100mm. Potrebne su najmanje 3 prizme ili 6 kocaka.

## 3.3 ZIDNI ELEMENTI

### 3.3.1 Vrste zidnih elemenata

Danas u svijetu postoji na tisuće raznih oblika zidnih elemenata. Zidni se elementi mogu podijeliti prema vrsti materijala od kojeg su izrađeni: glineni (opeka, pečena glina),

kalcijsko-silikatni, betonski, betonski od lakog agregata, porasti betonski (sadrži pore), kameni.

Prema kontroli proizvodnje, zidni se elementi dijele na kategorije I. i II. Zidni elementi kategorije I. su oni za koje je proizvođač osigurao stalnu kontrolu kakvoće i koji u pošiljci imaju deklariranu tlačnu čvrstoću s 5% fraktila, dok su elementi kategorije II. oni koji imaju srednju vrijednost tlačne čvrstoće jednaku deklariranoj.

Prema postotku šupljina u volumenu zidnih elemenata oni se dijele na grupu 1, 2, 3 i grupu 4 (**tablica 3.2**) [25, 64].

**Tablica 3.2** Geometrijski uvjeti za grupe zidnih elemenata [25, 64]

	Materijali i uvjeti za zidne elemente							
	Grupa 1 (svi materijali)	Elementi	Grupa 2		Grupa 3		Grupa 4	
			Vertikalne šupljine				Horizontalne šupljine	
Volumen svih šupljina (% ukupnog volumena)	≤ 25	glina	> 25; ≤ 55		≥ 25; ≤ 70		> 25; ≤ 70	
		kalcij silikat	> 25; ≤ 55		ne koristi se		ne koristi se	
		beton <sup>b</sup>	> 25; ≤ 60		> 25; ≤ 70		> 25; ≤ 50	
Volumen pojedine šupljine (% ukupnog volumena)	≤ 12,5	glina	svaka od ponavljanih šupljina ≤ 2 rupe za prijenos do ukupno 12,5		svaka od ponavljanih šupljina ≤ 2 rupe za prijenos do ukupno 12,5		svaka od ponavljanih šupljina ≤ 30	
		kalcij silikat	svaka od ponavljanih šupljina ≤ 15 rupe za prijenos do ukupno 30		ne koristi se		ne koristi se	
		beton <sup>b</sup>	svaka od ponavljanih šupljina ≤ 30 rupe za prijenos do ukupno 30		svaka od ponavljanih šupljina ≤ 30 rupe za prijenos do ukupno 30		svaka od ponavljanih šupljina ≤ 25	
Deklarirana vrijednost debljine hrpta i ljsuki [mm]	Nema uvjeta		hrbat	ljsuka	hrbat	ljsuka	hrbat	ljsuka
		glina	≥ 5	≥ 8	≥ 3	≥ 6	≥ 5	≥ 6
		kalcij silikat	≥ 5	≥ 10	ne koristi se		ne koristi se	
		beton <sup>b</sup>	≥ 15	≥ 18	≥ 15	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Deklarirana vrijednost kombinirane debljine <sup>a</sup> hrpta i ljsuki (% ukupne debljine)	Nema uvjeta	glina	≥ 16		≥ 12		≥ 12	
		kalcij silikat	≥ 20		ne koristi se		ne koristi se	
		beton <sup>b</sup>	≥ 18		≥ 15		≥ 45	

<sup>a</sup> Kombinirana debljina je debljina hrpta i ljsuki mjereno horizontalno u pravcu okomitom na lice zida. Ova provjera je samo kvalifikacijska i treba ju ponoviti u slučaju osnovnih promjena dimenzija elemenata.

<sup>b</sup> U slučaju konusnih ili kružnih šupljina koristi se srednja vrijednost debljine hrpta ili ljsuki.

### 3.3.2 Svojstva zidnih elemenata

Među osnovna svojstva zidnih elemenata ubrajaju se njihova tlačna čvrstoća i trajnost. Tlačna čvrstoća zidnih elemenata, koja se uzima u proračunu, jest tzv. normalizirana tlačna čvrstoća,  $f_b$ . Ta je tlačna čvrstoća zidnog elementa prevedena na tlačnu čvrstoću zidnog elementa širine 100mm i visine 100mm, dok duljina nije definirana normom [64].

Da bi se srednja tlačna čvrstoća, dobivena eksperimentalno ispitivanjem uzoraka koji su bili 24 sata uronjeni u vodu, pretvorila u normaliziranu tlačnu čvrstoću za suhe zidne elemente, treba, za zidne elemente od pečene gline, rezultate srednje vrijednosti pomnožiti sa 1,1, a za sve ostale elemente sa 1,2. Zatim se takva vrijednost množi s faktorom oblika zidnog elementa,  $\delta$ . Faktor oblika,  $\delta$ , prikazan je u **tablici 3.3**, a on ovisi o širini i visini zidnoga elementa, za vrijednosti između dopuštena je linearna interpolacija.

**Tablica 3.3** Vrijednosti faktora oblika,  $\delta$  [25, 64]

Visina zidnog elementa [mm]	Najmanja horizontalna dimenzija zidnog elementa [mm]				
	50	100	150	200	$\geq 250$
50	0,85	0,75	0,70	-	-
65	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65
100	1,15	1,00	0,90	0,80	0,75
150	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,10
$\geq 250$	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Zidni elementi moraju imati srednju tlačnu čvrstoću na tlak okomito na naliježuću površinu (vertikalno), barem,  $4,0\text{N/mm}^2$ . U horizontalnom smjeru tlačna čvrstoća mora biti barem  $2,0\text{N/mm}^2$ .

### 3.3.3 Ispitivanje zidnih elemenata

Ispitivane su četiri vrste zidnih elemenata (**slika 3.1**) od različitih materijala kojima su proizvođači deklarirali samo neka svojstva:

- Glineni šuplji blok V-5 (BLOK OPEKA) 25/19/19, proizvođač „Opeka” Osijek, deklariranih svojstava: čvrstoća  $15\text{N/mm}^2$ , masa 6,7kg;
- Glineni šuplji blok 38UT (EUROTERM) 38/25/23,8, proizvođač „Opeka” Osijek, deklariranih svojstava: čvrstoća  $5\text{N/mm}^2$ , masa 18kg;

- Betonski šuplji blok 39/24/19 (BETONSKI BLOK), proizvođač „MI-BLOK” Betonska galanterija Gašinci, deklariranih svojstava: čvrstoća  $5\text{N/mm}^2$ , masa  $22,5\text{ kg}$ ;
- Porobetonski zidni blok ZB25 (YTONG) 62,5/25/25, proizvođač Zagorje ob Savi, Ytong, deklariranih svojstava: srednja tlačna čvrstoća  $2,5\text{N/mm}^2$ ; obujamska masa  $0,4\text{t/m}^3$ .



**Slika 3.1** Blok opeka, euroterm, betonski blok i ytong

Prema EN 772-16:2000 [25, 64], za određivanje izmjera, određene su izmjere i odstupanja od srednje vrijednosti te rasponi izmjera. Glineni šuplji blokovi imaju nedopušteno odstupanje u duljini, a betonski šuplji blok u rasponu visine. Porobetonski blokovi imaju najveću moguću klasu poklapanja s deklariranim dimenzijama.

**Tablica 3.4** Klase odstupanja dimenzija

Redni broj	Vrsta zidnog elementa	Odstupanje od srednje vrijednosti	Najveći raspon izmjere
1	Glineni šuplji	Nedopušteno (L)	R2
2	Betonski šuplji	T2	Nedopušteno (H)
3	Porobeton	T2+	R2+

Prema HRN ENV 1996-1:2007 Eurocod 6 [25, 64] (**tablica 3.2**) zidni elementi klasificirani su u grupe. Prema ukupnom volumenu šupljina u brutto volumenu, veličini pojedine šupljine i složenoj debljini stijenki, glineni i betonski elementi spadaju u Grupu 2, dok porobeton spada u Grupu 1.

**Tablica 3.5** Grupe zidnih elemenata [25, 64]

Redni broj	Vrsta zidnog elementa	Grupa	
1	Glineni šuplji	2	ukupni volumen šupljina $54,42\% < 55\%$ ; složena debljina $27,8 > 16\%$ ; pojedina šupljina $< 12,5\%$
2	Betonski šuplji	2	ukupni volumen šupljina $48,3,5\% < 55\%$ ; složena debljina $18,59 > 18\%$ ; pojedina šupljina $< 30\%$
3	Porobeton	1	

### 3.3.4 Eksperimentalno ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata

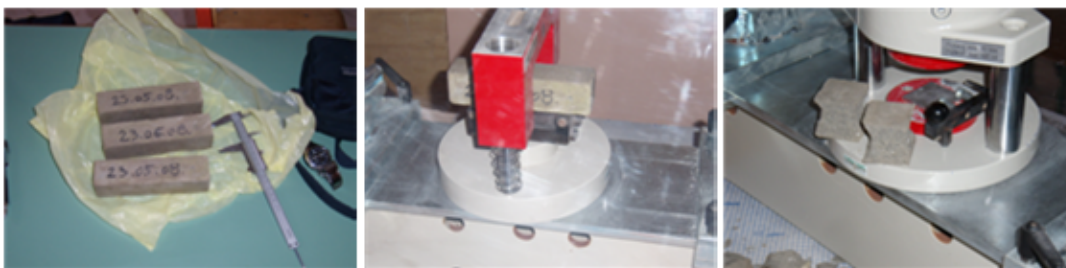
U skladu s normom DIN EN 772-1:2000 [64] ispitane su tlačne čvrstoće zidnih elemenata. Od svake vrste zidnih elemenata nasumce je odabrano i ispitano po šest elemenata. Na glinenim i betonskim zidnim elementima pritisne površine obrađene su slojem za izravnavanje izvedenim od cementnoga morta.

Glineni zidni elementi njegovani su uranjanjem u vodu 15 sati prije ispitivanja. Ostali zidni elementi njegovani su na zraku 14 dana. Opterećenje (sila) je zadavano ručno, pomoću hidraulične preše, njezina vrijednost kontrolirana je putem pretvarača sile, koji je spojen na kutiju za obradu podataka, a ona na računalo. Uzorke se opterećivalo silom sve dok nisu popucali, tj. do sloma.

Ispitivanje cementnog morta za izravnavanje pritisne površine glinenih šupljih i betonskih blokova prikazano je na *slici 3.3*.



**Slika 3.2** Ispitivanje tlačne čvrstoće blok opeke, euroterma, betonskog bloka i ytonga



**Slika 3.3** Ispitivanje cementnog morta



## 3.3.4.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata BLOK OPEKE

Tablica 3.6 Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1	248	184	184
2	247	184	197
3	248	185	194
4	248	185	186
5	248	184	187
6	247	185	186
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>248</b>	<b>184</b>	<b>186</b>
<i>Nazivna vrijednost</i>	<i>250</i>	<i>190</i>	<i>190</i>
<b>Odstupanje [%]</b>	<b>0,93</b>	<b>2,94</b>	<b>2,32</b>

Vrijednosti tlačne čvrstoće cementnog morta za izravnavanje pritisne površine zidnoga elementa, kao i čvrstoće na savijanje dane su u **tablici 3.7**.

Tablica 3.7 Tlačne čvrstoće cementnog morta za izravnavanje blok opeke

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	3,60		3,60		3,00	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	65,00	65,00	59,00	59,00	62,50	58,00
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x40		160x40x40		160x40x40	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8,42		7,96		7,02	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	40,63	40,63	36,88	36,88	39,06	36,25
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>7,80</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>38,39</b>					

U **tablici 3.8** prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnih elemenata blok opeke. Normna tlačna čvrstoća dobivena je na osnovu sljedećeg izraza [64]:

$$f_b = f_{mc,norm} = 1,1 \cdot \delta \cdot f_{b,sr} \quad (3.1)$$

gdje je:

- 1,1            koeficijent pretvaranja za glinene zidne elemente u suhe elemente,
- $\delta=1,08$     faktor oblika zidnog elementa blok opeke (prema **tablici 3.3**),
- $f_{b,sr}=f_{mc,sr}$     srednja tlačna čvrstoća zidnih elemenata [N/mm<sup>2</sup>].

**Tablica 3.8** Tlačne čvrstoće zidnih elemenata blok opeke

Uzorak [n]	1	2	3	4	5	6
Sila sloma, $F_m$ [N]	520000	560000	640000	510000	640000	750000
Ploština, $A_{g,u}$ [mm <sup>2</sup> ]	45632	45448	45756	45880	45632	45695
Tlačna čvrstoća, $f_{mc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	11,40	12,32	13,99	11,12	14,03	16,41
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{mc,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>13,21</b>					
Standardno odstupanje, $S$ [N/m <sup>2</sup> ]	2,00					
Koeficijent varijacije [%]	15,14					
<b>Normna tlačna čvrstoća, <math>f_{mc,norm}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>15,71</b>					

### 3.3.4.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata EUROTERMA

**Tablica 3.9** Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1	376	246	236
2	378	244	232
3	376	245	234
4	379	242	233
5	377	243	235
6	380	241	231
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>378</b>	<b>244</b>	<b>234</b>
<i>Nazivna vrijednost</i>	380	250	238
<b>Odstupanje [%]</b>	<b>0,61</b>	<b>2,60</b>	<b>1,89</b>

Vrijednosti tlačne čvrstoće cementnog morta za izravnavanje pritisne površine zidnoga elementa, kao i čvrstoće na savijanje dane su u **tablici 3.10**.

**Tablica 3.10** Tlačne čvrstoće cementnog morta za izravnavanje euroterma

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	2,45		2,55		2,45	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	44,00	41,00	48,00	46,00	44,00	45,50
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x40,2		160x40x40,1		160x40x39,6	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5,73		5,97		5,73	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	27,36	25,50	29,93	28,68	27,78	28,72
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>5,81</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>27,99</b>					

U **tablici 3.11** prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnih elemenata euroterma. Normna tlačna čvrstoća dobivena je na osnovu izraza (3.1). Koeficijent oblika,  $\delta$ , za zidni element euroterma prema **tablici 3.3** iznosi 1,12.

**Tablica 3.11** Tlačne čvrstoće zidnih elemenata euroterma

Uzorak [n]	1	2	3	4	5	6
Sila sloma, $F_m$ [N]	432100	419600	254600	438600	348000	313000
Ploština, $A_{g,u}$ [mm <sup>2</sup> ]	92496	92232	92120	91718	91611	91580
Tlačna čvrstoća, $f_{mc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4,67	4,55	2,76	4,78	3,80	3,42
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{mc,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>4,00</b>					
Standardno odstupanje, $S$ [N/m <sup>2</sup> ]	0,81					
Koeficijent varijacije [%]	20,24					
<b>Normna tlačna čvrstoća, <math>f_{mc,norm}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>4,93</b>					

### 3.3.4.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata **BETONSKOGA BLOKA**

**Tablica 3.12** Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1	388	239	185
2	390	240	187
3	390	239	192
4	389	239	190
5	390	239	190
6	390	239	190
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>390</b>	<b>239</b>	<b>189</b>
<i>Nazivna vrijednost</i>	<i>390</i>	<i>240</i>	<i>190</i>
<b>Odstupanje [%]</b>	<b>0,10</b>	<b>0,24</b>	<b>0,64</b>

Vrijednosti tlačne čvrstoće cementnog morta za izravnavanje pritisne površine zidnog elementa, kao i čvrstoće na savijanje dane su u **tablici 3.13**.

**Tablica 3.13** Tlačne čvrstoće cementnog morta za izravnavanje betonskog bloka

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	3,60		3,18		3,38	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	67,50	67,00	65,00	66,50	68,50	64,00
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x39,8		160x40x40,2		16 x40x40,2	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8,42		7,44		7,91	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	42,40	42,09	40,42	41,36	42,60	39,80
<b>Srednja vlačna čvrstoća,</b> <b><math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>7,92</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća,</b> <b><math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>41,44</b>					

U **tablici 3.14** prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnih elemenata betonskog bloka. Normna tlačna čvrstoća dobivena je na osnovu sljedećeg izraza [64]:

$$f_b = f_{mc,norm} = 1,0 \cdot \delta \cdot f_{b,sr} \quad (3.2)$$

gdje je:

- 1,0 koeficijent pretvaranja za njegovanje na zraku,
- $\delta=1,01$  faktor oblika zidnog elementa blok opeke (prema **tablici 3.3**),
- $f_{b,sr}=f_{mc,sr}$  srednja tlačna čvrstoća zidnih elemenata [N/mm<sup>2</sup>].

**Tablica 3.14** Tlačne čvrstoće zidnih elemenata betonskog bloka

Uzorak [n]	1	2	3	4	5	6
Sila sloma, $F_m$ [N]	350000	350000	394000	412000	420000	450000
Ploština, $A_{g,u}$ [mm <sup>2</sup> ]	92829	93758	93308	93128	93367	93308
Tlačna čvrstoća, $f_{mc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,77	3,73	4,22	4,42	4,50	4,82
<b>Srednja tlačna čvrstoća,</b> <b><math>f_{mc,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>4,25</b>					
Standardno odstupanje, $S$ [N/m <sup>2</sup> ]	0,43					
Koeficijent varijacije [%]	10,09					
<b>Normna tlačna čvrstoća,</b> <b><math>f_{mc,norm}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>4,29</b>					

## 3.3.4.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata YTONGA

Tablica 3.15 Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1	625	250	250
2	625	250	250
3	625	250	250
4	625	250	250
5	625	250	250
6	625	250	250
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>625</b>	<b>250</b>	<b>250</b>
<i>Nazivna vrijednost</i>	625	250	250
<b>Odstupanje [%]</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

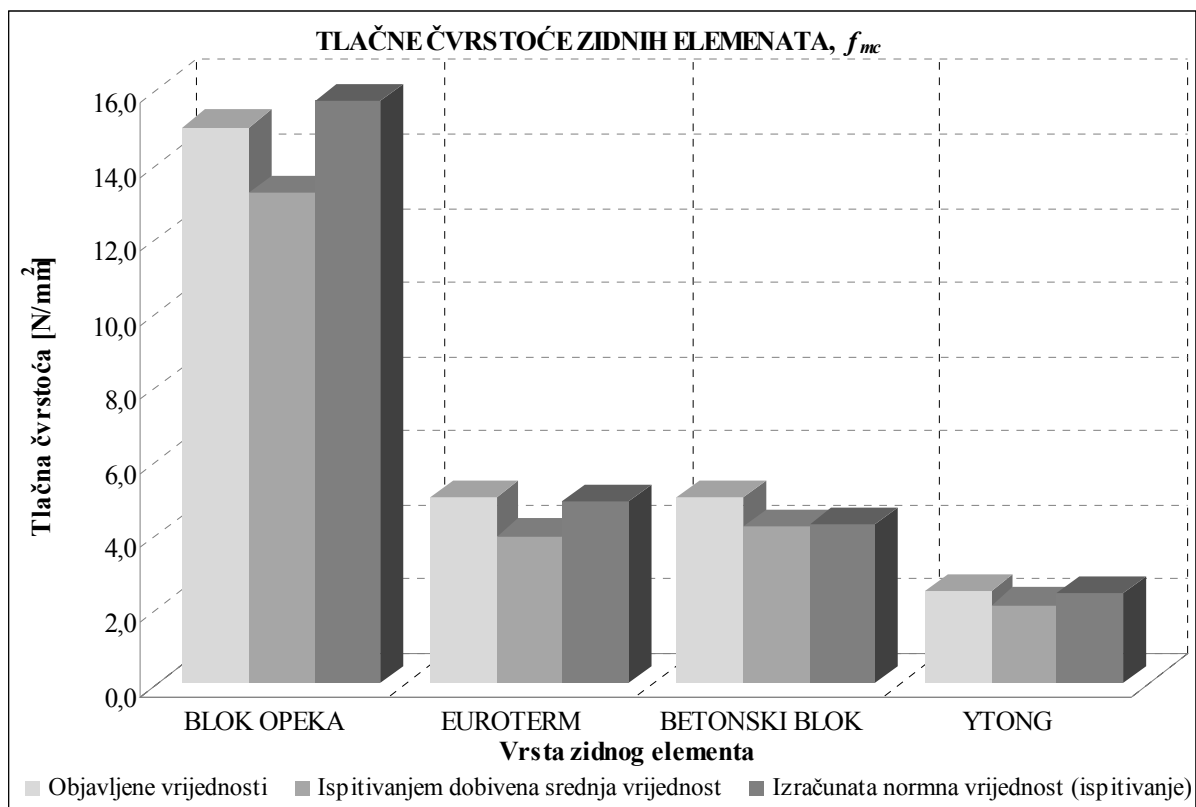
U **tablici 3.16** prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnih elemenata ytonga. Normna tlačna čvrstoća dobivena je na osnovu izraza (3.2). Koeficijent oblika,  $\delta$ , za zidni element ytonga prema **tablici 3.3** iznosi 1,15.

Tablica 3.16 Tlačne čvrstoće zidnih elemenata ytonga

Uzorak [n]	1	2	3	4	5	6
Sila sloma, $F_m$ [N]	350600	355200	324800	327200	292900	336500
Ploština, $A_{g,u}$ [mm <sup>2</sup> ]	156250	156250	156250	156250	156250	156250
Tlačna čvrstoća, $f_{mc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,24	2,27	2,08	2,09	1,87	2,15
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{mc,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>2,12</b>					
Standardno odstupanje, $S$ [N/m <sup>2</sup> ]	0,14					
Koeficijent varijacije [%]	6,76					
<b>Normna tlačna čvrstoća, <math>f_{mc,norm}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>2,44</b>					

### 3.3.5 Usporedba rezultata

Na *slici 3.4* prikazan je odnos ispitanih srednjih i normnih vrijednosti tlačnih čvrstoća zidnih elemenata određenih ispitivanjem te objavljenih vrijednosti. Objavljene vrijednosti proizvođača uglavnom ne odgovaraju vrijednostima koje bi bile u skladu s EC6 [25]. Vrijednosti odstupanja najbolje se vide u *tablici 3.4*.



**Slika 3.4** Grafički prikaz usporedbe tlačnih čvrstoća zidnih elemenata

**Tablica 3.17** Usporedba tlačnih čvrstoća zidnih elemenata

Zidni element	Objavljena tlačna čvrstoća, $f_{mc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost tlačne čvrstoće, $f_{mc,sr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Izračunata normna tlačna čvrstoća, $f_{mc,norm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
BLOK OPEKA	<b>15,00</b>	<b>13,21</b>	<b>15,71</b>
EUROTERM	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>4,93</b>
BETONSKI BLOK	<b>5,00</b>	<b>4,25</b>	<b>4,29</b>
YTONG	<b>2,50</b>	<b>2,12</b>	<b>2,44</b>

## 3.4 ZIDNI ISPUN

### 3.4.1 Mehanička svojstva zidnoga ispuna

Zidni ispun kompozit je sastavljen od zidnih elemenata i morta. Mehanička svojstva zidnog ispuna mogu se odrediti na dva načina [64]:

- a) ne uzimajući u obzir susjedne konstrukcijske elemente, tj. uzimajući u obzir samo zid koji ima svoja mehanička svojstva i
- b) uzimajući u obzir susjedne elemente konstrukcije jer mehanička svojstva ovise o svojstvima samoga zidnog ispuna, ali i o geometriji i svojstvima susjednih elemenata koji mu zbog međudjelovanja ta svojstva (kakva bi imao kad bi se promatrao neovisno) mijenjaju.

Mehanička svojstva zidnoga ispuna mogu se dobiti normiranim eksperimentalnim ispitivanjem, a ona su:

- tlačna čvrstoća,  $f_k$ ,
- posmična čvrstoća,  $f_v$ ,
- čvrstoća pri savijanju,  $f_x$ ,
- referentna vlačna čvrstoća,  $f_t$ ,
- odnos naprezanje – relativna deformacija ( $\sigma - \varepsilon$ ) i modul elastičnosti,  $E$ .

#### 3.4.1.1 Mehanizmi sloma zidnog ispuna pod tlačnim naprezanjem

Mehanizmom sloma zidnih prizmi na kojima se ispituju tlačne čvrstoće bavili su se razni autori te su i opisani na više mjesta. U radu će se prikazati općeprihvaćeno objašnjenje mehanizma sloma kada je tlačna čvrstoća zidnoga elementa veća od čvrstoće morta. Obrnuti slučaj, kada je tlačna čvrstoća zidnoga elementa manja od čvrstoće morta, može dovesti do potpuno različitoga ponašanja, ali taj je slučaj u praksi rijedak (npr. kod zidnih elemenata kod porastog betona).

- a) *Prizme sastavljene od šupljih zidanih elemenata sa sljubnicama morta u uskim trakama uz oba lica zida:*

U prizmama koje su zidane mortom samo u uskim trakama uz oba lica zida nastaju, zbog vertikalnih opterećenja, vertikalne pukotine kroz hrptove zidanih elemenata.

Proučavanjem stanja naprezanja došlo se do zaključka kako prijenos opterećenja na vanjske stijenke šupljih zidanih elemenata izaziva nejednolika vertikalna tlačna naprezanja po širini i visini elementa. Učinak takvog stanja jest koncentracija horizontalnih vlačnih naprezanja na dnu hrpta zidnoga elementa, slično kao kod visokostijenog nosača. Ova je pojava uočena i prilikom usporedbe tlačne čvrstoće zidnih elemenata i prizmi sastavljenih od takvih elemenata. Naime, ako su zidni elementi, puni i oni sa šupljinama, imali istu tlačnu čvrstoću, tlačne čvrstoće prizmi zidanih posebno od punih i posebno od šupljih elemenata bile su različite. Pri tome su prizme od šupljih elemenata imale manje tlačne čvrstoće nego prizme od punih elemenata. Taj se fenomen pripisuje jakim bočnim vlačnim silama u zidanim elementima, a šuplji zidni elementi jednostavno imaju manje poprečne površine, a samim time i veća naprezanja pa stoga prije doživljavaju slom.

### **3.4.2 Ostali čimbenici koji utječu na čvrstoću i nosivost zidnoga ispuna**

Na tlačnu čvrstoću i nosivost zidnoga ispuna utječu: dimenzije i geometrijski odnosi zidnih elemenata, ispunjenost horizontalnih i vertikalnih sljubnica mortom, omjer volumena i rasporeda šupljina i vanjskih dimenzija zidnih elemenata, visina prizmi, tj. zidnog ispuna, čvrstoća morta, čvrstoća zidnih elemenata, odabrani zidni vez, debljina sljubnice morta [64].

Čvrstoća se izračunava s obzirom na ukupnu(bruto) površinu. Pema tome, veću čvrstoću i nosivost imaju puni zidni elementi u odnosu na one elemente zidane od šupljih elemenata, pod uvjetom da su od istoga materijala.

Raspored šupljina mora biti simetričan. Čvrstoća će biti manja ako je omjer volumena šupljina i bruto volumena zidnih elemenata veći.

Visina prizmi, tj. zidnoga ispuna i njihov omjer s debljinom zidnoga ispuna, imaju važnu ulogu. Što je taj omjer veći, to je čvrstoća manja.

Čvrstoće morta i zidanih elemenata neposredno djeluju na ukupnu nosivost i čvrstoću zidnoga ispuna. Taj odnos nije linearan, tj. dvostruko veća čvrstoća morta i zidnog elementa neće ostvariti dvostruko veću čvrstoću zidnoga ispuna, nego nešto manju od toga.

Pravilan zidni vez veoma je važan za nosivost zidnog ispuna jer nepravilni vez, kao i onaj s vertikalnim sljubnicama, a koji tvore ravninu po cijeloj visini zida, dovode do smanjene nosivosti.

Debljina sljubnica morta utječe na čvrstoću tako što se povećanjem debljine smanjuje čvrstoća zidnoga ispuna.



### 3.4.3 Karakteristična tlačna čvrstoća zidnoga ispuna

Karakteristična tlačna čvrstoća uzorka zidnoga ispuna,  $f_k$ , jest čvrstoća ispod koje se, bez učinka ekscentričnosti, vitkosti, ili spriječenosti horizontalnog pomaka pločama preko kojih se prenosi tlak, ne očekuje više od 5% rezultata [64]. Karakterističnu tlačnu čvrstoću,  $f_k$ , treba odrediti eksperimentalno ili iz prikladnog odnosa te čvrstoće s čvrstoćom zidnoga elementa i čvrstoćom morta. Koeficijent varijacije tlačne čvrstoće zidnog ispuna ne bi smio biti veći od 25%. Ako karakterističnu tlačnu čvrstoću zidnoga ispuna nije moguće odrediti pokusom, svakako treba eksperimentalno odrediti tlačne čvrstoće zidnih elemenata i morta. Izrazi prikazani dalje u tekstu empirijske su formule za određivanje karakteristične tlačne čvrstoće zidnog ispuna na temelju tlačnih čvrstoća zidnoga elementa i morta, dobivene ispitivanjem više stotina uzoraka.

Uzorci se ispituju nakon 7 ili nakon 28 dana starosti ili kada je postignuta neka određena čvrstoća morta. Uzorak se postavlja centrično kako bi se uzdužna os uzorka i uzdužna os stroja za ispitivanje poklopile. Opterećenje se nanosi jednoliko po cijeloj površini na vrhu i na dnu uzorka. Opterećenje se neprekidno povećava, tako da se slom uzorka dosegne nakon 15-30 min. Ploče, preko kojih se opterećenje nanosi, trebaju biti učvršćene za stroj za nanošenje sile, kako bi osigurale ravninske uvjete (bez ekscentričnosti).

Uzorak zidnog ispuna prikazan je na  **slici 3.5**, na kojem se osim tlačne čvrstoće,  $f_k$ , mjeri i relativna deformacija radi određivanja modula elastičnosti,  $E$ . S pomoću četiriju elektronskih uređaja, ekstenzometra, mjere se deformacije u vertikalnom smjeru. Ekstenzometri se postave po dva na svaku plohu uzorka, a kao relativna deformacija uzorka uzima se srednja vrijednost od četiri očitavanja. Potrebno je izdvojiti izmjerene vrijednosti relativne deformacije,  $\varepsilon_{1/3}$ , pri sili jednakoj trećini od one maksimalne zbog određivanja modula elastičnosti,  $E$ . Tlačna se čvrstoća izračuna za sva tri uzorka zidnog ispuna,  $f_1, f_2, f_3$ , primjenom izraza:

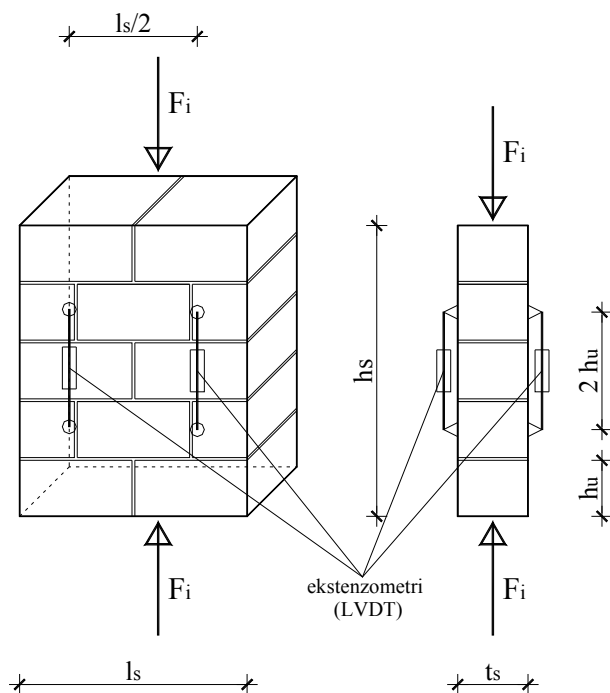
$$f_i = \frac{F_{i,max}}{A_i} \quad (3.3)$$

gdje je:

$F_{i,max}$  maksimalna sila i-tog uzorka određena ispitivanjem [N],

$A_i$  ploština opterećenog poprečnog presjeka i-tog uzorka [mm<sup>2</sup>].

Srednja vrijednost,  $f$ , tlačnih čvrstoća svih uzoraka zidnog ispuna zaokruži se na najbližu vrijednost 0,1N/mm<sup>2</sup>.



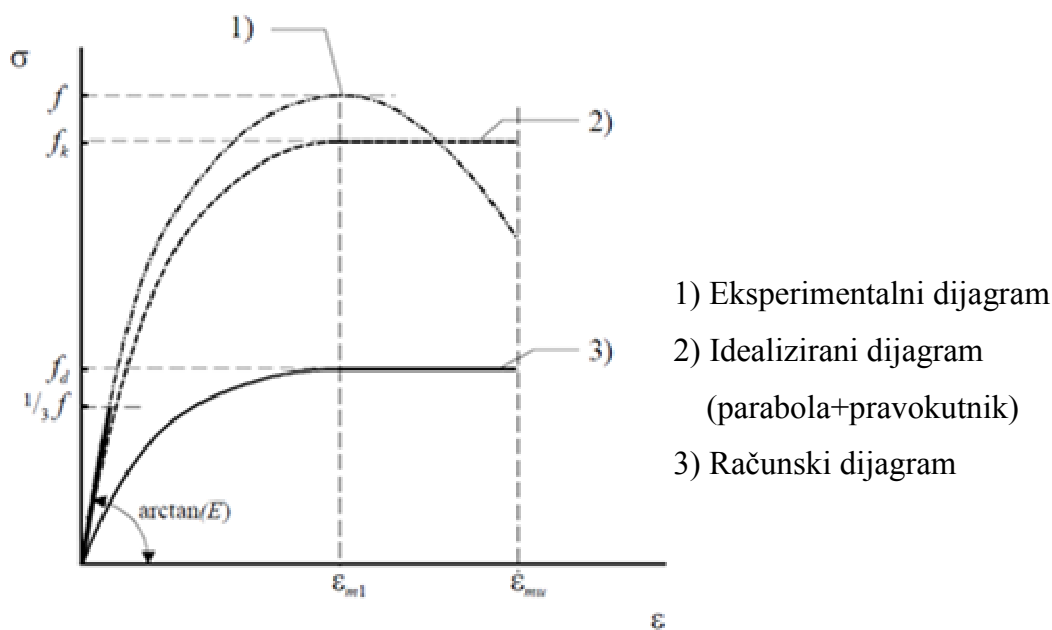
Slika 3.5 Ispitivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti

### 3.4.3.1 Modul elastičnosti i posmični modul

Modul elastičnosti  $i$ -tog uzorka jednak je:

$$E = \frac{f_i}{3 \cdot \varepsilon_{1/3}} \quad (3.4)$$

a izračunava se za sve uzorke. Ovdje je  $f_i/3=1/3$  čvrstoće pri slomu, a  $\varepsilon_{1/3}$  pripadna relativna deformacija, **slika 3.6**.



Slika 3.6 Dijagram naprezanje – relativna deformacija za tlačno opterećen zidni ispun

U nedostatku eksperimentalnih ispitivanja, sekantni modul elastičnosti za sve vrste zidnog ispuna može se uzeti sa  $E=1000 f_k$ , gdje je  $f_k$  karakteristična tlačna čvrstoća zidnoga ispuna. Posmični modul treba uzeti  $G=0,4 E$ . Pri proračunu na djelovanje potresa uzima se  $G=0,167 E$ .

U proračunu se  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram može uzeti kao ploština ispod dijagrama parabola+pravokutnik kao što je prikazano na *slici 3.6*. Valja imati na umu kako zidni elementi s velikim šupljinama (Grupe 2 i Grupe 3 prema *tablici 3.2*) mogu imati krhki slom već kod relativne deformacije  $\varepsilon_{ml}=0,002$ , dakle prije dosezanja horizontalnoga dijela dijagrama.

### 3.4.3.2 Računsko određivanje karakteristične tlačne čvrstoće zidnog ispuna iz tlačne čvrstoće zidnih elemenata i morta

Ako se ne raspolože eksperimentalno dobivenim podacima o tlačnoj čvrstoći zidnoga ispuna, karakteristična tlačna čvrstoća zidnoga ispuna zidanog u mortu opće namjene, može se odrediti iz sljedeće jednadžbe prema EC6 [25]:

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (3.5)$$

samo ako tlačna čvrstoća morta,  $f_m$ , nije veća od  $20\text{N/mm}^2$  niti veća od  $2 f_b$ , a mjerodavna je manja vrijednost:

$f_b$  normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa [ $\text{N/mm}^2$ ],

$f_m$  nazivna tlačna čvrstoća morta [ $\text{N/mm}^2$ ],

$K$  konstanta dana u jedinicama [ $\text{N/mm}^2$ ],

$\alpha=0,65$  i  $\beta=0,25$  su koeficijenti prema EC6.

Vrijednost koeficijenta,  $K$ , svaka država može mijenjati i prilagoditi svojim uvjetima, a prema EC6 [25] koji su dani u *tablici 3.18*.

Karakteristična tlačna čvrstoća zidnoga ispuna zidanog u tankoslojnom mortu, rabeći kalcijsko-silikatnu opeku Grupe 1 ili zidne elemente od porastog (sadrži pore) betona, može se odrediti iz sljedeće jednadžbe prema EC6 [25]:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,85} \quad (3.6)$$

samo ako,  $f_b$ , nije veće od  $50\text{N/mm}^2$  niti je tankoslojni mort tlačne čvrstoće manji od  $5\text{N/mm}^2$  i kada je debljina zidnog ispuna jednaka širini ili dužini zidnih elemenata tako da nema uzdužne vertikalne sljubnice morta kroz cijeli zid ili kroz jedan dio dužine zida.

**Tablica 3.18** Vrijednosti koeficijenta,  $K$ , ovisno o vrsti morta [25, 64]

Zidni blok		Mort opće namjene	Tankoslojni mort	Lakoagregatni mort	
				$600 \leq \rho \leq 800$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$800 < \rho \leq 1500$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Glina	Grupa 1	0,55	0,75	0,30	0,40
	Grupa 2	0,45	0,70	0,25	0,30
	Grupa 3	0,35	0,50	0,20	0,25
	Grupa 4	0,35	0,35	0,20	0,25
Kalcij silikat	Grupa 1	0,55	0,80	ne koristi se	ne koristi se
	Grupa 2	0,45	0,65	ne koristi se	ne koristi se
Beton	Grupa 1	0,55	0,80	0,45	0,45
	Grupa 2	0,45	0,65	0,45	0,45
	Grupa 3	0,40	0,50	ne koristi se	ne koristi se
	Grupa 4	0,35	ne koristi se	ne koristi se	ne koristi se
Auto klavirani aerirani beton	Grupa 1	0,55	0,80	0,45	0,45
Umjetni kamen	Grupa 1	0,45	0,75	ne koristi se	ne koristi se
Obrađeni prirodni kamen	Grupa 1	0,45	ne koristi se	ne koristi se	ne koristi se

### 3.4.4 Karakteristična posmična čvrstoća zidnog ispuna

Karakteristična posmična čvrstoća zidnoga ispuna,  $f_{vk}$ , jest ona čvrstoća ispod koje se ne očekuje da će pasti više od 5% rezultata ispitivanja te čvrstoće [64]. Ova čvrstoća može se dobiti iz odgovarajućeg ispitivanja uzoraka. Potrebno je izraditi 9 uzoraka od kojih se po 3 ispituju do posmičnog sloma pri vertikalnom naprezanju ovisnom o tlačnoj čvrstoći zidnoga elementa od 0,2(0,1), 0,6(0,3) i 1,0(0,5) N/mm<sup>2</sup>. Duljina uzorka treba biti između 40 i 70 cm, dok omjer visine i debljine treba biti veći od 2. U svakom sloju treba biti barem jedna vertikalna sljubnica morta. Vertikalno naprezanje,  $f_{pi}$ , računa se iz izraza (3.7), a posmična čvrstoća,  $f_{vi}$ , iz izraza (3.8):

$$f_{pi} = \frac{F_{pi}}{A_i} \quad (3.7)$$

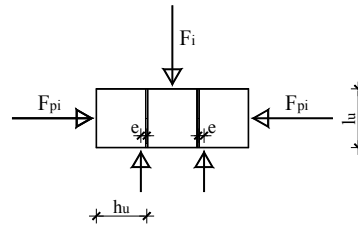
$$f_{vi} = \frac{F_{i,max}}{2 \cdot A_i} \quad (3.8)$$

gdje je:

$A_i$  ploština uzorka koji se ispituje [mm<sup>2</sup>],

$F_{pi}$  vertikalna sila [N], i

$F_{i,max}$  najveća horizontalna posmična sila (pri posmičnom slomu) [N].



Slika 3.7 Ispitivanje posmične čvrstoće

#### 3.4.4.1 Računsko određivanje karakteristične posmične čvrstoće zidnog ispuna

Ako se ne raspolaze eksperimentalnim podacima, računska karakteristična posmična čvrstoća zidnoga ispuna,  $f_{vk}$ , uz uvjet da su horizontalne i vertikalne sljubnice potpuno ispunjene mortom, može se uzeti kao manja vrijednost od [64]:

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4 \cdot \sigma_d \text{ ili } f_{vk} = 0,065 \cdot f_b \quad (3.9)$$

ali ne manje od,  $f_{vk0}$ , prema graničnim vrijednostima iz **tablice 3.19**,

gdje je:

- $f_{vk0}$  posmična čvrstoća kad je  $\sigma_d=0$ , za obične mortove bez aditiva, kao što je prikazano u tablici 3.19. Ako ne postoje eksperimentalno dobiveni podaci za  $f_{vk0}$ , tada treba uzeti  $f_{vk0}=0,1 \text{ N/mm}^2$ ,  $[\text{N/mm}^2]$ ,
- $\sigma_d$  računsko vertikalno tlačno naprezanje u zidu, u razini koja se promatra uzimajući kombinaciju opterećenja, a koja daje najmanje vertikalno opterećenje  $[\text{N/mm}^2]$ ,
- $f_b$  normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa  $[\text{N/mm}^2]$ .

**Tablica 3.19** Granične vrijednosti karakteristične posmične čvrstoće,  $f_{vk0}$  [25, 64]

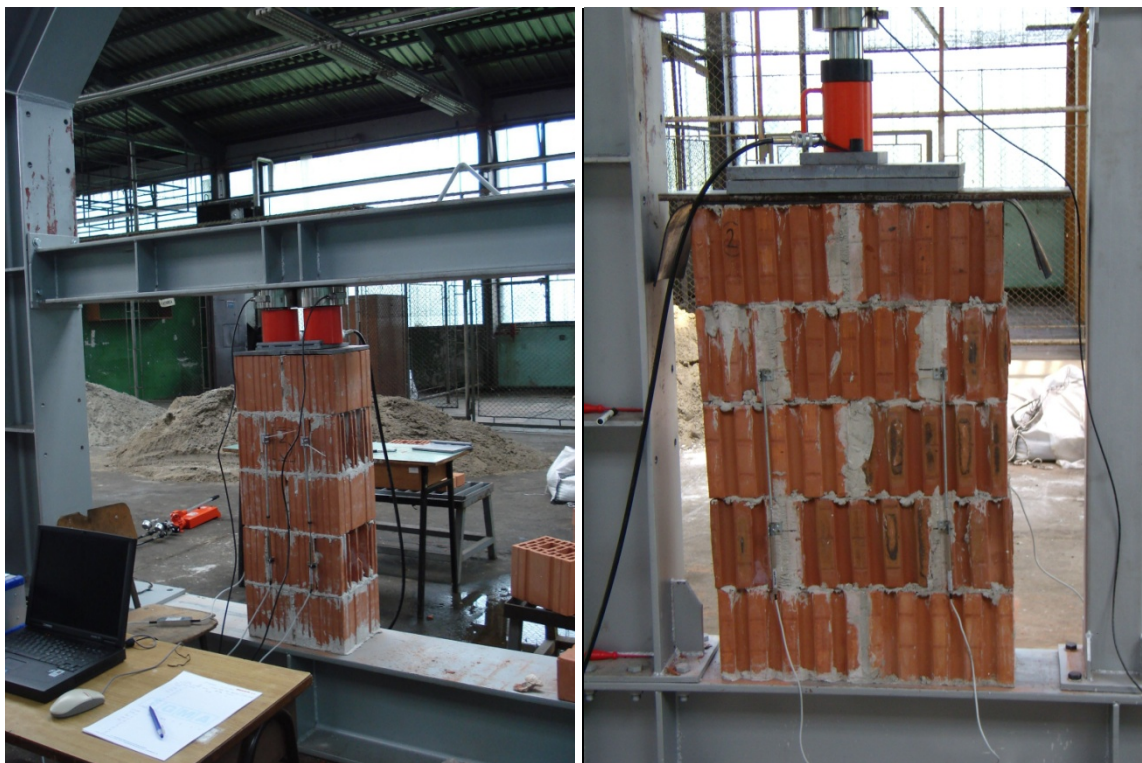
Zidni element	$f_{vk0}$ $[\text{N/mm}^2]$		
	Mort opće namjene	Tankoslojni mort	Lakoagregatni mort
Glina	M10 - M20	0,30	0,15
	M2,5 - M9		
	M1 - M2		
Kalcij silikat	M10 - M20	0,40	0,15
	M2,5 - M9		
	M1 - M2		
Beton	M10 - M20	0,30	0,15
Autoklavirani aerirani beton	M2,5 - M9		
Umjetni kamen i obrađeni prirodni kamen	M1 - M2		

Za tankoslojne mortove koji se rabe uz zidne elemente od porastog betona, kalcijsko-silikatne ili betonske, mogu se primjenjivati vrijednosti  $f_{vk}$  iz navedenog izraza (3.9) rabeći ograničenja iz *tablice 3.19*.

### 3.4.5 Eksperimentalno ispitivanje tlačne čvrstoće zidnoga ispuna

Tlačne čvrstoće uzoraka zidnoga ispuna ispitane su u skladu s normom EN 1052-1:1998 [25, 64]. Uzorci od glinenih i betonskih elemenata zidani su u produžnom mortu 1:1:5 s debljinama horizontalnih reški 1 cm i potpuno popunjenim vertikalnim reškama. Zidni ispun od porobetonskih blokova zidan je u odgovarajućem tankoslojnom mortu. Za sve vrste zidnoga ispuna napravljena su po tri uzorka.

Čvrstoće mortova za zidanje, također su ispitane na dan ispitivanja uzoraka. Naliježuće plohe uzoraka obrađene su mortom kojim je zidan zidni ispun, a između uzorka i gornje čelične ploče postavljen je sloj tvrde gume - debljine 5mm. Uzorci su njegovani na zraku 28 dana. Mjerena je veličina pritiskujuće sile te pomaci u uzdužnom smjeru ispitivanog uzorka. Mjerenje pomaka obavljeno je pomoću ekstenzometara LVDT s mjernom bazom od oko 40cm.



**Slika 3.8** Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke i euroterma



**Slika 3.9** Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka i ytonga

### 3.4.5.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od BLOK OPEKE

**Tablica 3.20** Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1	391	249	991
2	389	248	990
3	388	248	986

Vrijednosti tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje pritisne površine uzoraka, kao i čvrstoće na savijanje dane su u **tablici 3.21**.

**Tablica 3.21** Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje uzoraka

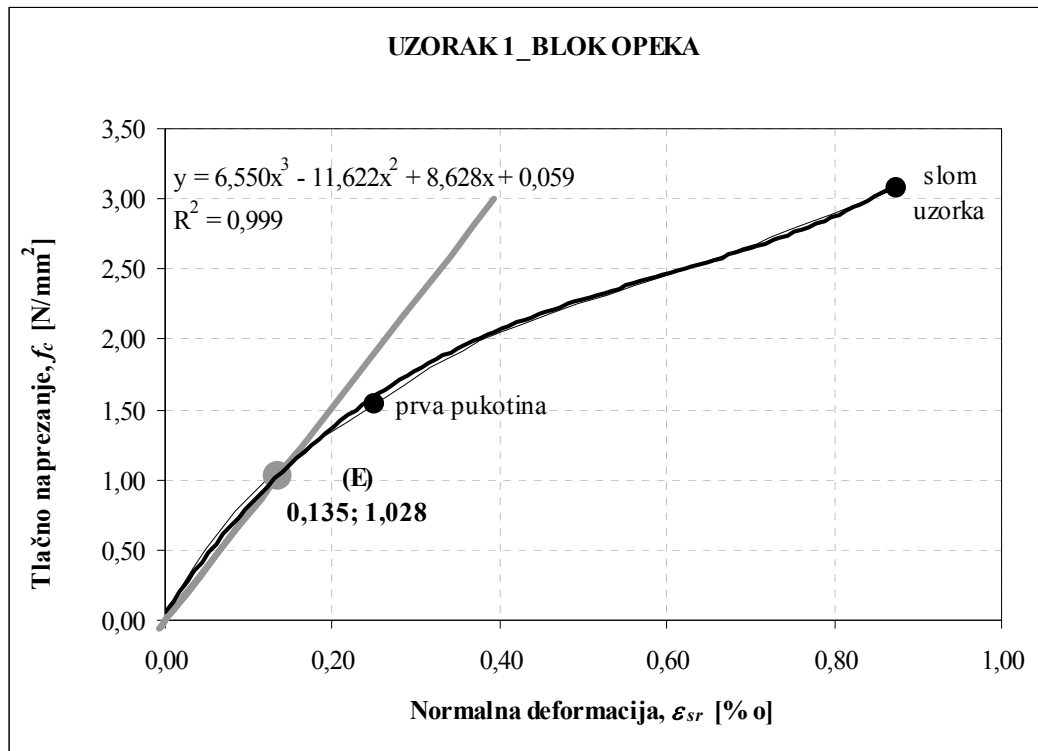
Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	0,40		0,50		0,50	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	8,20	8,30	8,10	8,40	8,20	8,00
Dimenzije uzorka, [mm]	160x40x40		160x40x40		160x40x40	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,94		1,17		1,17	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5,13	5,19	5,06	5,25	5,13	5,00
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>1,09</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>5,13</b>					

Dobiveni rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnoga ispuna od blok opeke, za svaki uzorak, prikazani su na **slikama 3.10** do **3.12**. Također, na istim slikama može se vidjeti tangenta krivulja na osnovu koje je određen modul elastičnosti. Tangenta je postavljena na zamjenjujuću krivulju koja je polinom 3. reda u točki koja predstavlja trećinu tlačne čvrstoće pri slomu, a ista najbolje opisuje krivulju dobivenih eksperimentalnih rezultata.

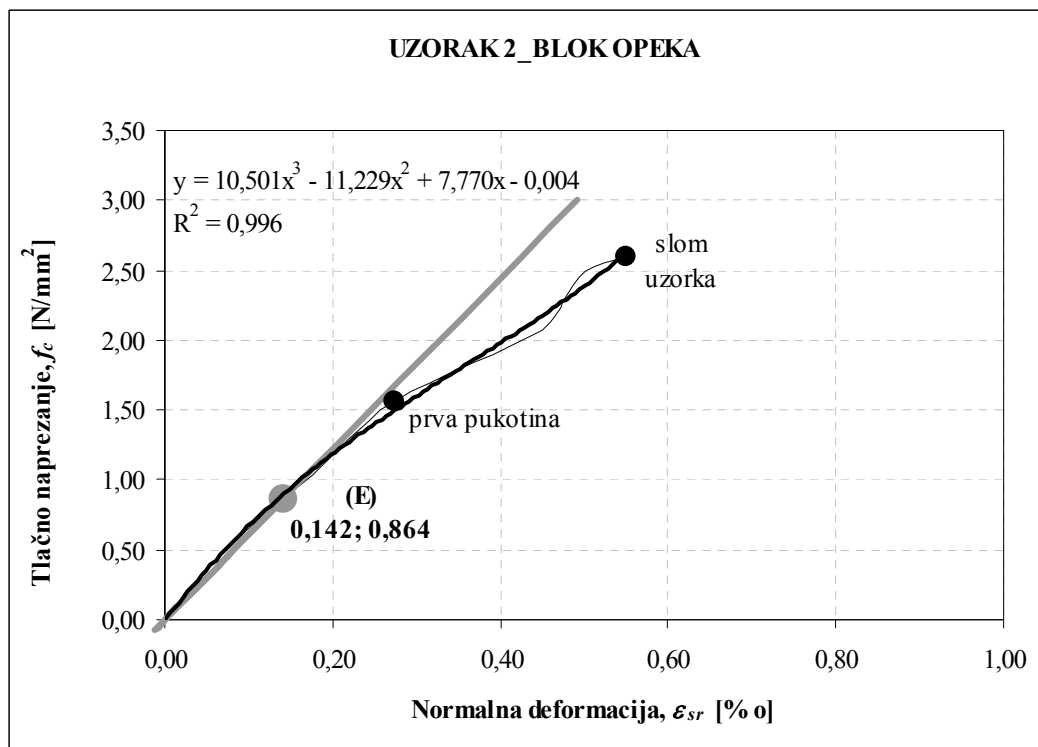
U **tablici 3.22** prikazana je srednja i karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke.

U **tablici 3.23** dane su vrijednosti modula elastičnosti za svaki uzorak, kao i njegova srednja vrijednost za zidni ispun od blok opeke.

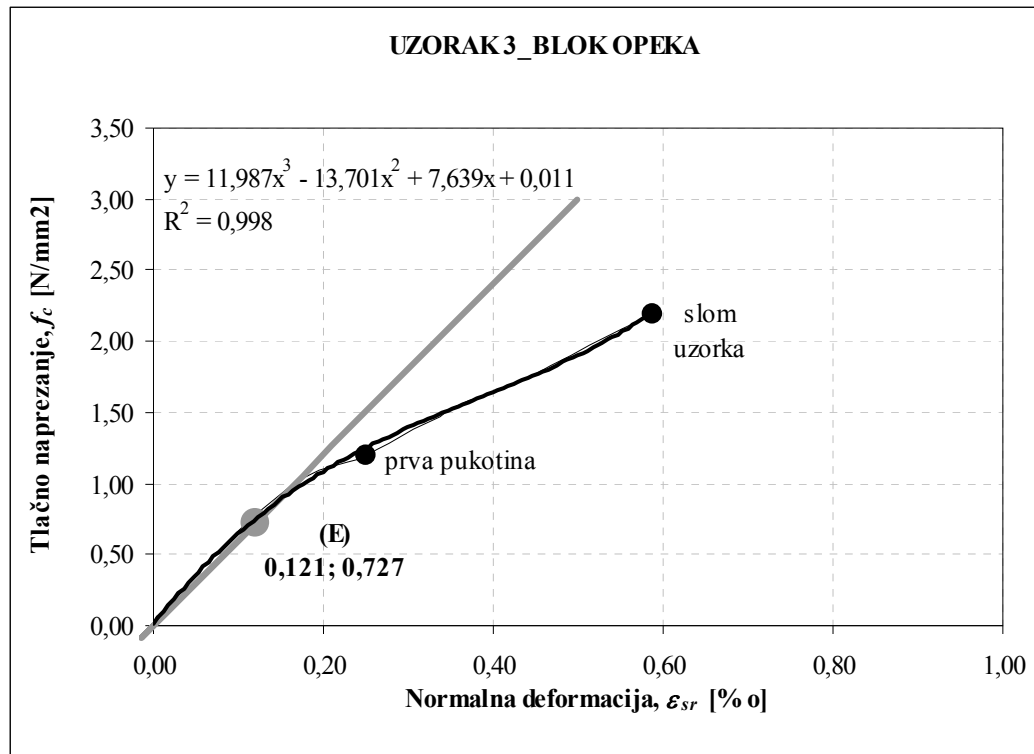




Slika 3.10 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 1 zidnog ispuna od blok opeke



Slika 3.11 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 2 zidnog ispuna od blok opeke



Slika 3.12 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 3 zidnog ispuna od blok opeke

Tablica 3.22 Tlačne čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke

Uzorak [n]	1	2	3
Sila pri pojavi prve pukotine, $F_{puk}$ [N]	150000	150000	115000
Sila sloma, $F^u$ [N]	300000	250000	210000
Ploština uzorka, $A_z$ [mm <sup>2</sup> ]	97359	96472	96224
Naprezanje pri pojavi pukotine, $f_{c,cr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,54	1,55	1,20
Tlačna čvrstoća, $f_{c,w}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,08	2,59	2,18
Standardno odstupanje, $S$ [N/mm <sup>2</sup> ]		0,45	
<b>Srednja vrijednost tlačne čvrstoće, <math>f_{c,w,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>		<b>2,62</b>	
<b>Karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće, <math>f_{cwk} = f_{c,w,sr} / 1,2</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>		<b>2,18</b>	

Tablica 3.23 Modul elastičnosti zidnog ispuna od blok opeke

Uzorak [n]	1	2	3
Trećina čvrstoće pri slomu, $f_{c,w}/3$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,03	0,86	0,73
Pripadna relativna deformacija, $\varepsilon_{1/3}$ [%o]	0,135	0,142	0,121
Modul elastičnosti, $E_i$ [N/mm <sup>2</sup> ]	7608	6105	6002
<b>Srednja vrijednost modula elastičnosti, <math>E</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>		<b>6572</b>	

### 3.4.5.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od EUROTERMA

**Tablica 3.24** Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1	755	238	1215
2	755	235	1215
3	755	240	1214

Vrijednosti tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje pritisne površine uzoraka, kao i čvrstoće na savijanje dane su u **tablici 3.25**.

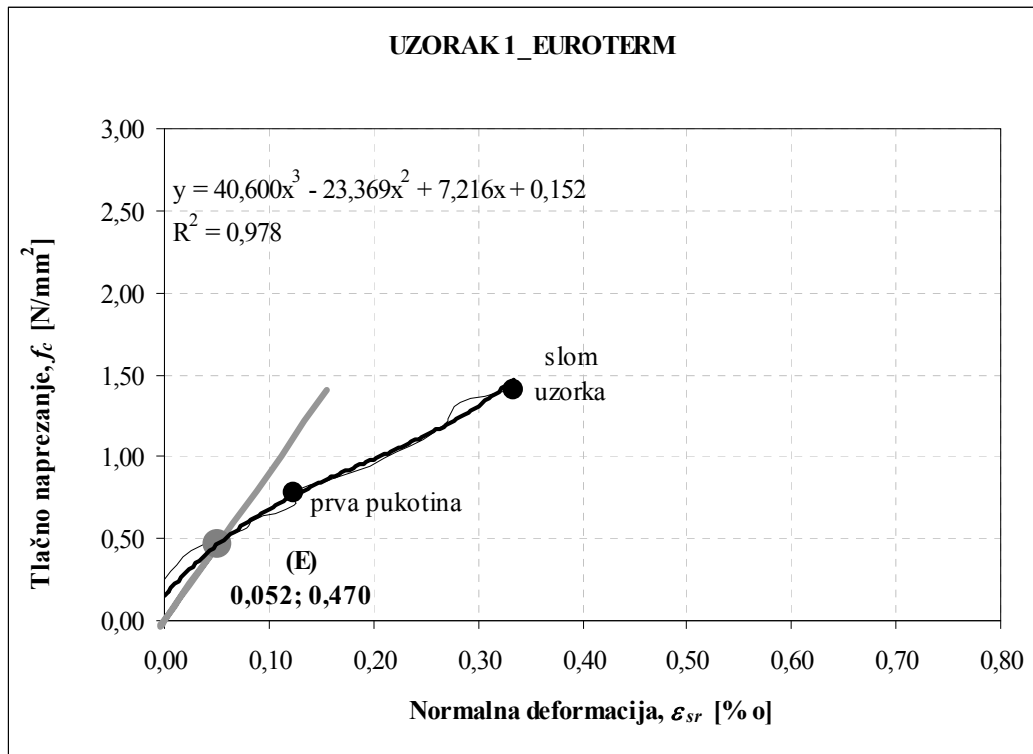
**Tablica 3.25** Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje uzoraka

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	0,50		0,52		0,54	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	7,10	7,10	6,06	6,25	6,20	6,00
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x39,8		160x40x39,9		160x40x39,9	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,17		1,22		1,26	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4,46	4,45	3,80	3,92	3,88	3,76
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>1,22</b>					
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>4,04</b>					

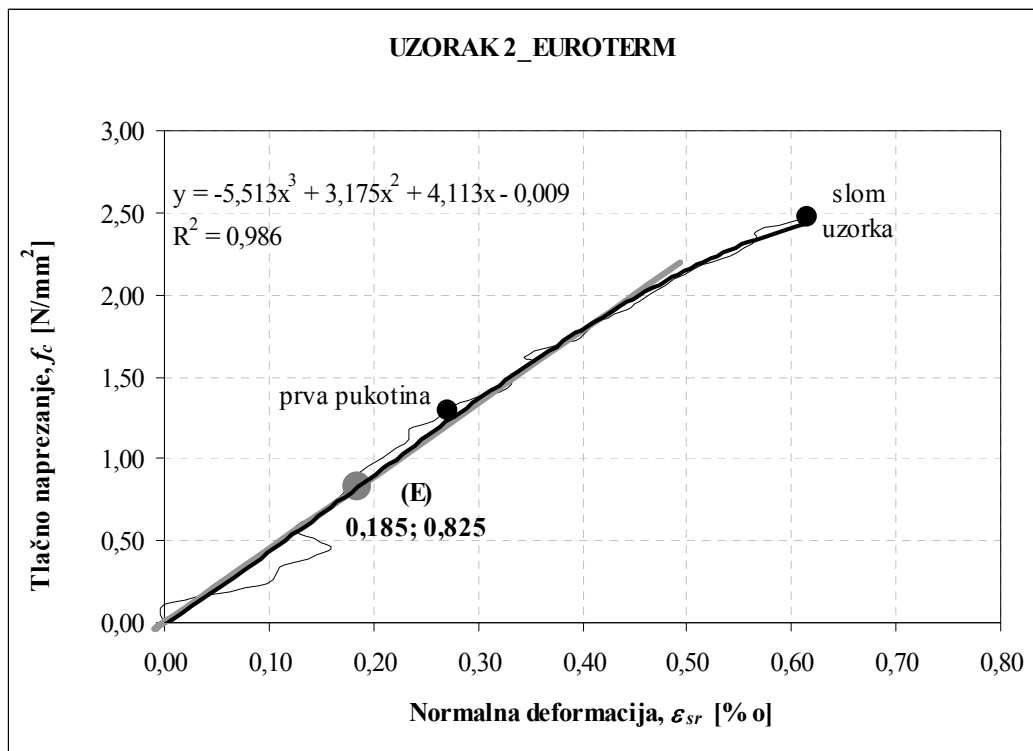
Dobiveni rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnoga ispuna od euroterma, za svaki uzorak, prikazani su na **slikama 3.13** do **3.15**. Također, na istim slikama može se vidjeti tangentna krivulja na osnovu koje je određen modul elastičnosti. Tangenta je postavljena na zamjenjujuću krivulju koja je polinom 3. reda u točki koja predstavlja trećinu tlačne čvrstoće pri slomu, a ista najbolje opisuje krivulju dobivenih eksperimentalnih rezultata.

U **tablici 3.26** prikazana je srednja i karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće zidnoga ispuna od euroterma.

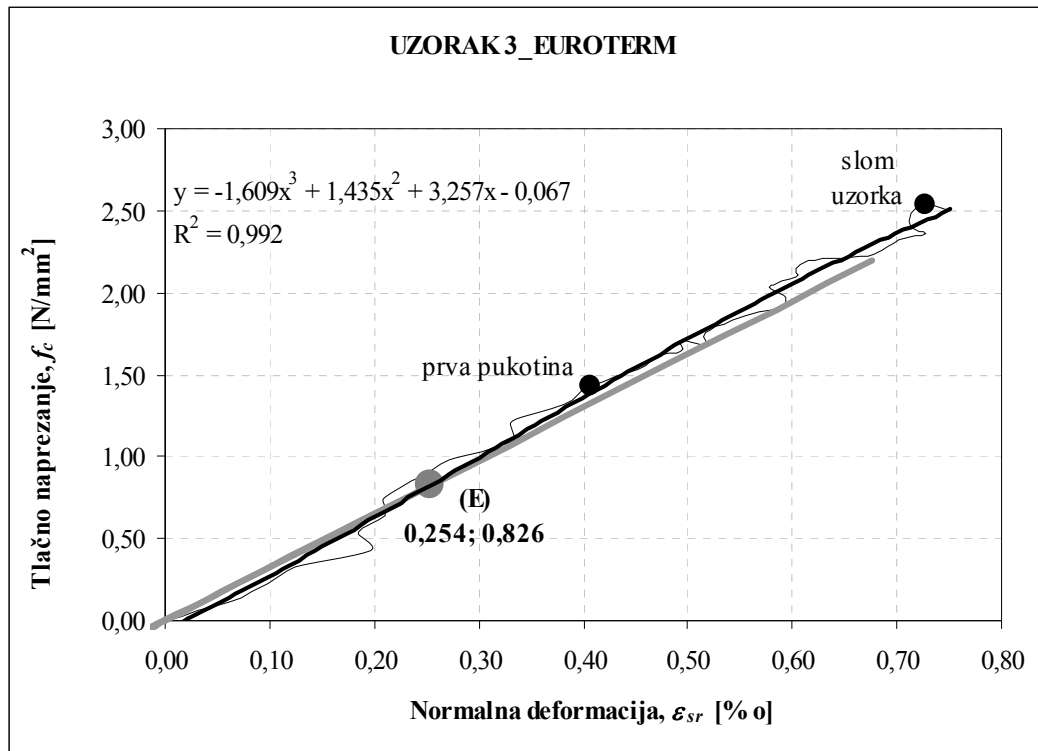
U **tablici 3.27** dane su vrijednosti modula elastičnosti za svaki uzorak, kao i njegova srednja vrijednost za zidni ispun od euroterma.



Slika 3.13 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 1 zidnog ispuna od euroterma



Slika 3.14 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 2 zidnog ispuna od euroterma



Slika 3.15 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 3 zidnog ispuna od euroterma

Tablica 3.26 Tlačne čvrstoće zidnog ispuna od euroterma

Uzorak [n]	1	2	3
Sila pri pojavi prve pukotine, $F_{puk}$ [N]	140700	229700	258800
Sila sloma, $F^u$ [N]	253100	439000	460000
Ploština uzorka, $A_z$ [mm <sup>2</sup> ]	179690	177425	181200
Naprezanje pri pojavi pukotine, $f_{c,cr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,78	1,29	1,43
Tlačna čvrstoća, $f_{c,w}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,41	2,47	2,54
Standardno odstupanje, $S$ [N/mm <sup>2</sup> ]		0,63	
<b>Srednja vrijednost tlačne čvrstoće, <math>f_{cw,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>		<b>2,14</b>	
<b>Karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće,</b> $f_{cw,k} = f_{cw,sr} / 1,2$ [N/mm <sup>2</sup> ]		<b>1,78</b>	

Tablica 3.27 Modul elastičnosti zidnog ispuna od euroterma

Uzorak [n]	1	2	3
Trećina čvrstoće pri slomu, $f_{c,w}/3$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,47	0,82	0,85
Pripadna relativna deformacija, $\varepsilon_{1/3}$ [‰]	0,052	0,185	0,254
Modul elastičnosti, $E_i$ [N/mm <sup>2</sup> ]	9029	4463	3332
<b>Srednja vrijednost modula elastičnosti, <math>E</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>		<b>5608</b>	

### 3.4.5.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od BETONSKOG BLOKA

**Tablica 3.28** Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1	785	245	990
2	785	240	990
3	785	238	985

Vrijednosti tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje pritisne površine uzoraka, kao i čvrstoće na savijanje dane su u **tablici 3.29**.

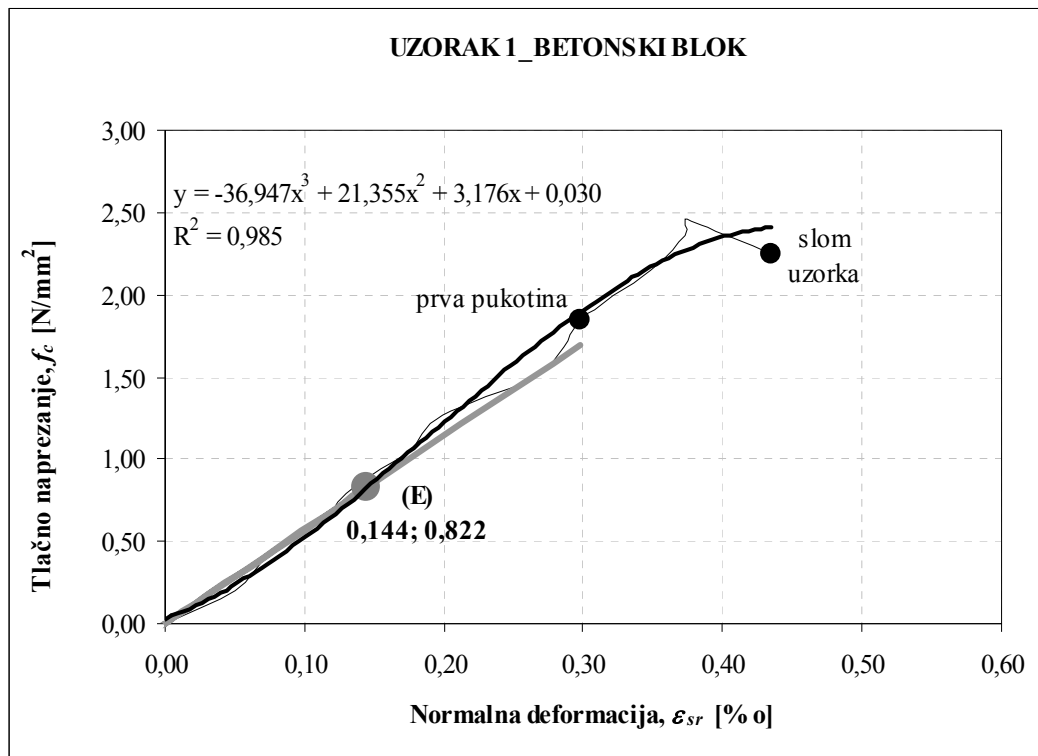
**Tablica 3.29** Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje uzoraka

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	0,92		0,82		0,82	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	10,07	10,06	10,90	11,40	12,90	11,40
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x39,7		160x40x40		160x40x39,9	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,15		1,92		1,92	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	6,34	6,34	6,81	7,13	8,10	7,16
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>2,00</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>6,98</b>					

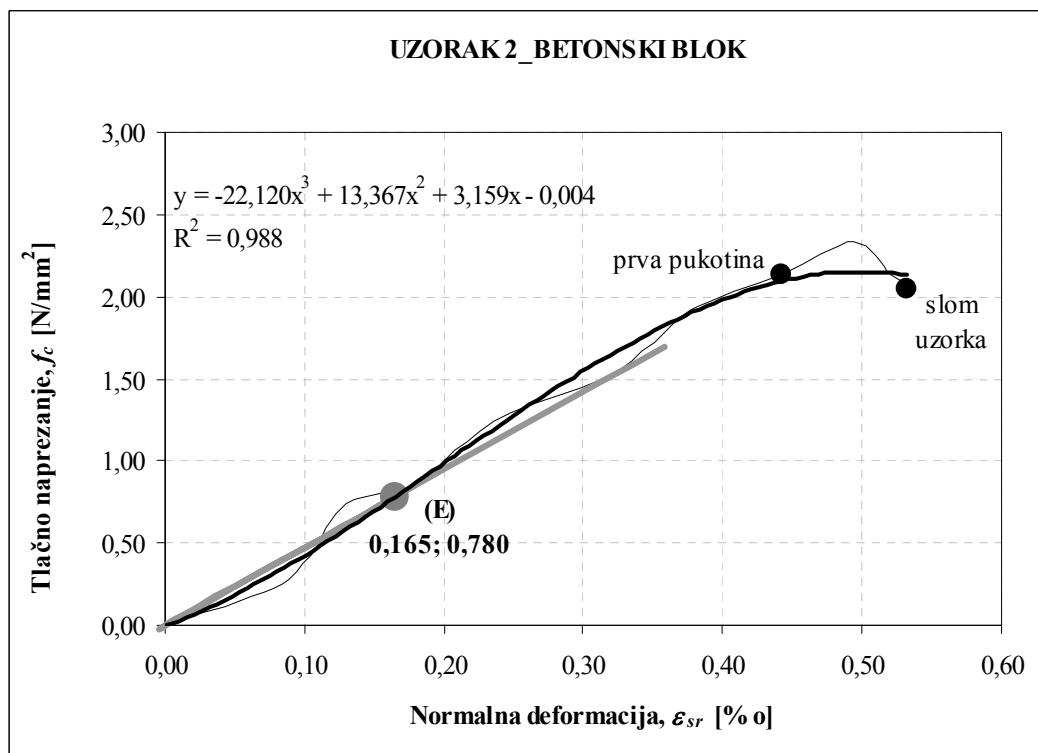
Dobiveni rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnoga ispuna od betonskog bloka, za svaki uzorak, prikazani su na **slikama 3.16** do **3.18**. Također, na istim slikama može se vidjeti tangenta krivulja na osnovu koje je određen modul elastičnosti. Tangenta je postavljena na zamjenjujuću krivulju koja je polinom 3. reda u točki koja predstavlja trećinu tlačne čvrstoće pri slomu, a ista najbolje opisuje krivulju dobivenih eksperimentalnih rezultata.

U **tablici 3.30** prikazana je srednja i karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće zidnoga ispuna od betonskog bloka.

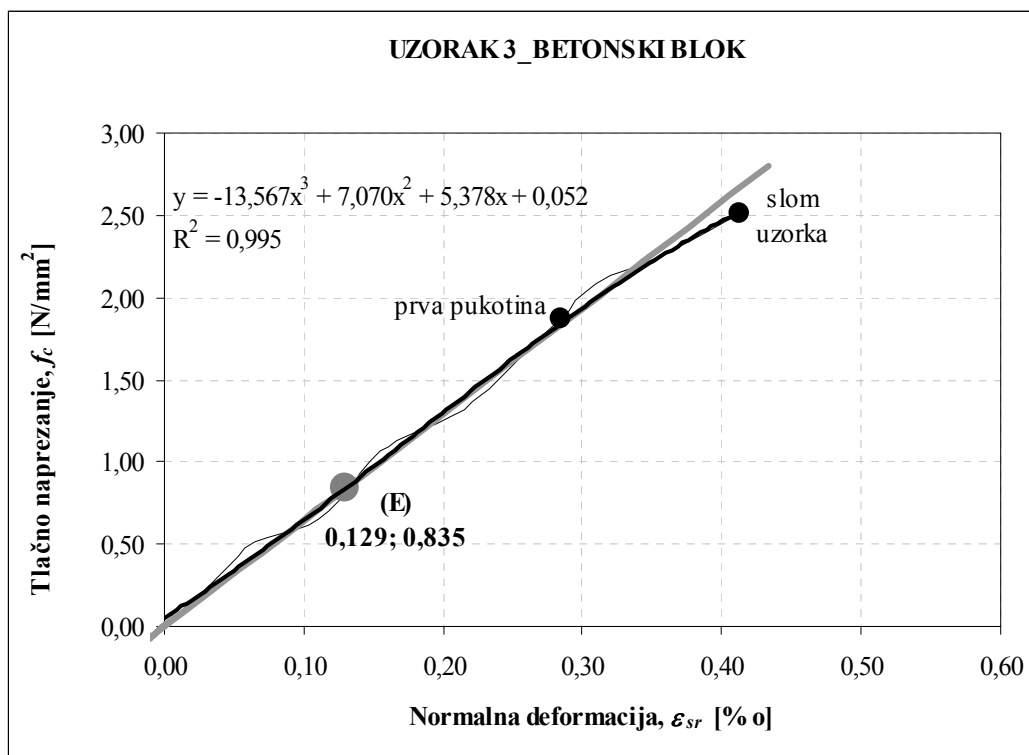
U **tablici 3.31** dane su vrijednosti modula elastičnosti za svaki uzorak, kao i njegova srednja vrijednost za zidni ispun od betonskoga bloka.



Slika 3.16 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 1 zidnog ispuna od betonskog bloka



Slika 3.17 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 2 zidnog ispuna od betonskog bloka



Slika 3.18 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 3 zidnog ispuna od betonskog bloka

Tablica 3.30 Tlačne čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka

Uzorak [n]	1	2	3
Sila pri pojavi prve pukotine, $F_{puk}$ [N]	356000	362000	350000
Sila sloma, $F^u$ [N]	474000	441000	468000
Ploština uzorka, $A_z$ [mm <sup>2</sup> ]	192325	188400	186830
Naprezanje pri pojavi pukotine, $f_{c,cr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,85	1,92	1,87
Tlačna čvrstoća, $f_{c,w}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,46	2,34	2,50
Standardno odstupanje, $S$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,09		
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće, $f_{c,w,sr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,44		
Karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće, $f_{cwk} = f_{c,w,sr} / 1,2$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,03		

Tablica 3.31 Modul elastičnosti zidnog ispuna od betonskog bloka

Uzorak [n]	1	2	3
Trećina čvrstoće pri slomu, $f_{c,w}/3$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,82	0,78	0,83
Pripadna relativna deformacija, $\varepsilon_{1/3}$ [‰]	0,144	0,165	0,129
Modul elastičnosti, $E_i$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5713	4737	6468
Srednja vrijednost modula elastičnosti, $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5639		



### 3.4.5.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnog ispuna od YTONGA

**Tablica 3.32** Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1	935	250	1253
2	935	250	1252
3	937	250	1251

Vrijednosti tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje uzoraka, kao i čvrstoće na savijanje, dane su u **tablici 3.33**.

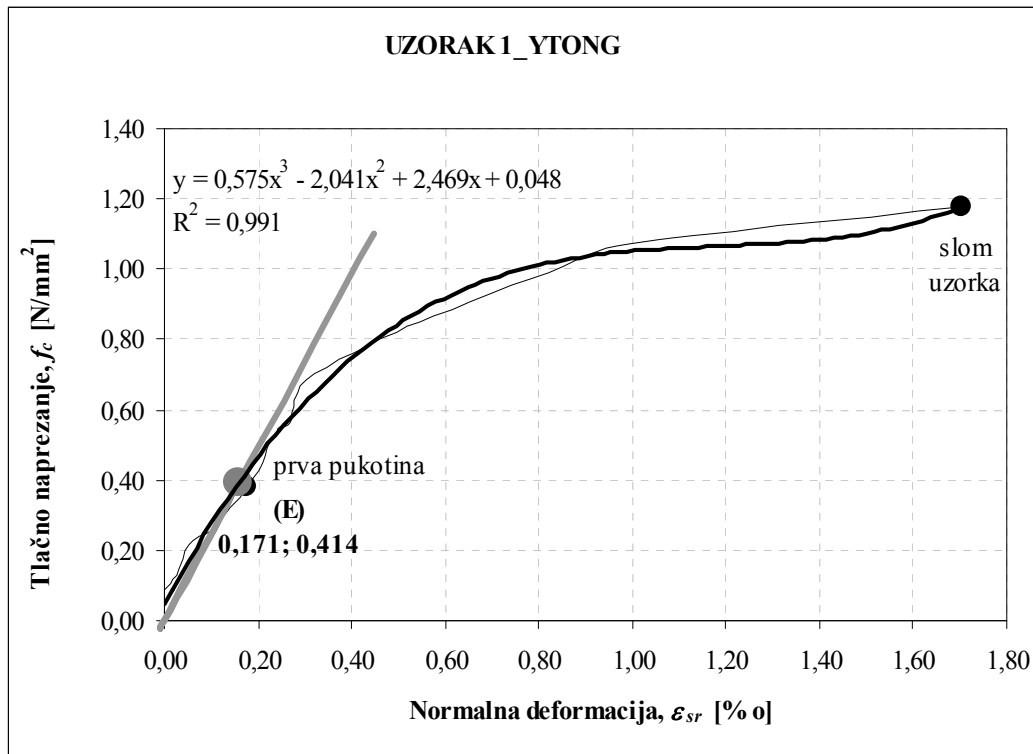
**Tablica 3.33** Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje i izravnavanje uzoraka

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	1,78		1,72		1,54	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	16,40	20,80	22,80	24,00	25,80	23,40
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x39,8		160x40x39,9		160x40x40	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4,17		4,02		3,60	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10,28	13,04	14,26	15,01	16,12	14,62
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>3,93</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>13,89</b>					

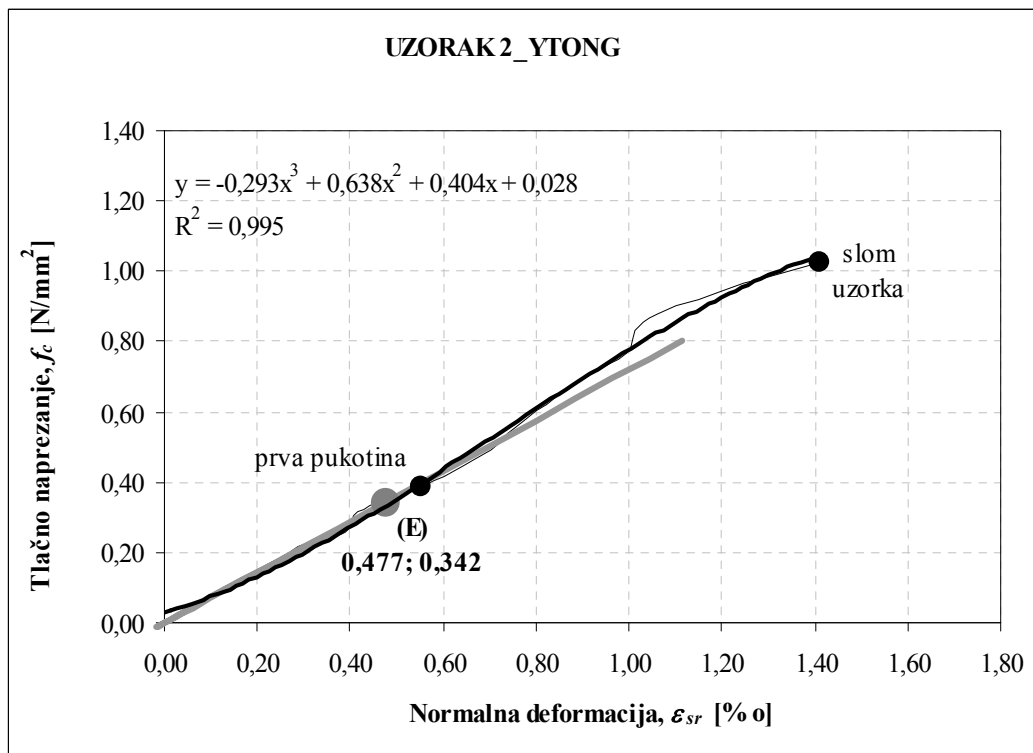
Dobiveni rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnoga ispuna od ytonga, za svaki uzorak, prikazani su na **slikama 3.19** do **3.21**. Također, na istim slikama može se vidjeti tangentna krivulja na osnovu koje je određen modul elastičnosti. Tangenta je postavljena na zamjenjujuću krivulju koja je polinom 3. reda u točki koja predstavlja trećinu tlačne čvrstoće pri slomu, a ista najbolje opisuje krivulju dobivenih eksperimentalnih rezultata.

U **tablici 3.34** prikazana je srednja i karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće zidnog ispuna od ytonga.

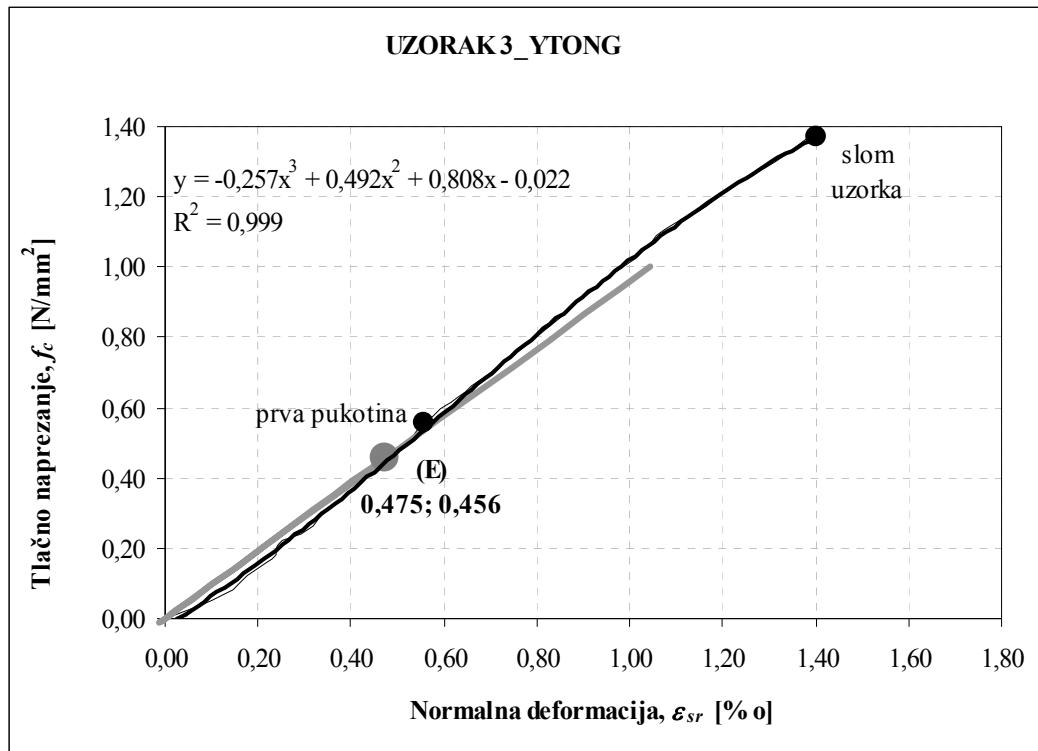
U **tablici 3.35** dane su vrijednosti modula elastičnosti za svaki uzorak, kao i njegova srednja vrijednost za zidni ispun od ytonga.



Slika 3.19 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 1 zidnog ispuna od ytonga



Slika 3.20 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 2 zidnog ispuna od ytonga



Slika 3.21 Odnos naprezanja i deformacije za UZORAK 3 zidnog ispuna od ytonga

Tablica 3.34 Tlačne čvrstoće zidnog ispuna od ytonga

Uzorak [n]	1	2	3
Sila pri pojavi prve pukotine, $F_{puk}$ [N]	89500	90000	130000
Sila sloma, $F^u$ [N]	275000	240000	320500
Ploština uzorka, $A_z$ [mm <sup>2</sup> ]	233750	233750	233750
Naprezanje pri pojavi pukotine, $f_{c,cr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,38	0,39	0,55
Tlačna čvrstoća, $f_{c,w}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,18	1,03	1,37
Standardno odstupanje, $S$ [N/mm <sup>2</sup> ]		0,17	
<b>Srednja vrijednost tlačne čvrstoće, <math>f_{c,w,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>		<b>1,19</b>	
<b>Karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće, <math>f_{cwk} = f_{c,w,sr}/1,2</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>		<b>0,99</b>	

Tablica 3.35 Modul elastičnosti zidnog ispuna od ytonga

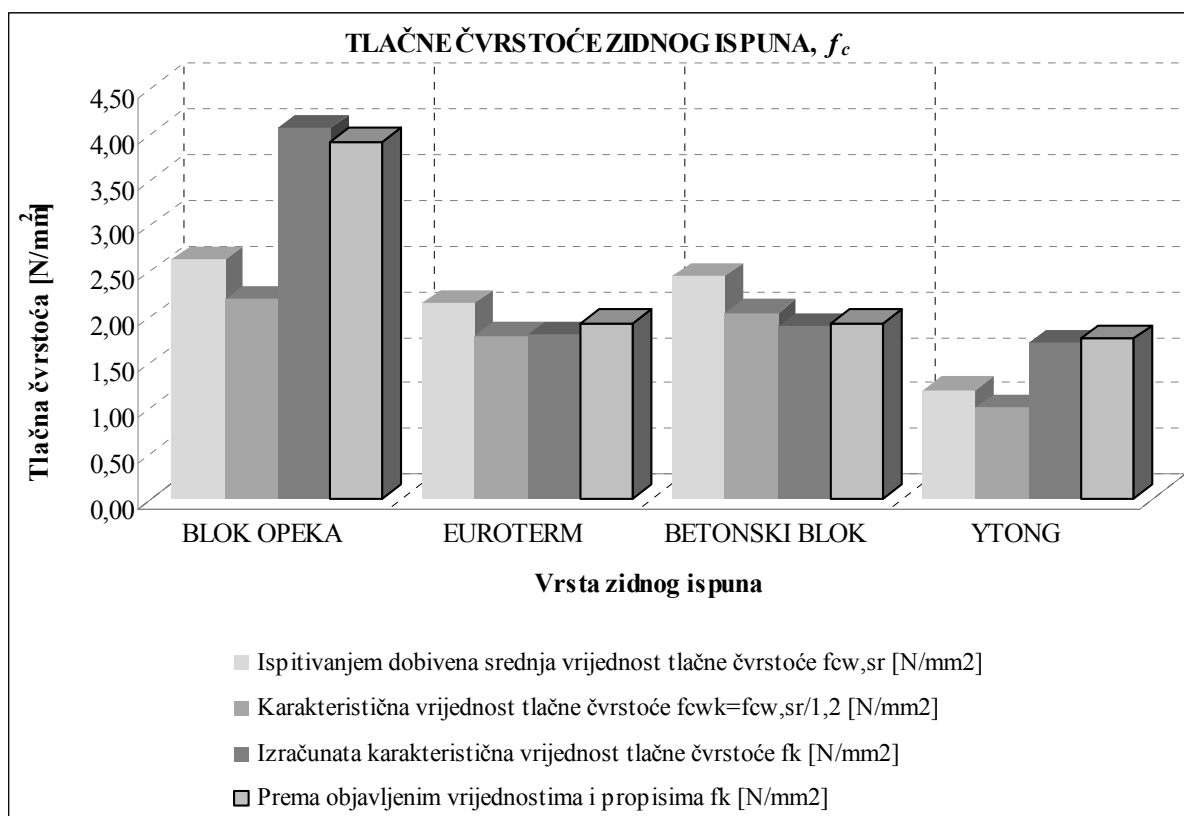
Uzorak [n]	1	2	3
Trećina čvrstoće pri slomu, $f_{c,w}/3$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,39	0,34	0,46
Pripadna relativna deformacija, $\varepsilon_{1/3}$ [‰]	0,159	0,477	0,475
Modul elastičnosti, $E_i$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2460	717	960
<b>Srednja vrijednost modula elastičnosti, <math>E</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>		<b>1379</b>	

### 3.4.5.5 Usporedba rezultata

#### a) Tlačna čvrstoća:

Na **slici 3.22** dan je prikaz tlačnih čvrstoća zidnoga ispuna od različitih zidnih elemenata. U **tablici 3.36** nalaze se brojčane vrijednosti istih.

Iz navedene slike, odnosno tablice, vidimo kako je karakteristična tlačna čvrstoća zidnoga ispuna dobivena eksperimentalnim ispitivanjem za blok opeku i ytong manja nego što bi se dobilo izračunom prema izrazu (3.1) i izrazu (3.2), bez obzira jesmo li koristili eksperimentalne rezultate morta i zidnih elemenata ili smo ih uzeli s objavljenim vrijednostima. Karakteristična tlačna čvrstoća zidnoga ispuna od euroterma i betonskog bloka dobiva se približno jednako, kao i da ju računamo pomoću izraza (3.1) na osnovu eksperimentalnih rezultata morta i zidnih elemenata ili njihovih objavljenih vrijednosti.



**Slika 3.22** Grafički prikaz usporedbe tlačnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata

„Izračunata karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće,  $f_k$ “ dobivena je pomoću izraza (3.5) i izraza (3.6), gdje su korišteni eksperimentalni rezultati tlačne čvrstoće zidnih elemenata i morta. Za koeficijent,  $K$ , su prema **tablici 3.2** uzete sljedeće vrijednosti: 0,45 za blok opeku, euroterm i betonski blok; 0,80 za ytong.

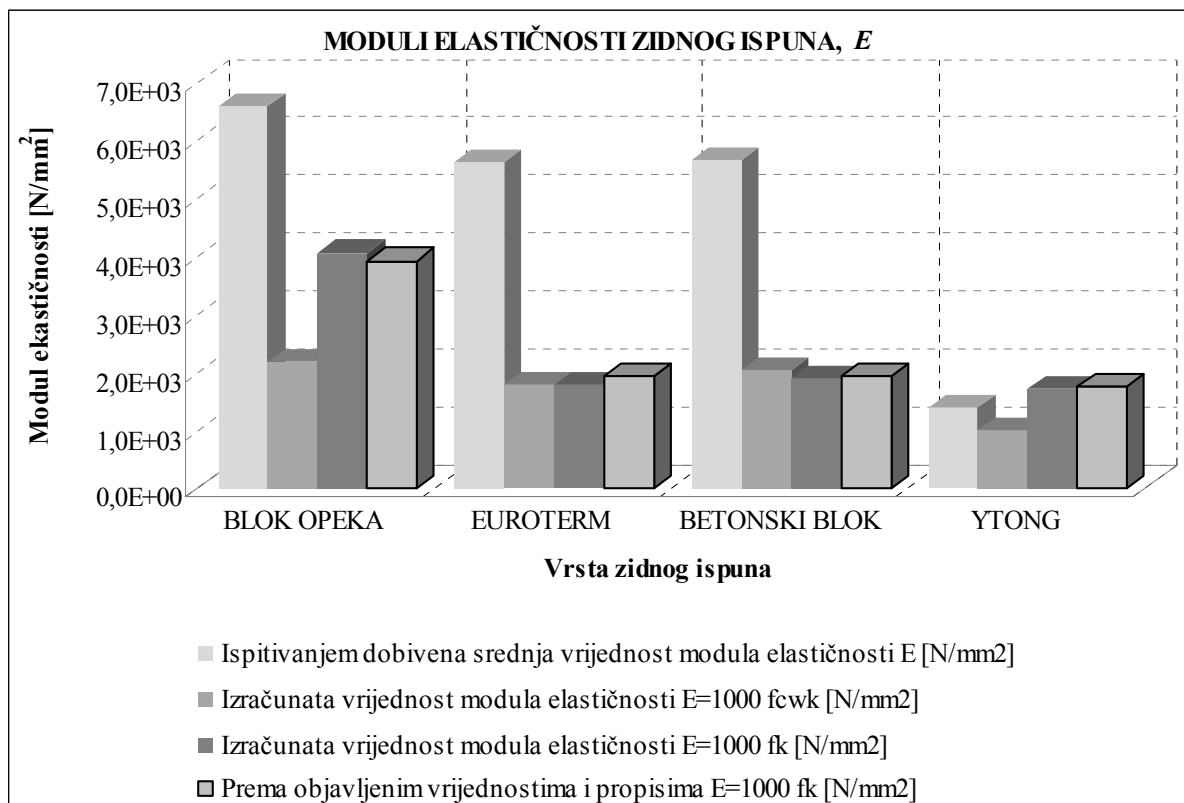
Vrijednost „Prema objavljenim vrijednostima i propisima,  $f_k$ “ dobivena je pomoću izraza (3.5) i izraza (3.6), gdje su korištene objavljene vrijednosti tlačnih čvrstoća zidnih elemenata i odabrana tlačna čvrstoća morta u iznosu od  $5,0[\text{N}/\text{mm}^2]$ .

**Tablica 3.36** Usporedba tlačnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata

Vrsta zidnog ispuna	Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost tlačne čvrstoće, $f_{cw,sr} [\text{N}/\text{mm}^2]$	Karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće, $f_{cw,k} = f_{cw,sr} / 1,2 [\text{N}/\text{mm}^2]$	Izračunata karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće, $f_k [\text{N}/\text{mm}^2]$	Prema objavljenim vrijednostima i propisima, $f_k [\text{N}/\text{mm}^2]$
BLOK OPEKA	2,62	2,18	4,06	3,91
EUROTERM	2,14	1,78	1,79	1,92
BETONSKI BLOK	2,44	2,03	3,35	3,41
YTONG	1,19	0,99	1,71	1,74

## b) Modul elastičnosti i posmični modul:

Moduli elastičnosti zidnoga ispuna prikazani su na *slici 3.23*, a njihove brojčane vrijednosti u *tablici 3.37*. Iz navedene slike, odnosno tablice, vidimo kako smo eksperimentalnim ispitivanjem dobili veće vrijednosti modula elastičnosti za sve vrste zidnoga ispuna, osim za ytong, nego što bi dobili da smo koristili izraz  $E=1000 f_k$ . Posmični modul nije eksperimentalno ispitivan nego se može uzeti kako je navedeno u *točki 3.4.3*.



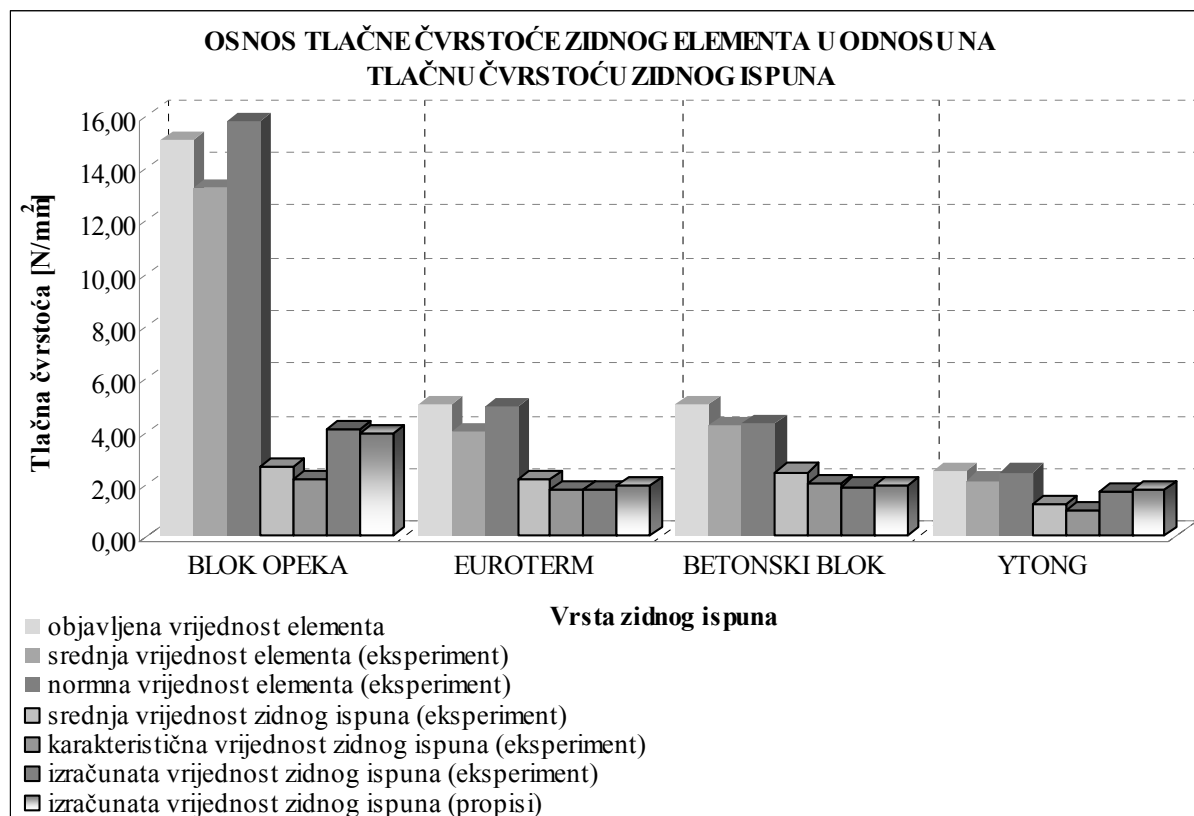
**Slika 3.23** Grafički prikaz usporedbe modula elastičnosti zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata

**Tablica 3.37** Usporedba modula elastičnosti zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata

Vrsta zidnog ispuna	Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost modula elastičnosti, E [N/mm <sup>2</sup> ]	Izračunata vrijednost modula elastičnosti, E=1000 f <sub>cwk</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Izračunata vrijednost modula elastičnosti, E=1000 f <sub>k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Prema objavljenim vrijednostima i propisima, E=1000 f <sub>k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
BLOK OPEKA	6572	2182	4057	3912
EUROTERM	5608	1784	1790	1916
BETONSKI BLOK	5639	2031	3349	3405
YTONG	1379	992	1706	1743

## c) Utjecaj tlačne čvrstoće zidnog elementa na tlačnu čvrstoću zidnog ispuna:

Utjecaj tlačne čvrstoće zidnoga elementa na tlačnu čvrstoću zidnoga ispuna grafički je prikazan na *slici 3.24*. Sa slike možemo vidjeti kako velika tlačna čvrstoća zidnoga elementa ne znači odmah i veliku tlačnu čvrstoću zidnoga ispuna. To se najbolje vidi ako se promatra zidni element od blok opeke kod kojeg je odnos tlačne čvrstoće zidnog elementa i tlačne čvrstoće zidnog ispuna najveći. Kod ostalih je zidnih elemenata ta razlika bitno manja.



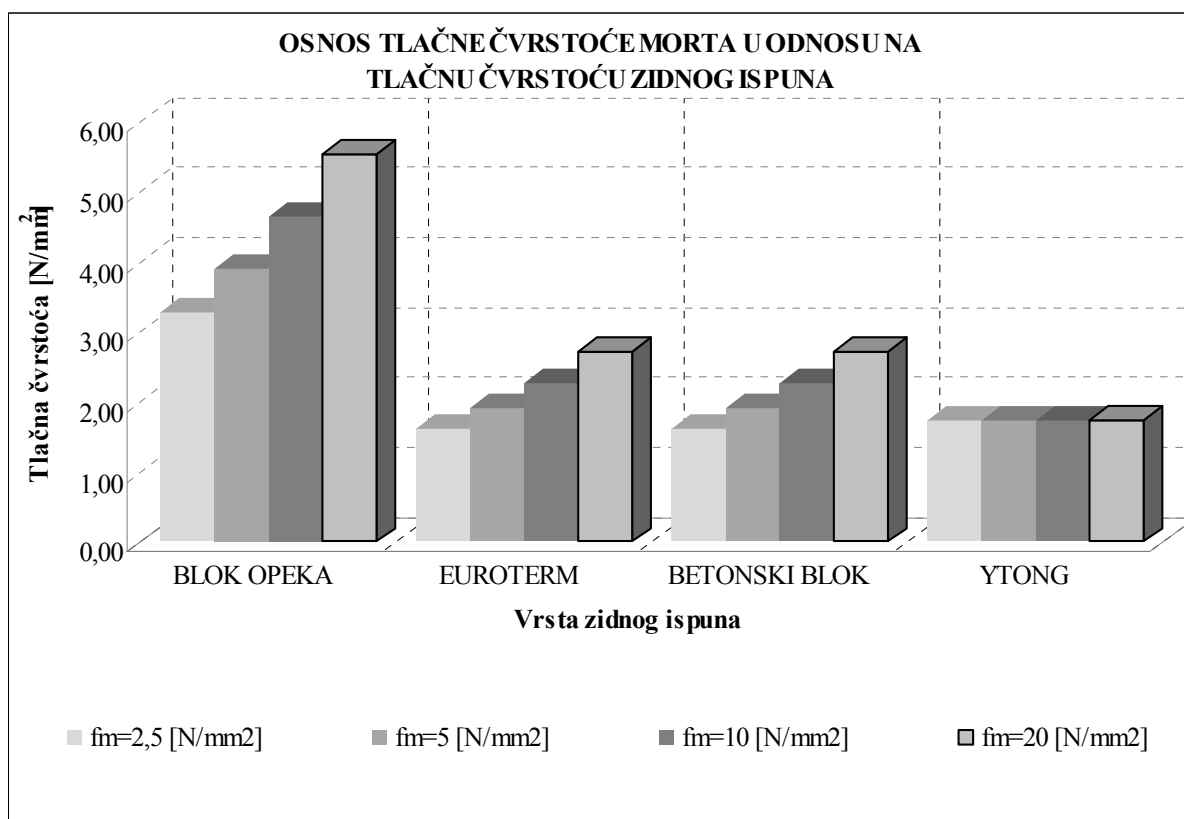
**Slika 3.24** Prikaz utjecaja tlačne čvrstoće zidnog elementa na tlačnu čvrstoću zidnog ispuna

Isto tako, sa *slike 3.24* možemo vidjeti da što je tlačna čvrstoća zidnoga elementa manja, to je manja i razlika u odnosu tlačnih čvrstoća zidnoga elementa i zidnoga ispuna.

d) Utjecaj tlačne čvrstoće morta na tlačnu čvrstoću zidnog ispuna:

Utjecaj tlačne čvrstoće morta za zidanje zidnih elemenata na tlačnu čvrstoću zidnoga ispuna, grafički je prikazan na **slici 3.25**. Sa slike možemo iščitati kako velika tlačna čvrstoća morta ne znači i veliku tlačnu čvrstoću zidnoga ispuna. To se najbolje vidi ako se promatra zidni element od blok opeke, euroterma i betonskog bloka. Kod ytonga tlačna čvrstoća zidnog ispuna ne ovisi o tlačnoj čvrstoći morta (ljepila), izraz (3.6).

Prirast tlačne čvrstoće zidnog ispuna različit je za različite zidne elemente, nije linearan.



**Slika 3.25** Prikaz utjecaja tlačne čvrstoće morta na tlačnu čvrstoću zidnog ispuna

Vrijednosti koje se nalaze na **slici 3.25** dobivene su na osnovu objavljenih vrijednosti tlačnih čvrstoća zidnih elemenata i tlačne čvrstoće morta, koje se vide na slici, a prema izrazu (3.5) i izrazu (3.6). Za koeficijent,  $K$ , prema **tablici 3.2** uzete su sljedeće vrijednosti: 0,45 za blok opeku, euroterm i betonski blok; 0,80 za ytong.



### 3.4.6 Eksperimentalno ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna

Posmično popuštanje zidnoga ispuna može se prikazati preko Coulombovog zakona koji postavlja linearni odnos između posmičnog i normalnog naprezanja  $\tau$  i  $\sigma$  kao  $\tau=c+\tan\varphi\sigma$ . Ovdje  $c$  predstavlja koheziju, a  $\tan\varphi$  kut trenja na kontaktu zidnoga elementa i morta. Veličina posmične čvrstoće pri odsutnosti normalnih naprezanja eksperimentalno se dobije ekstrapolacijom na osnovu ispitivanja posmične čvrstoće pri različitim vrijednostima normalnog naprezanja.

U skladu s prEN 1052-3:2001 [25, 64] određene su početne posmične čvrstoće četiriju vrsta zidnoga ispuna, *slika 3.26* i *slika 3.27*.



**Slika 3.26** Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke i euroterma



**Slika 3.27** Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka i ytonga

Tijekom pokusa vrijednost predtlaka nije bilo moguće održati stalnim, tako da se mijenjao do apsolutne vrijednosti manje od 10% propisane veličine. Na svim uzorcima je došlo do sloma po reški.

### 3.4.6.1 Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od BLOK OPEKE

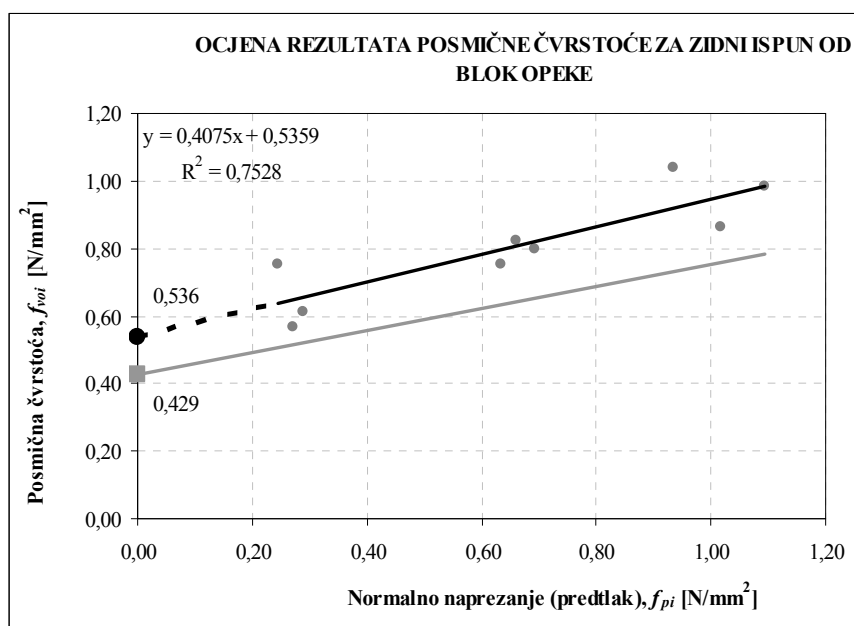
**Tablica 3.38** Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1-9	248	184	186

Za zidni ispun od blok opeke zidanog u produžnom mortu srednje tlačne čvrstoće prema **tablici 3.39**, na osnovu devet ispitanih uzoraka (po tri ispitana uzorka pri tlaku od 0,2 N/mm<sup>2</sup>, 0,6 N/mm<sup>2</sup> i 1,0 N/mm<sup>2</sup>) dobivena je vrijednost početne posmične čvrstoće kako pokazuje **slika 3.28**. U **tablici 3.40** prikazani su rezultati ispitivanja posmične čvrstoće zidnoga ispuna od blok opeke.

**Tablica 3.39** Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje uzoraka

Uzorak [n]	I	II	III
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	0,50	0,70	0,50
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	9,00   11,00	9,20   9,10	9,30   10,20
Dimenzije uzorka, [mm]	160x40x40	160x40x40	160x40x40
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,17	1,64	1,17
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5,63   6,88	5,75   5,69	5,81   6,38
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>1,33</b>		
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>6,02</b>		


**Slika 3.28** Ocjena rezultata posmične čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke

**Tablica 3.40** Posmične čvrstoće zidnog ispuna od blok opeke

Uzorak [n]	Normalna sila, $F_{pi}$ [N]	Ploština pod normalnom silom, $A_{pi}$ [mm <sup>2</sup> ]	Normalno naprezanje (predtlak), $f_{pi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4=2/3</b>
1	12440	45674	0,27
2	13220	45674	0,29
3	11200	45674	0,27
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,25</b>
4	31700	45674	0,69
5	28900	45674	0,63
6	30200	45674	0,66
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,66</b>
7	46500	45674	1,02
8	50000	45674	1,09
9	42700	45674	0,93
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>1,02</b>
Uzorak [n]	Posmična sila pri slomu, $F_{i,max}$ [N]	Ploština opterećena na posmik, $A_{vi}$ [mm <sup>2</sup> ]	Posmična čvrstoća, $f_{voi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7=5/6</b>
1	52000	91348	0,57
2	56120	91348	0,61
3	69000	91348	0,76
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,65</b>
4	73000	91348	0,80
5	69000	91348	0,76
6	75000	91348	0,82
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,79</b>
7	79000	91348	0,86
8	90000	91348	0,99
9	95000	91348	1,04
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,96</b>
<b>Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće pri nultom naprezanju, <math>f_{v0}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>			<b>0,536</b>
<i>Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće, <math>f_{vk0}</math> [N/mm<sup>2</sup>]; <math>f_{vk0}=0,8f_{v0}</math></i>			<b>0,429</b>
<b>Srednja vrijednost kuta unutarnjeg trenja, <math>\alpha</math> [°]</b>			<b>22,17</b>
<i>Karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja, <math>\alpha_k</math> [°]; <math>tg\alpha_k=0,8tg\alpha</math></i>			<b>18,06</b>

## 3.4.6.2 Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od EUROTERMA

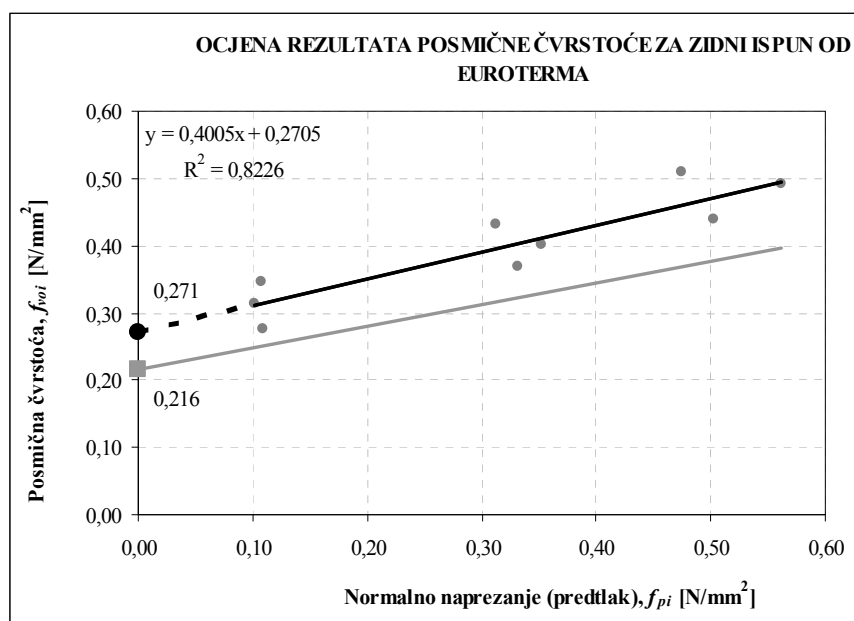
Tablica 3.41 Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1-9	376 (300)	246	237

Za zidni ispun od euroterma zidanog u produžnom mortu srednje tlačne čvrstoće prema **tablici 3.42**, na osnovu devet ispitanih uzoraka (po tri ispitana uzorka pri tlaku od 0,1 N/mm<sup>2</sup>, 0,3 N/mm<sup>2</sup> i 0,5 N/mm<sup>2</sup>) dobivena je vrijednost početne posmične čvrstoće kako pokazuje **slika 3.29**. U **tablici 3.43** prikazani su rezultati ispitivanja posmične čvrstoće zidnoga ispuna od euroterma.

Tablica 3.42 Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje uzoraka

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	0,52		0,60		0,70	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	8,20	8,20	8,45	9,00	9,00	8,80
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x39,7		160x39,9x40,2		160x39,8x39,8	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,22		1,40		1,64	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5,18	5,18	5,27	5,61	5,68	5,56
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>1,42</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>5,41</b>					



Slika 3.29 Ocjena rezultata posmične čvrstoće zidnog ispuna od euroterma

**Tablica 3.43** Posmične čvrstoće zidnog ispuna od euroterma

Uzorak [n]	Normalna sila, $F_{pi}$ [N]	Ploština pod normalnom silom, $A_{pi}$ [mm <sup>2</sup> ]	Normalno naprežanje (predtlak), $f_{pi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4=2/3</b>
1	8100	73800	0,11
2	7500	73800	0,10
3	7900	73800	0,11
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,11</b>
4	24500	73800	0,33
5	26000	73800	0,35
6	23100	73800	0,31
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,33</b>
7	37100	73800	0,50
8	35000	73800	0,47
9	41500	73800	0,56
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,51</b>
Uzorak [n]	Posmična sila pri slomu, $F_{i,max}$ [N]	Ploština opterećena na posmik, $A_{vi}$ [mm <sup>2</sup> ]	Posmična čvrstoća, $f_{voi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7=5/6</b>
1	51000	184746	0,28
2	58000	184746	0,31
3	64000	184746	0,35
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,31</b>
4	68000	184746	0,37
5	74000	184746	0,40
6	80000	184746	0,43
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,40</b>
7	81000	184746	0,44
8	94000	184746	0,51
9	91000	184746	0,49
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,48</b>
<b>Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće pri nultom naprežanju, <math>f_{v0}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>			<b>0,271</b>
<b>Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće, <math>f_{vk0}</math> [N/mm<sup>2</sup>]; <math>f_{vk0}=0,8f_{v0}</math></b>			<b>0,216</b>
<b>Srednja vrijednost kuta unutarnjeg trenja, <math>\alpha</math> [°]</b>			<b>21,83</b>
<b>Karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja, <math>\alpha_k</math> [°]; <math>tg\alpha_k=0,8tg\alpha</math></b>			<b>17,77</b>

### 3.4.6.3 Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od BETONSKOG BLOKA

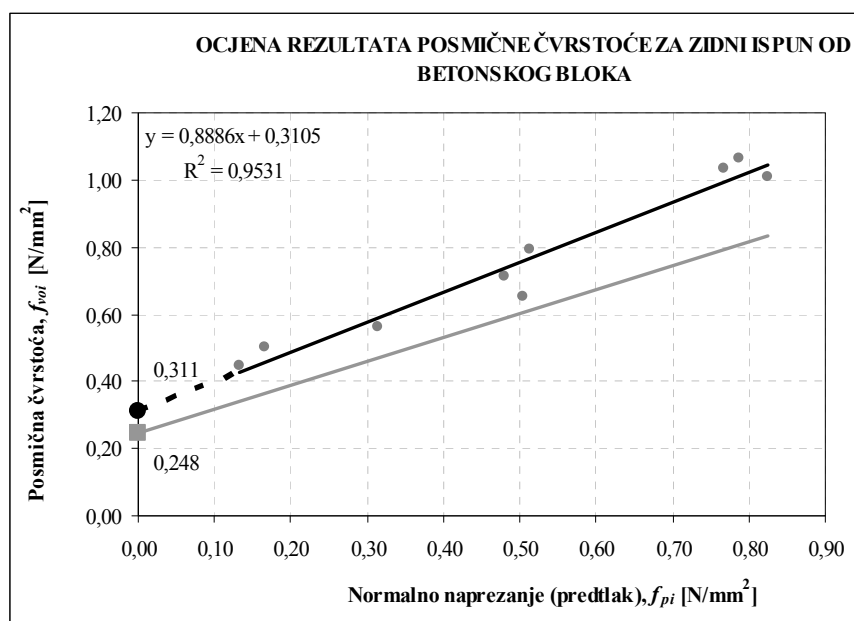
**Tablica 3.44** Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1-9	300 (390)	239	189

Za zidni ispun od betonskoga bloka zidanoga u produžnom mortu srednje tlačne čvrstoće prema **tablici 3.45**, na osnovu devet ispitanih uzoraka (po tri ispitana uzorka pri tlaku od  $0,1 \text{ N/mm}^2$ ,  $0,3 \text{ N/mm}^2$  i  $0,5 \text{ N/mm}^2$ ) dobivena je vrijednost početne posmične čvrstoće kako pokazuje **slika 3.30**. U **tablici 3.46** prikazani su rezultati ispitivanja posmične čvrstoće zidnoga ispuna od betonskoga bloka.

**Tablica 3.45** Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje uzoraka

Uzorak [n]	I	II	III
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	0,50	0,52	0,54
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	7,10	7,10	6,00
Dimenzije uzorka, [mm]	160x40x39,8	160x40x39,9	160x40x39,9
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [ $\text{N/mm}^2$ ]	1,17	1,22	1,26
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [ $\text{N/mm}^2$ ]	4,46	4,45	3,76
Srednja vlačna čvrstoća, $f_{mt,sr}$ [ $\text{N/mm}^2$ ]	1,22		
Srednja tlačna čvrstoća, $f_{m,sr}$ [ $\text{N/mm}^2$ ]	4,04		


**Slika 3.30** Ocjena rezultata posmične čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka

**Tablica 3.46** Posmične čvrstoće zidnog ispuna od betonskog bloka

Uzorak [n]	Normalna sila, $F_{pi}$ [N]	Ploština pod normalnom silom, $A_{pi}$ [mm <sup>2</sup> ]	Normalno naprezanje (predtlak), $f_{pi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4=2/3</b>
1	22600	71825	0,31
2	11900	71825	0,17
3	9500	71825	0,13
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,20</b>
4	34400	71825	0,48
5	36200	71825	0,50
6	36800	71825	0,51
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,50</b>
7	56500	71825	0,79
8	59300	71825	0,83
9	55100	71825	0,77
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,79</b>
Uzorak [n]	Posmična sila pri slomu, $F_{i,max}$ [N]	Ploština opterećena na posmik, $A_{vi}$ [mm <sup>2</sup> ]	Posmična čvrstoća, $f_{voi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7=5/6</b>
1	80900	186745	0,43
2	72300	186745	0,39
3	64100	186745	0,34
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,39</b>
4	102300	186745	0,55
5	94100	186745	0,50
6	113600	186745	0,61
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,55</b>
7	153000	186745	0,82
8	145200	186745	0,78
9	148700	186745	0,80
<b>Srednja vrijednost</b>			<b>0,80</b>
<b>Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće pri nultom naprezanju, <math>f_{v0}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>			<b>0,239</b>
<b>Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće, <math>f_{vk0}</math> [N/mm<sup>2</sup>]; <math>f_{vk0}=0,8f_{v0}</math></b>			<b>0,191</b>
<b>Srednja vrijednost kuta unutarnjeg trenja, <math>\alpha</math> [°]</b>			<b>34,36</b>
<b>Karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja, <math>\alpha_k</math> [°]; <math>tg\alpha_k=0,8tg\alpha</math></b>			<b>28,67</b>

## 3.4.6.4 Ispitivanje posmične čvrstoće zidnog ispuna od YTONGA

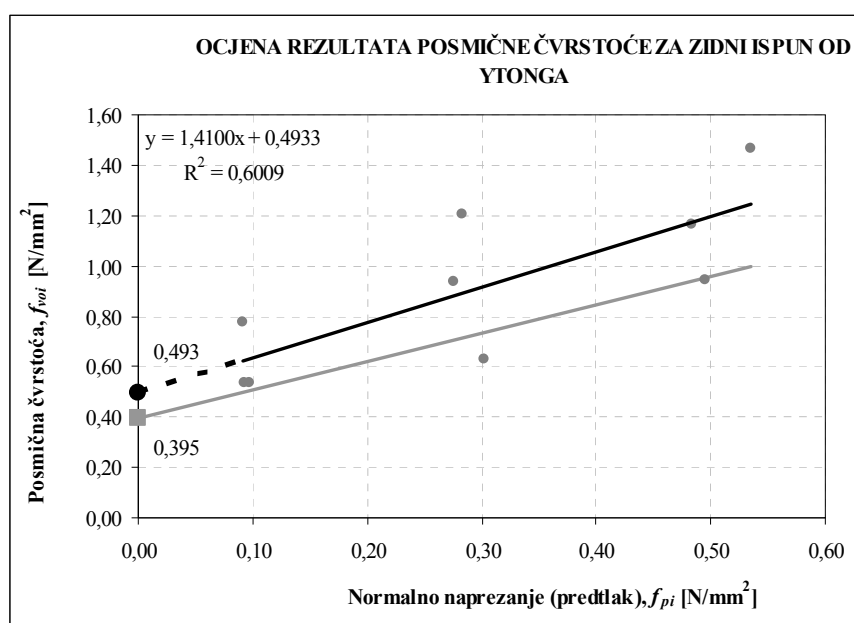
Tablica 3.47 Izmjere ispitanih uzoraka

Uzorak [n]	Duljina, $l_u$ [mm]	Širina, $w_u$ [mm]	Visina, $h_u$ [mm]
1-9	300	250	250

Za zidni ispun od ytonga zidanoga u produžnom mortu srednje tlačne čvrstoće prema *tablici 3.48*, na osnovu devet ispitanih uzoraka (po tri ispitana uzorka pri tlaku od 0,1 N/mm<sup>2</sup>, 0,3 N/mm<sup>2</sup> i 0,5 N/mm<sup>2</sup>) dobivena je vrijednost početne posmične čvrstoće kako pokazuje *slika 3.31*. U *tablici 3.49* prikazani su rezultati ispitivanja posmične čvrstoće zidnoga ispuna od ytonga.

Tablica 3.48 Tlačne čvrstoće cementnog morta za zidanje uzoraka

Uzorak [n]	I	II	III
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	1,35	1,35	1,44
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	20,00   20,00	19,50   20,00	19,20   19,00
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x40	160x40x40,9	160x40x40,3
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,16	3,16	3,37
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	12,50   12,50	11,92   12,22	11,91   11,79
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>3,23</b>		
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>12,14</b>		



Slika 3.31 Ocjena rezultata posmične čvrstoće zidnog ispuna od ytonga



**Tablica 3.49** Posmične čvrstoće zidnog ispuna od ytonga

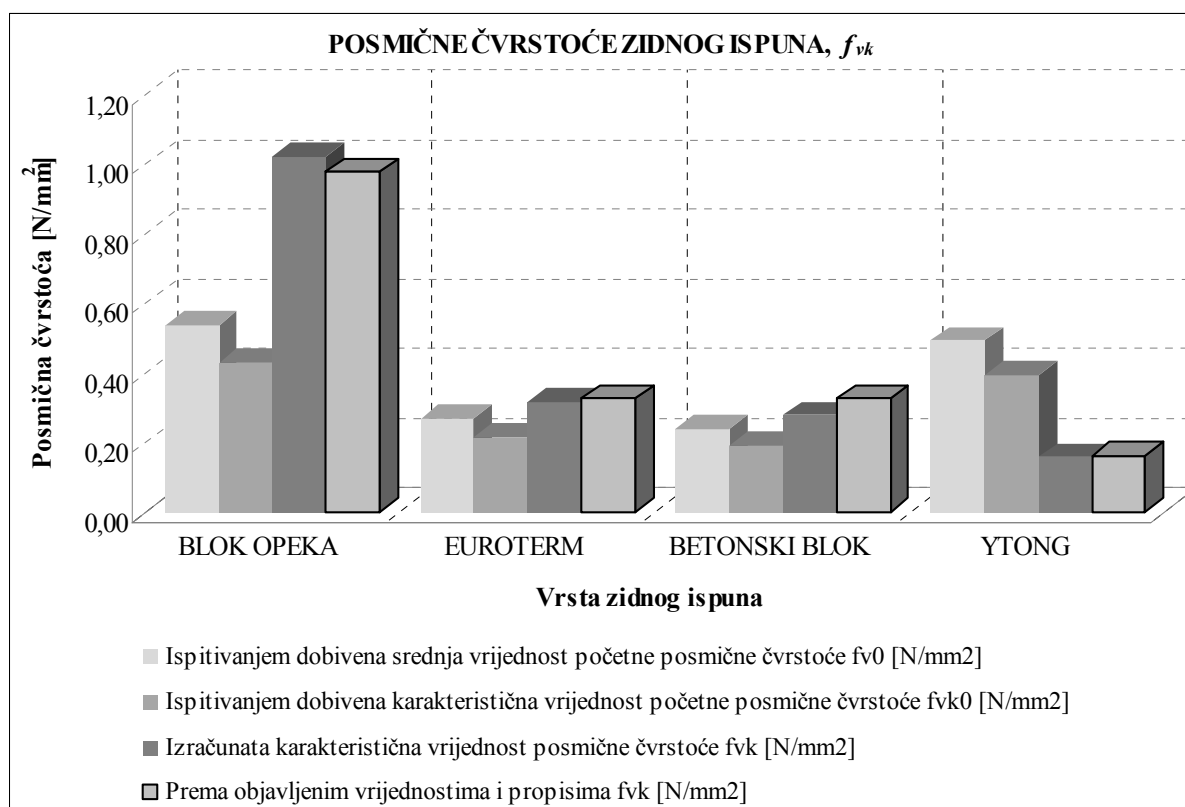
Uzorak [n]	Normalna sila, $F_{pi}$ [N]	Ploština pod normalnom silom, $A_{pi}$ [mm <sup>2</sup> ]	Normalno naprežanje (predtlak), $f_{pi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4=2/3</b>
1	7300	75000	0,10
2	6840	75000	0,09
3	7000	75000	0,09
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,09</b>
4	21200	75000	0,28
5	22700	75000	0,30
6	20700	75000	0,28
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,29</b>
7	37100	75000	0,49
8	40100	75000	0,53
9	36300	75000	0,48
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,50</b>
Uzorak [n]	Posmična sila pri slomu, $F_{i,max}$ [N]	Ploština opterećena na posmik, $A_{vi}$ [mm <sup>2</sup> ]	Posmična čvrstoća, $f_{voi}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7=5/6</b>
1	48000	75000	0,53
2	50000	75000	0,77
3	40200	75000	0,54
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,61</b>
4	90400	75000	1,21
5	47100	75000	0,63
6	70200	75000	0,94
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>0,92</b>
7	70700	75000	0,94
8	110000	75000	1,47
9	87300	75000	1,16
<i>Srednja vrijednost</i>			<b>1,19</b>
<b>Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće pri nultom naprežanju, <math>f_{v0}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>			<b>0,493</b>
<i>Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće, <math>f_{vk0}</math> [N/mm<sup>2</sup>]; <math>f_{vk0}=0,8f_{v0}</math></i>			<b>0,395</b>
<b>Srednja vrijednost kuta unutarnjeg trenja, <math>\alpha</math> [°]</b>			<b>54,65</b>
<i>Karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja, <math>\alpha_k</math> [°]; <math>tg\alpha_k=0,8tg\alpha</math></i>			<b>48,44</b>

### 3.4.6.5 Usporedba rezultata

Na *slici 3.32* dan je prikaz posmičnih čvrstoća zidnoga ispuna od različitih zidnih elemenata. U *tablici 3.50* nalaze se brojčane vrijednosti istih.

Iz navedene slike, odnosno tablice, vidimo da je karakteristična posmična čvrstoća zidnog ispuna dobivena eksperimentalnim ispitivanjem za blok opeku, euroterm i betonski blok, manja nego što bi se dobilo izračunom prema izrazu (3.9), bez obzira jesmo li koristili eksperimentalne rezultate zidnih elemenata ili smo ih uzeli s objavljenim vrijednostima.

Karakteristična posmična čvrstoća zidnoga ispuna, dobivena eksperimentalnim ispitivanjem za ytong, veća je nego što bi se dobila korištenjem izraza (3.9), bez obzira jesmo li koristili eksperimentalne rezultate zidnih elemenata ili smo ih uzeli s objavljenim vrijednostima.



**Slika 3.32** Grafički prikaz usporedbe posmičnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata

„Izračunata karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće,  $f_{vk}$ “ dobivena je pomoću izraza (3.9), gdje su korišteni eksperimentalni rezultati tlačne čvrstoće zidnih elemenata.

Vrijednost „Prema objavljenim vrijednostima i propisima,  $f_{vk}$ “ dobivena je pomoću izraza (3.9), gdje su korištene objavljene vrijednosti tlačnih čvrstoća zidnih elemenata.

**Tablica 3.50** Usporedba posmičnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata

Vrsta zidnog ispuna	Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost početne posmične čvrstoće, $f_{v0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Ispitivanjem dobivena karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće, $f_{vk0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Izračunata karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće, $f_{vk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Prema objavljenim vrijednostima i propisima, $f_{vk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
BLOK OPEKA	0,54	0,43	1,02	0,98
EUROTERM	0,27	0,22	0,32	0,33
BETONSKI BLOK	0,24	0,19	0,28	0,33
YTONG	0,49	0,39	0,16	0,16

Granične vrijednosti posmičnih čvrstoća za zidni ispun od različitih zidnih elemenata dane su u **tablici 3.51**. Iz dobivenih eksperimentalnih rezultata vidimo kako se nalazimo u preporučenim granicama.

**Tablica 3.51** Granične vrijednosti posmičnih čvrstoća zidnog ispuna od različitih zidnih elemenata [64]

Vrsta zidnog ispuna	Granične vrijednosti karakteristične početne posmične čvrstoće, $f_{vk0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Granične vrijednosti karakteristične posmične čvrstoće, $f_{vk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
BLOK OPEKA	0,20	1,20
EUROTERM	0,20	1,20
BETONSKI BLOK	0,15	1,20
YTONG	0,30	1,70

### 3.4.7 Klasifikacija zidnog ispuna

Na osnovu provedenih eksperimentalnih ispitivanja i dobivenih rezultata, zidni ispun klasificiran je prema tlačnoj čvrstoći zidnih elemenata, odnosno tlačnoj čvrstoći zidnoga ispuna, i to kao:

- 1) **JAKI ISPUN** – zidni ispun zidan u produženom vapnenom mortu omjera 1:1:5 od zidnih elemenata od **BLOK OPEKE (OPEČNI BLOKOVI MO10)**;
- 2) **SREDNJI ISPUN** – zidni ispun zidan u produženom vapnenom mortu omjera 1:1:5 od zidnih elemenata od **EUROTERMA (OPEČNI BLOKOVI MO5)**;
- 3) **MEKI ISPUN** – zidni ispun zidan u tankoslojnom mortu (ljepilu) od zidnih elemenata od **YTONGA (POROBETONSKI BLOKOVI MO2,5)**.

Sva ispitivanja, odnosno analiza rezultata u nastavku, provodit će se na osnovu navedene klasifikacije zidnoga ispuna.

### 3.5 ZAKLJUČAK POGLAVLJA

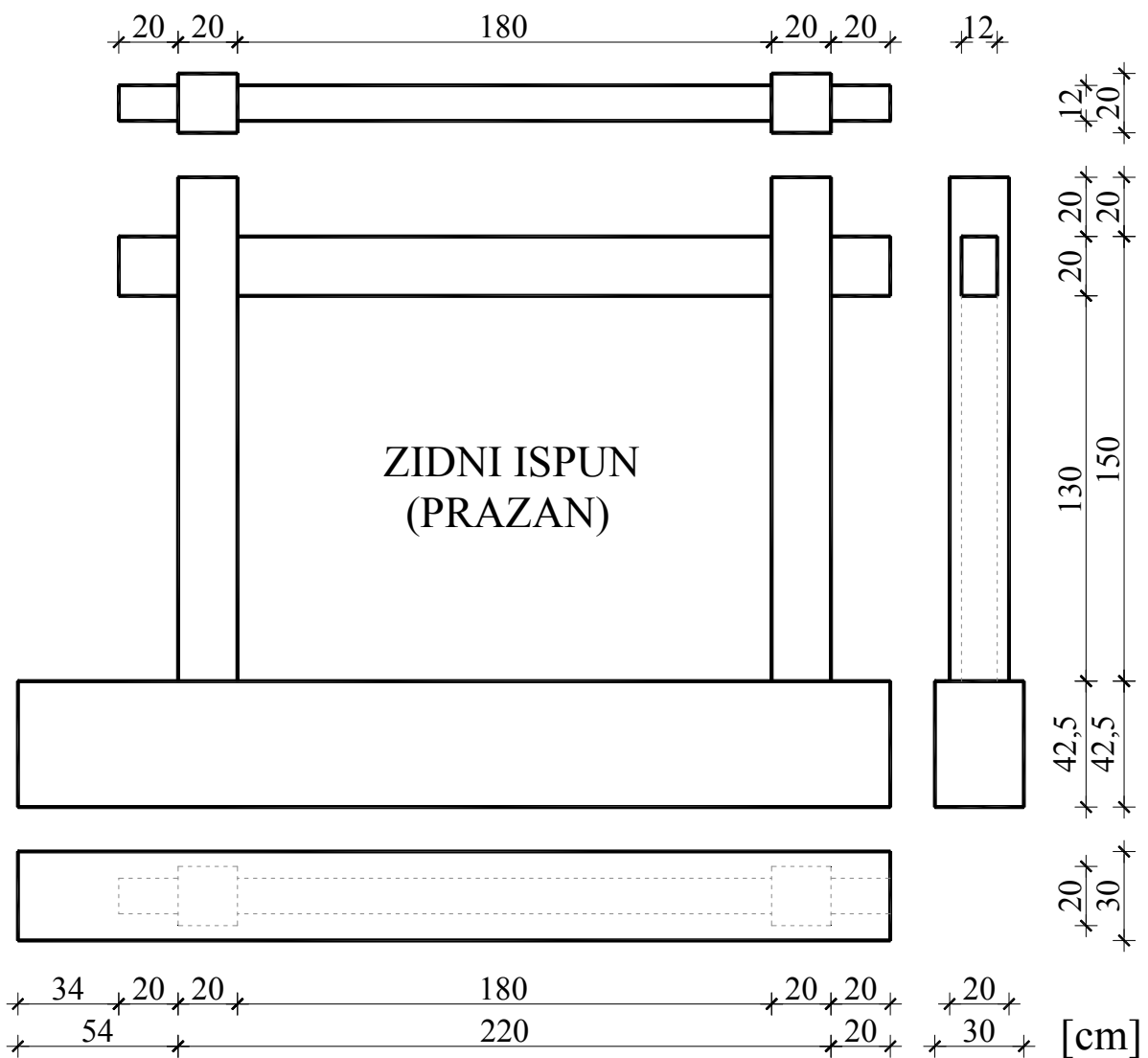
Opće poznato je da su eksperimentalni rezultati od velikoga značaja za bilo kakvu ozbiljniju analizu. Mehaničke karakteristike materijala od izuzetne su važnosti za njihovo poznavanje u stvarnim uvjetima uporabe. U ovome poglavlju provedena su eksperimentalna ispitivanja njihovih osnovnih karakteristika, iz čega proizlazi sljedeće:

- Eksperimentalno ispitivanje morta, koji je korišten za izravnavanje i zidanje zidnih elemenata, u skladu je s preporučenim vrijednostima, odnosno propisima.
- Eksperimentalno dobivene tlačne čvrstoće zidnih elemenata u prosjeku su nešto manje od deklariranih vrijednosti pojedinih proizvođača.
- Tlačne čvrstoće zidnog ispuna dobivene eksperimentalno, razlikuju se za opečni blok MO10, dok su za ostale zidne elemente približno jednake onima koje bi se dobile izračunom prema propisima, bez obzira jesmo li ih dobili na osnovu eksperimentalnih rezultata zidnih elemenata i morta ili na osnovu objavljenih vrijednosti.
- Moduli elastičnosti zidnoga ispuna od opečnih blokova i betonskih blokova, dobiveni eksperimentalnim ispitivanjem, bitno se razlikuju u odnosu na one koji bi se dobili prema propisima. Rezultati dobiveni za porobetonske blokove približno su jednaki onima koji bi se dobili izračunom prema propisima.
- Velika vrijednost tlačne čvrstoće zidnoga elementa nema velikoga značajnijega utjecaja na tlačnu čvrstoću zidnoga ispuna, a velika vrijednost tlačne čvrstoće ne znači automatski i veliku tlačnu čvrstoću zidnoga ispuna;
- Znatno povećanje tlačne čvrstoće morta ne povećava znatnije tlačnu čvrstoću zidnoga ispuna, gdje mort ima na nju utjecaja (tlačna čvrstoća zidnog ispuna od porobetona ne ovisi o tlačnoj čvrstoći morta).
- Eksperimentalno dobivene posmične čvrstoće zidnoga ispuna u skladu su s preporučenim vrijednostima prema propisima.
- Klasifikacija zidnoga ispuna napravljena je kako bi se odredio utjecaj zidnoga ispuna kada imamo njegove različite čvrstoće, odnosno modul elastičnosti.

## POGLAVLJE 4: ISPITIVANJE MODELA

### 4.1 UVOD

U ovome radu MODEL predstavlja armirano-betonski okvir ispunjen zidnim ispunom i prazan armirano-betonski okvir. U ovome istraživanju, a u okviru širega znanstvenoga projekta, napravljeno je i ispitano ukupno 10 modela. Upotrijebljene su tri vrste zidnoga ispuna prema klasifikaciji iz prethodnoga poglavlja. Jaki ispun zidan je od zidnih elemenata opečnih blokova MO10, srednji ispun zidan je od opečnih blokova MO5 i meki ispun zidan je od porobetonских blokova MO2,5. Od svake vrste ispuna ispitana su po tri modela i jedan model praznoga armirano-betonskog okvira. Svi MODELI napravljeni su u mjerilu 1:2,5, *slika 4.1*.



Slika 4.1 Prikaz MODELA

## 4.2 ULAZNI PODATCI O MODELIMA

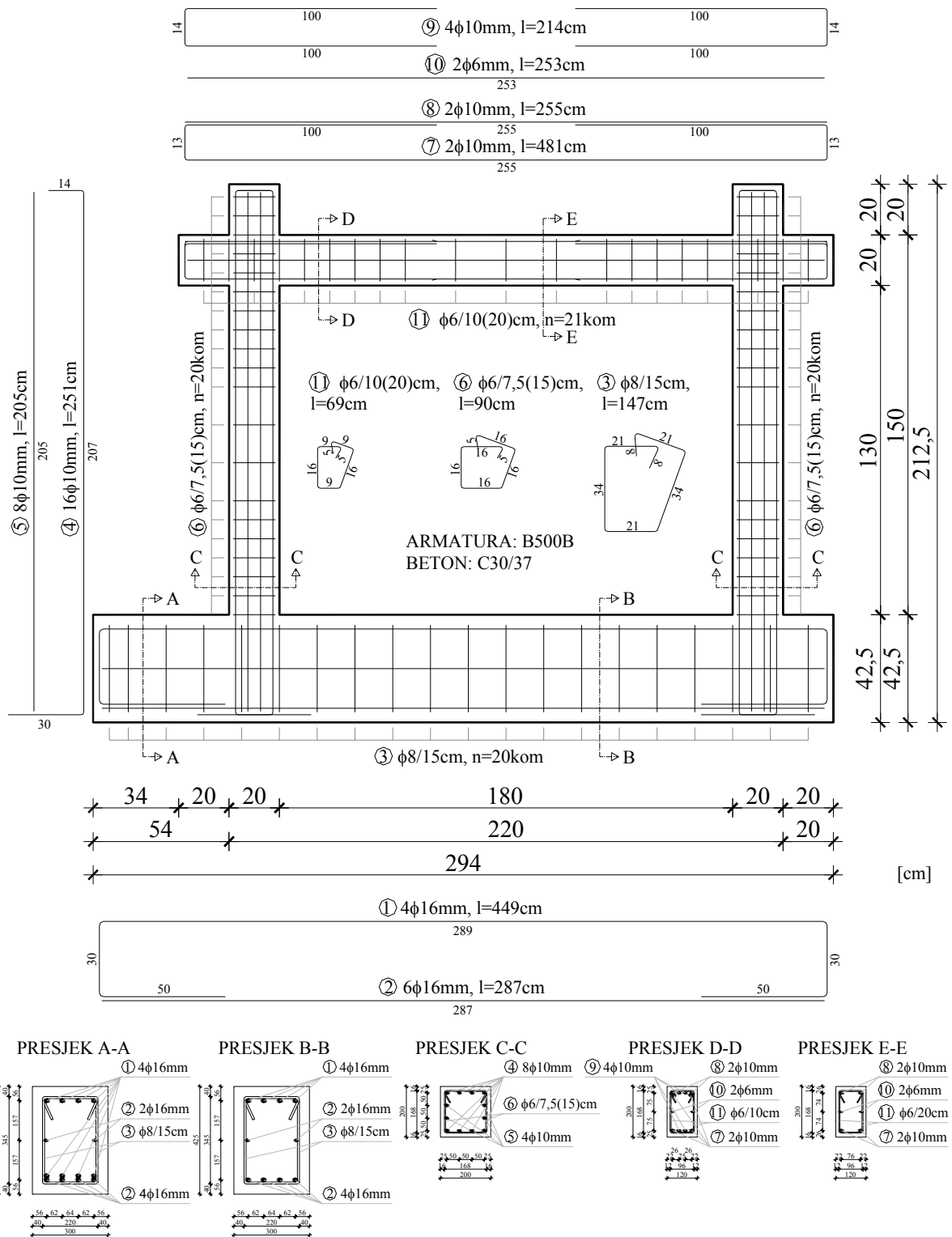
### 4.2.1 Armirano-betonski okvir modela

Armirano-betonski okvir modela napravljen je u mjerilu 1:2,5 na osnovu prototipa, koji predstavlja srednje polje prizemlja srednjeg okvira prototipa u uzdužnom smjeru (smjer-x), *slika 2.1*. Skaliranje dimenzija prototipa izvršeno je prema *tablici 4.1*, poštujući pri tome zakone sličnosti, što znači da su modeli i prototip imali ista materijalna svojstva, te odgovarajuća vertikalna opterećenja kojima se simulirao teret gornjih katova prototipa.

**Tablica 4.1** Skaliranje dimenzija prototipa

	Prototip	Armirano-betonski okvir modela
Visina [cm]	375	150
Dužina [cm]	500	200
Poprečni presjek stupa [cm]	50/50	20/20
Poprečni presjek grede [cm]	30/50	12/20
Uzdužna i poprečna armatura u stupu	12 $\Phi$ 25mm $\Phi$ 10/75(150)mm	12 $\Phi$ 10mm $\Phi$ 6/75(150)mm
Uzdužna i poprečna armatura u gredi na ležaju	10 $\Phi$ 25mm $\Phi$ 10/100mm	10 $\Phi$ 10mm $\Phi$ 6/100mm
Uzdužna i poprečna armatura u gredi u polju	4 $\Phi$ 25mm $\Phi$ 10/200mm	4 $\Phi$ 10mm $\Phi$ 6/200mm
Uzdužna torziona armatura u gredi	2 $\Phi$ 16mm	2 $\Phi$ 6mm
Debljina ispune [cm]	30	12

Svi armirano-betonski okviri modela projektirani su kako bi se izvodili od betona klase C30/37 i armirali rebrastom armaturom B500B prema Eurocode propisima [24, 26, 27]. Prikaz nacrtu armature na armirano-betonskom okviru modela dan je na *slici 4.2*.



Slika 4.2 Prikaz dimenzija i nacrt armature armirano-betonskog okvira modela

Izrada armirano-betonskih okvira modela kao i dovoz u halu (prostor) za ispitivanje prikazana je na *slici 4.3*.



**Slika 4.3** Prikaz izrade i dopreme armirano-betonskih okvira modela

Datumi izrade armirano-betonskih okvira modela kao i njihove oznake, odnosno datumi uzimanja uzoraka betona za ispitivanje i ispitivanja uzoraka betona prikazani su u *tablici 4.2*. Od svakoga okvira uzet je po jedan uzorak betona za ispitivanje mehaničkih karakteristika.

**Tablica 4.2** Datumi izrade armirano-betonskih okvira modela



Oznaka armirano-betonskog okvira modela	Datum izrade armirano-betonskog okvira modela i uzimanja uzoraka betona za ispitivanje	Ispitivanje uzorka betona
K-1	21.11.2008.	19.12.2008.
K-2	24.11.2008.	22.12.2008.
K-3	25.11.2008.	23.12.2008.
K-4	27.11.2008.	29.12.2008.
K-5	29.11.2008.	29.12.2008.
K-6	01.12.2008.	29.12.2008.
K-7	02.12.2008.	30.12.2008.
K-8	03.12.2008.	31.12.2008.
K-9	04.12.2008.	02.01.2009.

#### 4.2.1.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Tlačna čvrstoća betona, od kojeg su izrađeni armirano-betonski okviri modela, ispitana je za svaki armirano-betonski okvir, i to po jedna kocka u skladu s propisima [24]. Dimenzije ispitivanih kocaka, kao i dobiveni rezultati prikazane(i) su u **tablici 4.3**.

**Tablica 4.3** Tlačna čvrstoća betona armirano-betonskih okvira modela

Oznaka ab okvira modela	Dimenzije uzorka, a [mm]	Sila sloma [N]	Tlačna čvrstoća, $f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Tlačna čvrstoća, $f_{ck,t=1,2} f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
K-1	150,3 / 150,1 / 150,1	886100	39,5	47,4
K-2	151,3 / 150 / 150,1	1106200	48,5	58,2
K-3	151,4 / 150,2 / 150,1	715100	31,5	37,8
K-4	151 / 150,1 / 150,2	998800	44,0	52,8
K-5	151,3 / 150,1 / 150,2	1172800	51,5	61,8
K-6	150,1 / 150,2 / 150,2	924300	41,0	49,2
K-7	151,2 / 150,3 / 150,2	948000	41,5	49,8
K-8	150,8 / 150,2 / 150,2	980100	43,5	52,2
K-9	151,3 / 150,2 / 150,2	800200	35,0	42,0

Tlačna čvrstoća,  $f_{ck,t}$ , predstavlja tlačnu čvrstoću betona nakon 365 dana.

Vlačna čvrstoća betona nije ispitivana, izračunata je pomoću izraza:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (4.1)$$

gdje je:

$f_{ck}$  karakteristična tlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem, [N/mm<sup>2</sup>],

Modul elastičnosti betona određen je, također, pomoću izraza:

$$E_{cm} = 9500 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (4.2)$$

gdje je:

$f_{ck}$  karakteristična tlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem, [N/mm<sup>2</sup>],

Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti betona, a koji su dobiveni na osnovu eksperimentalne tlačne čvrstoće prema izrazima (4.1) i (4.2), prikazani su u **tablici 4.4**.

**Tablica 4.4** Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti betona armirano-betonskih okvira modela

Oznaka ab okvira modela	Vlačna čvrstoća, $f_{ct,m}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Modul elastičnosti, $E_{cm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
K-1	3,48	34405
K-2	3,99	36454
K-3	2,99	32354
K-4	3,74	35459
K-5	4,15	37088
K-6	3,57	34763
K-7	3,60	34881
K-8	3,71	35345
K-9	3,21	33282

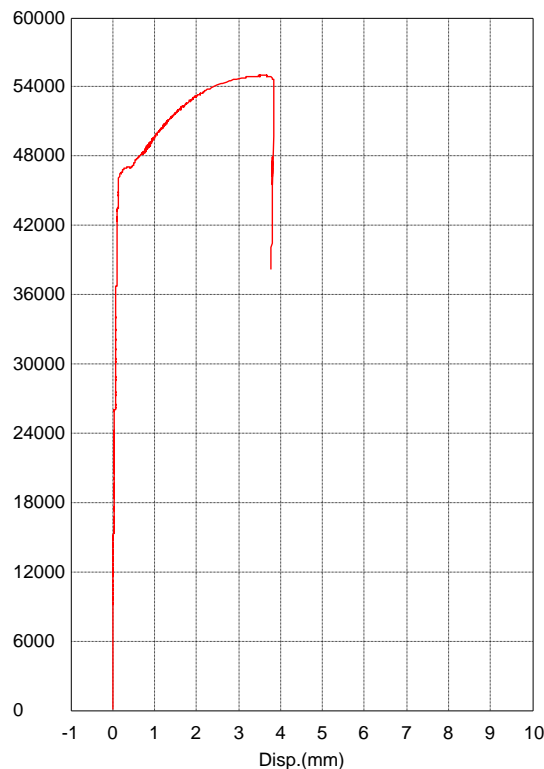
#### 4.2.1.2 Ispitivanje vlačne čvrstoće armature

Mehaničke karakteristike armature s kojom su armirani armirano-betonski okviri modela dobivene su vlačnim ispitivanjem uzoraka armature. Ispitane su po tri šipke promjera 8, 10 i 12mm u skladu s propisima. Sva ispitivanja provedena su pomoću kidalice u laboratoriju za Eksperimentalnu mehaniku. Rezultati ispitivanja prikazani su u **tablici 4.5**.

**Tablica 4.5** Granica popuštanja, vlačna čvrstoća i modul elastičnosti rebraste armature

Promjer armature, $\phi$ [mm]	Srednja vrijednost granice popuštanja, $f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Srednja vrijednost vlačne čvrstoće, $f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Srednja vrijednost modula elastičnosti, $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]
8	583	654	201385
10	594	700	206957
12	574	605	198599
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>584</b>	<b>653</b>	<b>202314</b>

Karakteristični dijagram odnosa sile (naprezanja) i pomaka (deformacije) ispitivanih uzoraka armature prikazan je na **slici 4.4**.



**Slika 4.4** Prikaz odnosa sile i pomaka za karakteristični uzorak armature

#### 4.2.2 Zidni ispun modela

Armirano-betonski okviri modela ispunjeni su zidnim ispunom kako je navedeno u uvodu. Dakle, po tri armirano-betonska okvira modela ispunjena su jakim zidnim ispunom od opečnih blokova MO10, srednjim zidnim ispunom od opečnih blokova MO5 i mekim zidnim ispunom od porobetonskih blokova MO2,5. Datumi zidanja zidnoga ispuna modela, kao i uzimanje uzoraka morta za zidanje, prikazani su u **tablici 4.6**.

**Tablica 4.6** Datumi zidanja zidnog ispuna

Oznaka armirano-betonskog okvira modela	Vrsta zidnog ispuna	Datum zidanja zidnog ispuna
K-7	Opečni blok MO10	19.08.2009.
K-5	Opečni blok MO10	19.08.2009.
K-8	Opečni blok MO10	19.08.2009.
K-2	Opečni blok MO5	12.08.2009.
K-6	Opečni blok MO5	12.08.2009.
K-4	Opečni blok MO5	12.08.2009.
K-1	Porobetonski blok MO2,5	19.06.2009.
K-3	Porobetonski blok MO2,5	19.06.2009.
K-9	Porobetonski blok MO2,5	19.06.2009.

Dimenzije zidnih elemenata zidnoga ispuna, također su skalirane (zidni elementi izrezani su iz izvornih sačuvavši na taj način količinu i površinu otvora s gotovo podjednakim postotkom šupljina). Pri tome se pazilo kako bi broj horizontalnih sljubnica bio isti kao i kod prototipa. Dimenzije skaliranih zidnih elemenata prikazane su u **tablici 4.7**.

Zidanje zidnih elemenata opečnih blokova izvodilo se u produženom vapnenom mortu omjera, cement:vapno:pijesak=1:1:5, debljine sljubnica oko 10mm. Zidanje zidnih elemenata porobetonskih blokova izvodilo se s odgovarajućim ljepilom debljine sljubnica oko 3mm.

**Tablica 4.7** Dimenzije skaliranih zidnih elemenata

Vrsta zidnog elementa	Dimenzije zidnog elementa, $l_u/w_u/h_u$ [mm]	Skalirane dimenzije zidnog elementa, $l_u/w_u/h_u$ [mm]
Opečni blok MO10	250/190/190	190/120/90
Opečni blok MO5	500/120/190	500/120/90
Porobetonski blok MO2,5	625/125/250	625/125/100



**Slika 4.4** Prikaz zidanja zidnog ispuna od opečnih blokova MO10



**Slika 4.5** Prikaz zidanja zidnog ispuna od opečnih blokova MO5



**Slika 4.6** Prikaz zidanja zidnog ispuna od porobetonskih blokova MO2,5



**Slika 4.7** Stroj za rezanje zidnih elemenata

#### 4.2.2.1 Ispitivanje morta za zidanje zidnog ispuna od opečnih blokova MO10

Vrijednosti tlačne čvrstoće morta za zidanje zidnoga ispuna od opečnih blokova MO10, kao i čvrstoće na savijanje dane su u **tablici 4.8**.

**Tablica 4.8** Tlačne čvrstoće morta za zidanje zidnog ispuna od opečnih blokova MO10

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	0,43		0,44		0,61	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	4,61	4,61	4,61	4,74	4,74	4,72
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x40		160x40x40		160x40x40	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,01		1,03		1,43	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,88	2,88	2,88	2,96	2,96	2,95
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>1,15</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>2,92</b>					

#### 4.2.2.2 Ispitivanje morta za zidanje zidnog ispuna od opečnih blokova MO5

Vrijednosti tlačne čvrstoće morta za zidanje zidnoga ispuna od opečnih blokova MO5, kao i čvrstoće na savijanje, dane su u **tablici 4.9**.

**Tablica 4.9** Tlačne čvrstoće morta za zidanje zidnog ispuna od opečnih blokova MO5

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	0,23		0,19		0,22	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	4,60	4,40	4,54	4,00	4,48	4,52
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x40		160x40x40		160x40x40	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,53		0,44		0,51	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,88	2,75	2,84	2,50	2,80	2,83
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>0,50</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>2,76</b>					

#### 4.2.2.3 Ispitivanje ljepila za zidanje zidnog ispuna od porobetonskih blokova MO2,5

Vrijednosti tlačne čvrstoće ljepila za zidanje zidnoga ispuna od porobetonskih blokova MO2,5, kao i čvrstoće na savijanje dane su u **tablici 4.10**.

**Tablica 4.10** Tlačne čvrstoće ljepila za zidanje zidnog ispuna od porobetonskih blokova MO2,5

Uzorak [n]	I		II		III	
Sila sloma pri savijanju, $F_{mt}$ [kN]	1,75		1,68		1,58	
Sila sloma pri tlaku, $F_m$ [kN]	19,50	20,80	22,80	24,00	25,80	23,40
Dimenzije uzorka [mm]	160x40x40		160x40x40		160x40x40	
Vlačna čvrstoća pri savijanju, $f_{mt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4,10		3,93		3,70	
Tlačna čvrstoća, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	12,19	13,00	14,25	15,00	16,13	14,63
<b>Srednja vlačna čvrstoća, <math>f_{mt,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>3,91</b>					
<b>Srednja tlačna čvrstoća, <math>f_{m,sr}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>14,20</b>					

#### 4.2.2.4 Ispitivanje zidnog ispuna

Svi eksperimentalni rezultati zidnoga ispuna nalaze se u *Poglavlju 3*, te će se kao takvi i primjenjivati u svim narednim analizama u kojima su potrebni. Sažeti prikaz eksperimentalnih rezultata ispitivanja zidnoga ispuna prikazan je u *tablici 4.11*.

**Tablica 4.11** Eksperimentalni rezultati ispitivanja zidnog ispuna

Vrsta zidnog ispuna	Opečni blok MO10	Opečni blok MO5	Porobetonski blok MO2,5
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće, $f_{cw,sr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,62	2,14	1,19
Karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće, $f_{cw,k}=f_{cw,sr}/1,2$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,18	1,78	0,99
Srednja vrijednost modula elastičnosti, $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	6572	5608	1379
Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće pri nultom naprezanju, $f_{v0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,536	0,271	0,493
Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće, $f_{vk0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]; $f_{vk0}=0,8f_{v0}$	0,429	0,216	0,395
Srednja vrijednost kuta unutarnjeg trenja, $\alpha$ [°]	22,17	21,83	54,65
Karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja, $\alpha_k$ [°]; $tg\alpha_k=0,8tg\alpha$	18,06	17,77	48,44

### 4.3 OZNAKE MODELA

Radi lakšega označavanja modela i praćenja rezultata u *tablici 4.12* pridružene su im odgovarajuće grupe, kao i datumi ispitivanja modela.

**Tablica 4.12** Oznake i ispitivanje modela

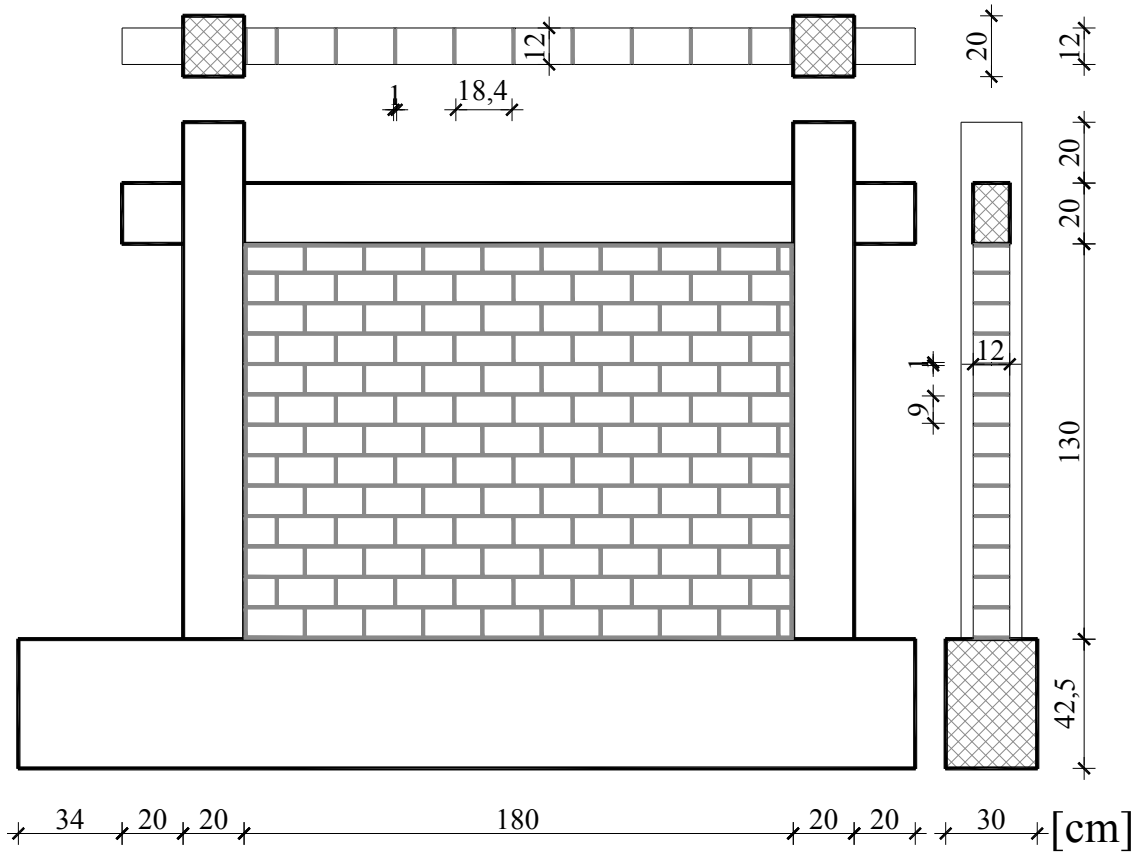
Grupa	Model	Oznaka ab okvira modela	Vrsta zidnog ispuna	Datum ispitivanja modela
<b>GRUPA I</b>	MODEL7	K-7	Opečni blok MO10	21.09.2009.
	MODEL8	K-5	Opečni blok MO10	22.09.2009.
	MODEL9	K-8	Opečni blok MO10	24.09.2009.
<b>GRUPA II</b>	MODEL4	K-2	Opečni blok MO5	14.09.2009.
	MODEL5	K-6	Opečni blok MO5	15.09.2009.
	MODEL6	K-4	Opečni blok MO5	17.09.2009.
<b>GRUPA III</b>	MODEL1	K-1	Porobetonski blok MO2,5	21.07.2009.
	MODEL2	K-3	Porobetonski blok MO2,5	22.07.2009.
	MODEL3	K-9	Porobetonski blok MO2,5	23.07.2009.
<b>GRUPA IV</b>	MODEL10	K-9	-	09.10.2009.

GRUPA I su modeli s jakim zidnim ispunom, GRUPA II su modeli sa srednjim zidnim ispunom i GRUPA III su modeli s mekim zidnim ispunom. GRUPA IV je model praznoga armirano-betonskog okvira.

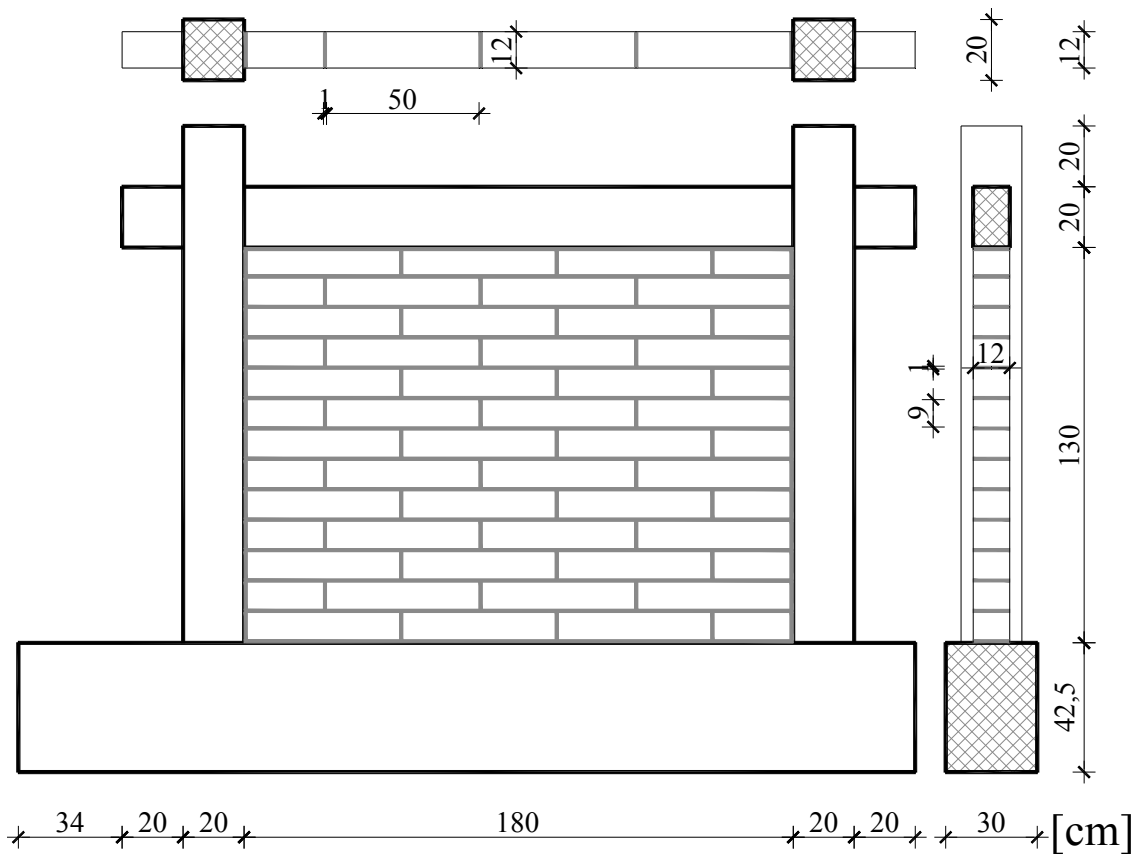
Iz *tablice 4.12* vidimo da je kod GRUPE IV armirano-betonski okvir modela oznake K-9 bio prethodno ispitivan. Oštećenja nastala na njemu tijekom ispitivanja bila su neznatna, te je izvršena lakša sanacija armirano-betonskoga okvira modela.

Prikaz modela po GRUPAMA dan je na *slikama 4.8* do *4.11*.

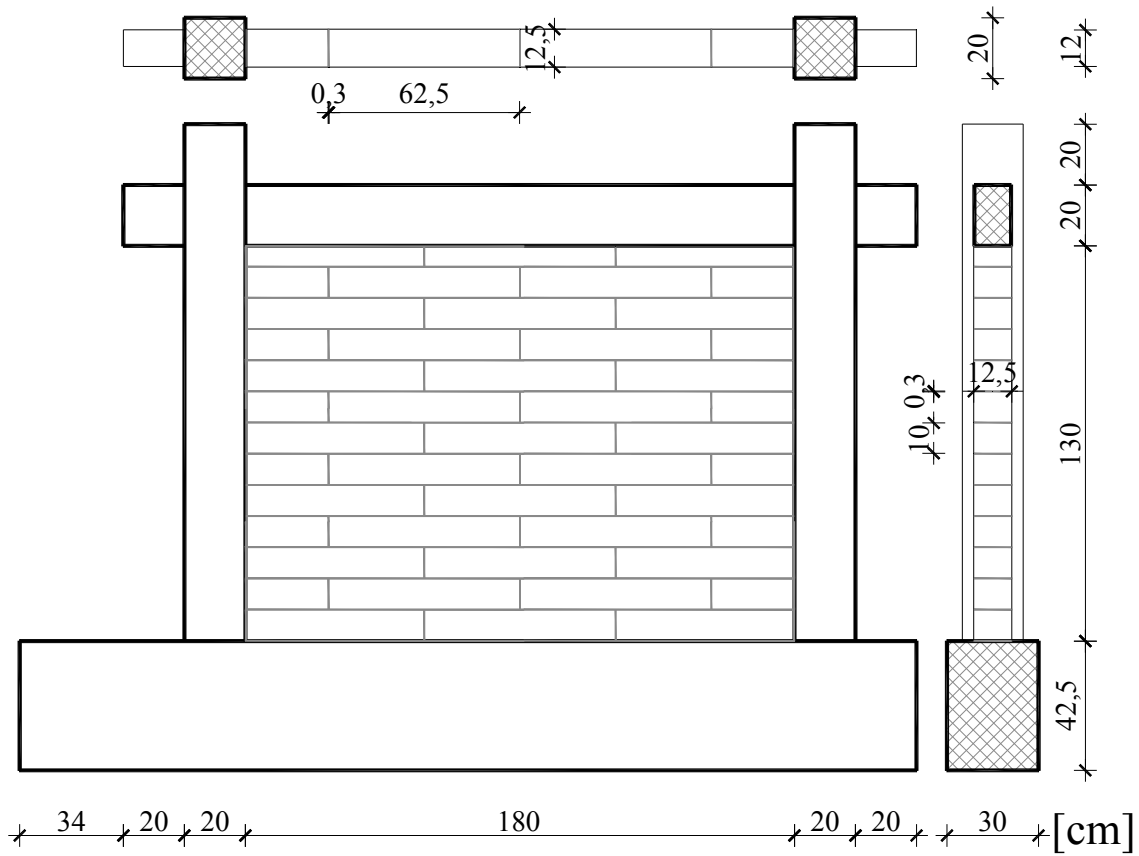




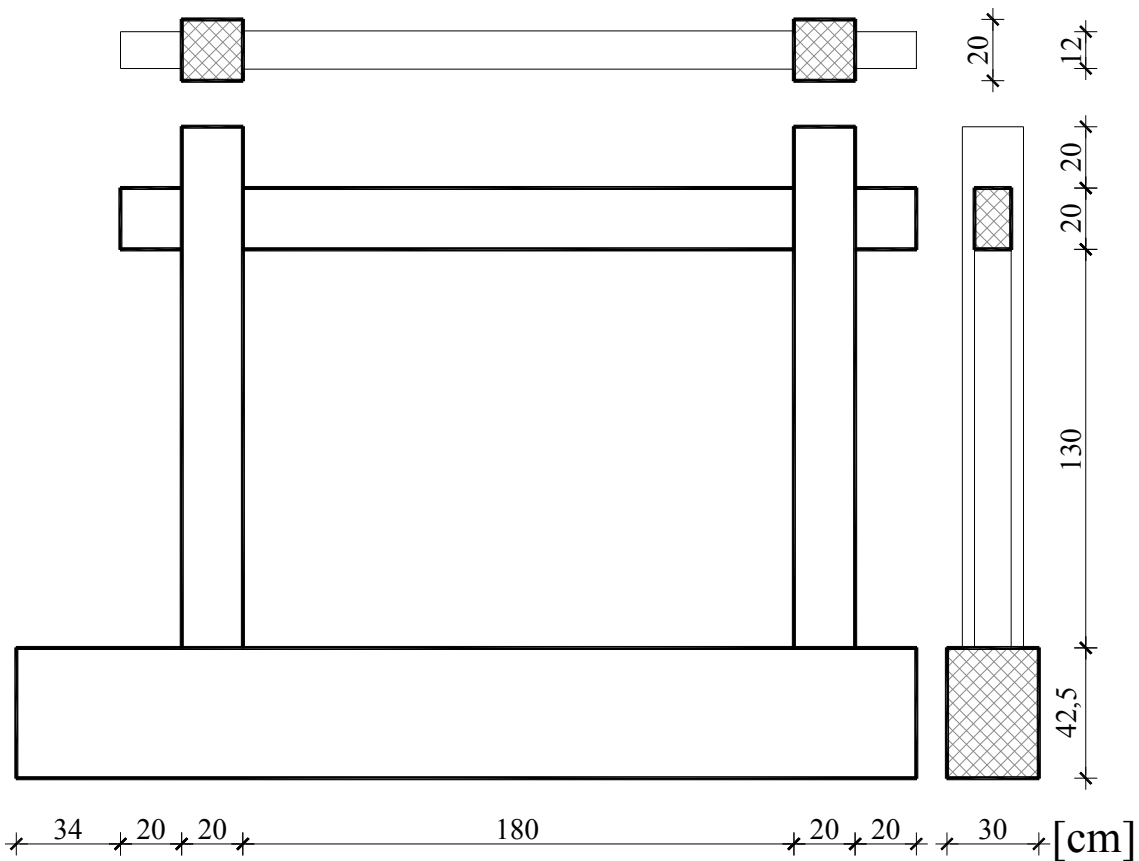
Slika 4.8 Prikaz MODELA 7, 8, 9 – GRUPA I



Slika 4.9 Prikaz MODELA 4, 5, 6 – GRUPA II



Slika 4.10 Prikaz MODELA 1, 2, 3 – GRUPA III

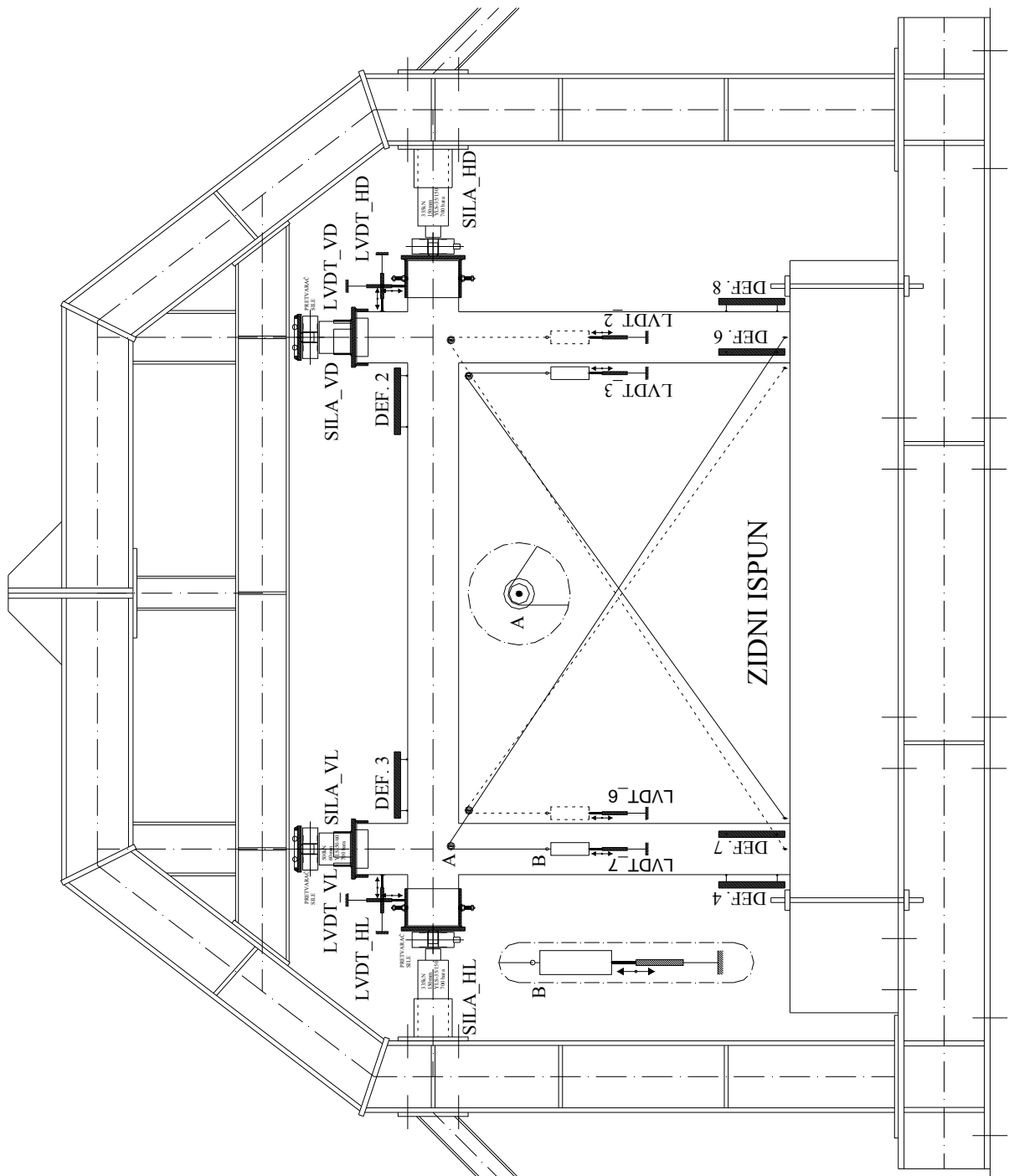


Slika 4.11 Prikaz MODELA 10 – GRUPA IV

## 4.4 ISPITIVANJE MODELA

### 4.4.1 Uvod

Ispitivanje modela provodilo se u zatvorenome čeličnome okviru prema *slici 4.12*. Čelični okvir bočno je pridržan s dva čelična kosnika za sprječavanje horizontalnoga pomaka samoga čeličnoga okvira.



**Slika 4.12** Prikaz zatvorenoga čeličnoga okvira i mjernih instrumenata na modelu

Zatvoreni čelični okvir, kao i njegovi kosnici, bili su kruto spojeni za armirano-betonsku temeljnu ploču.

Dvije horizontalne hidraulične preše fiksirane su na čelične stupove čeličnoga okvira, a čelični stupovi, na mjestu horizontalnih hidrauličnih preša, povezani su čeličnim gredama od „L“ profila, *slika 4.13*. Dvije vertikalne hidraulične preše postavljene su na armirano-betonske stupove modela, koje su se odupirale o gredu čeličnoga okvira na kojoj je bio osiguran horizontalni pomak pomoću čeličnih valjaka (*slika 4.13*).

Modeli u čeličnome okviru bili su spojeni preko krute temeljne grede armirano-betonskoga okvira modela za čeličnu temeljnu gredu čeličnoga okvira.

#### 4.4.2 Mjerni instrumenti na modelima

Mjerni instrumenti na svim modelima (GRUPAMA) postavljeni su na isti načini, tj. prema *slici 4.12*. Svi pomaci mjerili su se pomoću LVDT\_a (mjerača pomaka).

Horizontalne sile (SILA\_HL-horizontalna lijeva sila i SILA\_HD-horizontalna desna sila) i vertikalne sile (SILA\_VL – vertikalna lijeva sila i SILA\_VD – vertikalna desna sila) unosile su se preko hidrauličnih preša na kojima su bili postavljeni pretvarači sila, *slika 4.13*.



**Slika 4.13** Prikaz instrumenata za unos horizontalne i vertikalne sile

Vertikalni pomaci modela istaka jednoga i drugoga kraja grede, mjereni su pomoću LVDT\_a (LVDT\_VL – vertikalni lijevi i LVDT\_VD – vertikalni desni), koji su bili pričvršćeni za posebnu čeličnu skelu neovisnu o zatvorenome čeličnom okviru.

Horizontalni pomaci modela istaka jednoga i drugoga kraja stupa, mjereni su pomoću LVDT\_a (LVDT\_HL – horizontalni lijevi i LVDT\_HD – horizontalni desni) koji su, također, bili pričvršćeni za posebnu čeličnu skelu neovisnu o zatvorenome čeličnom okviru.



**Slika 4.14** Prikaz horizontalnih i vertikalnih LVDT\_a za mjerenje pomaka

Produljenja, odnosno skraćenja dijagonala armirano-betonskoga okvira modela, mjerena su pomoću LVDT\_2 i LVDT\_7. Dijagonale su bile postavljene unakrsno, s jedne i s druge strane modela. Produljenja, odnosno skraćenja dijagonala zidnog ispuna modela, mjerena su pomoću LVDT\_3 i LVDT\_6. Dijagonale su, također, bile postavljene unakrsno, s jedne i s druge strane modela. Sve su dijagonale na jednome kraju bile nepomično pričvršćene, dok je na drugome kraju visio uteg koji je bio prebačen preko male čelične koloture. Čelična kolotura bila je nepomično pričvršćena na spoju stupa i grede, odnosno na uglovima zidnoga ispuna.



**Slika 4.15** Prikaz LVDT\_a za mjerenje produljenja odnosno skraćenja dijagonala



Za mjerenje deformacija bili su postavljeni deformetri s mjernom bazom od 20cm na gredi (DEF\_2, DEF\_3), odnosno stupovima (DEF\_4, DEF\_7, DEF\_6 i DEF\_8), u svemu prema *slici 4.12* odnosno *slici 4.16*.



**Slika 4.16** Prikaz deformetara za mjerenje deformacija na gredi i stupovima

Svi podaci s mjernih instrumenata (pretvarači sila, LVDT\_i i deformetri) prikupljeni su s dvaju DEWE mjernih sustava (na koje su bili spojeni pomoću kablova) i obrađivani su pomoću DEWESoft ver.6.6.7 programa, *slika 4.17*.



**Slika 4.17** Prikaz sustava za prikupljanje podataka

Tijekom ispitivanja, sva događanja bilježena su pomoću digitalnoga fotoaparata (nastajanje pukotina u zidnom ispunu, drobljenje zidnog ispuna, odvajanje zidnoga ispuna od stupova i grede, nastajanje pukotina na stupovima i gredama). Isto tako, moguće klizanje između čelične i temeljne grede armirano-betonskog okvira kontrolirano je pomoću mikroure (slika 4.18) čije su vrijednosti bilježene, a klizanje je bilo zanemarivo (vrijednosti su bile manje od 0,5mm pri najvećim horizontalnim (poprečnim) silama kod svih modela).

Prikaz mjernih instrumenata na modelima (GRUPAMA) prikazan je na *slici 4.19*.



**Slika 4.18** Prikaz mikroure za kontrolu klizanja na modelima (GRUPAMA)



**Slika 4.19** Prikaz mjernih instrumenata na modelima (GRUPAMA)




#### 4.4.2.1 Karakteristike mjernih instrumenata

Prilikom eksperimentalnoga ispitivanja korišteni su naprijed već opisani mjerni instrumenti. Njihove osnovne karakteristike prikazane su za svaki od korištenih mjernih instrumenata u **tablici 4.13**. Prije postavljanja mjernih instrumenata na modele izvršena je kalibracija istih. Dakle, korišteno je ukupno 8 LVDT\_a, 6 deformetara, 4 pretvarača sile, 4 hidraulične preše (dvije vertikalne i dvije horizontalne) i 1 mikorura.

**Tablica 4.13** Karakteristike mjernih instrumenata

Naziv, karakteristike	Izgled
<p>Univerzalni višenamjenski elektromehanički stroj za ispitivanje materijala i konstrukcijskih elemenata Autograph AG – X nosivosti 300 kN</p> <p>Shimadzu Precision AG-X/AGS-J/EZ TEST/MST-I SERIES</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- vlačna čvrstoća okruglih (9-23mm) i plošnih (0-17mm) uzoraka</li> <li>- tlačna čvrstoća</li> <li>- deformetar raspona 50mm i mjernog područja 25mm</li> <li>- Trapezium softverska podrška</li> </ul>	
<p>Uređaji za prikupljanje i obradu podataka mjerenja</p> <p>DEWE – BOOK – 16 Slot Conditioning System</p> <p>DEWE – 50 – USB2 – 16 – NI</p> <p>DEWE – 43</p> <p>DEWESoft 6.6.7 softverska podrška</p>	
<p>LVDT (mjerači pomaka)</p> <p>RDP</p> <p>Type DCTH500A, raspon ±12,5mm, Linearna pogreška (% F.S.): &lt;math&gt;\leq \pm 0.5 / \pm 0.25 / \pm 0.1&lt;/math&gt;</p>	
<p>Deformetri</p> <p>Analogni L=200mm, raspon 5mm, preciznost 0,001mm</p>	
<p>Mjerna ura (mikroura)</p> <p>- digitalna</p> <p>Preisser DIGI-MET : raspon 0-12,5mm preciznost: 0,001 mm</p>	



Naziv, karakteristike	Izgled
<p>Mjerači sila (pretvarači sila) AEP transducers TC4 – 500 kN izlaz: 2mV/V, linearnost histereze: 0,05%</p>	
<p>Plosnata/niska tlačna preša, model YLS (Yale) Jednosmjerna, povratna YLS-50/60</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nosivost 500kN</li> <li>- pomak klipa 60mm</li> <li>- operativni tlak 700bara</li> </ul>	
<p>Tlačne preše šupljeg cilindra, model YCH (Yale) Dvosmjerna????, hidraulički povratna YCH-33/150</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nosivost tlak/vlak 350/180kN</li> <li>- pomak klipa 150mm</li> <li>- operativni tlak 700bara</li> </ul>	
<p>Hidraulične pumpe, 700 bara Ručne hidraulične pumpe za jednosmjerne preše, model HPS (Yale) Svojstva: Operativni tlak max. 700 bara, rad u dva područja s automatskim prijelazom, velika zapremina rezervoara, zapornice za fino podešavanje i otpuštanje tlaka.</p>	
<p>Električni hidraulički agregati (Yale) Višestruki protočni hidraulični pogonski agregat, model PMF-1 1/3/20/3*4M Namjena: Višestruko protočna hidraulična pumpa može opsluživati i do 4 cilindra s istom brzinom u isto vrijeme, ubrizgavanjem jednake količine ulja u svaki pojedini cilindar. Ovaj princip omogućuje sinkronizirano podizanje i slična opterećenja iz centralne točke, čak i pod različitim uvjetima opterećenja pojedinih cilindara. Svojstva: Sinkronizirani rad do tri preše zbog 3 jednaka, nezavisna i pojedinačna uljna tlaka. 3 ručna ventila smjera, tlak 3*700 bara, zapremina rezervoara ulja 20l, izlazna snaga 3 * 0,3 l/min, motor 400V – 1,1kW, 3Ph.</p>	

### 4.4.3 Opterećenje modela

#### 4.4.3.1 Vertikalno opterećenje

Zamjenjujuće projektirano vertikalno opterećenje od modela prototipa nanošeno je na stupovima modela pomoću dvije hidraulične preše kapaciteta 500kN. Iznos projektiranog vertikalnog opterećenja od modela prototipa, a koje je prikazano u **tablici 2.16**, skalirano je u mjerilu 1:2,5<sup>2</sup> i prikazano u **tablici 4.14**.

**Tablica 4.14** Prikaz zamjenjujućeg vertikalnog opterećenja na stupovima modela

Vrsta zidnog ispuna	Uzdužna sila na prototipu, $N_p$ [kN]	Uzdužna sila na modelu, $N_m$ [kN]	Normalno naprezanje, $\sigma_m = N_m/A_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
GRUPA I	2259,57	361,53	9,04
GRUPA II	2214,01	354,24	8,86
GRUPA III	2159,24	345,48	8,64
GRUPA IV (srednja vrijednost)	<b>2210,94</b>	<b>353,75</b>	<b>8,84</b>

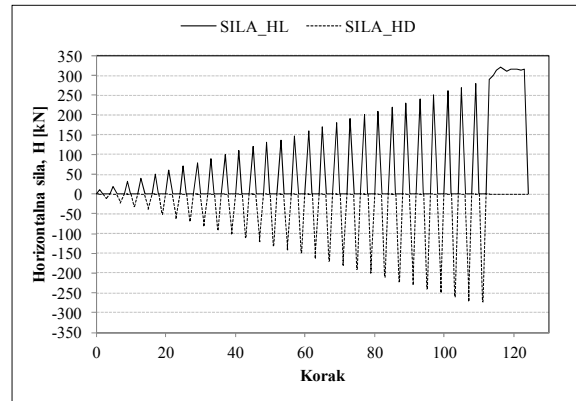
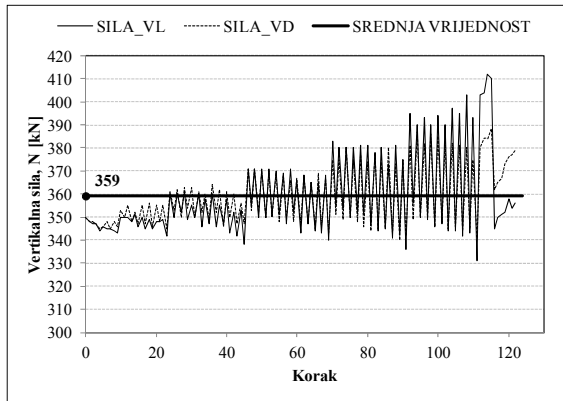
#### 4.4.3.2 Horizontalno opterećenje

Horizontalno (poprečno) cikličko opterećenje nanošeno je pomoću dvije horizontalne preše kapaciteta 350kN. Korak nanošenja sile bio je 10kN. Postupak je bio sljedeći: prvo bi unijeli silu s jedne strane, a zatim bi očitali silu i pripadajući pomak. Nakon toga preša se otpusti na nulto stanje te se opet očita sila i pripadajući pomak. Zatim, otpusti se preša na nulto stanje, očita se sila i pripadajući pomak. I na kraju se zada ista vrijednost sile s druge strane i ponovi sve navedeno.

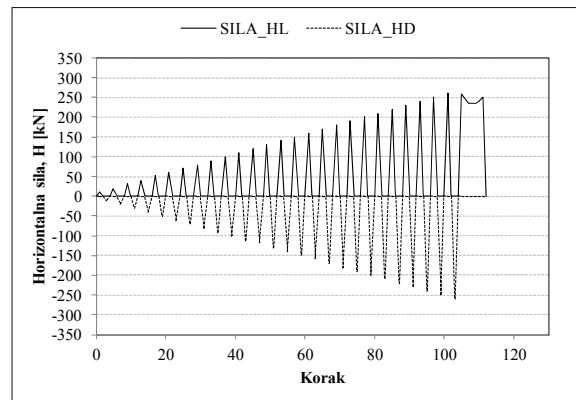
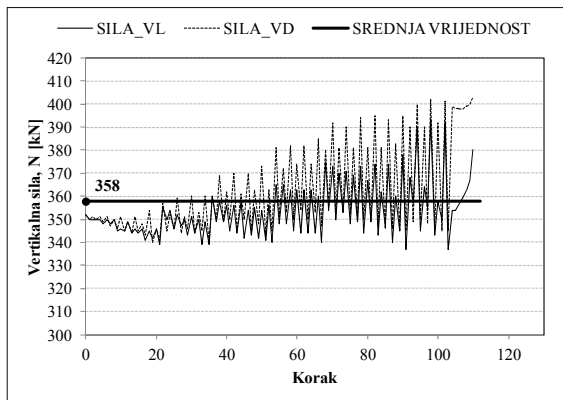
Postupak se ponavljao sve dok zidni ispun nije popustio (imamo značajna oštećenja), nakon toga se u jednom smjeru (ili s lijeve ili s desne strane) samo povećavala horizontalna (poprečna) sila i bilježio pripadajući horizontalni pomak.

#### 4.4.3.3 Prikaz vertikalnoga i horizontalnoga opterećenja na MODELIMA

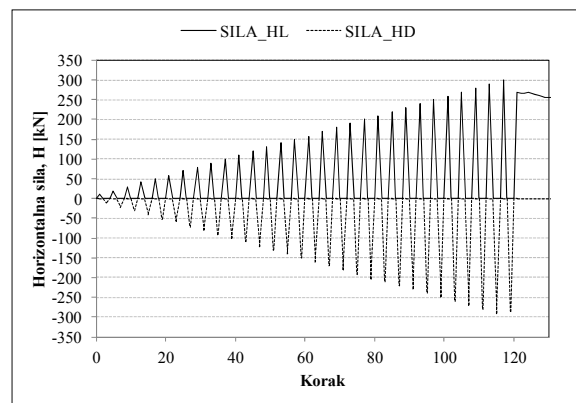
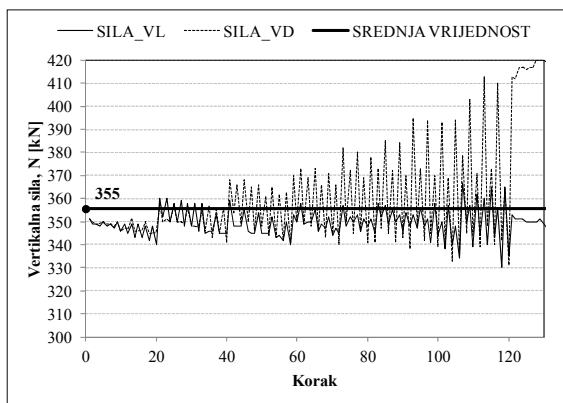
Na **slikama 4.20** do **4.29** dan je prikaz vertikalnoga opterećenja i postupka nanošenja horizontalne sile u koracima od približno 10kN. Za modele GRUPE III nije bilježeno nulto stanje, što se vidi i iz prikaza horizontalnoga opterećenja na **slikama 4.26** do **4.28**.



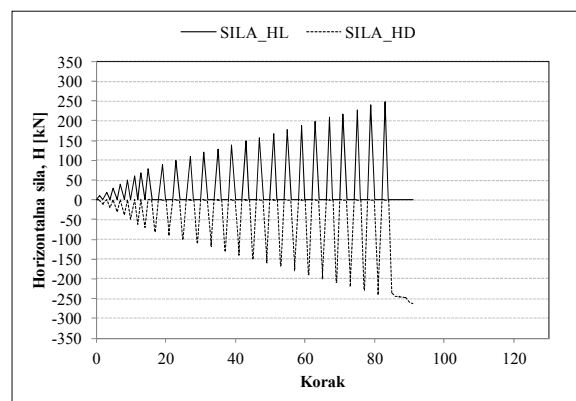
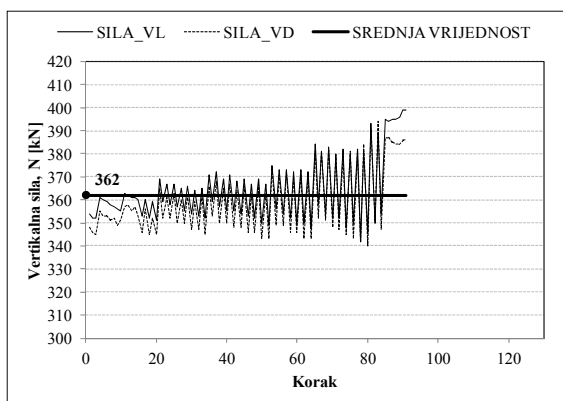
Slika 4.20 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 7 (GRUPA I)



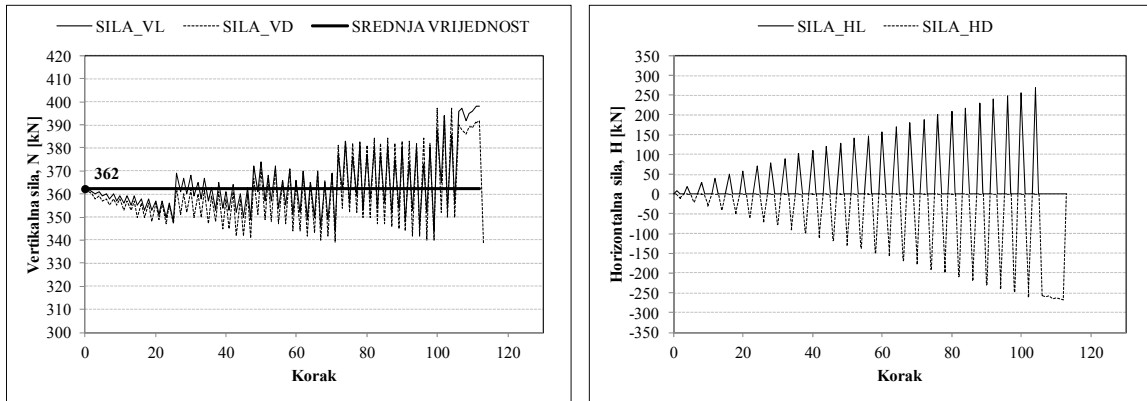
Slika 4.21 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 8 (GRUPA I)



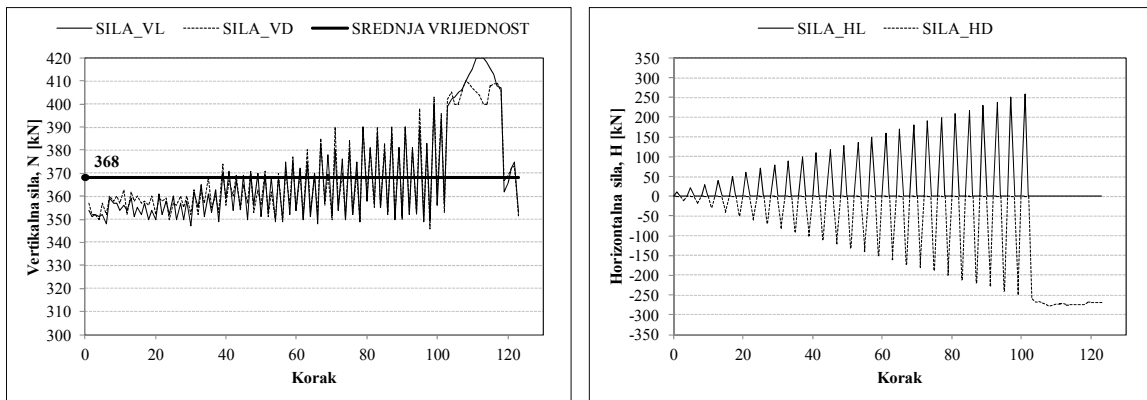
Slika 4.22 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 9 (GRUPA I)



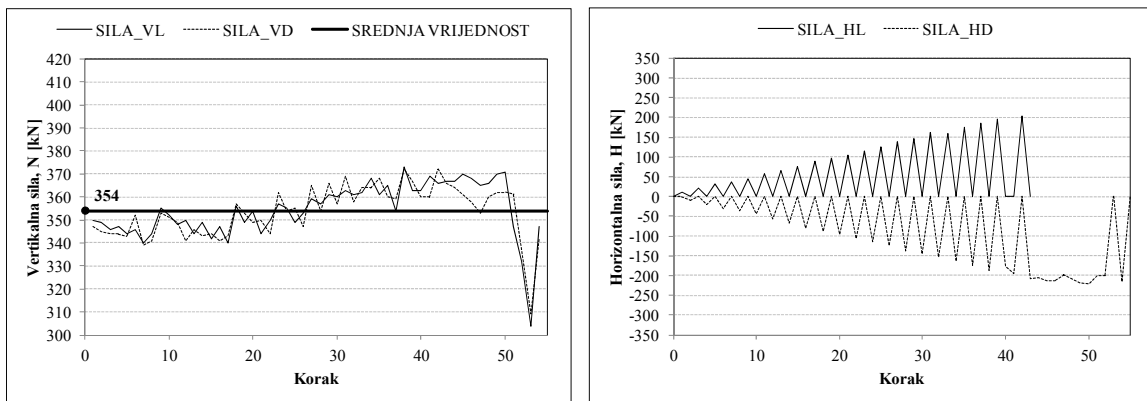
Slika 4.23 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 4 (GRUPA II)



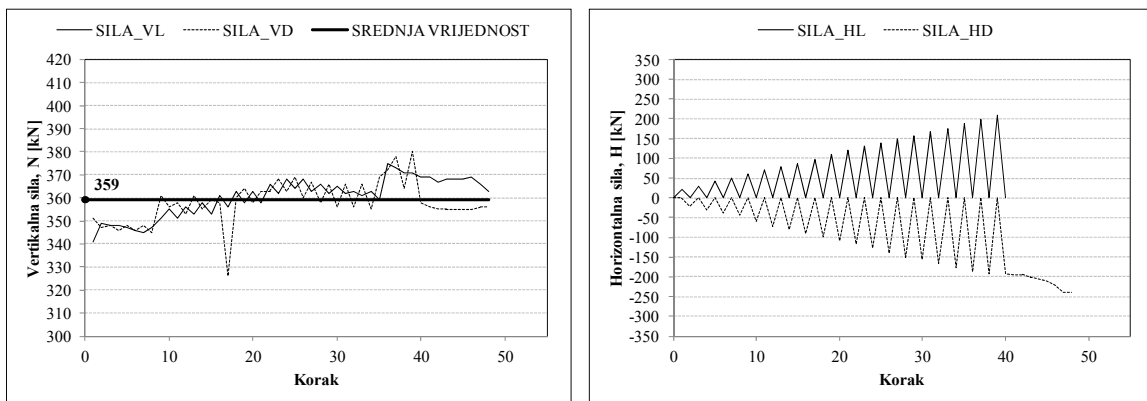
Slika 4.24 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 5 (GRUPA II)



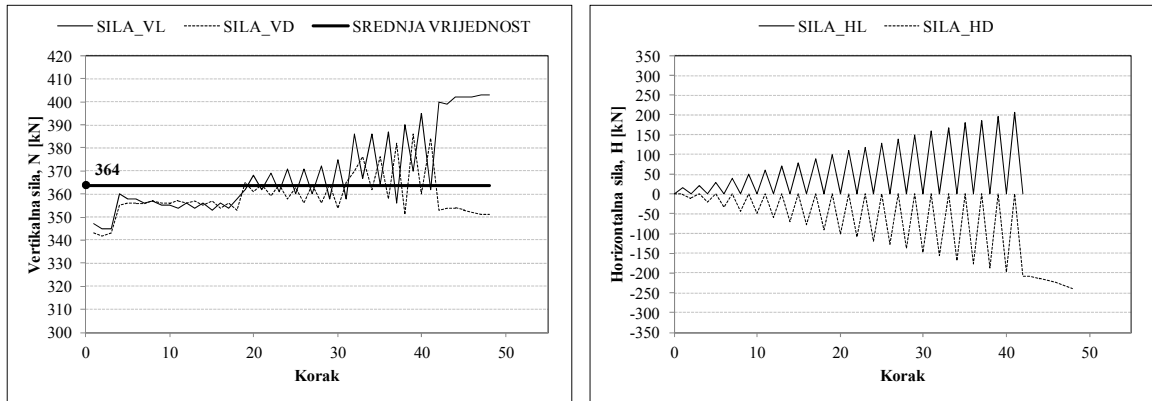
Slika 4.25 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 6 (GRUPA II)



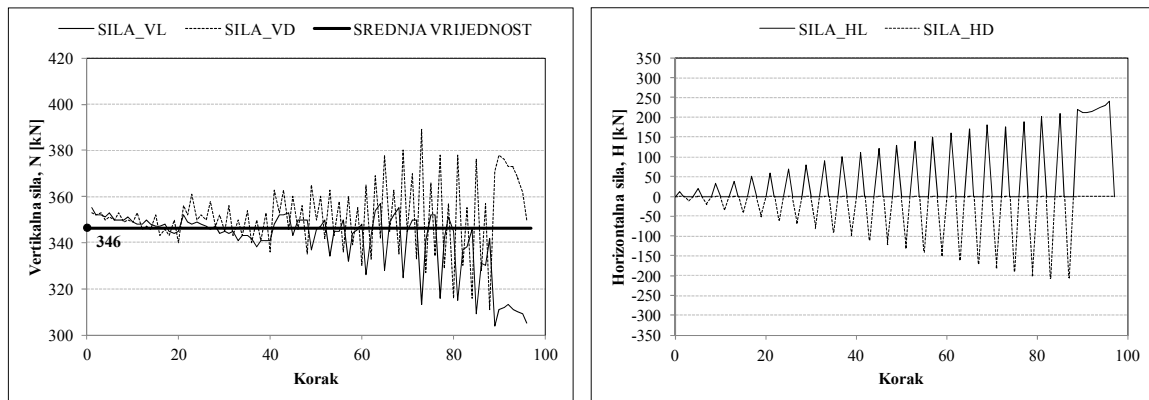
Slika 4.26 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 1 (GRUPA III)



Slika 4.27 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 2 (GRUPA III)



Slika 4.28 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 3 (GRUPA III)



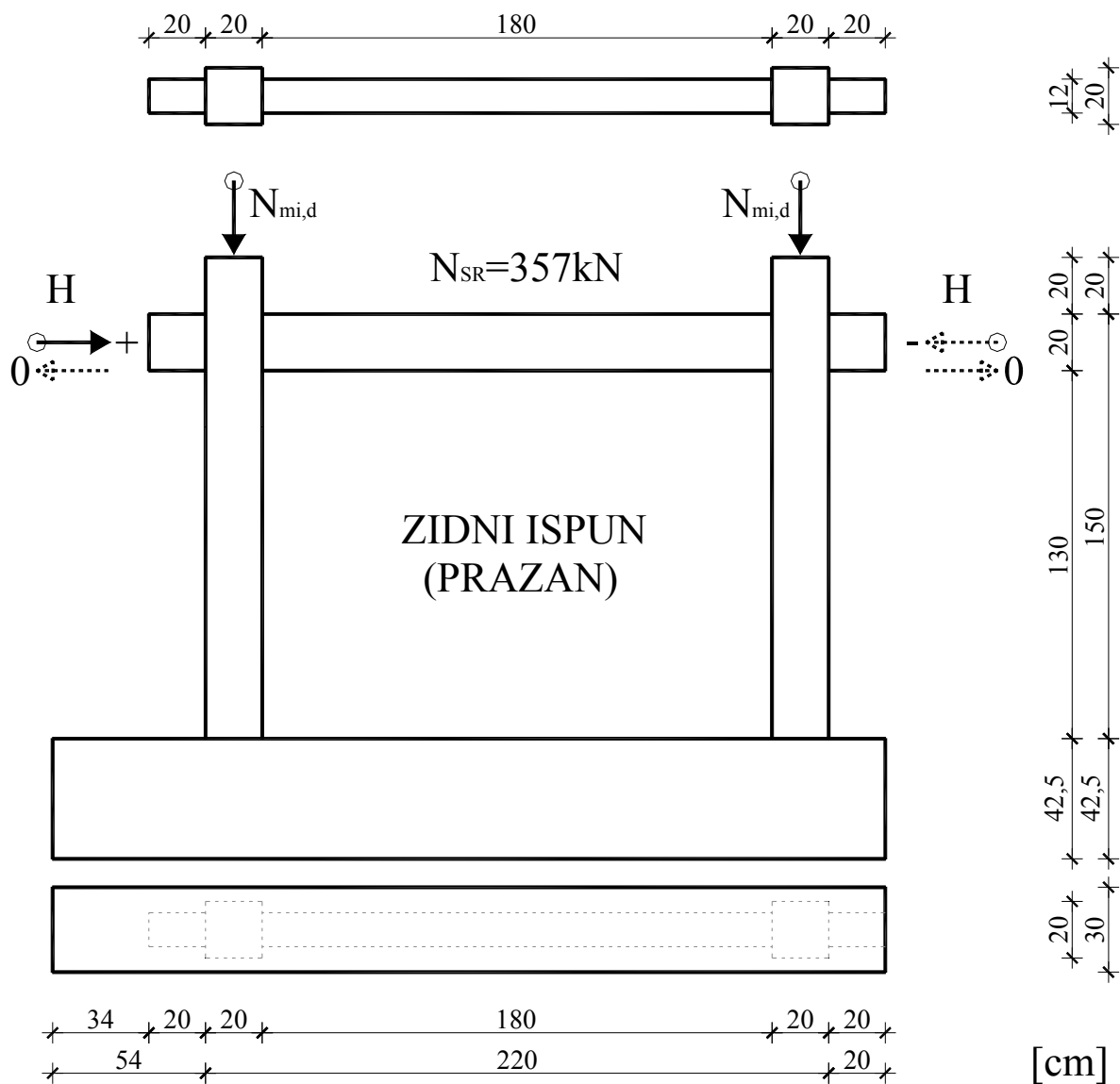
Slika 4.29 Prikaz vertikalnog i horizontalnog opterećenja na MODELU 10 (GRUPA IV)

Tijekom ispitivanja, što je vidljivo iz prethodnih slika, vertikalno opterećenje nije bilo potpuno konstantno. U nultoj fazi uvijek se vodilo računa kako bi sile bile približno jednake projektiranima, tako što smo pritisak u vertikalnim hidrauličnim prešama povećavali do projektiranog iznosa vertikalne sile. Prilikom zadavanja horizontalne sile, njihove su vrijednosti malo rasle, što je u granicama dopuštenoga. Za analitički i numerički model koristit će se srednje vrijednosti vertikalnih sila na modelima (GRUPAMA), a koje su prikazane u **tablici 4.15**.

Tablica 4.15 Prikaz ostvarenog zamjenjujućeg vertikalnog opterećenja na stupovima modela

Grupa (i)	Projektirana uzdužna sila na modelu, $N_{mi}$ [kN]	Ostvarena srednja uzdužna sila na modelu, $N_{mi,d}$ [kN]	Normalno naprezanje, $\sigma_{mi,d} = N_{mi,d} / A_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
GRUPA I	362	357	8,93
GRUPA II	354	364	9,10
GRUPA III	345	359	8,98
GRUPA IV	354	346	8,65
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>354</b>	<b>357</b>	<b>8,91</b>

Iz **tablice 4.15** vidimo kako su ostvarene vrijednosti vertikalne sile približno jednake projektiranim za sve GRUPE, razlika koja se pojavljuje manja je od 5%. Također, normalno naprezanje u stupovima modela približno je jednako normalnome napreznju u stupovima modela prototipa (pogledati **tablicu 2.16**), razlika koja se pojavljuje manja je od 1%.



**Slika 4.30** Djelovanje vertikalnog (N) i horizontalnog (H) opterećenja na MODELIMA (GRUPAMA)

## 4.5 REZULTATI ISPITIVANJA

U nastavku su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja dobiveni na modelima, a za navedene dimenzije i opterećenja modela. Za svaki model (grupu) definirana su nastajanja pukotina i opisan je mehanizam sloma, određene su eksperimentalne cikličke krivulje odziva (krivulje histereze) pomoću kojih su dobivene primarne krivulje (krivulje nosivosti) uslijed djelovanja cikličkog horizontalnog (poprečnog) opterećenja. Kako bi se što točnije moglo simulirati konstrukcijsko ponašanje armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom pomoću nelinearne vremenske analize potrebno je procijeniti krutost, čvrstoću i deformacijska svojstva njegovih komponenti. Ono se obično prikazuje pomoću idealizirane anvelope nosivosti kojom se povezuje horizontalna (poprečna) sila i vršni pomak sustava, što je naknadno i učinjeno.

### 4.5.1 Opis nastajanja pukotina i mehanizma (načina) sloma

#### 4.5.1.1 Uvod

Promatranja štete od potresa i sveobuhvatnih eksperimentalnih istraživanja u posljednjih nekoliko desetljeća pokazala su različite mehanizme sloma armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom ako je sustav podvrgnut horizontalnim (poprečnim) opterećenjem. Uglavnom, mehanizam sloma je posmični i ovisi o zidnom ispunu i krutosti armirano-betonskoga okvira, kvaliteti materijala i kontaktu između zidnoga ispuna i armirano-betonskoga okvira.

Pri maloj horizontalnoj poprečnoj sili u armirano-betonskome okviru ispunjenom zidnim ispunom postoji potpuni kontakt i zajedničko djelovanje zidnoga ispuna i armirano-betonskoga okvira. U toj je fazi doprinos zidnoga ispuna ukupnoj krutosti konstrukcije najveći. Kako se opterećenje povećava, dolazi do oblikovanja tzv. tlačne dijagonale u zidnome ispunu, što dovodi do odvajanja zidnoga ispuna od armirano-betonskoga okvira u uglovima vlačne dijagonale. Osnovni konstrukcijski sustav armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom pretvara se u rešetkasti. U tome sustavu stupovi armirano-betonskoga okvira postaju pojasevi vertikalne rešetke, grede su horizontalni štapovi, a zidni ispun dobiva ulogu tlačnih dijagonala takve rešetke. Ovu pojavu opisuje Šimić nakon svojih eksperimenata na malim uzorcima troetažnog okvira, kao i rezultate dobivene proračunom pomoću metode konačnih elemenata. Krutost građevine opada s povećanjem sile i pukotina. Daljnjim povećanjem horizontalnih (poprečnih) sila nastavlja se odvajanje armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna te dolazi do stvaranja novih pukotina u zidnome ispunu

sve do njegovoga sloma. U stupovima okvira tada nastaje popuštanje armature i pretvaranje sustava u mehanizam.

**Tablica 4.16** Mehanizmi sloma u ovisnosti o relativnoj čvrstoći armirano-betonskog okvira i zidnog ispunu (Murty, 2000)

	Slabi zidni ispun	Jaki zidni ispun
Slabi armirano-betonski okvir		dijagonalne pukotine u zidnom ispunu; plastični zglobovi u stupovima
Armirano-betonski okvir sa slabim spojem između jakih elemenata armirano-betonskog okvira	slom u uglovima zidnog ispunu; pukotine u spoju stupa i grede	dijagonalne pukotine u zidnom ispunu; pukotine u spoju stupa i grede
Jaki armirano-betonski okvir	horizontalni slom zidnog ispunu	

Klinger i drugi autori provodili su eksperimentalna i analitička istraživanja armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom na seizmičku pobudu. Uspoređujući rezultate došli su do zaključka kako je dovoljno zidni ispun modelirati tlačnim dijagonalnim štapom.

Iako se gotovo sve vrste armirano-betonskih okvira sa zidnom ispunom mogu svrstati u kategoriju krutih armirano-betonskih okvira i fleksibilne ispune, to ne znači kako je samo jedan od mogućih mehanizama sloma moguć. Tu su i drugi parametri, kao što su: čvrstoća zidnoga ispunu, kvaliteta zidanja zidnoga ispunu, količina i raspodjela armature u elementima armirano-betonskoga okvira, otpornost i duktilnost armirano-betonskoga okvira, koji također, utječu na krajnji mehanizam sloma. Dakle, postoji nekoliko mehanizama sloma koje treba uzeti u obzir pri provjeri seizmičke otpornosti zgrade.

*a) Opis mehanizama sloma zidnog ispunu:*

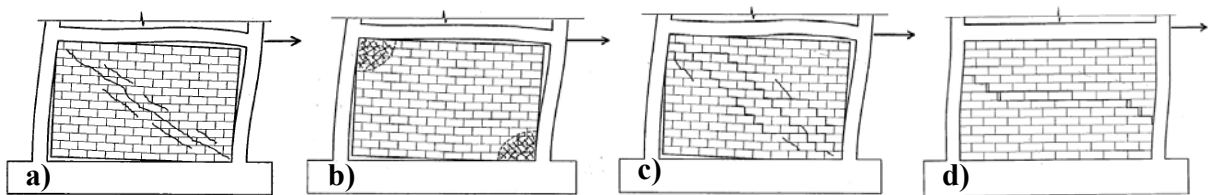
Slom u zidnome ispunu može nastati gubitkom veze u sljubnicama morta, pojavom pukotina ili slomom u zidnim elementima ili njihovim kombinacijama. Nastanak načina sloma ovisi o materijalnim karakteristikama i stanju naprezanja u zidnome ispunu. Na *slici 4.31* prikazani su mogući načini otkazivanja nosivosti zidnoga ispunu, odnosno mehanizmi sloma zidnog ispunu. Pregledom eksperimentalnih podataka (Shing, Mehrabi 2002) može se zaključiti kako će u najvećem broju slučajeva kod slabog zidnog ispunu nastati horizontalni posmik, dok će dijagonalni slom nastupiti u jakome zidnome ispunu.



Mehanizmi sloma zidnoga ispuna su:

- ✓ Dijagonalni slom zidnog ispuna (diagonal cracking – DC), *slika 4.31 a)*

Uslijed horizontalnoga (poprečnog) opterećenja, koje djeluje na armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom, nastaju velika tlačna naprezanja duž dijagonale zidnoga ispuna. Kada vlačne deformacije zidnoga ispuna dosegnu vrijednosti pri kojima nastaju pukotine, nastaje dijagonalno raspucavanje. Te pukotine prvotno nastaju u centru zidnoga ispuna i dalje putuju duž tlačne dijagonale. Kako međukatni pomaci rastu, dijagonalna pukotina širi se prema nasuprotnim uglovima zidnoga ispuna. Pri velikim pomacima može doći do ispadanja zidnoga ispuna u uglovima. Dijagonalni slom zidnoga ispuna nastaje kod slabih armirano-betonskih okvira ili armirano-betonskih okvira sa slabim spojem elemenata armirano-betonskog okvira u kombinaciji s jakim zidnim ispunom. Stafford-Smith i Carter (1969) zaključili su kako horizontalna (poprečna) sila uzrokuje dijagonalnu pukotinu u zidnom ispunu ovisno o kontaktnoj duljini između armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna. Taj izraz pokazao je kako velika vrijednost omjera duljine i visine ili manja vrijednost,  $\lambda h$ , (krući stup u odnosu na zidni ispun) rezultira većom dijagonalnom čvrstoćom zidnoga ispuna ( $\lambda$  – relativna krutost prema izrazu (6.2);  $h$  – visina zidnog ispuna). Eksperimentalna istraživanja pokazala su da oštećenja nastala uslijed potresa u šupljim zidnim elementima izazivaju slom ubrzo nakon nastanka pukotina, dok u slučaju punih zidnih elemenata (opeke), dijagonalni slom predstavlja samo nastanak graničnog stanja uporabljivosti.



**Slika 4.31** Mehanizmi sloma zidnog ispuna; a) dijagonalni slom, b) slom u uglovima zidnog ispuna, c) stepeničasti posmični slom, d) horizontalni posmični slom

- ✓ Slom u uglovima zidnoga ispuna (corners cracking – CC), *slika 4.31 b)*

Slom u uglovima zidnoga ispuna ili tlačni slom popraćen je naglim porastom pomaka i predstavlja plastični slom. Pri horizontalnome (poprečnom) opterećenju armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom nastaje tlačno naprezanje u uglovima zidnoga ispuna, mjestu najveće koncentracije naprezanja. U slučaju jakoga armirano-betonskoga okvira, odnosno armirano-betonskoga okvira s jakom vezom između elementa, doći će do raspucavanja na relativno malome području.

Ukoliko se radi o armirano-betonskim okvirima sa slabim spojem elemenata u kombinaciji sa slabom ispunom, dolazi do proširenja područja raspucavanja kuta zidnoga ispuna koje se širi i na spoj elemenata armirano-betonskoga okvira.

Uslijed povećanja pomaka može doći do ispadanja elemenata zidnoga ispuna, pri čemu se oštećenje širi na elemente armirano-betonskoga okvira. Javlja se kod slabog zidnog ispuna i armirano-betonskog okvira sa slabim spojem elemenata armirano-betonskoga okvira.

✓ Stepeničasti posmični slom (bed-joint sliding shear - SS), *slika 4.31 c)*

Kada je čvrstoća morta značajno manja u odnosu na čvrstoću zidanog elementa, posmična naprezanja dominiraju nad normalnim, pri čemu pukotine nastaju u sljubnicama morta. U tom se slučaju duž zidnoga ispuna pojavljuju jedna ili dvije velike pukotine duž dijagonale zidnoga ispuna u stepeničastom obliku. Otpornost zidnoga ispuna na posmično naprezanje obično se osigurava kroz kombinaciju djelovanja posmične čvrstoće veze i trenja između zidnog elementa zidnog ispuna i morta. Ovaj oblik popuštanja ovisi o posmičnoj čvrstoći morta, vlačnoj čvrstoći zidnog elementa i relativnim odnosima između posmičnih i normalnih naprezanja. Posmične pukotine između zidnih elemenata zidnog ispuna ne predstavljaju direktno stanje sloma, nego se odnose na granično stanje uporabljivosti. U slučaju šupljih elemenata zidnog ispuna, pukotine u zidnim elementima mogu dovesti do sloma zidnog ispuna.

✓ Horizontalni posmični slom (horizontal sliding shear – HSS), *slika 4.31 d)*

Otpornost zidnoga ispuna na posmično naprezanje pri horizontalnom (poprečnom) djelovanju direktno je povezana s djelotvornom kombinacijom posmične čvrstoće veze i trenja između zidnih elemenata i morta. Osim toga, pri djelovanju vertikalnoga opterećenja, posmična otpornost povećava se s povećanjem trenja između zidnih elemenata i morta. Utjecaj trenja bit će manji kod šupljih zidnih elemenata za koje se uzima da je koeficijent trenja jednak 0,15, dok za pune zidne elemente iznosi od 0,6-1,7 prema ispitivanjima *Polyakowa (1956)*. Posmični slom nastaje formacijom velike horizontalne pukotine u području polovice zidnog ispuna. Eksperimentalni rezultati upućuju na zaključak kako je zidni ispun sa zidanim elementima koji imaju vertikalne šupljine skloniji horizontalnome posmičnom slomu zbog veze koja je slabija u horizontalnoj u odnosu na vertikalnu sljubnicu. Moguće je da ovakav način otkazivanja nosivosti izazove posmični slom u stupovima armirano-betonskoga okvira.

b) Opis mehanizama sloma armirano-betonskoga okvira

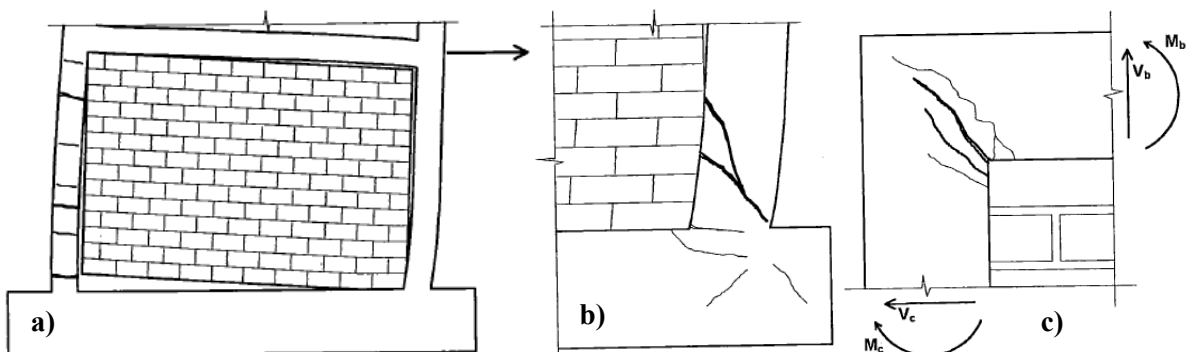
U elementima armirano-betonskoga okvira mogu nastati različiti mehanizmi otkazivanja nosivosti, odnosno mehanizmi sloma, ovisno o karakteristikama samih elemenata i efektu koji nastaje na plohi između zidnoga ispuna i armirano-betonskoga okvira.

Oštećenje u elementima najčešće nastupa u vidu fleksijskih plastičnih zglobova, popuštanja uslijed djelovanja aksijalne sile u stupovima, tlačnoga sloma ili kao kombinacija prethodno navedenih mehanizama otkazivanja nosivosti.

Mehanizmi sloma armirano-betonskoga okvira su:

- ✓ Vlačni slom ( tensile crack- CT), *slika 4.32 a)*

Nastaje uslijed djelovanja velikoga momenta savijanja koji će se javiti kod armirano-betonskoga okvira s velikim omjerom visine i raspona i kod jako krutih elemenata armirano-betonskoga okvira. To je duktilni mod, koji dopušta velike pomake bez iznenadnih lomova. Granični pomaci ovog moda vezuju se uz kapacitete deformacije ispune. Javlja se kod slabo armiranih stupova s jakom zidnom ispunom. Međutim, u slučaju slabih elemenata armirano-betonskoga okvira dominantni mod otkazivanja je savojni ili posmični u stupu ili gredi na području plastičnoga zgloba.



**Slika 4.32** Mehanizmi sloma armirano-betonskog okvira; a) vlačni slom, b) posmični slom, c) slom u spoju elemenata armirano-betonskog okvira

- ✓ Posmični slom (shear crack –SC), *slika 4.32 b)*

Armirano-betonski okviri s jakim zidnim ispunom generiraju veliku poprečnu silu u zidnom ispunu uslijed horizontalnih pomaka. Te se poprečne sile sa zidnog ispuna prenose na armirano-betonski okvir, koji je u ovome slučaju slabija komponenta. Oštećenja nastaju na krajevima stupova i greda u obliku dijagonalnih x-pukotina uz otpadanje zaštitnog sloja betona. Javlja se kod neduktilnih elemenata armirano-betonskoga okvira. Vjerojatno će nastati kod stupa koji je dio djelomično ispunjenog armirano-betonskoga okvira.

✓ Slom u spoju elemenata okvira (beam-column joint crack –BCC), *slika 4.32 c)*

Velika normalna i tangenta naprezanja duž kontaktne duljine u zonama opterećenih uglova armirano-betonskoga okvira rezultiraju razvojem velikih posmičnih sila i momenata savijanja. Stanje naprezanja, koje se razvija u spoju stup-greda, uzrokuje nastanak dijagonalnih pukotina koje se šire sa unutarnje prema vanjskoj strani čvora. Ovakav tip otkazivanja nosivosti ima izrazito nepoželjne efekte jer se zbog raskida veze horizontalne sile ne mogu pravilno prenijeti s grede međukatne konstrukcije na stupove i zidni ispun.

#### 4.5.1.2 Modeli GRUPE I (opećni blokovi MO10)

Kod modela GRUPE I u *tablici 4.17* prikazane su vrijednosti horizontalnih sila s pripadajućim katnim pomacima u trenutku pojave prvih  $n$  zabilježenih pukotina.

**Tablica 4.17** Horizontalne sile u trenutku pojave pukotina u zidnom ispunu

Grupa Model	GRUPA I					
	MODEL 7		MODEL 8		MODEL 9	
Pukotina br. [n]	H <sub>cr,n</sub> [kN]	IDR [%]	H <sub>cr,n</sub> [kN]	IDR [%]	H <sub>cr,n</sub> [kN]	IDR [%]
1	110	0,02	-100	-0,03	-131	-0,04
2	120	0,02	110	0,03	140	0,04
3	-141	-0,03	-139	-0,05	-150	-0,04
4	-170	-0,05	170	0,07	158	0,05
5	200	0,07	180	0,08	-160	-0,05
6	210	0,08	-181	-0,10	200	0,08
7	220	0,10	190	0,09	220	0,11
8	-221	-0,11	-190	-0,13	-220	-0,09
9	230	0,13	200	0,12	230	0,14
10	-230	-0,13	-200	-0,15	-230	-0,10
11	240	0,15	210	0,14	240	0,16
12	-240	-0,15	-209	-0,18	250	0,20
13	250	0,18	220	0,17	-250	-0,14
14	-248	-0,17	-220	-0,21	258	0,23
15	260	0,21	230	0,20	-260	-0,17
16	-259	-0,20	-230	-0,27	270	0,26
17	268	0,28	240	0,22	-270	-0,20
18	-270	-0,26	-240	-0,33	280	0,28
19	280	0,38	250	0,27	-280	-0,23
20	-273	-0,46	-250	-0,42	290	0,31
21	290	0,47	260	0,33	-290	-0,27
22	315	0,72	-260	-0,55	300	0,37
23	-	-	258	0,55	-286	-0,41
24	-	-	-	-	270	0,48

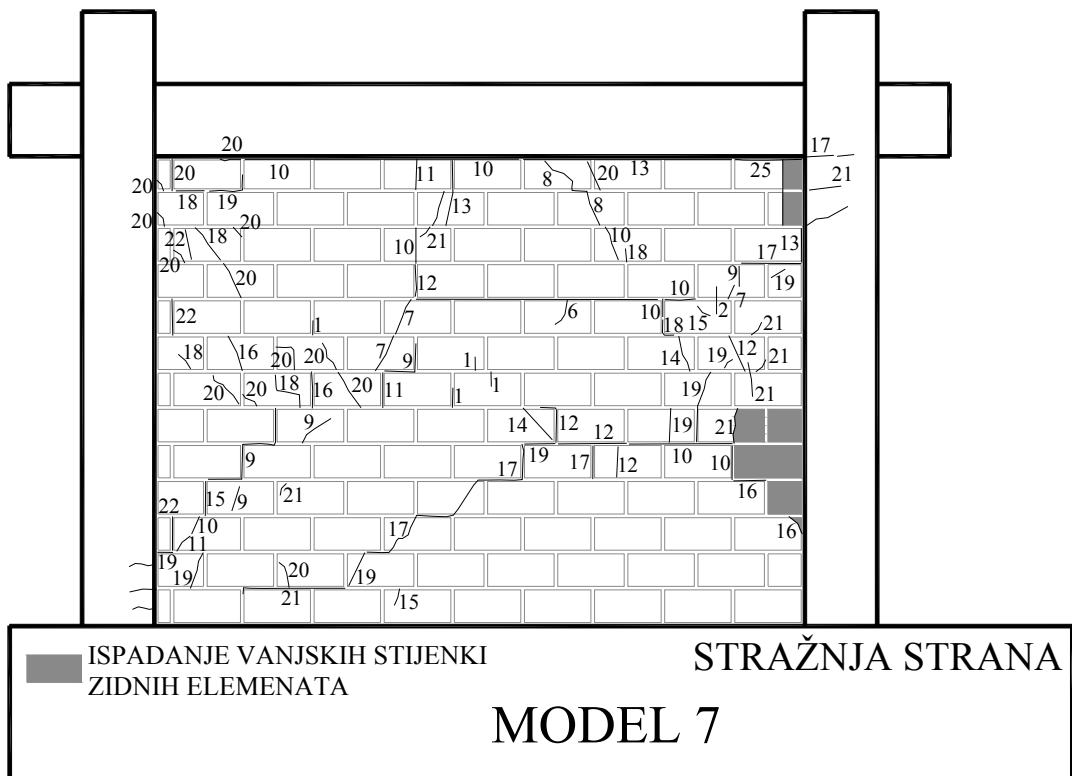
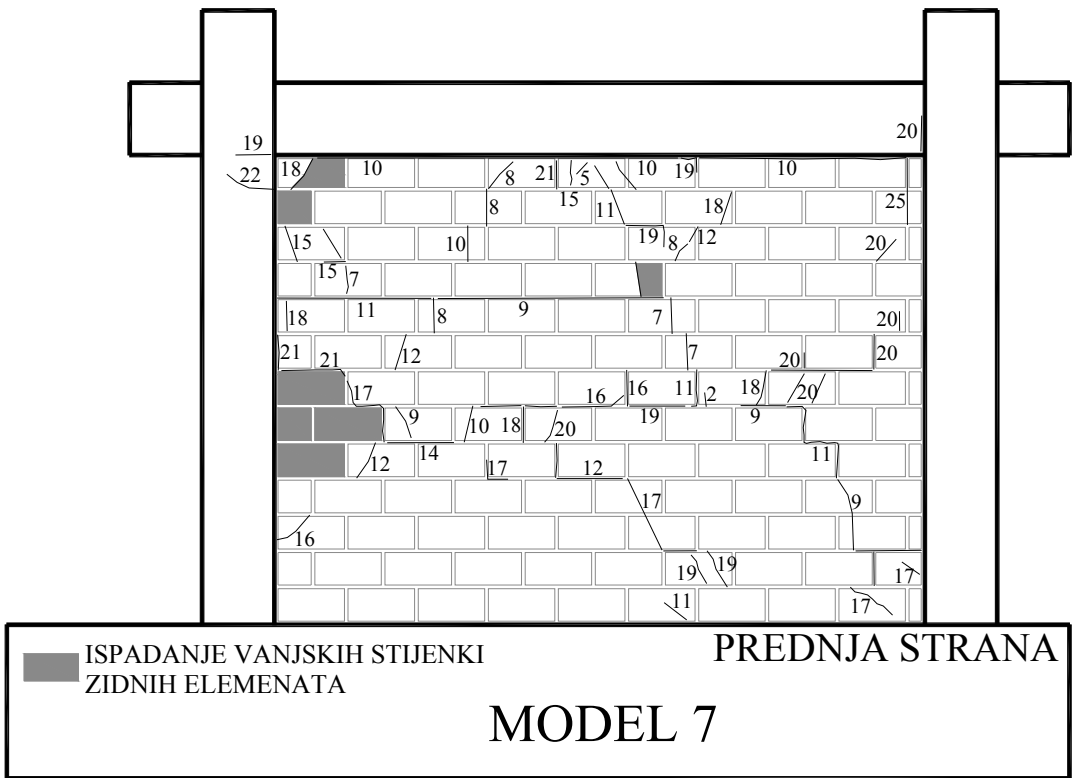
Katni pomak, IDR, izračunat je za sve GRUPE kao srednja vrijednost očitavanja horizontalnih LVDT\_a (mjerača pomaka) prema izrazu:

$$\text{IDR} = \{[(\text{LVDT\_HL} + \text{LVDT\_HD})/2] * 100\} / 1500 [\%],$$

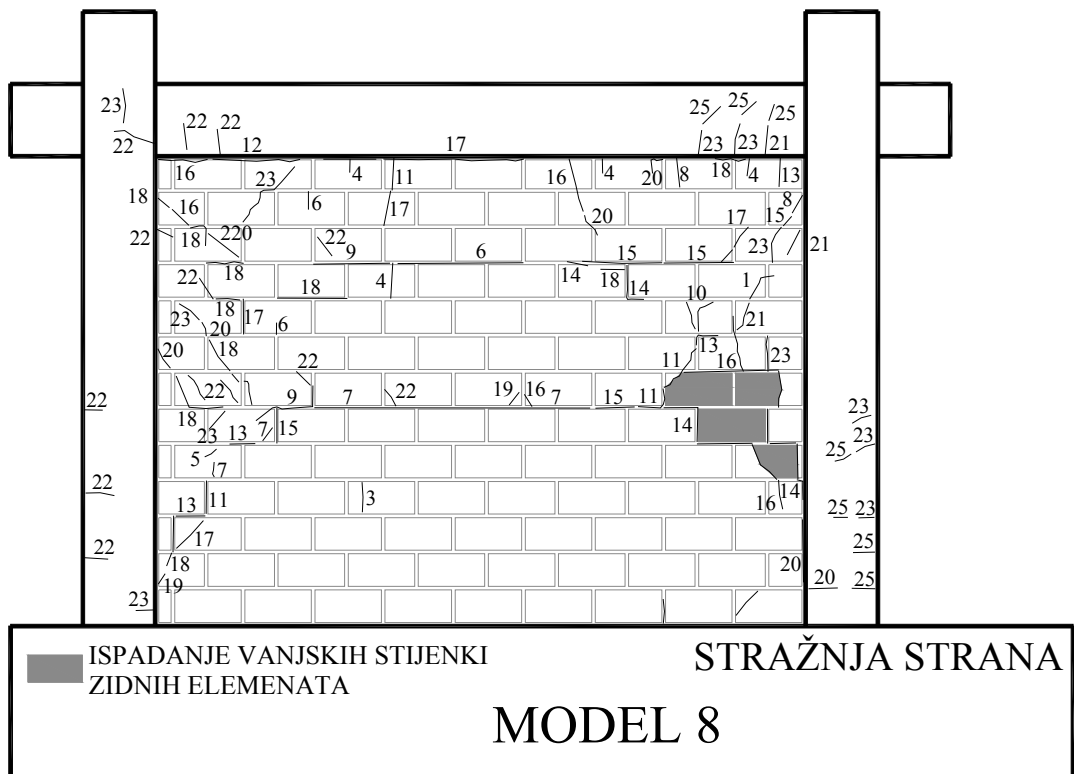
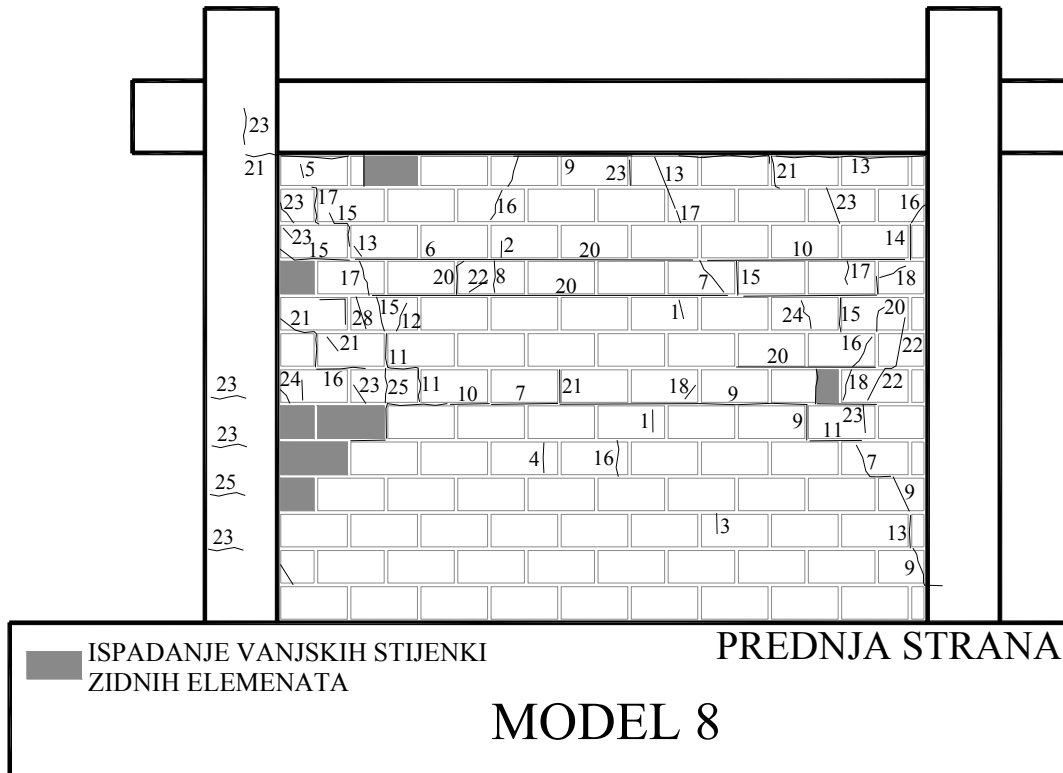
gdje je: LVDT\_HL i LVDT\_HD prema *slici 4.11*,  
1500 – visina modela [mm].

Iz *tablice 4.17*, možemo iščitati kako su se prve pukotine kod modela GRUPE I uvijek javljale pri katnome pomaku od približno 0,05%. Maksimalna nosivost modela Grupe I postignuta je između 0,25 i 0,30% katnog pomaka.

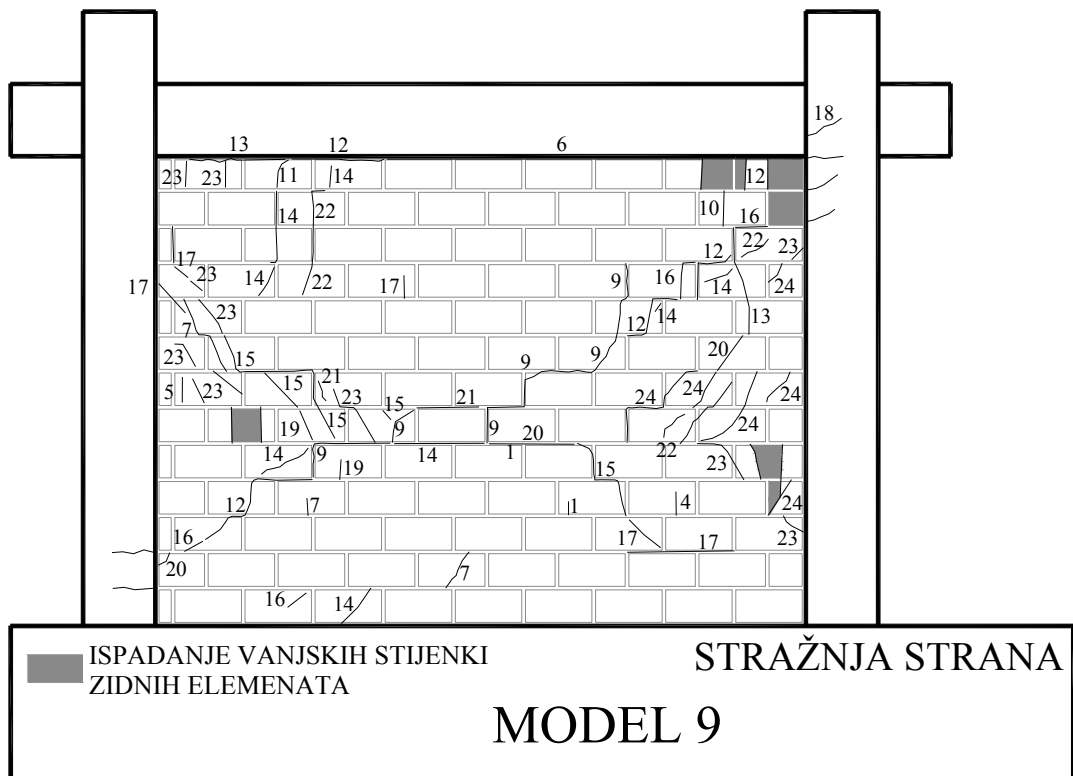
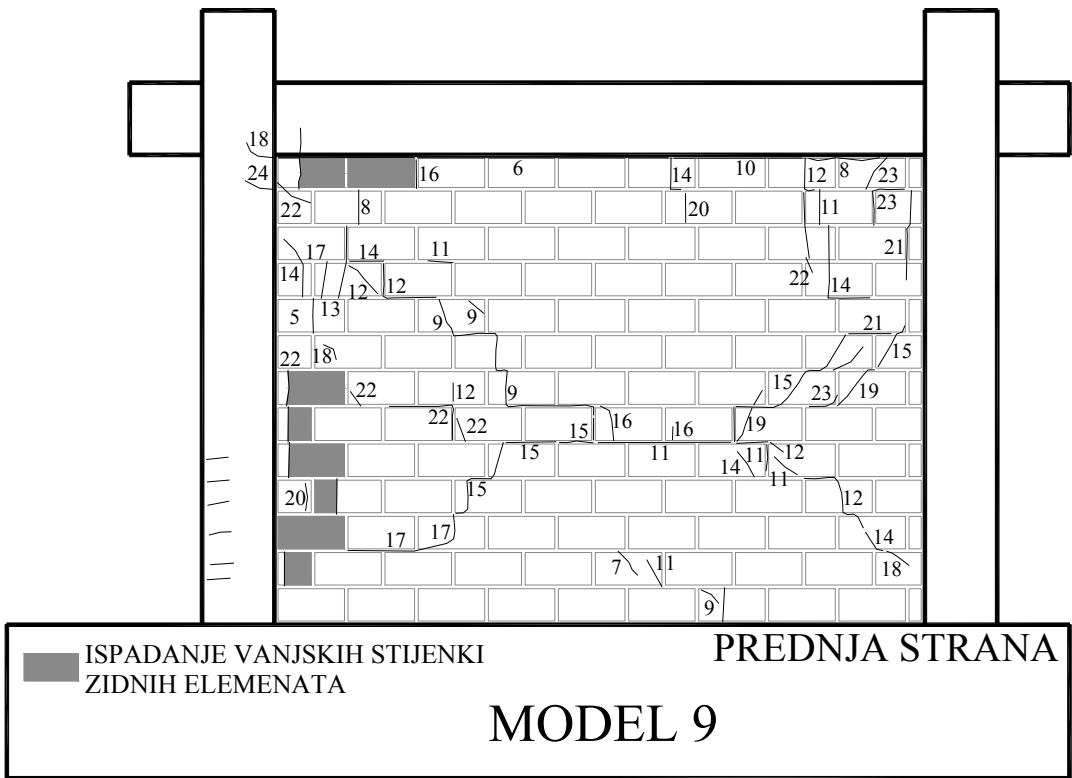
Na *slikama 4.33-4.35* prikazani su konačni oblici pukotina pri razinama katnih pomaka od 0,98-1,34%. Kod modela GRUPE I pukotine su se širile (napredovale) dijagonalno duž vertikalnih sljubnica morta, ali i po horizontalnim sljubnicama, što je rezultiralo dosezanjem posmične čvrstoće uzduž sljubnica morta. Navedene horizontalne pukotine spriječile su nastajanje dijagonalnih pukotina u gornjoj polovici zidnoga ispuna. Pri većim silama primijećeno je razdvajanje zidnoga ispuna od elemenata armirano-betonskoga okvira, drobljenje materijala zidnoga ispuna u blizini spoja grede i stupa, te ispadanje vanjskih stijenki zidnih elemenata. Mehanizam sloma može se opisati kao kombinacija posmičnog klizanja i drobljenja po dijagonali. Konačno, uslijed djelovanja vlačnih naprezanja pukotine su se pojavile pri dnu i vrhu stupova armirano-betonskoga okvira.



Slika 4.33 Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 7 (kod 1,10% katnog pomaka)



Slika 4.34 Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 8 (kod 0,98% katnog pomaka)



Slika 4.35 Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 9 (kod 1,34% katnog pomaka)



### 4.5.1.3 Modeli GRUPE II (opečni blokovi MO5)

Vrijednosti horizontalnih (poprečnih) sila s pripadajućim katnim pomacima u trenutku pojave prvih  $n$  zabilježenih pukotina kod modela GRUPE II prikazane su u **tablici 4.18**.

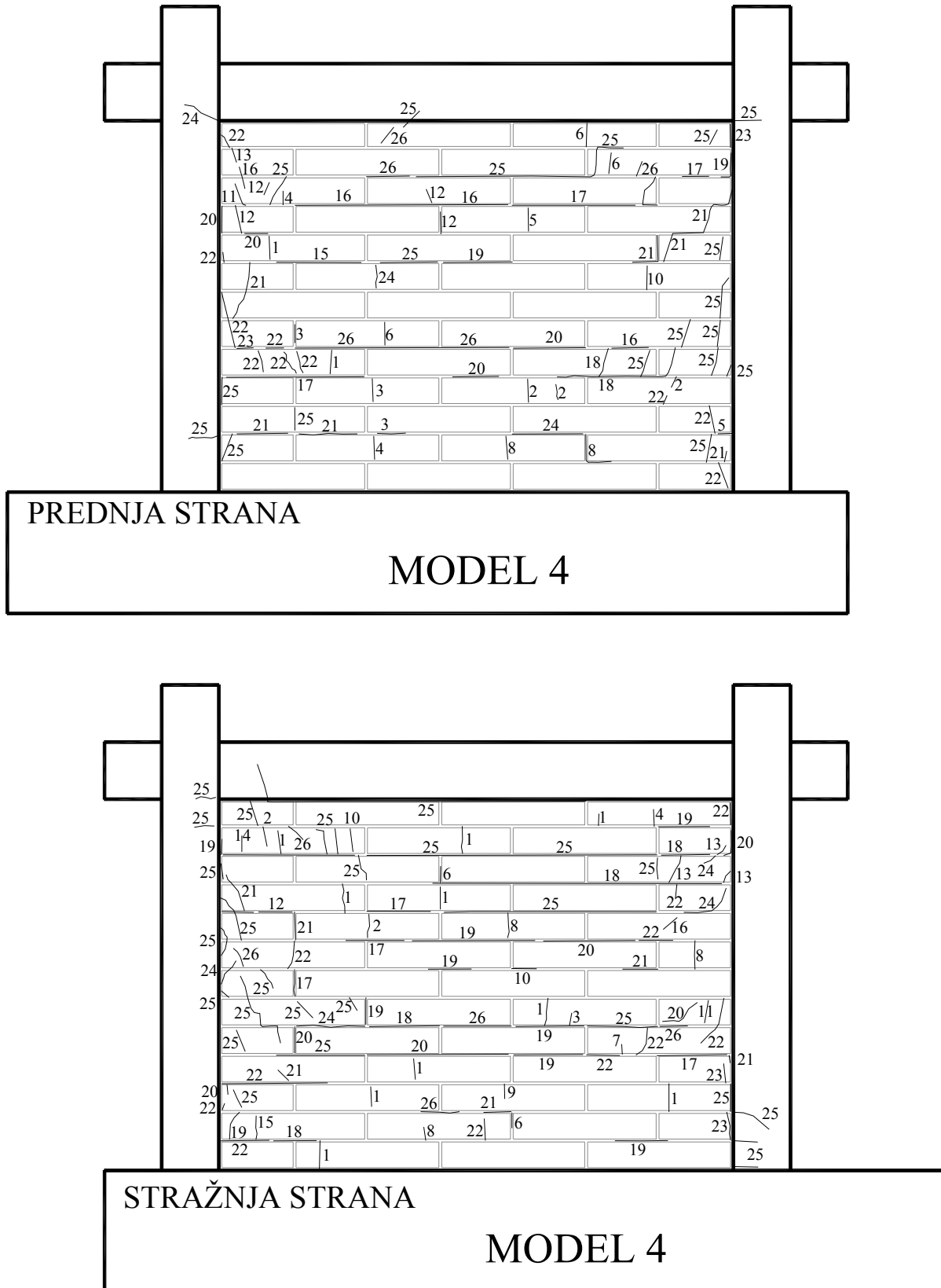
**Tablica 4.18** Horizontalne sile u trenutku pojave prvih pukotina u zidnom ispunu

Grupa	GRUPE II					
Model	MODEL 4		MODEL 5		MODEL 6	
Pukotina br. [n]	H <sub>cr,n</sub> [kN]	IDR [%]	H <sub>cr,n</sub> [kN]	IDR [%]	H <sub>cr,n</sub> [kN]	IDR [%]
1	-69	-0,02	-59	0,00	110	0,02
2	70	0,01	-71	0,00	140	0,03
3	-80	-0,02	98	0,01	-160	-0,05
4	-89	-0,02	110	0,02	160	0,04
5	89	0,02	-121	-0,01	-180	-0,05
6	99	0,02	-128	-0,01	200	0,07
7	-109	-0,03	129	0,02	211	0,07
8	108	0,02	-141	-0,01	-217	-0,08
9	-128	-0,04	-147	-0,01	-229	-0,09
10	129	0,03	148	0,02	-238	-0,10
11	-168	-0,07	-169	-0,02	-250	-0,12
12	-179	-0,08	168	0,03	248	0,11
13	-189	-0,10	177	0,03	-259	-0,16
14	189	0,10	-257	-0,06	260	0,14
15	-198	-0,11	260	0,08	267	0,19
16	-208	-0,12	-268	-0,13	267	0,26
17	209	0,12	258	0,20	270	0,33
18	-218	-0,14	259	0,28	277	0,47
19	218	0,14	264	0,40	275	1,00
20	-228	-0,17	263	0,46	-	-
21	228	0,19	-	-	-	-
22	-240	-0,22	-	-	-	-
23	238	0,24	-	-	-	-
24	-247	-0,25	-	-	-	-
25	245	0,56	-	-	-	-
26	263	0,84	-	-	-	-

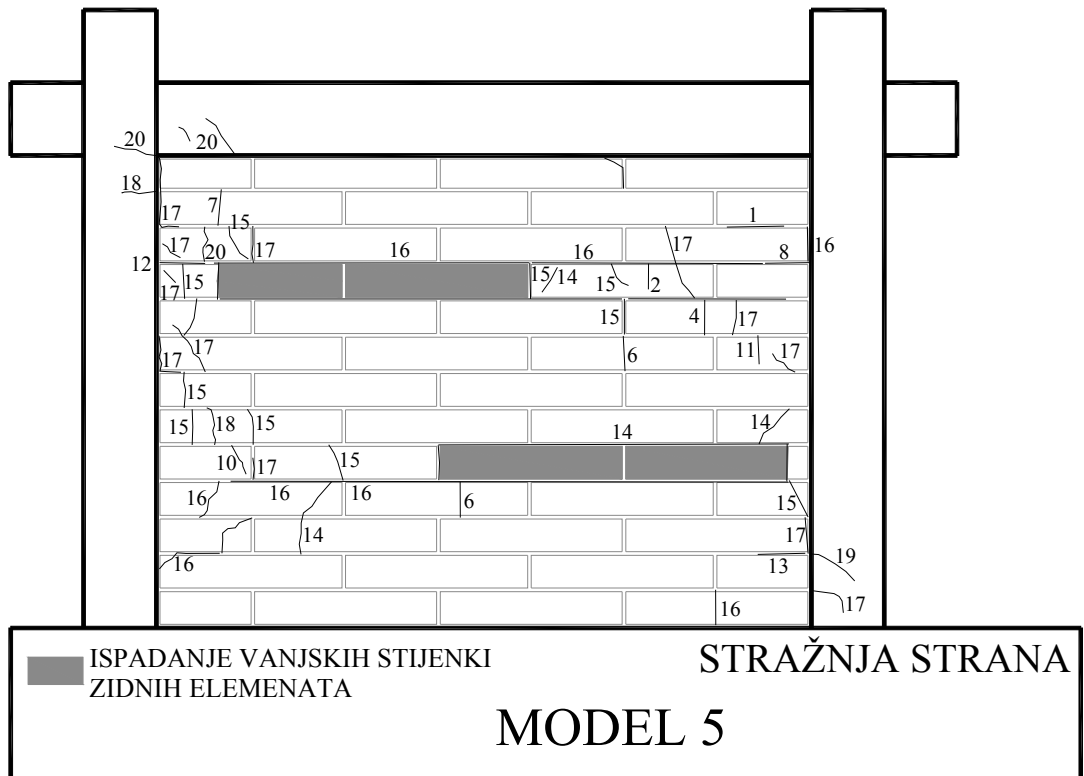
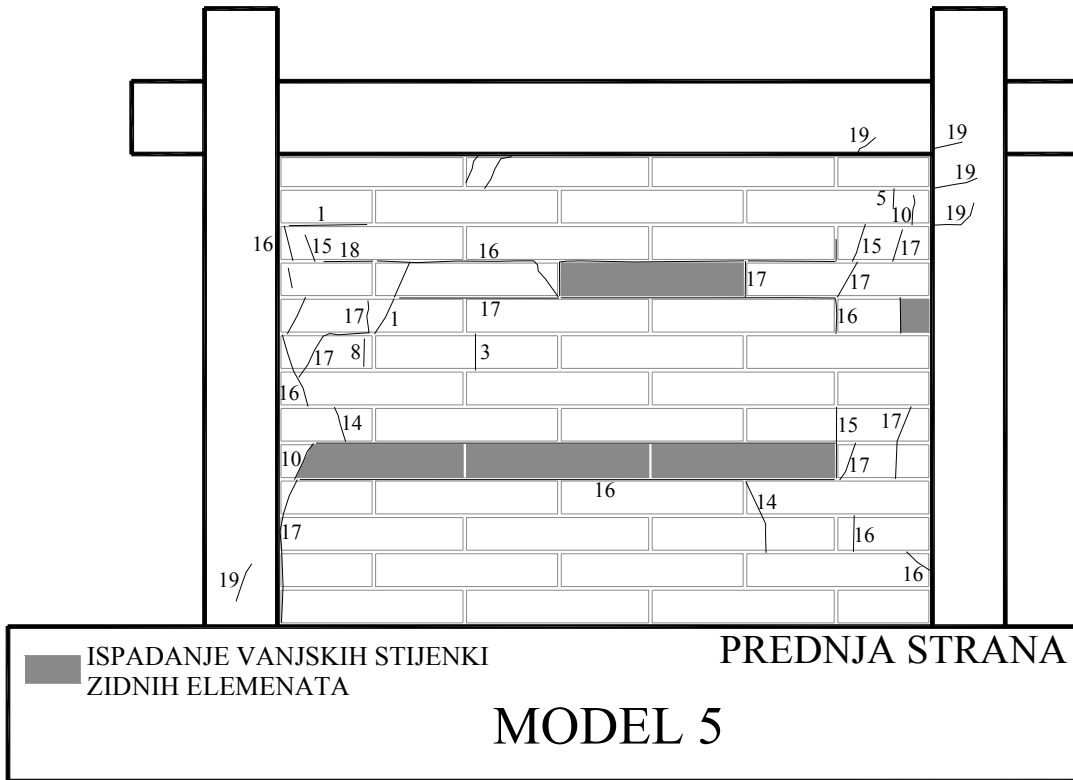
Kod modela GRUPE II možemo vidjeti u **tablici 4.18** kako su se prve pukotine uvijek javljale pri katnom pomaku od približno 0,02%. Maksimalna nosivost modela GRUPE II postignuta je između 0,25 i 0,30% katnog pomaka.

Konačni oblici pukotina pri razinama katnih pomaka od 0,51-1,68% prikazani su na **slikama 4.36-4.38**. Kod modela GRUPE II pukotine su se širile horizontalno duž sljubnica te na taj način formirale posmični klizni mehanizam sloma. Pri većim opterećenjima nije primijećeno razdvajanje zidnoga ispuna i elemenata okvira.

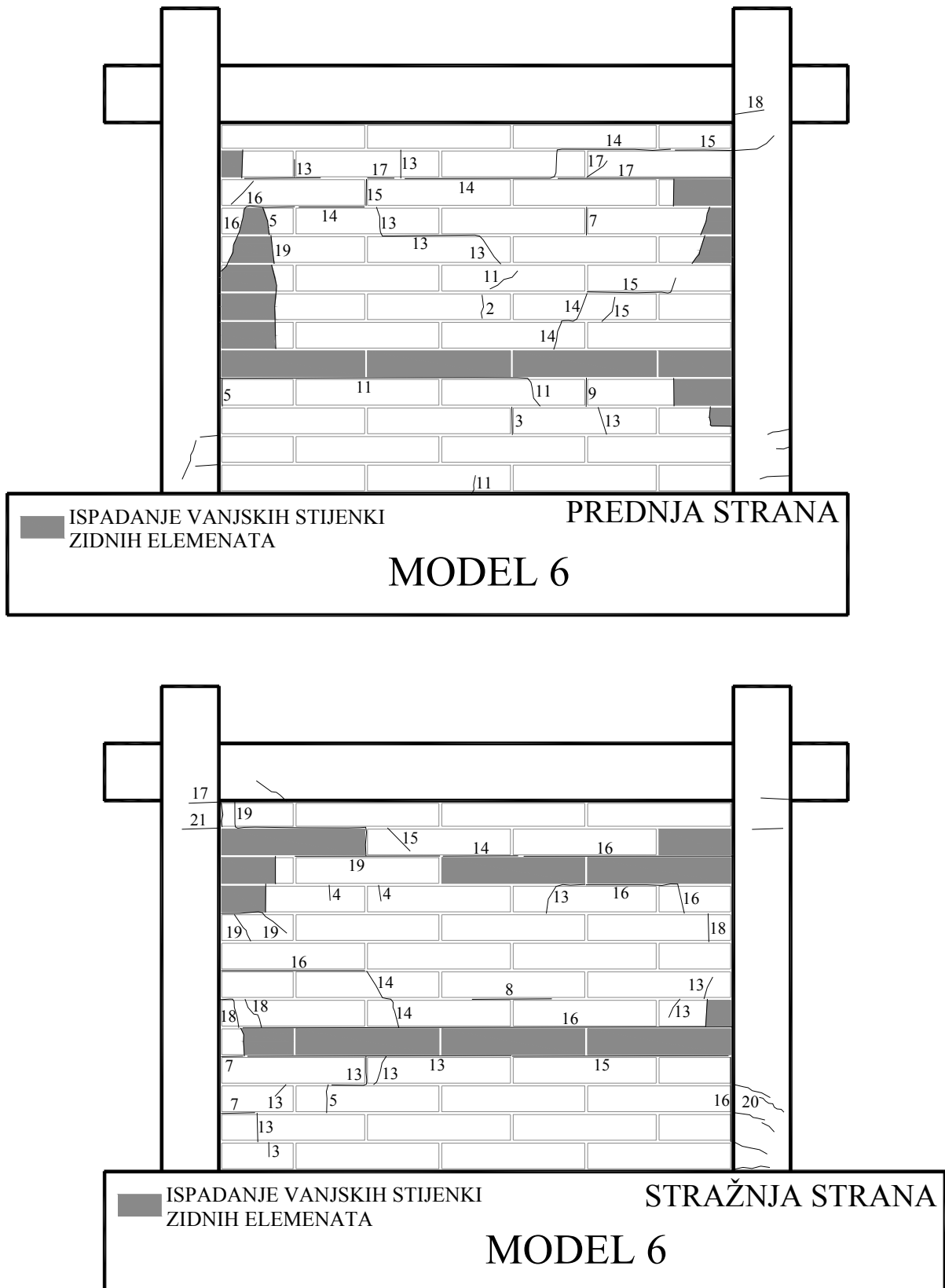
Ipak, došlo je do sloma drobljenjem materijala zidnoga ispuna u blizini spoja grede i stupa, a primijećene su i pukotine pri spoju stupova i grede armirano-betonskoga okvira, kao i na dnu stupova armirano-betonskoga okvira.



Slika 4.36 Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 4 (kod 0,84% katnog pomaka)



Slika 4.37 Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 5 (kod 0,51% katnog pomaka)



**Slika 4.38** Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 6 (kod 1,68% katnog pomaka)

#### 4.5.1.4 Modeli GRUPE III (porobetonski blokovi MO2,5)

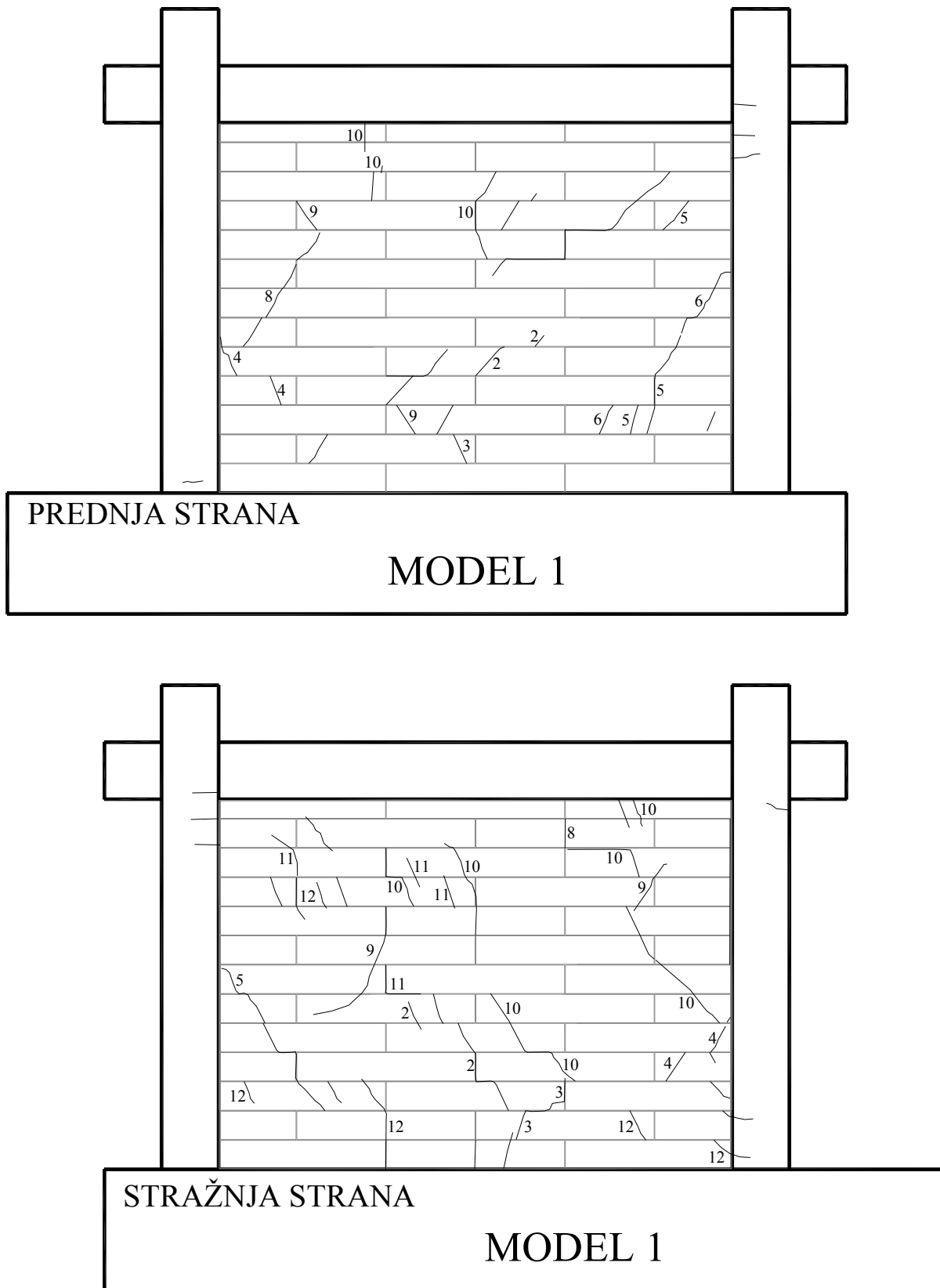
Kod modela GRUPE III u *tablici 4.19* prikazane su vrijednosti horizontalnih (poprečnih) sila s pripadajućim katnim pomacima u trenutku pojave prvih  $n$  zabilježenih pukotina.

**Tablica 4.19** Horizontalne sile u trenutku pojave prvih pukotina u zidnom ispunu

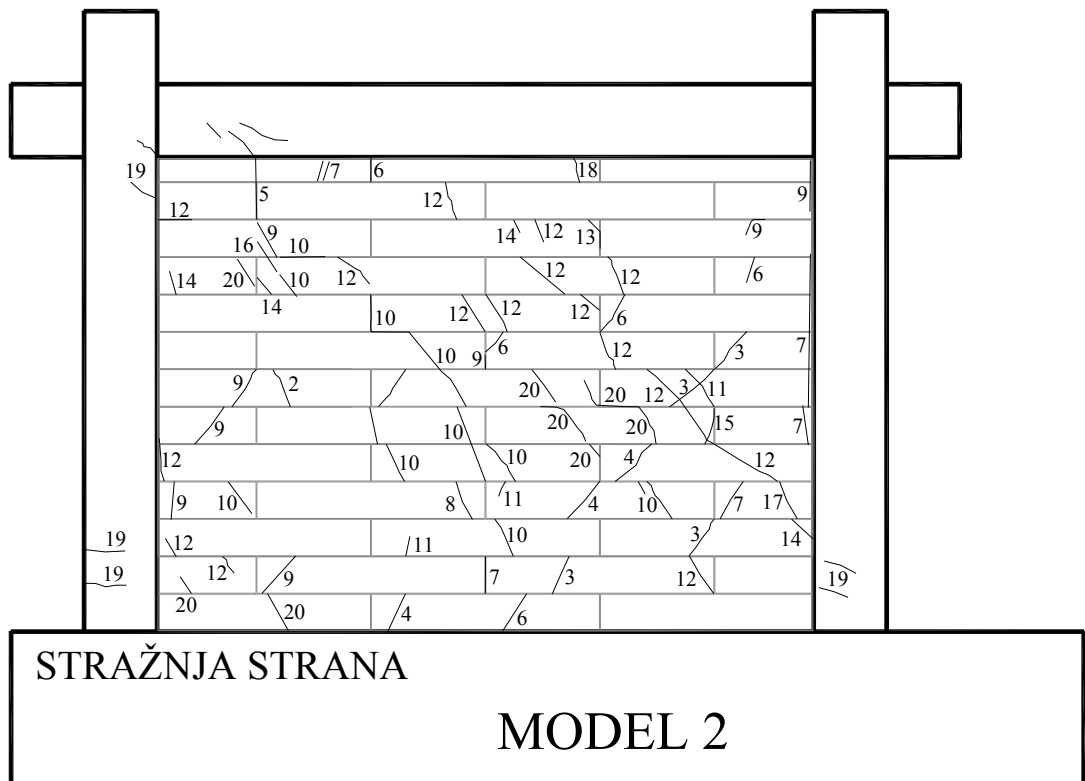
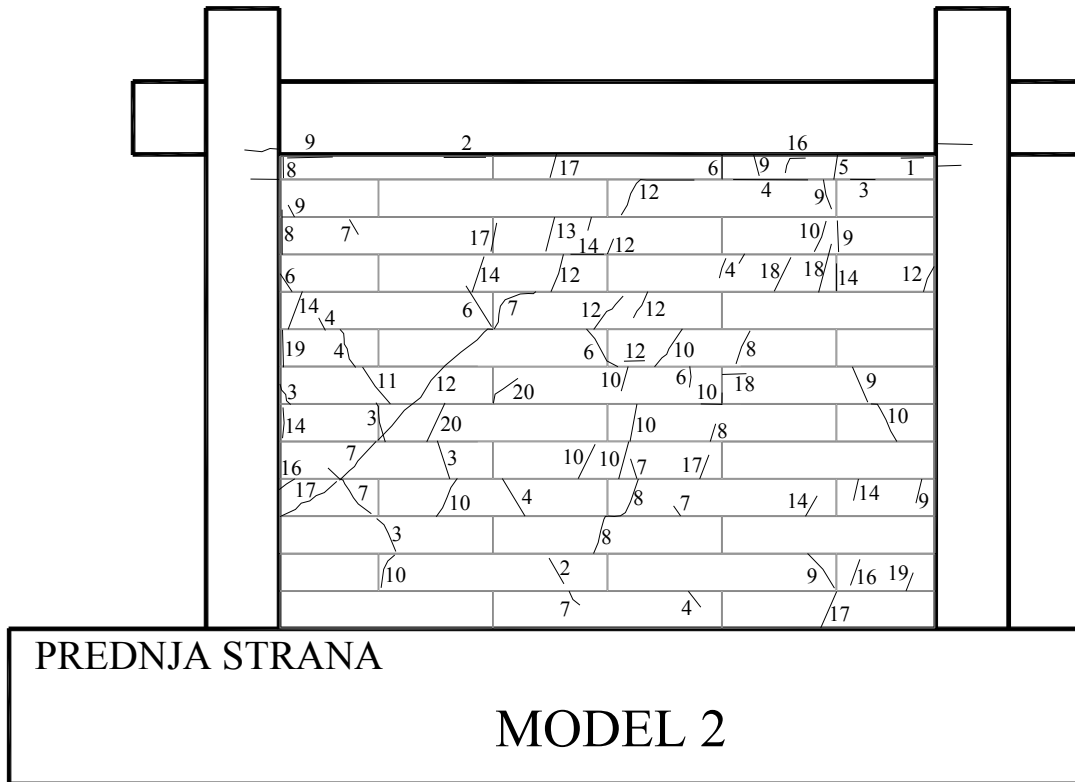
Grupa	GRUPA I					
Model	MODEL 7		MODEL 8		MODEL 9	
Pukotina br. [n]	H <sub>cr,n</sub> [kN]	IDR [%]	H <sub>cr,n</sub> [kN]	IDR [%]	H <sub>cr,n</sub> [kN]	IDR [%]
1	79	0,03	79	0,01	137	0,06
2	146	0,05	-150	-0,06	-149	-0,05
3	153	0,06	-157	-0,08	148	0,08
4	175	0,08	-168	-0,10	-159	-0,07
5	-197	-0,09	167	0,07	157	0,09
6	208	0,24	-176	-0,13	-168	-0,08
7	206	0,27	-187	-0,19	169	0,11
8	213	0,33	187	0,11	-180	-0,11
9	222	0,63	-198	-0,22	177	0,14
10	199	0,66	193	0,17	-186	-0,31
11	200	0,73	-210	-0,27	187	0,28
12	215	0,80	193	0,36	-196	-0,37
13	-	-	194	0,41	197	0,32
14	-	-	194	0,48	-207	-0,56
15	-	-	201	0,55	207	0,50
16	-	-	205	0,59	209	0,54
17	-	-	210	0,66	214	0,61
18	-	-	221	0,72	218	0,68
19	-	-	239	0,78	223	0,74
20	-	-	238	0,81	232	0,80
21	-	-	-	-	239	0,83

Iz *tablice 4.19*, možemo iščitati kako su se prve pukotine kod modela GRUPE III uvijek javljale pri katnom pomaku od približno 0,06%, kao i kod GRUPE I. Maksimalnu nosivost modela GRUPE III teško je procijeniti, nalazi se između 0,80 i 1,00% katnoga pomaka. Na *slikama 4.39-4.41* prikazani su konačni oblici pukotina pri razinama katnih pomaka od oko 0,80-0,83%. Kod modela GRUPE III pukotine su nastajale u zidnom ispunu po dijagonali zidnoga ispuna, što je s promjenama smjera opterećivanja rezultiralo X pukotinama. Povećanje horizontalne (poprečne) sile dovelo je do pojave horizontalnih kliznih pukotina po sljubnicama u gornjoj polovini zidnoga ispuna, ali ne u tolikoj mjeri kao u sljubnicama morta kod zidova od blok opeke. Nije zabilježeno odvajanje elemenata okvira i zidnoga ispuna. Konačni oblik pukotina bio je razgranat po cijelome zidnom ispunu. Zidni ispun izgrađen od porobetonskih blokova spojenih ljepilom ima drugačiju strukturu odnosno,

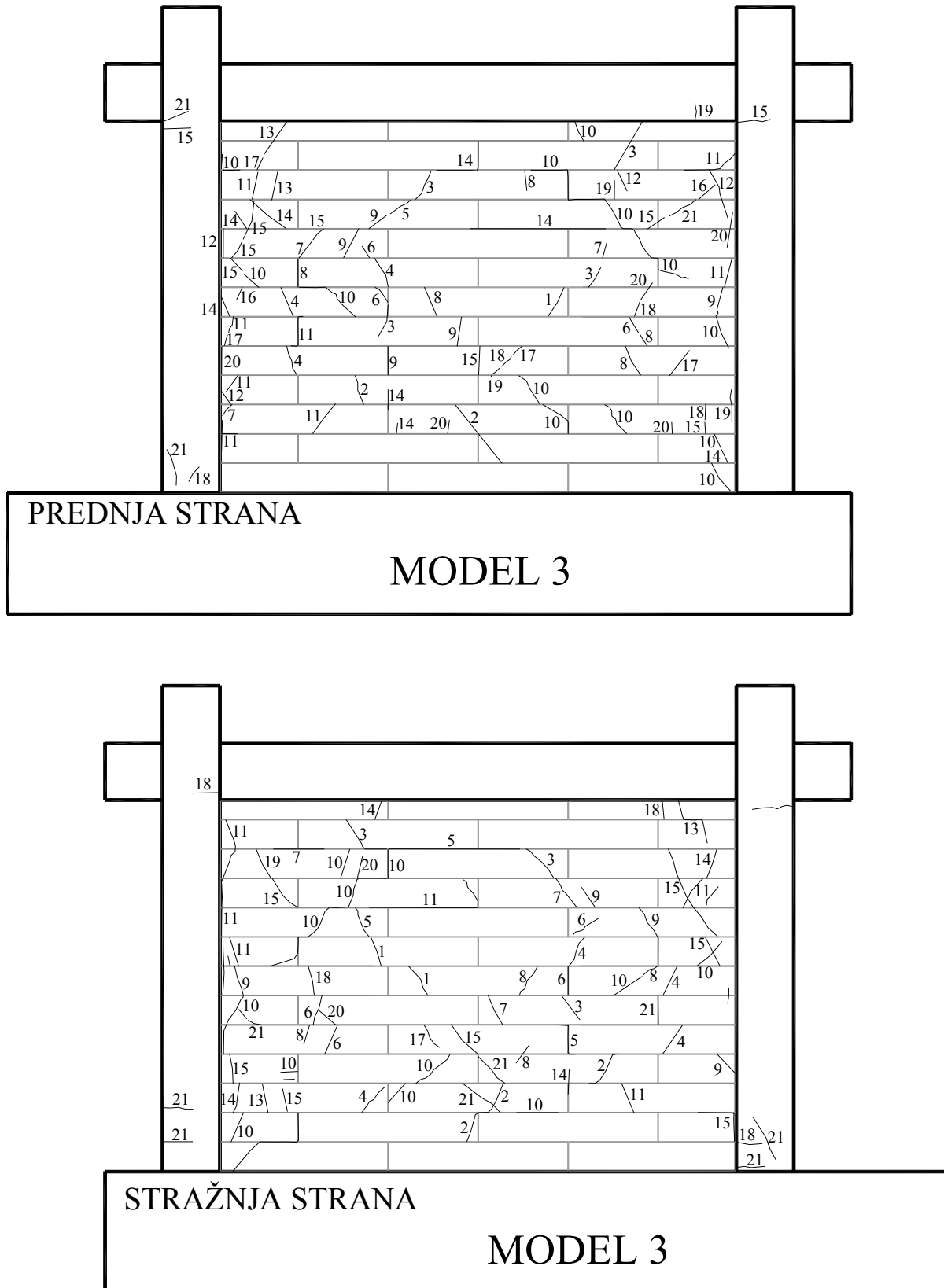
jaki mort i slabi zidni element. Stoga je oblik pukotina bio bitno različit od prethodne dvije GRUPE. Pri kraju ispitivanja pukotine su se pojavile i pri dnu, odnosno vrhu stupova armirano-betonskog okvira (spoju stupova i grede).



Slika 4.39 Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 1 (kod 0,80% katnog pomaka)



Slika 4.40 Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 2 (kod 0,81% katnog pomaka)



Slika 4.41 Prikaz konačnih oblika pukotina za MODEL 3 (kod 0,83% katnog pomaka)



#### 4.5.1.5 Model GRUPE IV (prazan armirano-betonski okvir)

Kod modela GRUPE IV, tj. praznoga armirano-betonskoga okvira pukotine su se javljale pri dnu stupa, i s jedne i s druge strane. Povećanjem horizontalne (poprečne) sile pukotine su se sve više širile, čime se stvarao plastični zglob na spoju stupa i temeljne grede. Također, pri većim horizontalnim silama pukotine su se javljale i na spoju stupova i grede armirano-betonskoga okvira. Prikaz pukotina praznog armirano-betonskoga okvira dan je na slici 4.42.



Slika 4.42 Prikaz pukotina na MODELU 10

### 4.5.2 Histerežno ponašanje modela

Pri malim veličinama horizontalnog (poprečnog) opterećenja i poprečnih deformacija armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom djelovao je kao monolitni kompozitni konstrukcijski sustav (okvirni-zidni element). Uslijed povećanog početnog omjera krutosti armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom u odnosu na prazan armirano-betonski okvir, doprinos popustljivog armirano-betonskog okvira ukupnoj poprečnoj otpornosti bio je mali dok je glavninu poprečnog opterećenja preuzimao kruti zidni ispun. Međutim, povećanjem poprečnih deformacija slabiji zidni ispun više ne može nositi povećanu horizontalnu (poprečnu) silu. Širenjem pukotina u zidnome ispunu te razdvajanjem zidnoga ispuna na dva i više dijelova, armirano-betonski okvir se deformira ovisno o načinu razdvajanja te duljini preostalog područja kontakta između zidnoga ispuna i elemenata armirano-betonskoga okvira.

Histerezni odnos horizontalne sile i pomaka te dijagonalnih deformacija armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna za svaki model prikazan je na *slikama 4.43-4.52*. Na istim slikama prikazane su i primarne krivulje za horizontalnu silu i pomak, kao i vršne deformacije dijagonala armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna. Na sekundarnim osima prikazani su horizontalna sila u odnosu na ukupnu težinu (posmični odnos) i katni pomak. Težina, odnosno srednja ostvarena vertikalna sila na svakom od ispitivanih modela prikazana je na *slikama 4.20-4.29*. Na temelju deformacija dijagonala može se odrediti trenutak početka odvojenog djelovanja armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna. One potvrđuju prethodno opisano ponašanje odnosa horizontalna sila-pomak.

Krivulja histereze za sve modele dobivena je kao srednja vrijednost očitavanja horizontalnih LVDT\_a (mjerača pomaka) prema izrazu:

$$d=(LVDT\_HL+LVDT\_HD)/2 \text{ [mm]},$$

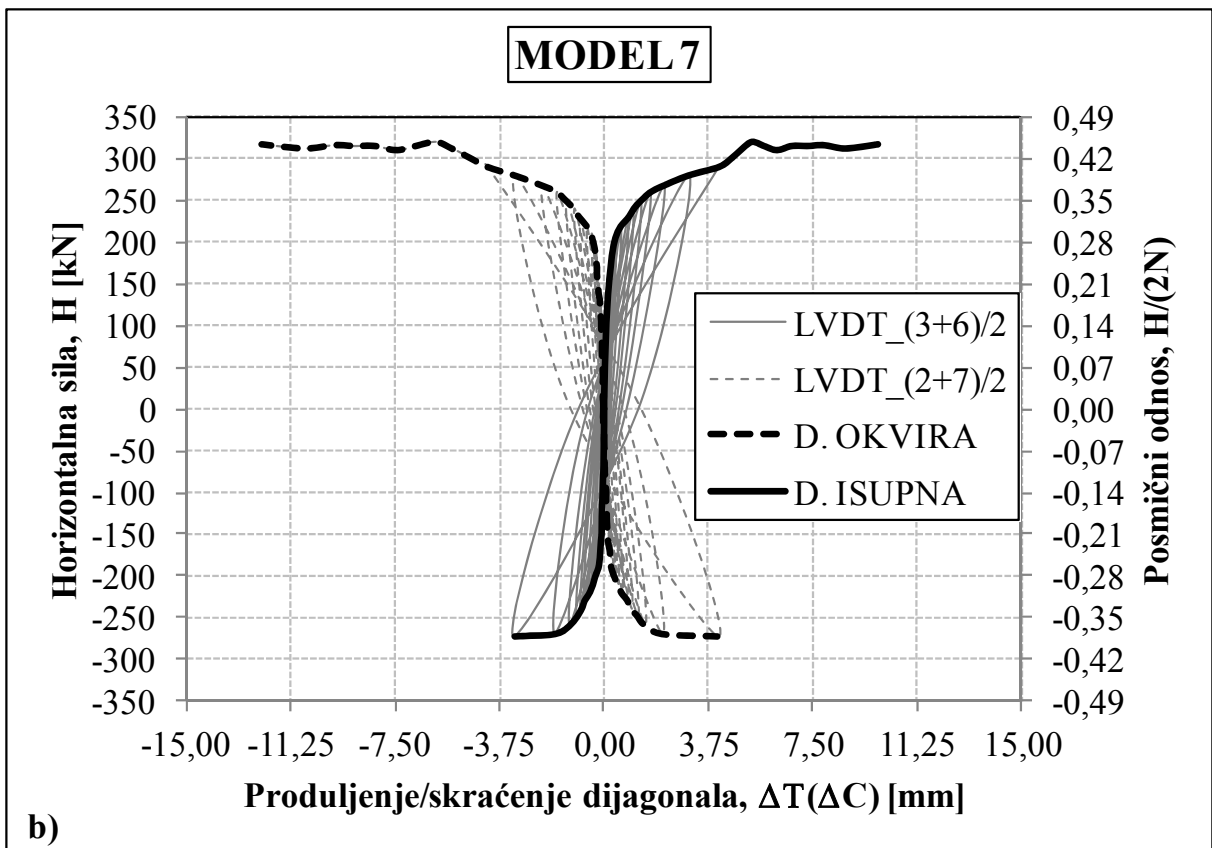
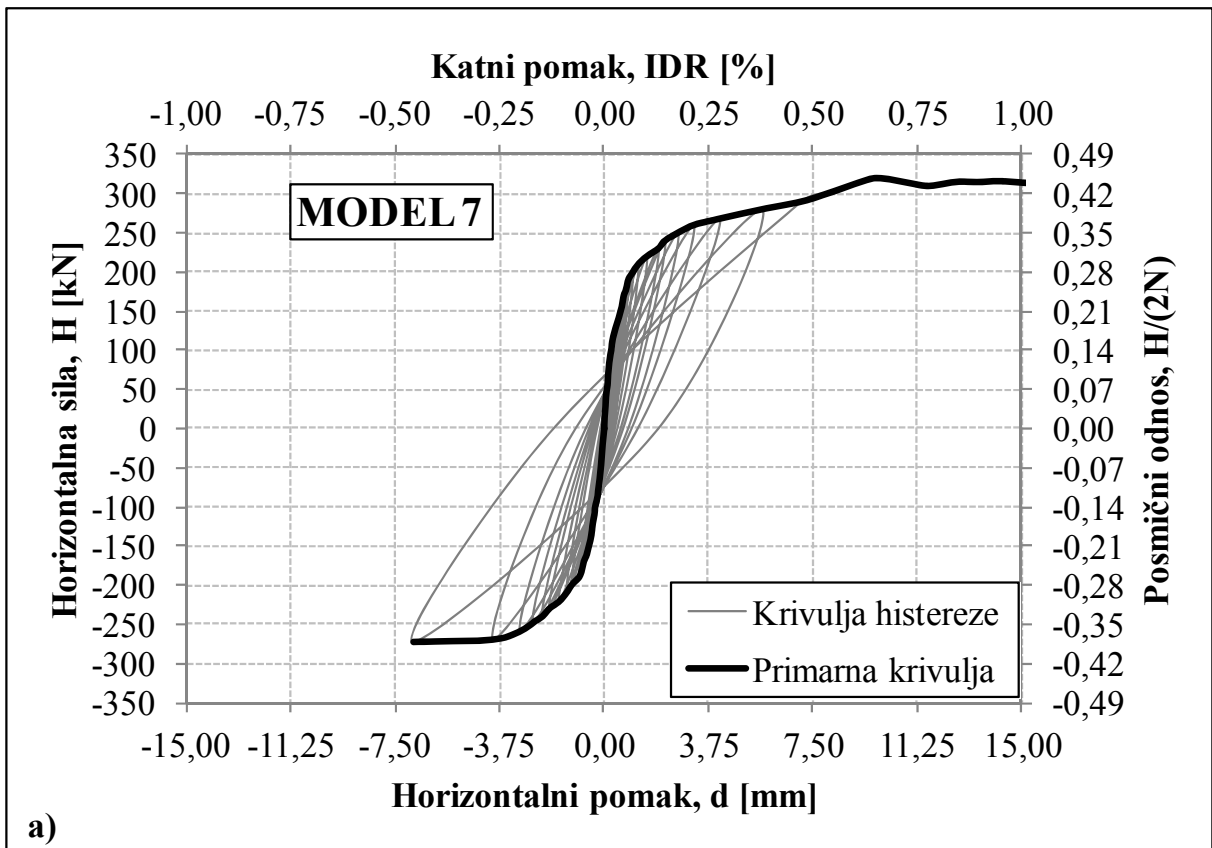
dok je katni pomak, IDR, izračunat za sve modele prema izrazu:

$$IDR=\{[(LVDT\_HL+LVDT\_HD)/2]*100\}/1500 \text{ [%]},$$

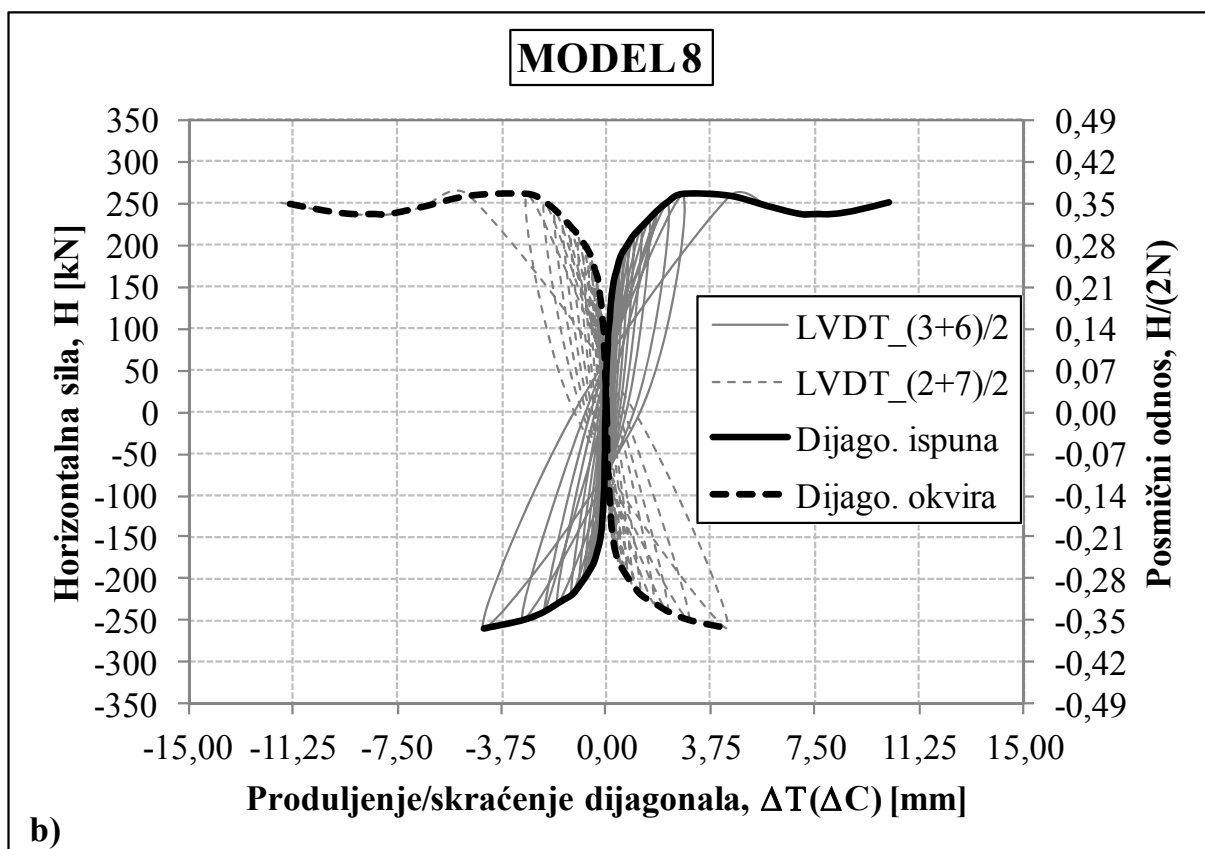
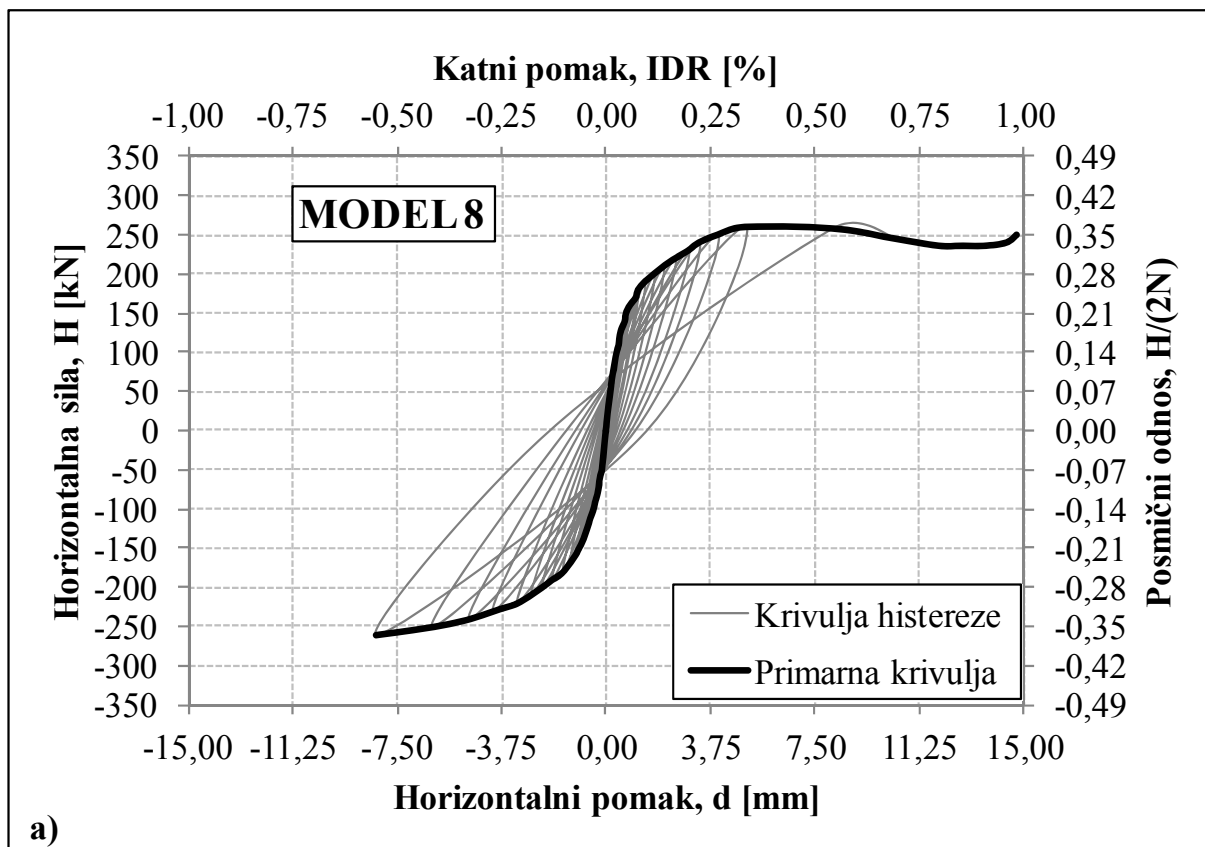
gdje je: LVDT\_HL i LVDT\_HD prema *slici 4.11*,  
1500 – visina modela [mm].

Primarne krivulje dobivene su za sve modele na osnovu krivulja histereze, kao ovojnica njihovih vršnih vrijednosti.

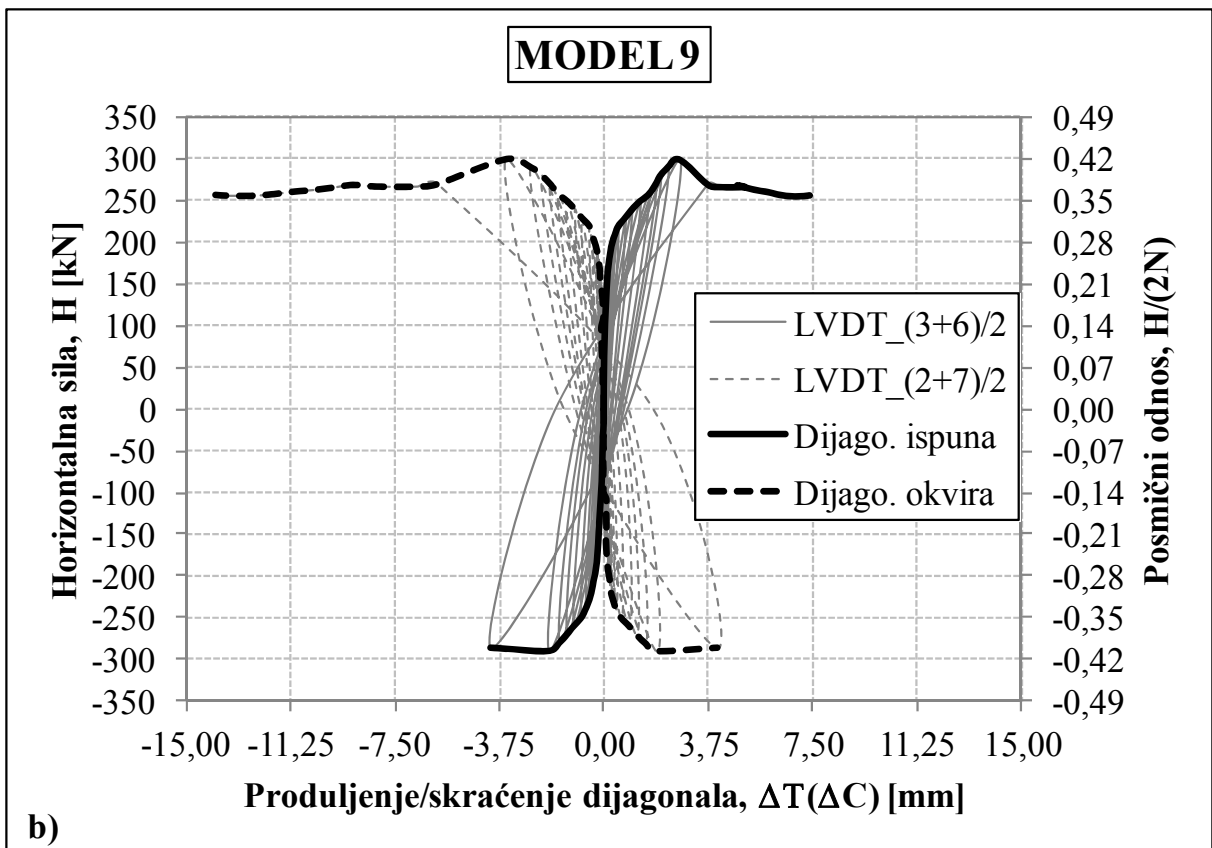
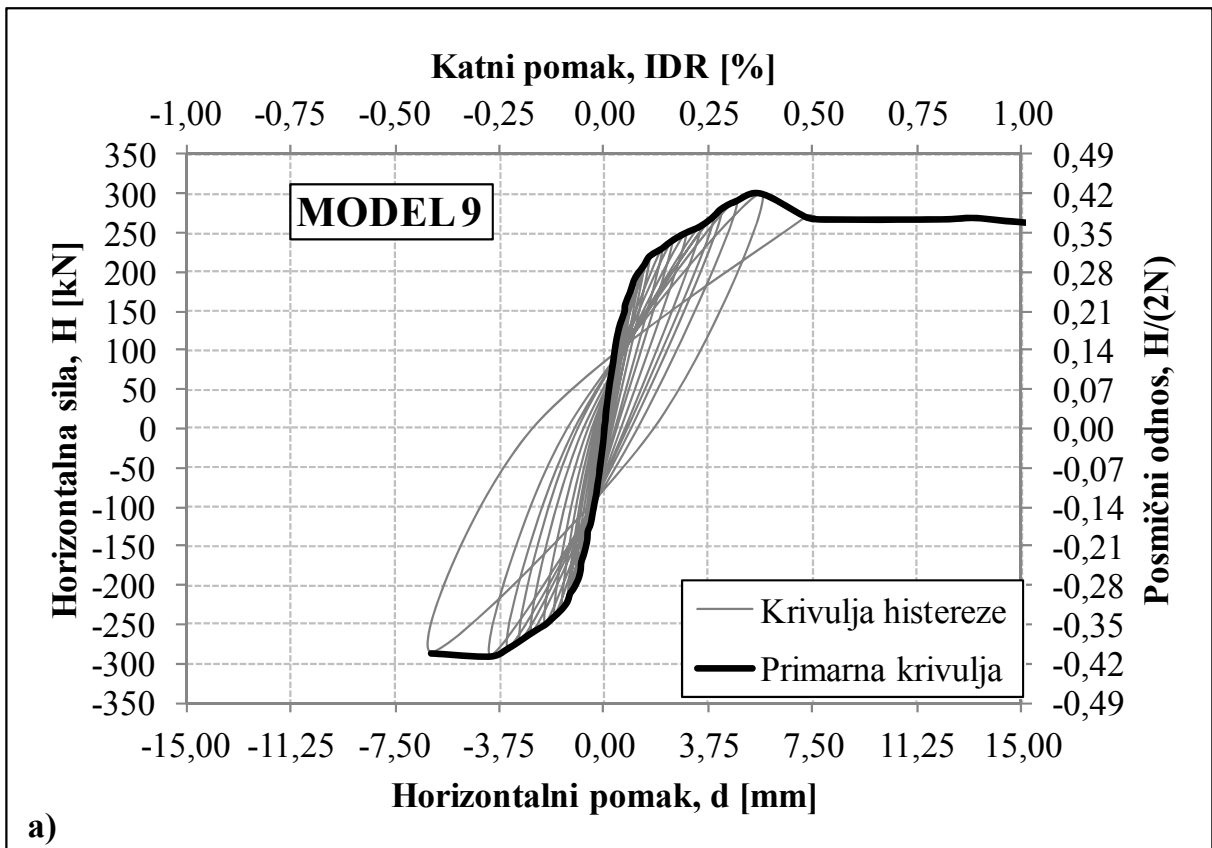
Vršne deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira (D. OKVIRA) i zidnoga ispuna (D. ISPUNA) dobivene su za sve modele kao srednja vrijednost očitavanja deformacija dijagonala armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna (LVDT\_i prema *slici 4.12*).



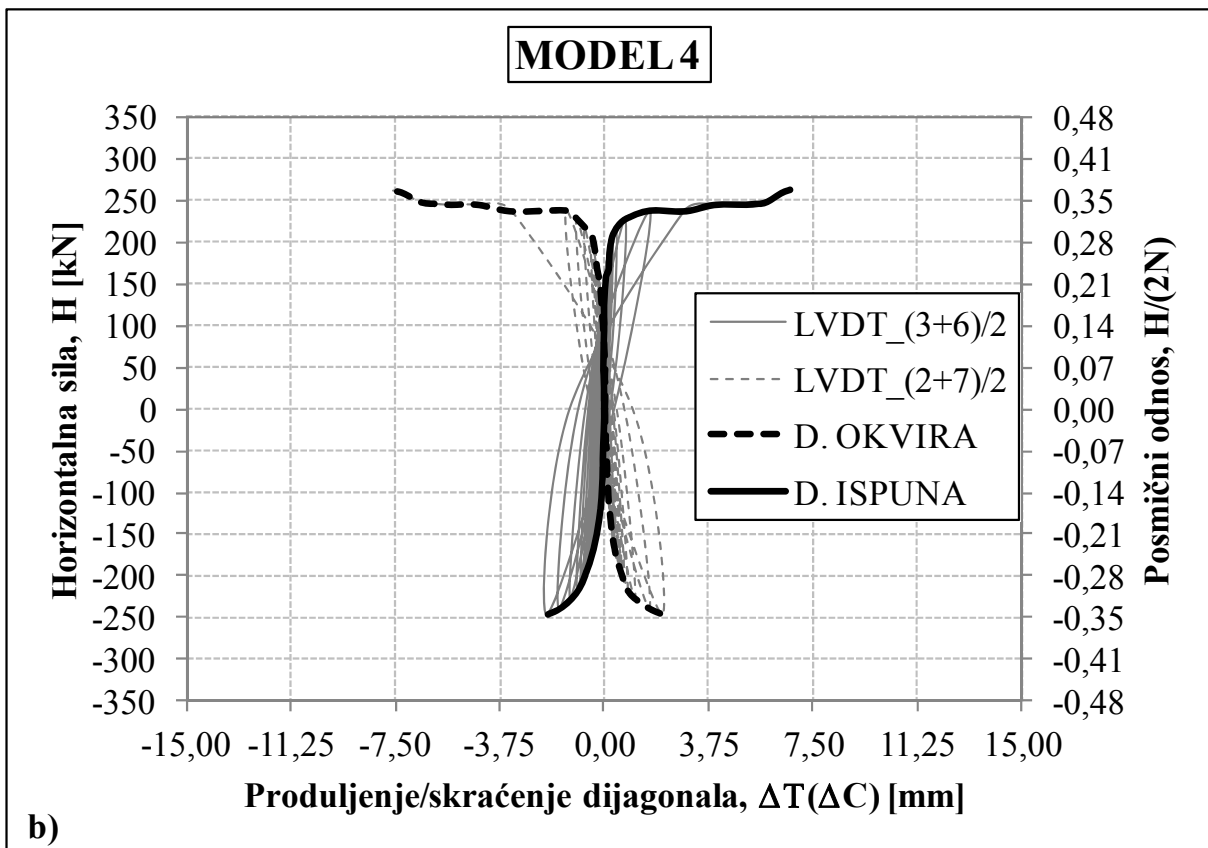
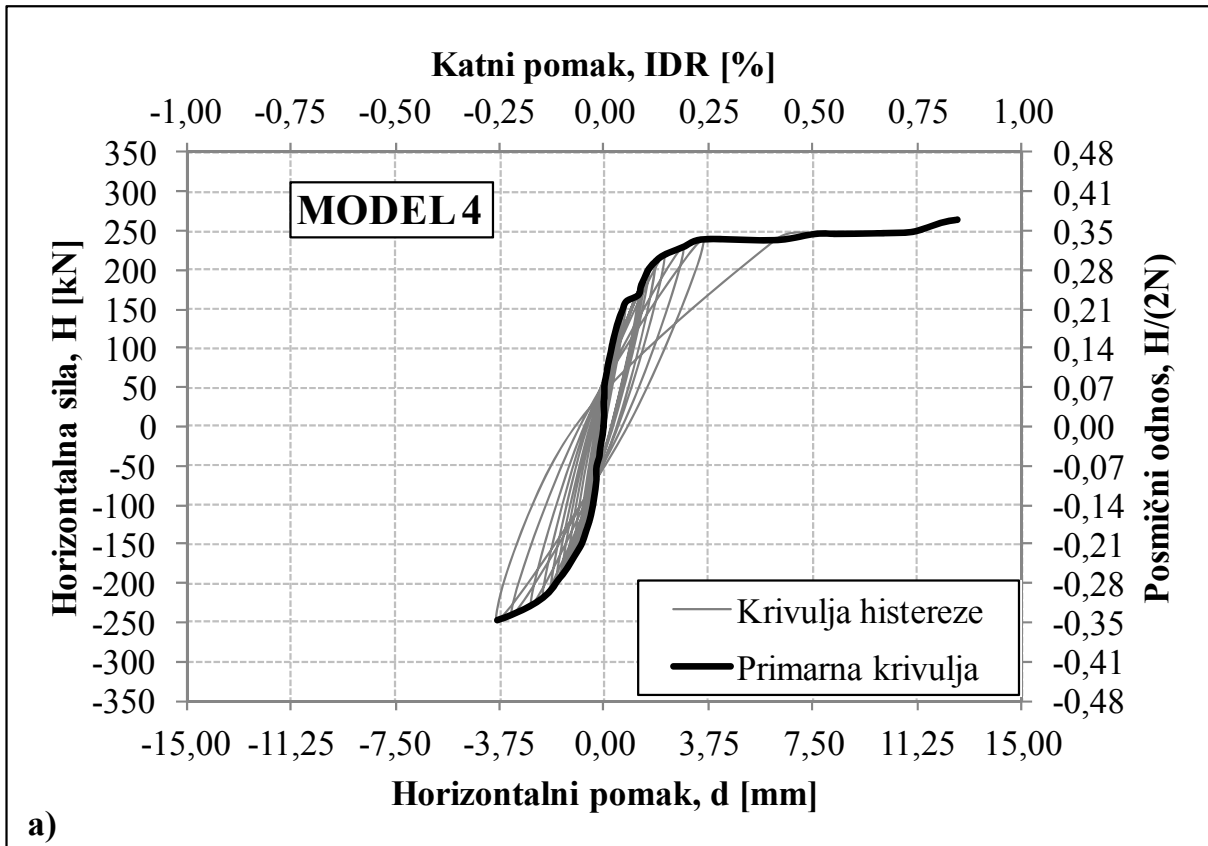
Slika 4.43 a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 7,  
b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 7



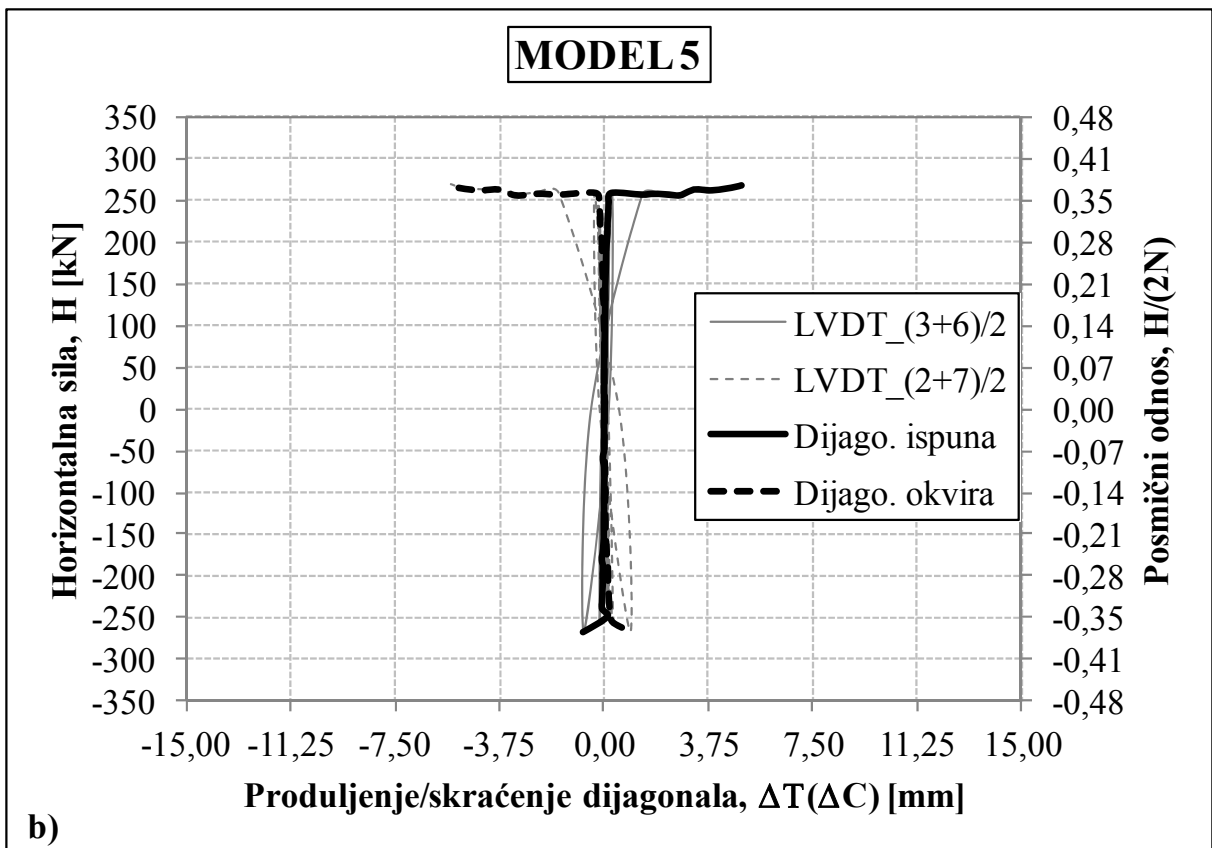
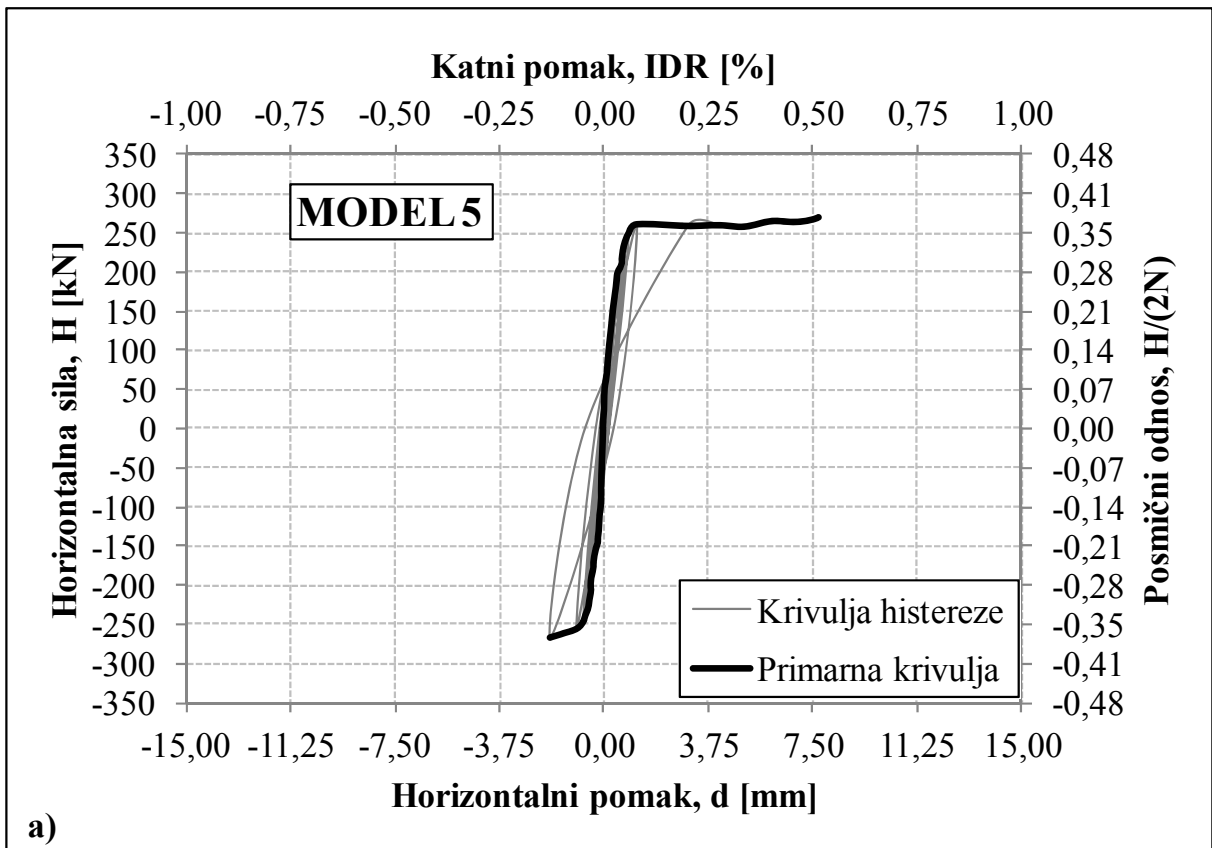
Slika 4.44 a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 8,  
b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 8



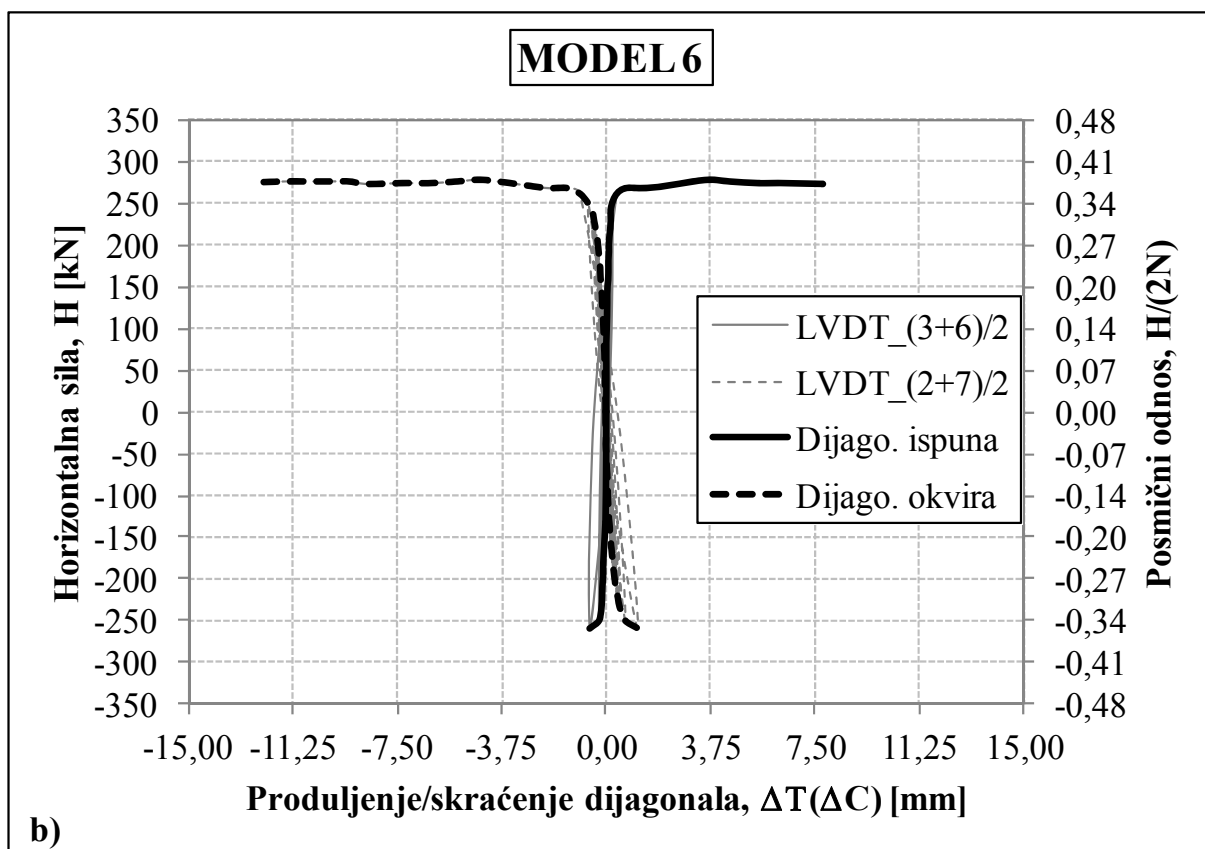
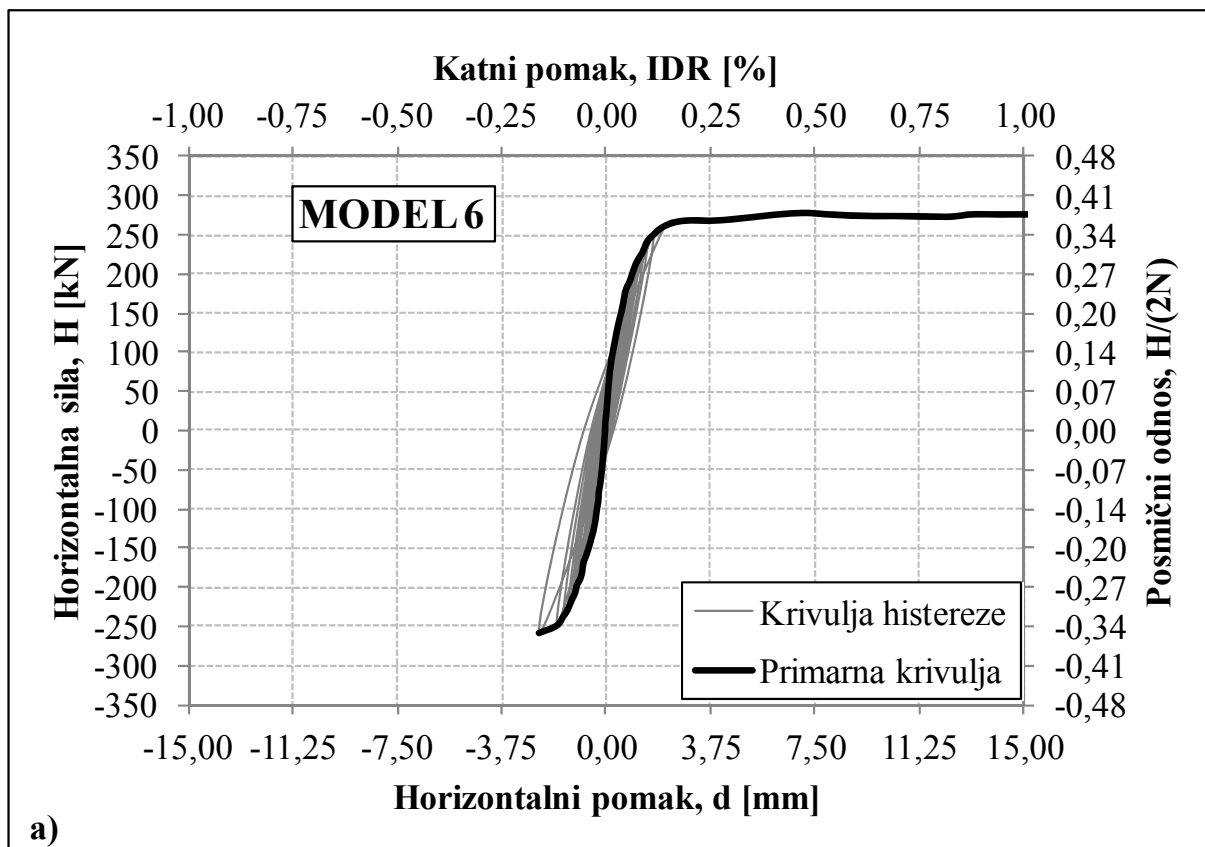
Slika 4.45 a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 9,  
b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 9



Slika 4.46 a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 4,  
b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispunu za MODEL 4

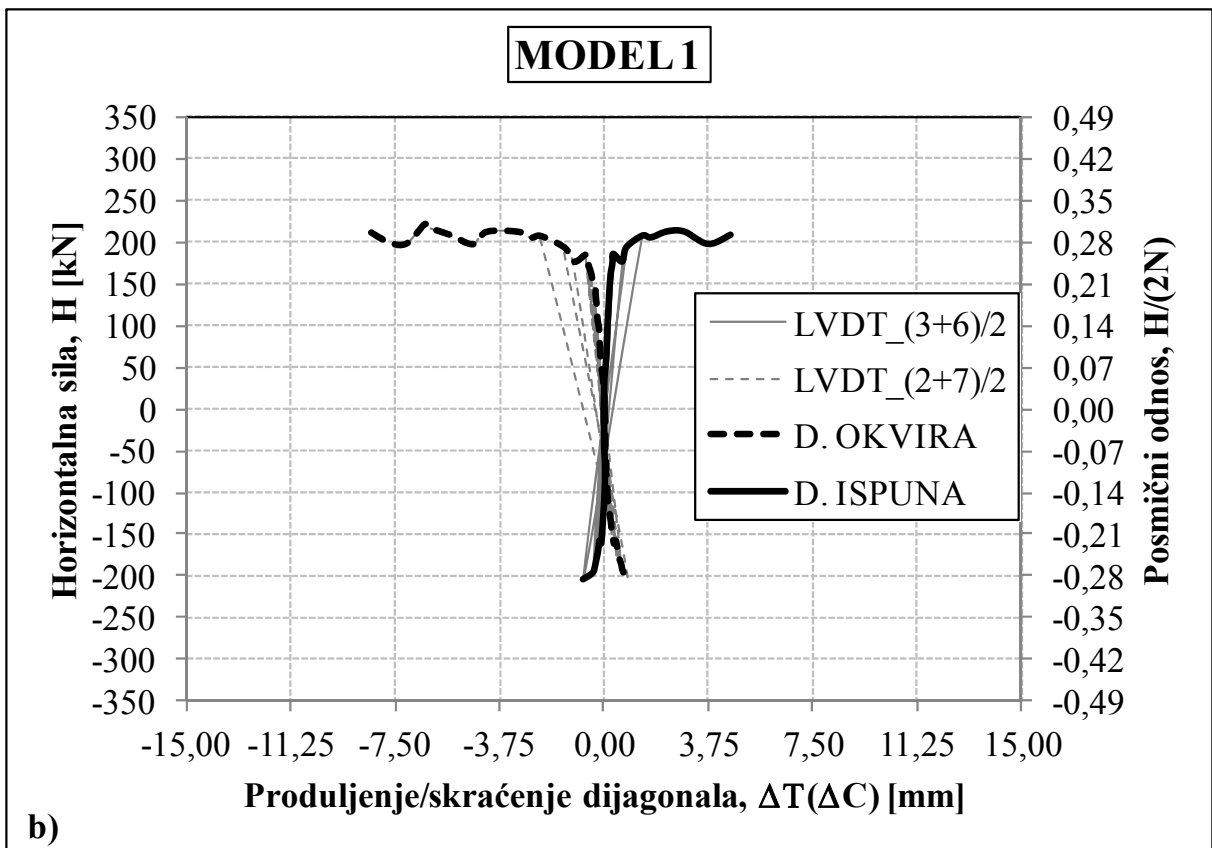
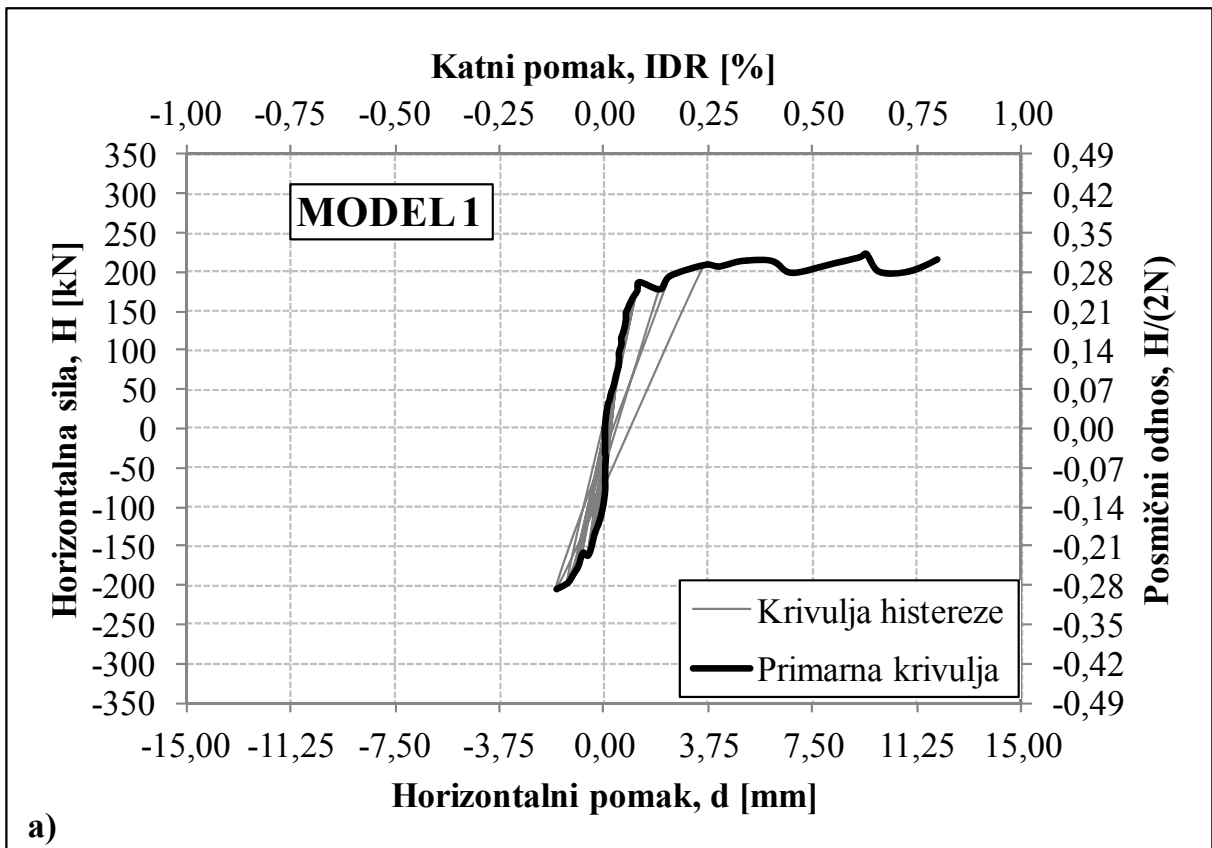


Slika 4.47 a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 5,  
b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 5

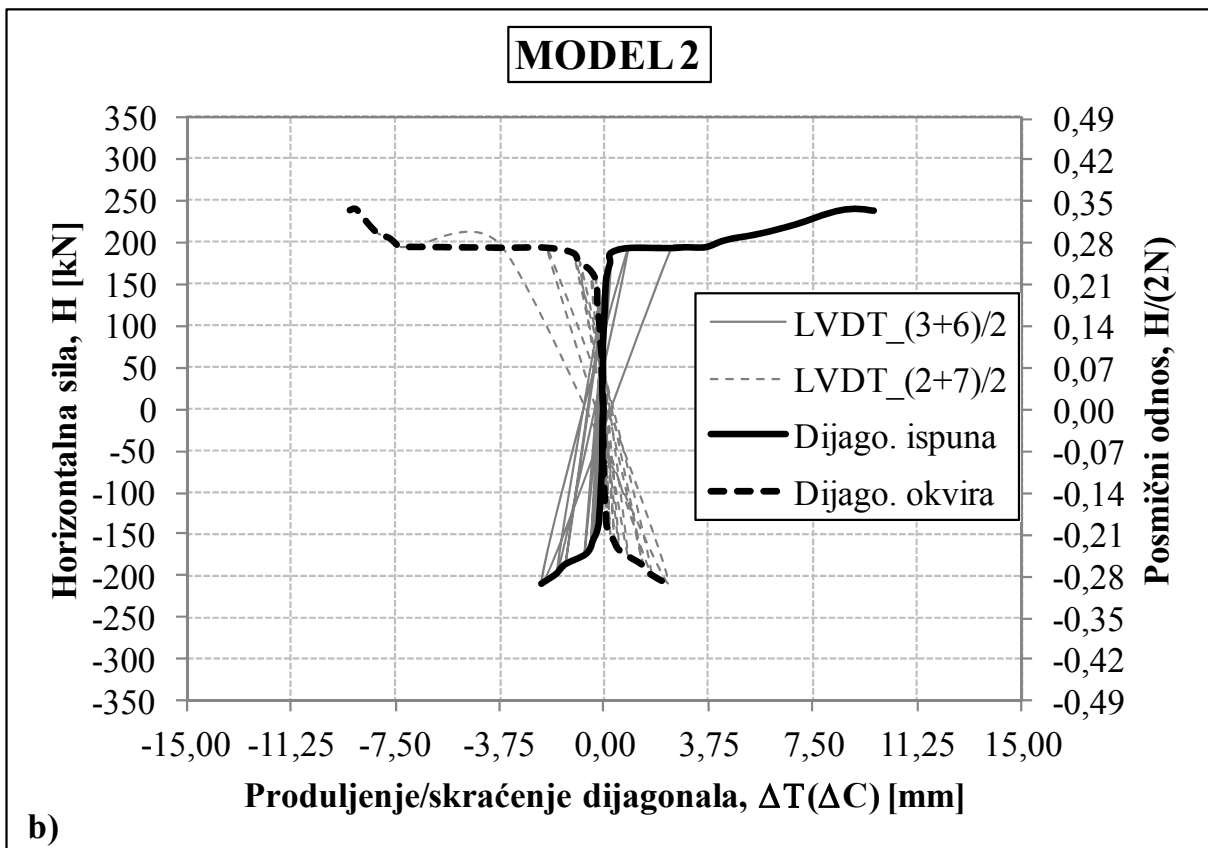
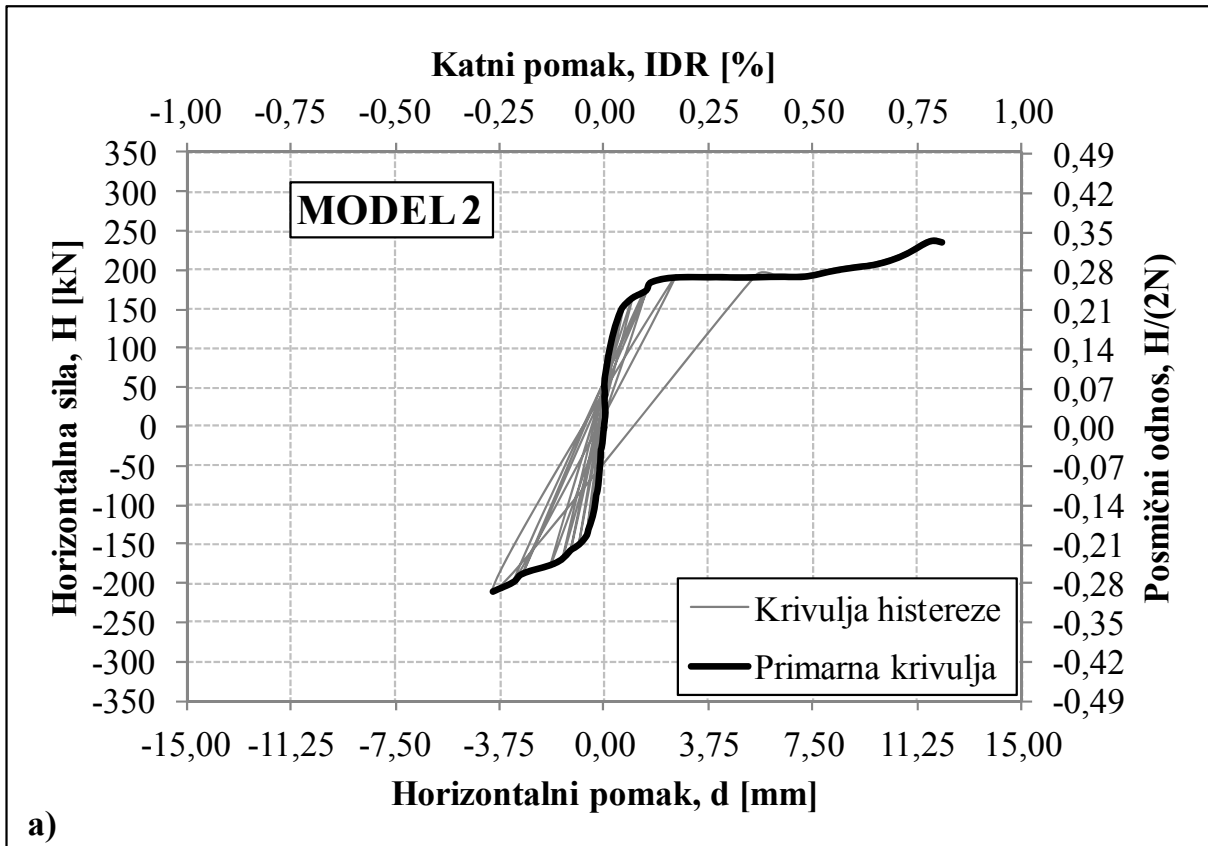


Slika 4.48 a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 6,  
b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 6

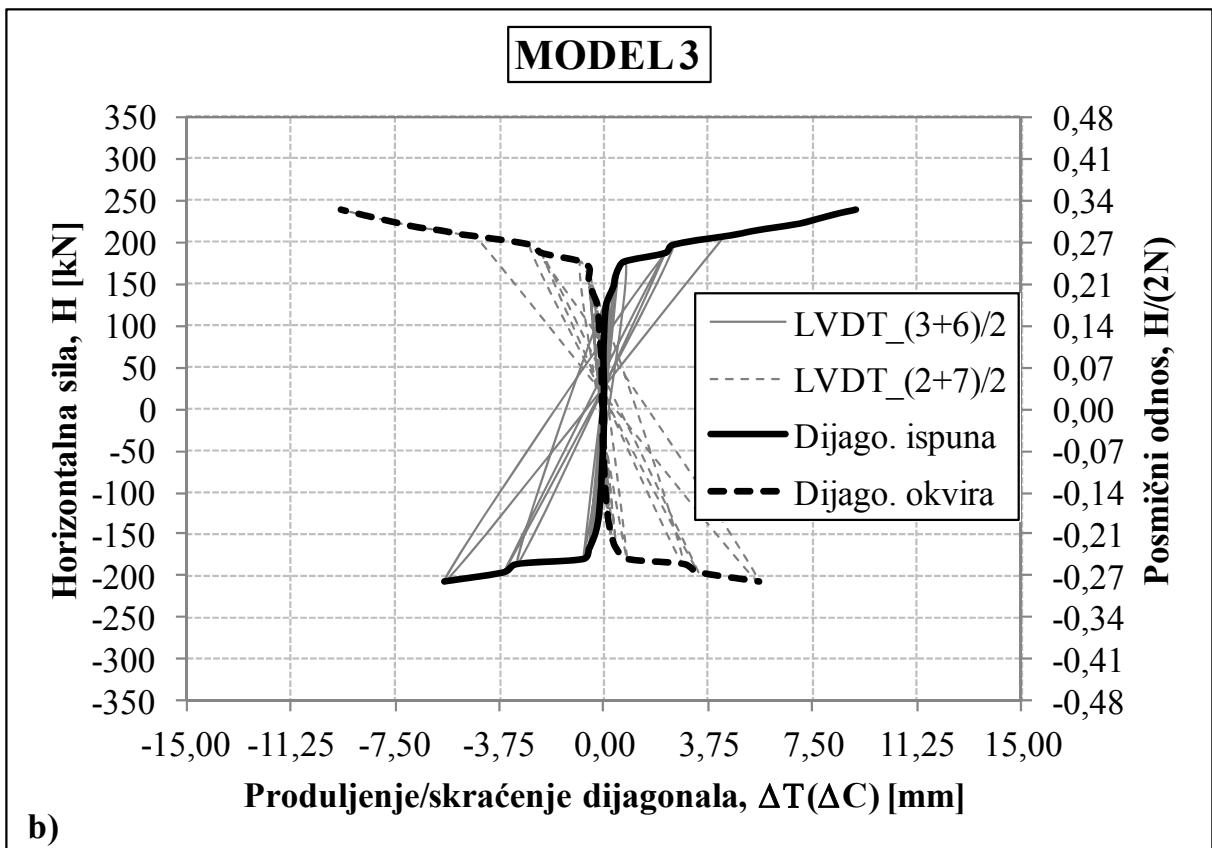
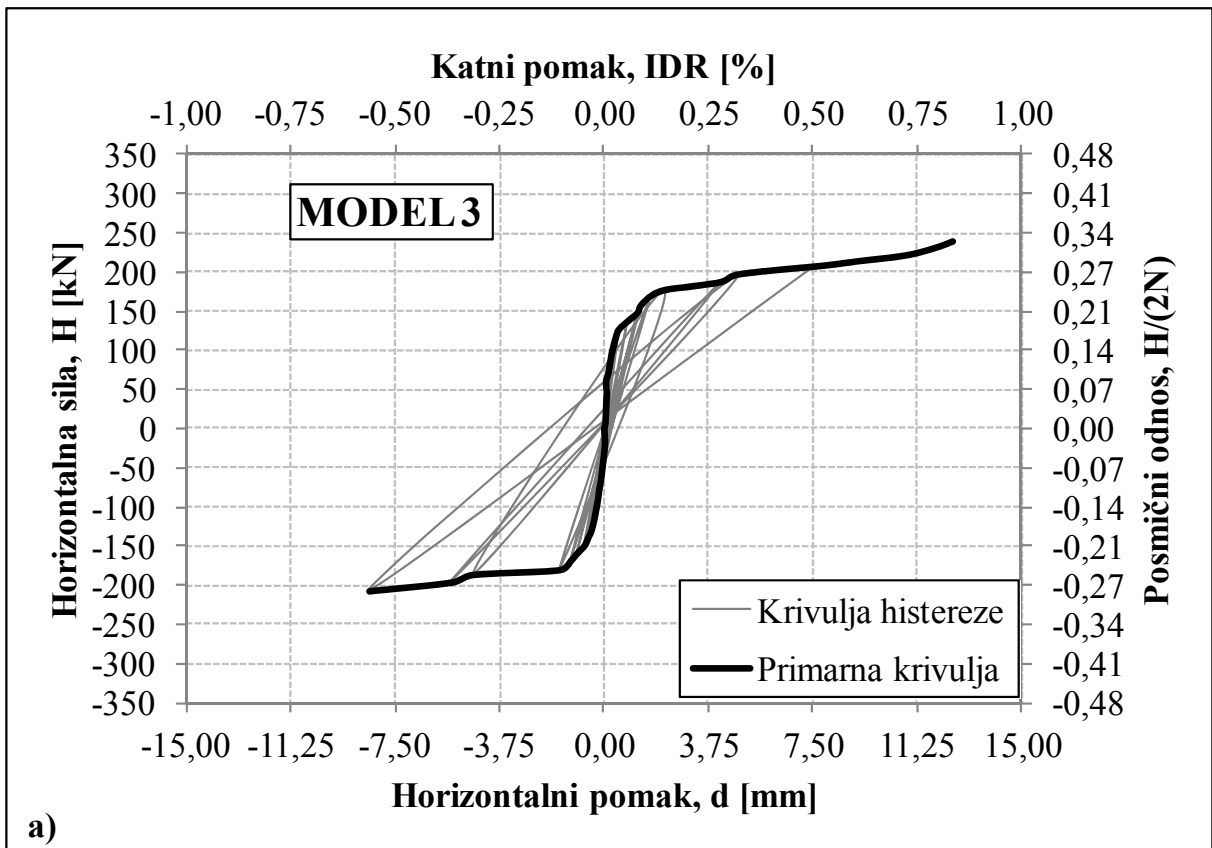




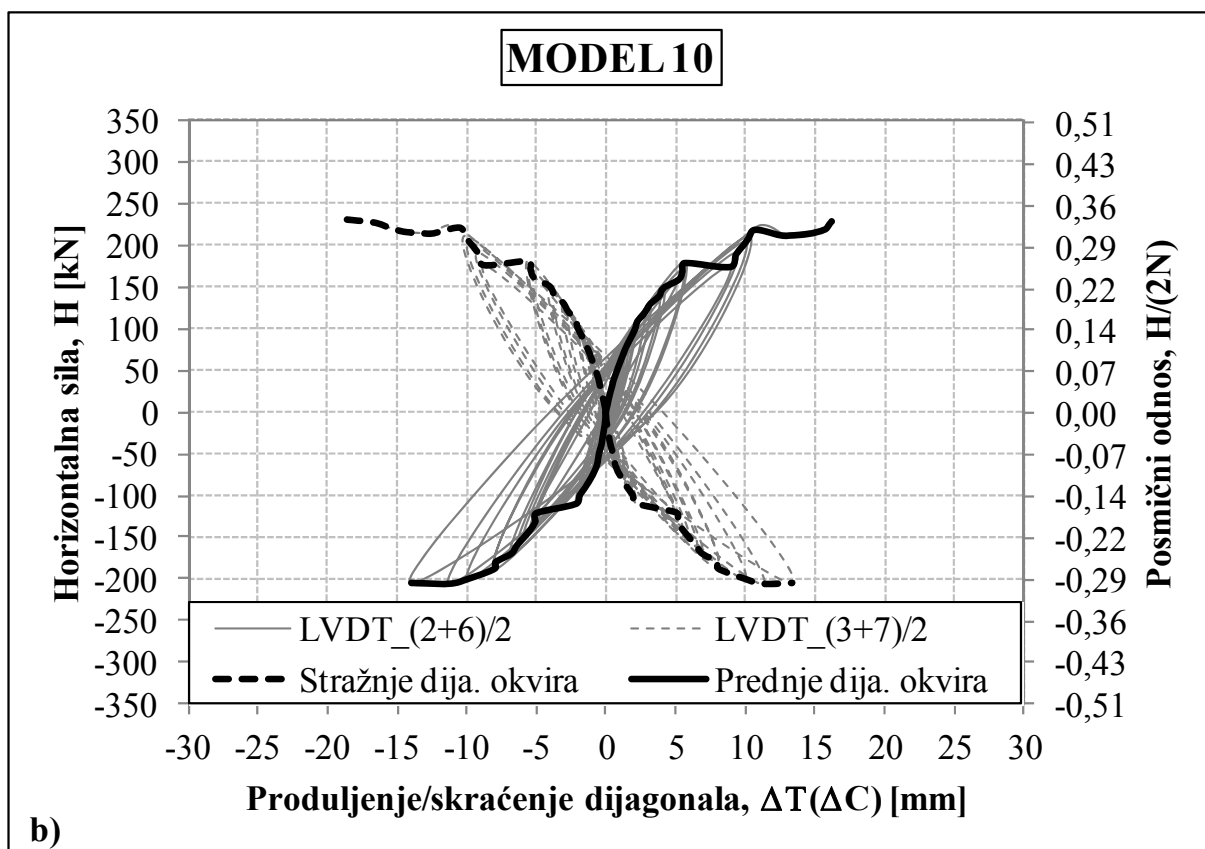
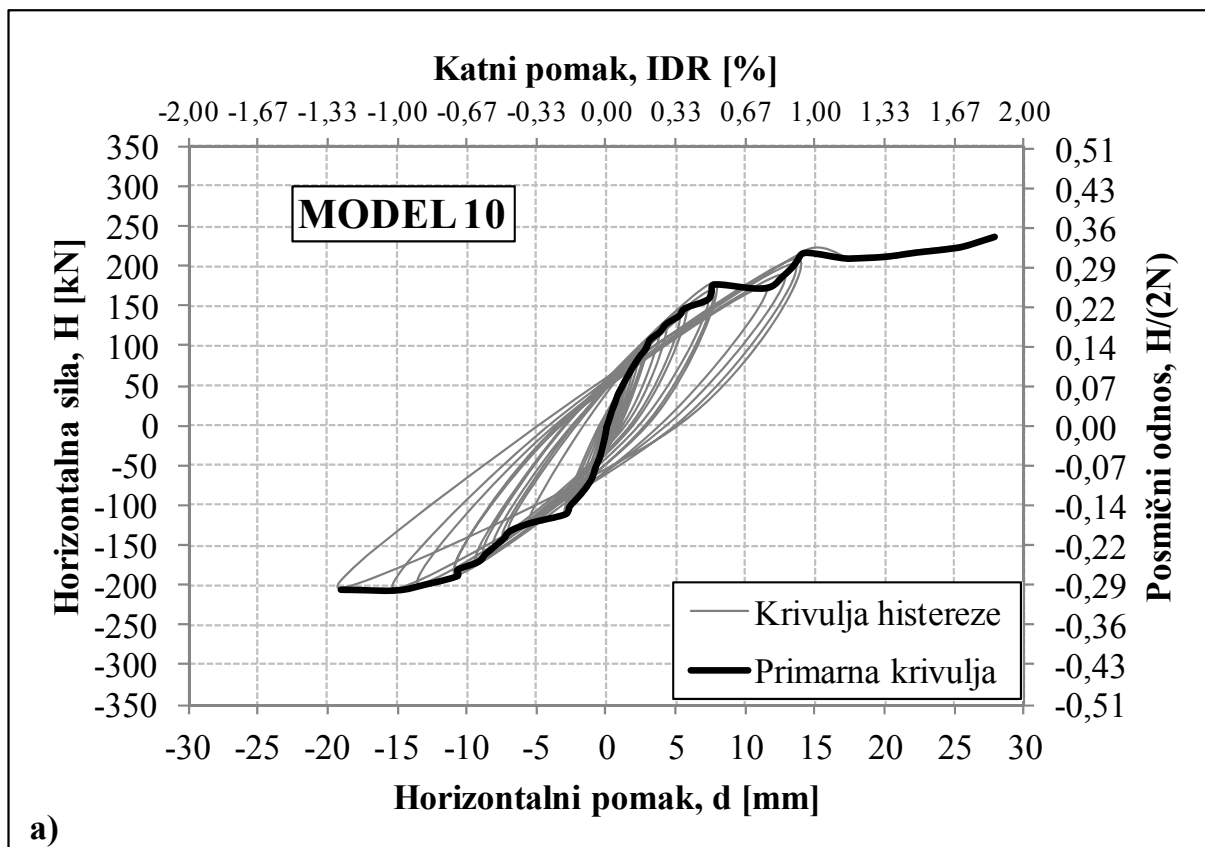
Slika 4.49 a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 1,  
b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 1



Slika 4.50 a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 2,  
b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 2



Slika 4.51 a) Krivulja horizontalna sila – pomak armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom za MODEL 3,  
b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira i njegovog zidnog ispuna za MODEL 3



Slika 4.52 a) Krivulja horizontalna sila – pomak praznog armirano-betonskog okvira (MODEL 10),

b) Deformacije dijagonala armirano-betonskog okvira za MODEL 10

#### 4.5.2.1 *Optimalizacija rezultata ispitivanja modela*

Na *slikama 4.53-4.56* prikazane su primarne krivulje modela za svaku od GRUPA, kao i optimalizirane primarne krivulje koje opisuju ponašanje modela svake GRUPE. Također, na *slikama 4.57-4.60* prikazane su krivulje deformacija dijagonala armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna modela svake GRUPE, kao i optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela za svaku GRUPU. Da bi se dobile optimalizirane primarne krivulje, kao i optimalizirane krivulje deformacija dijagonala koje opisuju ponašanje modela svake GRUPE, korišten je matematički programski paket MATLAB.

Optimalizirane krivulje za svaku od GRUPA dobivene su na osnovu funkcije "Optimal Fit of a Non-linear Function". Ona prikazuje optimalnu ugradnju nelinearnih funkcija na skupu podataka. Koristi FMINSEARCH, provedbom Nelder-Mead jednostranog algoritma (izravnom pretragom), kako bi se smanjila nelinearna funkcija nekoliko varijabli. Cilj je pronaći funkciju,  $y$ , s dva linearna i dva nelinearna parametra za podatke prema izrazu:

$$y=C(1) \exp (-\lambda(1) t)+ C(2) \exp (-\lambda(2) t). \quad (4.3)$$

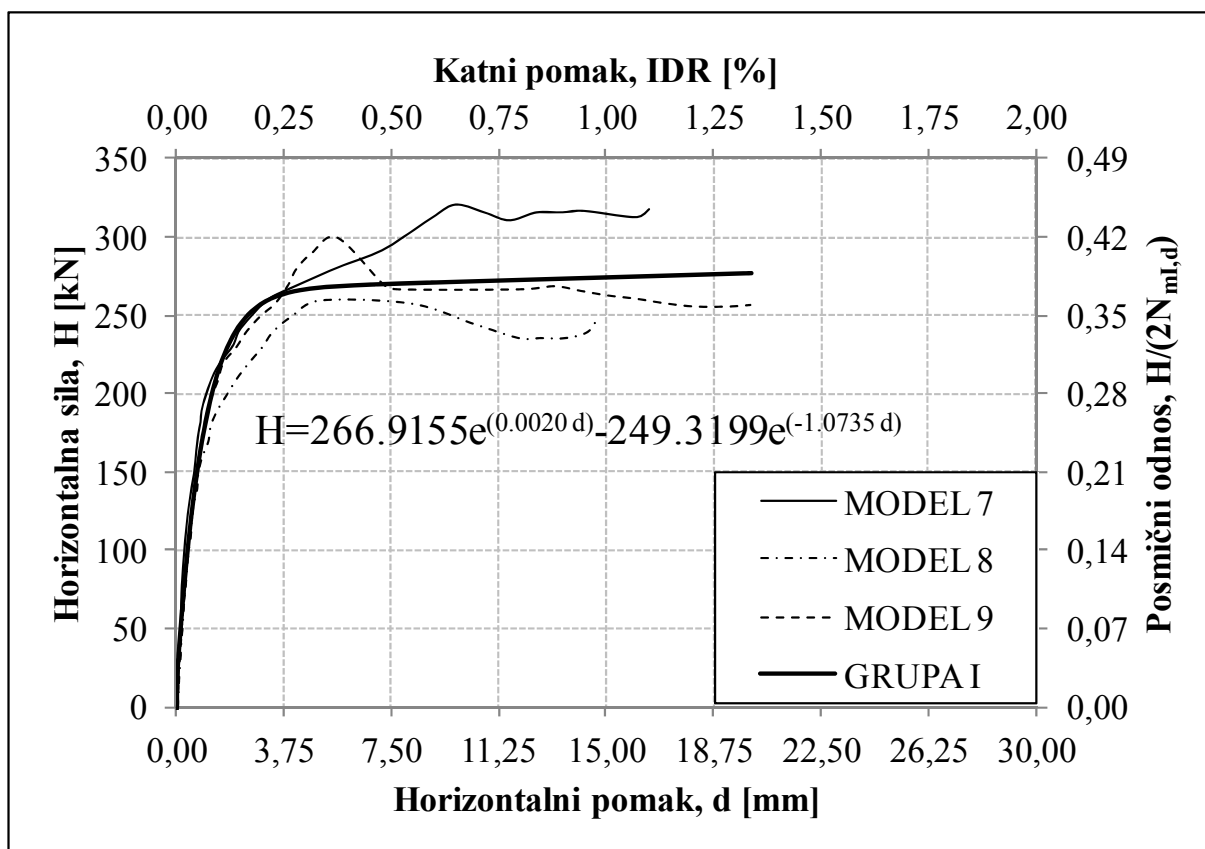
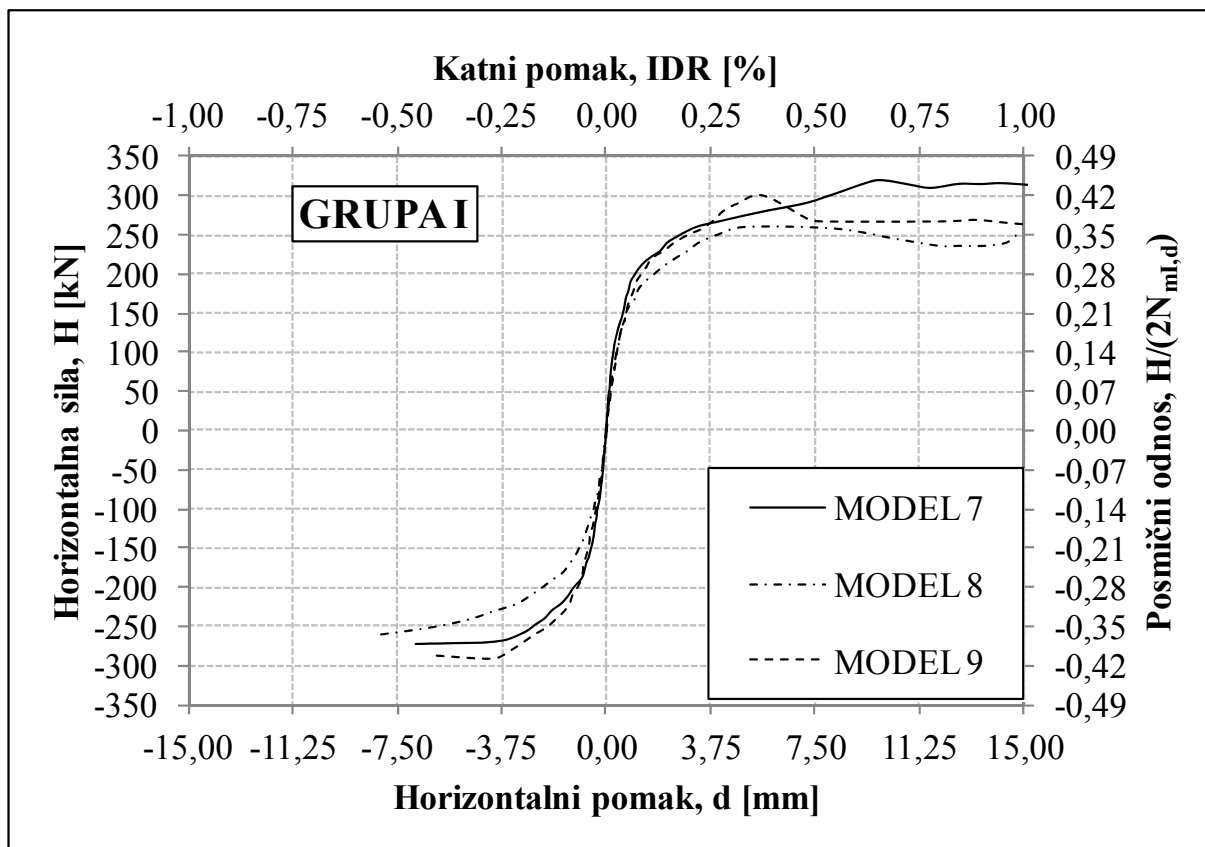
Za pronalazak ove funkcije, napravljene su FITFUN funkcije. S obzirom na nelinearni parametar ( $\lambda$ ) i podatke ( $t$  i  $y$ ), FITFUN izračunava pogrešku za ovu jednadžbu i obnovu linije ( $h$ ).

Na sekundarnim osima, na *slikama 4.53-4.60*, prikazan je posmični odnos horizontalne (poprečne) sile i vertikalnoga opterećenja, kao i katni pomak. Za vertikalno opterećenje uzeta je srednja vrijednost ostvarenoga vertikalnog opterećenja na svakom modelu pojedinih grupa (prema *tablici 4.15*).

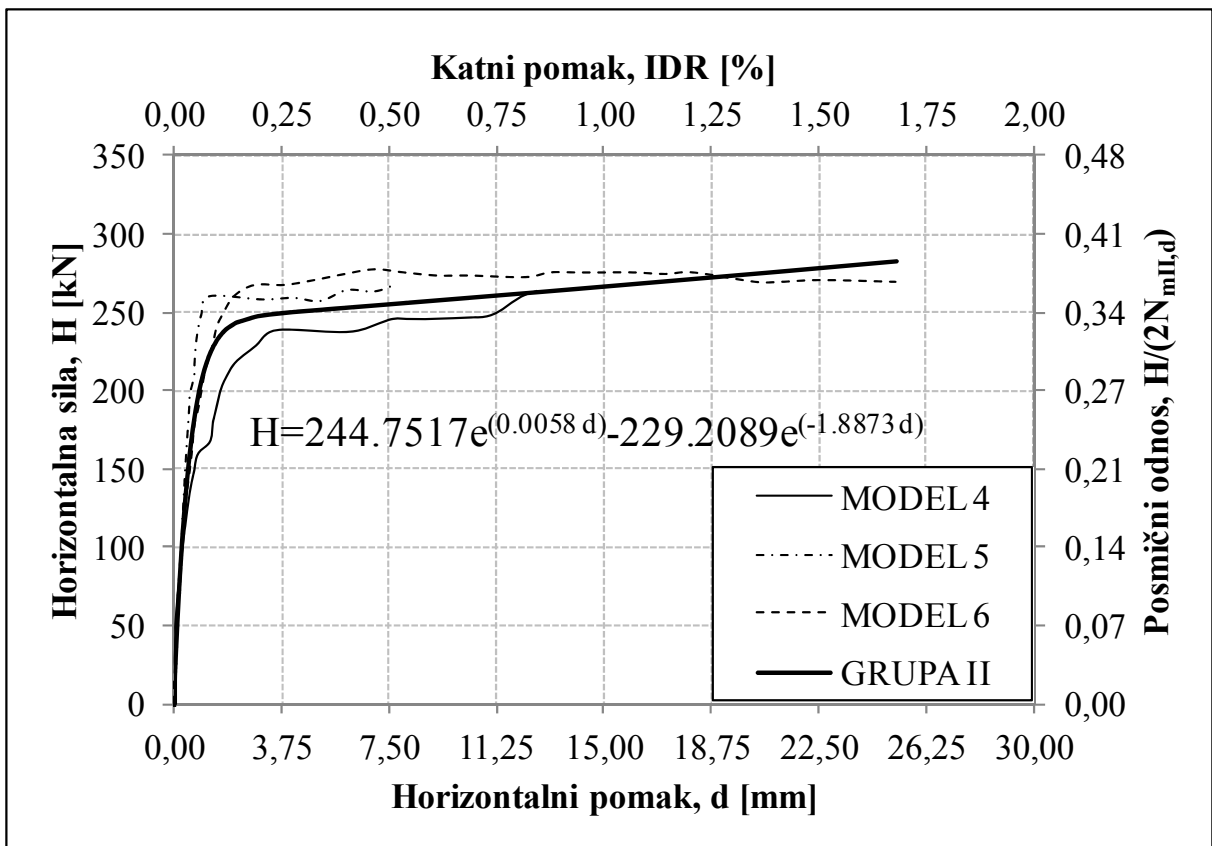
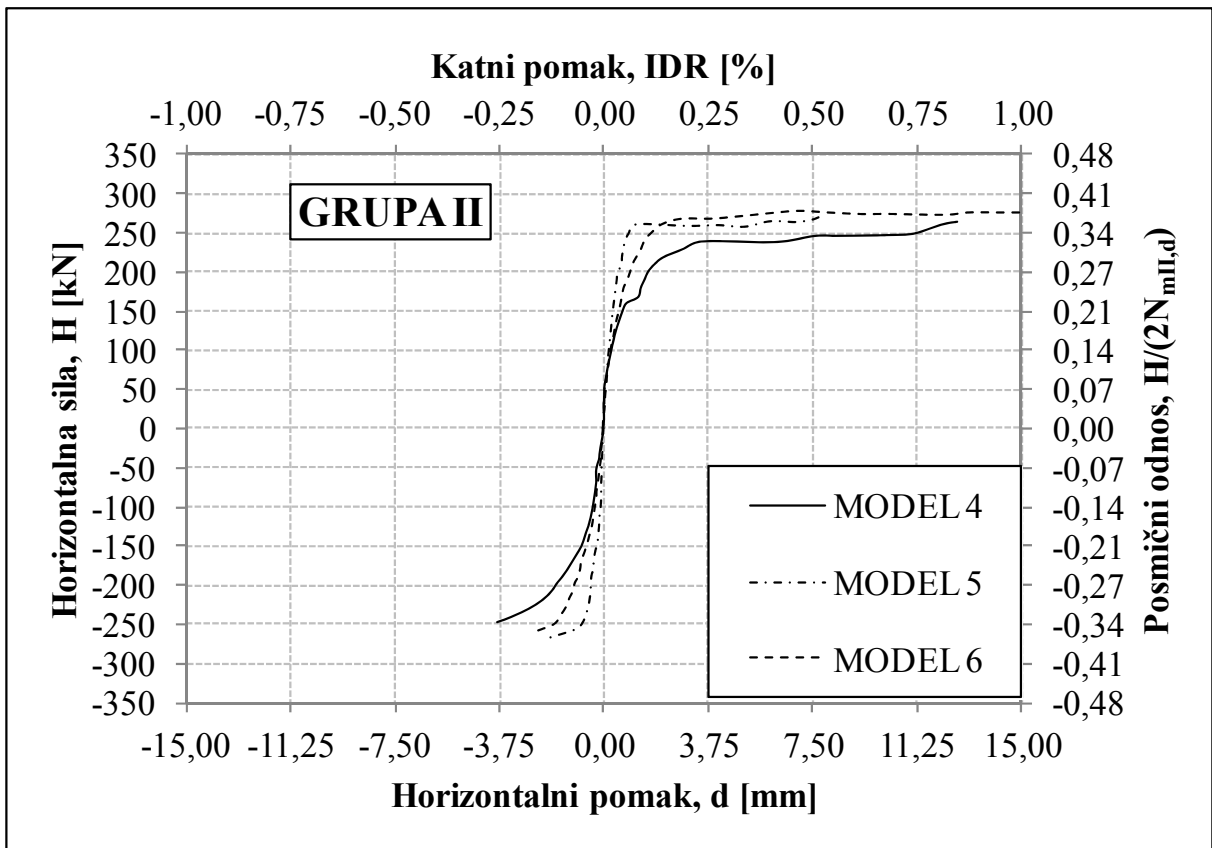
Optimalizirane krivulje, prikazane na *slikama 4.53-4.60* određene su samo za pozitivne grane primarnih krivulja, odnosno krivulja deformacija dijagonala za sve GRUPE modela.

Na *slikama 4.61-4.64* prikazane su optimalizirane krivulje deformacija dijagonala (armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna) modela svake GRUPE koje su međusobno preklapljene. Iz tako preklapljenih optimaliziranih krivulja deformacija dijagonala može se vidjeti trenutak odvajanja zidnoga ispuna od armirano-betonskoga okvira, a mogu se i izračunati ekvivalentne relativne posmične deformacije. Trenutak odvajanja nastaje kada se optimalizirane krivulje deformacija dijagonala (armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna) više ne preklapaju te dolazi do njihovoga razdvajanja.

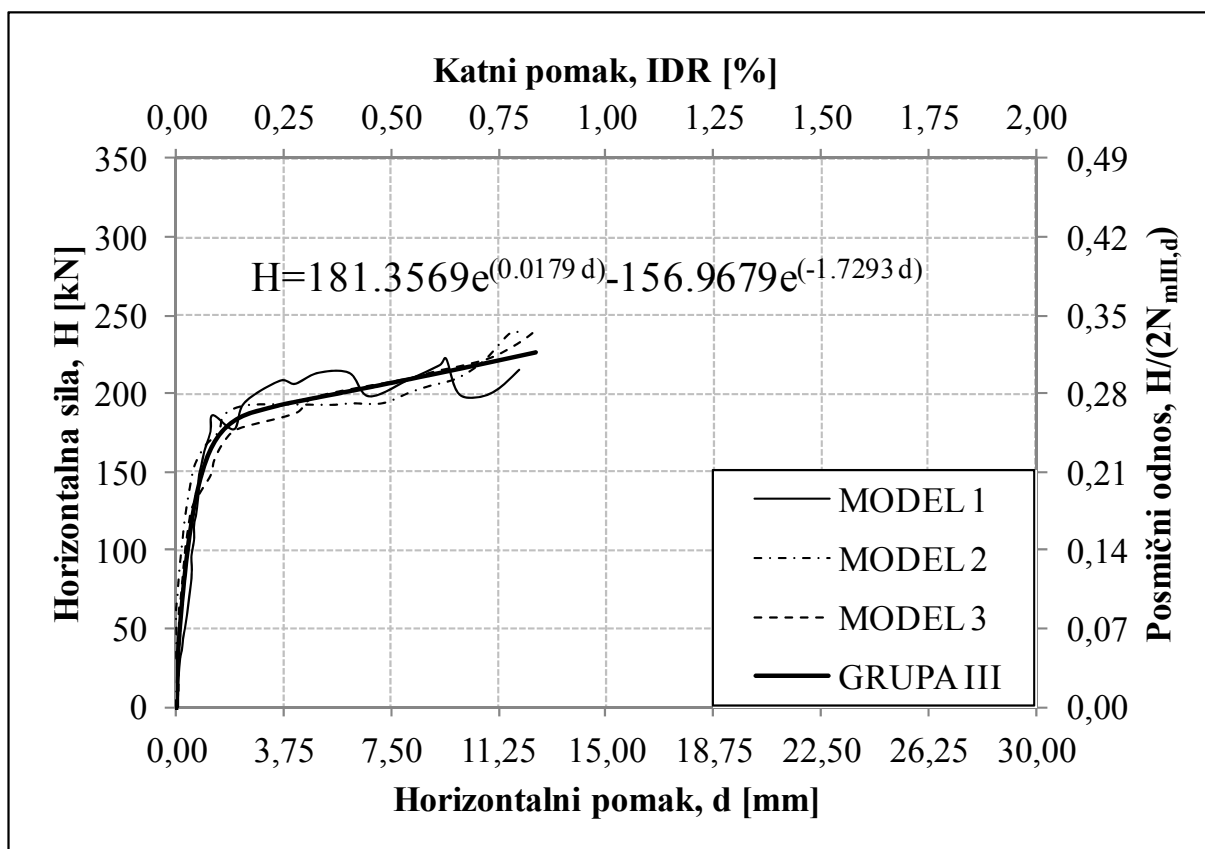
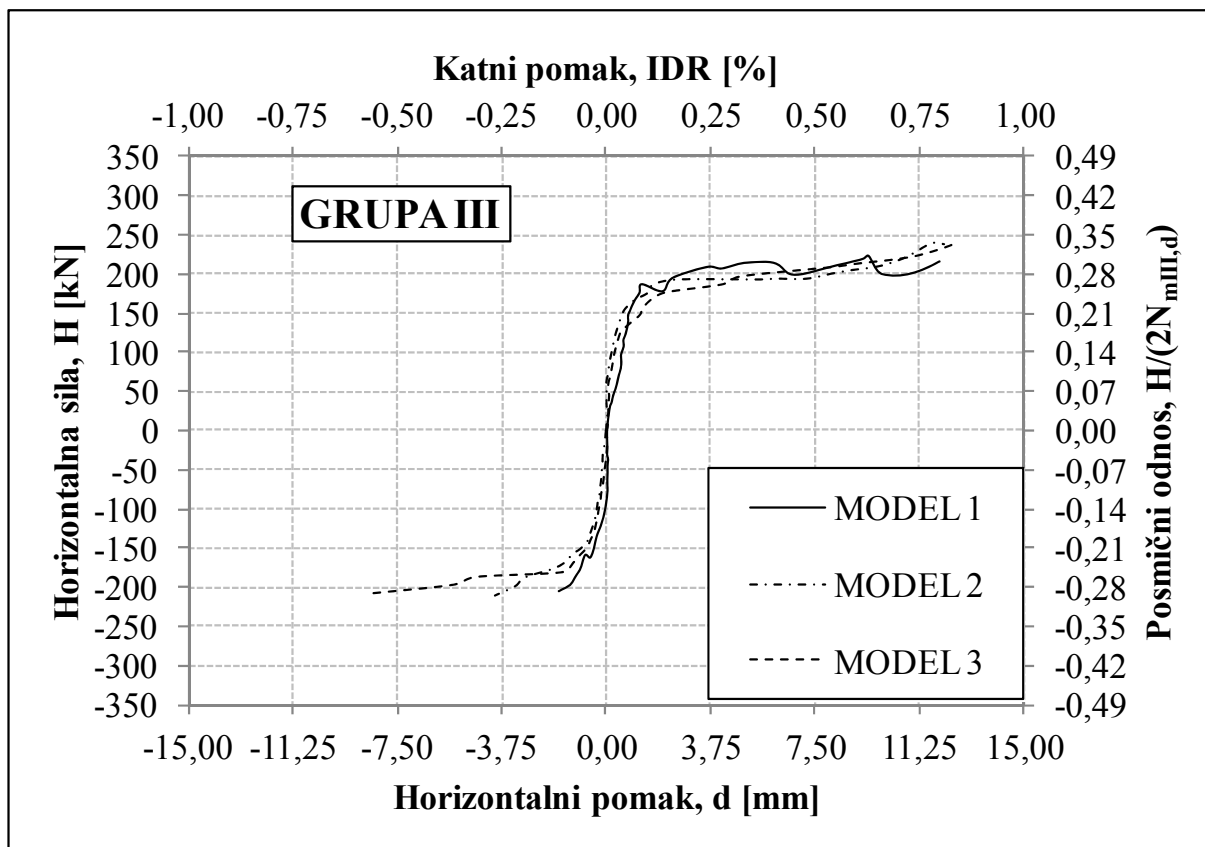
Krivulja deformacija dijagonala MODELA 10, tj. praznoga armirano-betonskog okvira (GRUPA IV) dobivena je kao srednja vrijednost od četiri očitavanja na dijagonalama (*slika 4.52 b*) i kao takva optimalizirana *slika 4.60*.



Slika 4.53 Primarne krivulje modela GRUPE I i optimalizirana primarna krivulja modela GRUPE I

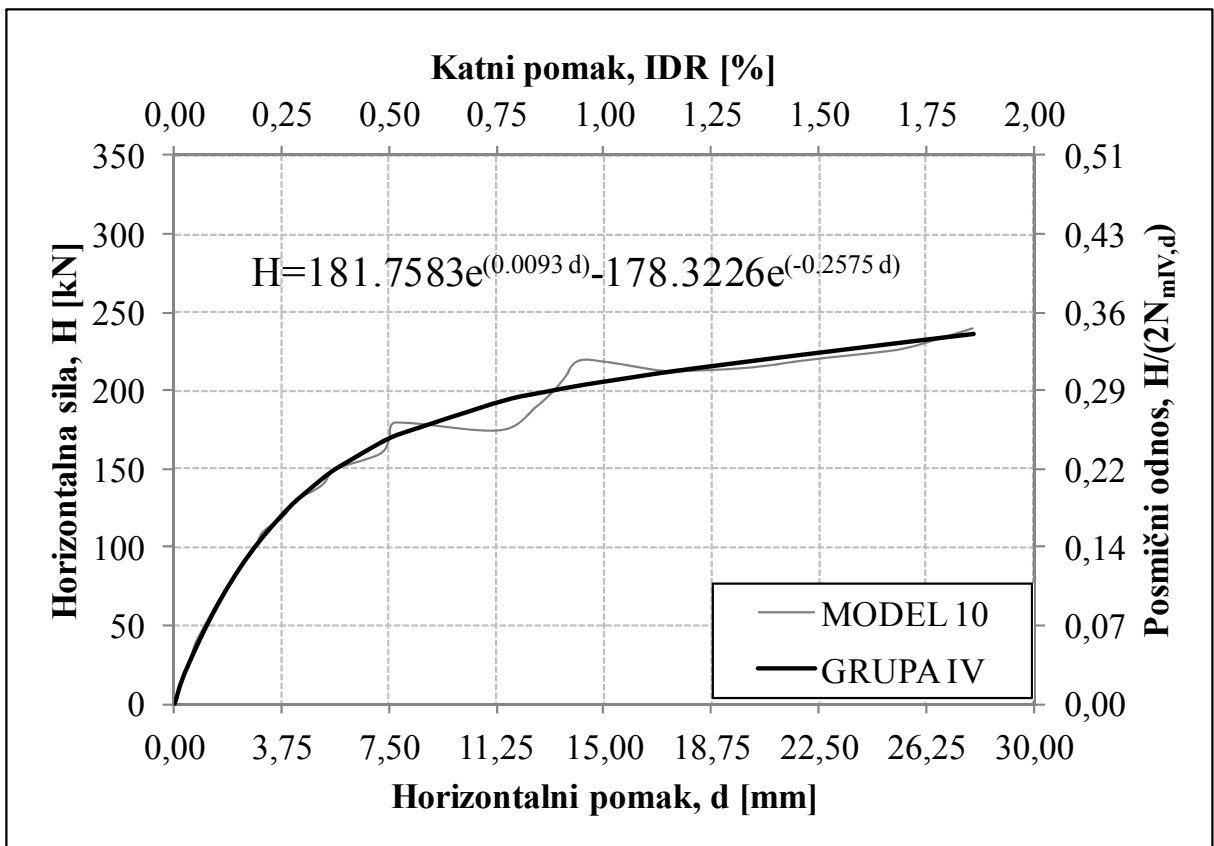
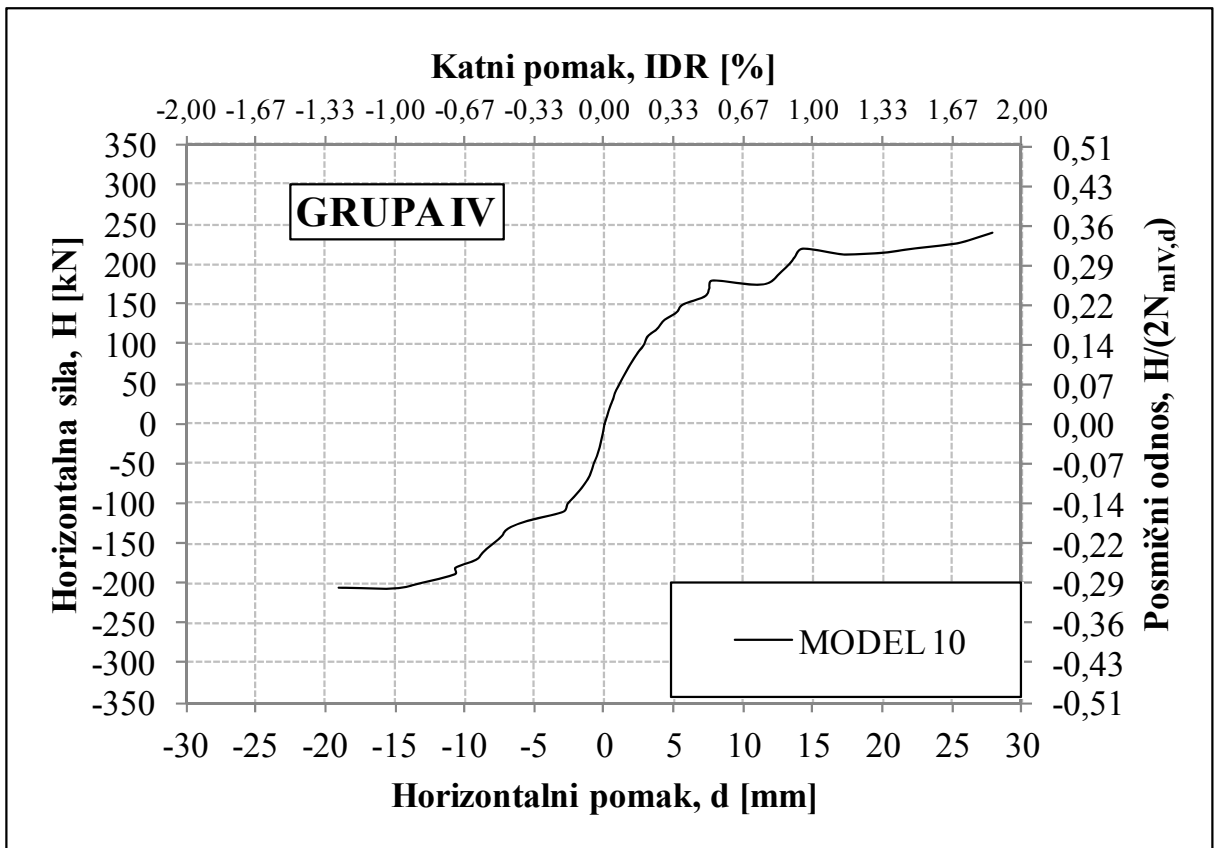


**Slika 4.54** Primarne krivulje modela GRUPE II i optimalizirana primarna krivulja modela GRUPE II

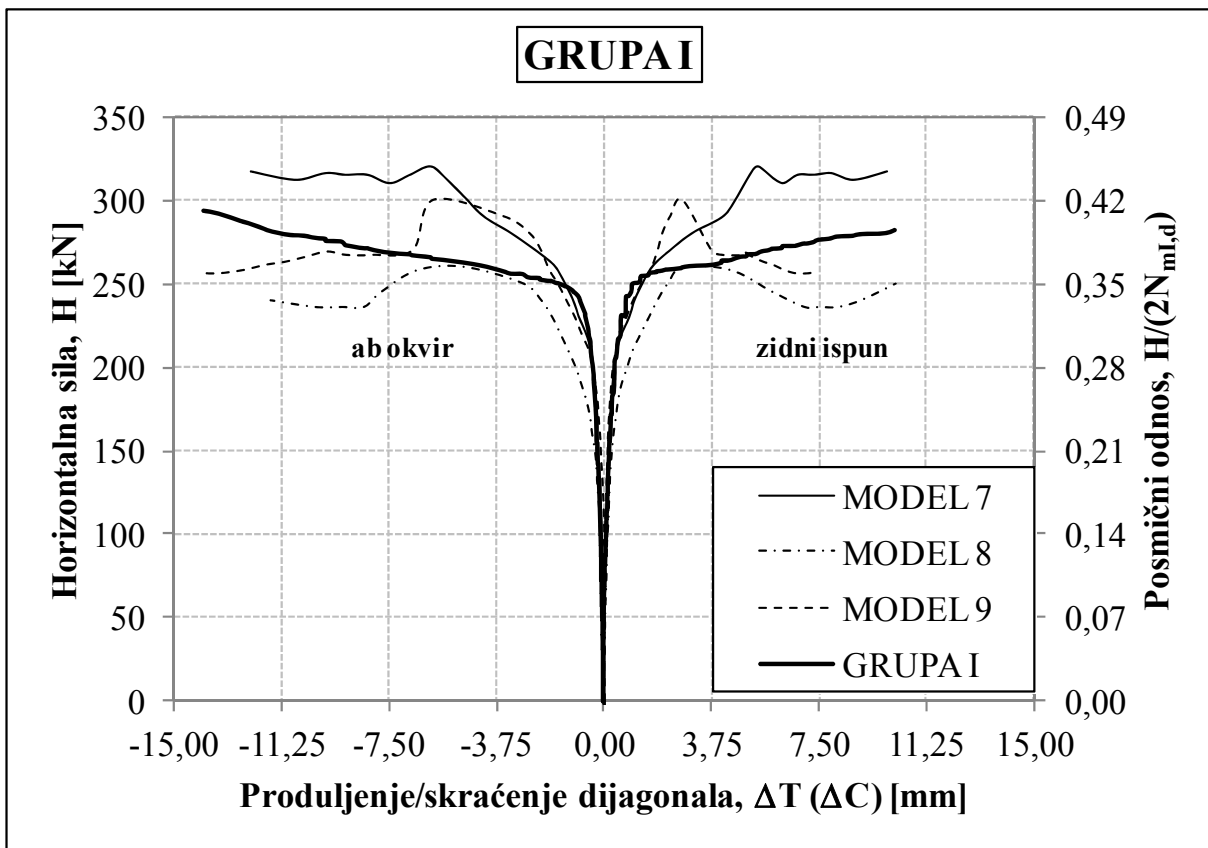
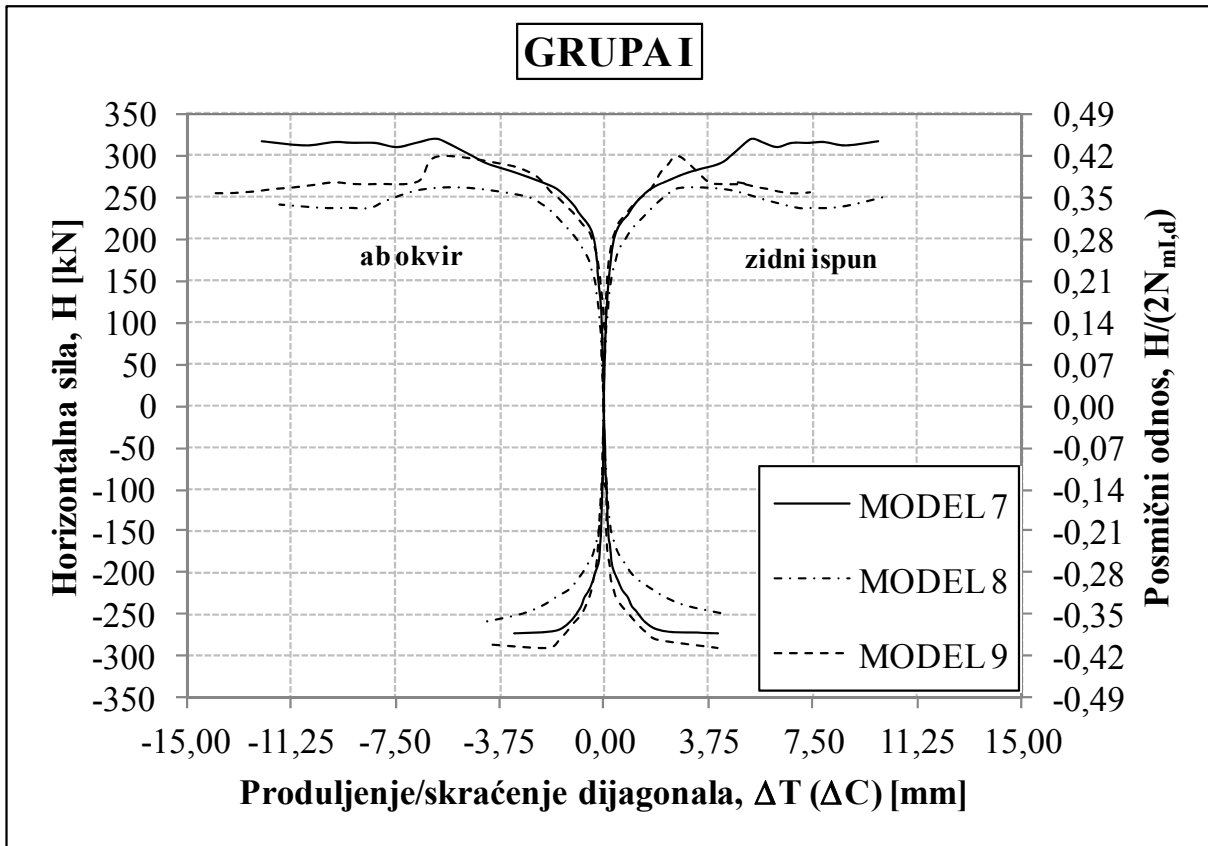


Slika 4.55 Primarne krivulje modela GRUPE III i optimalizirana primarna krivulja modela GRUPE III

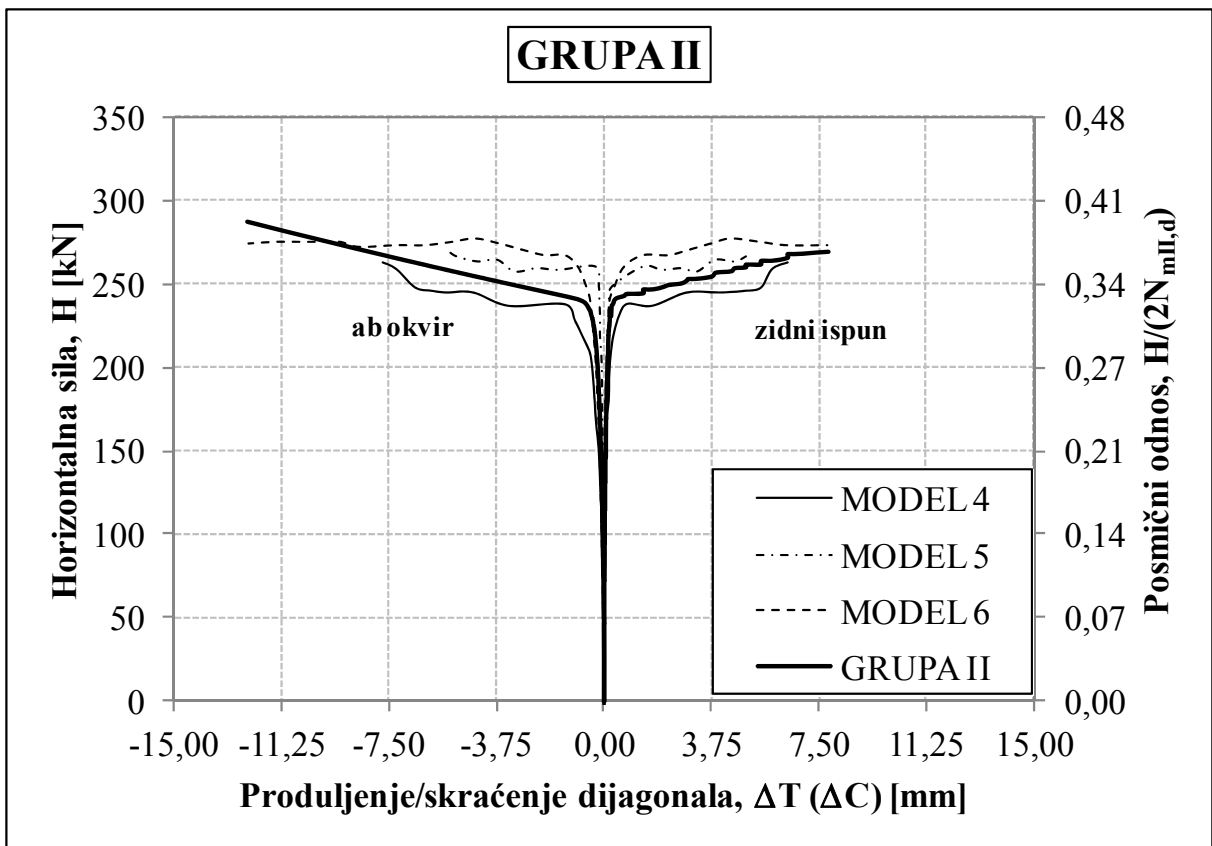
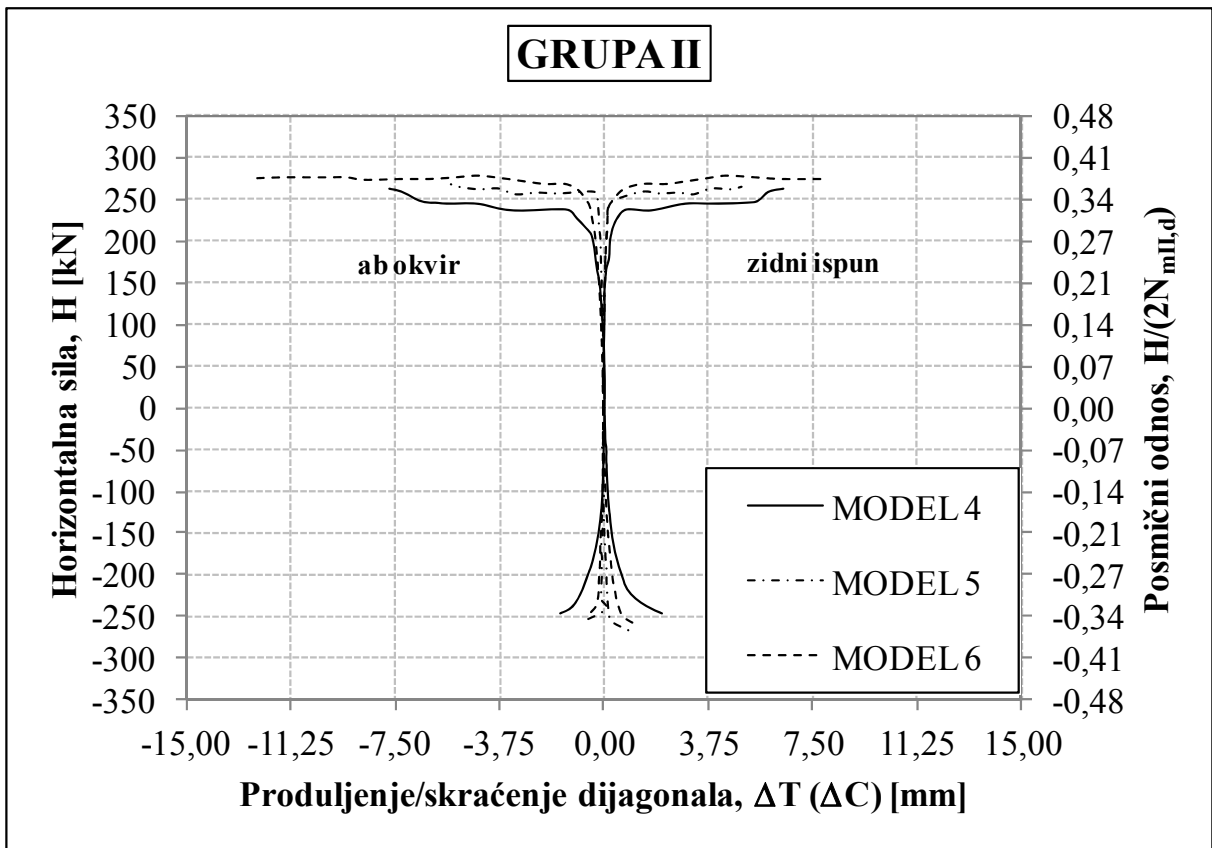




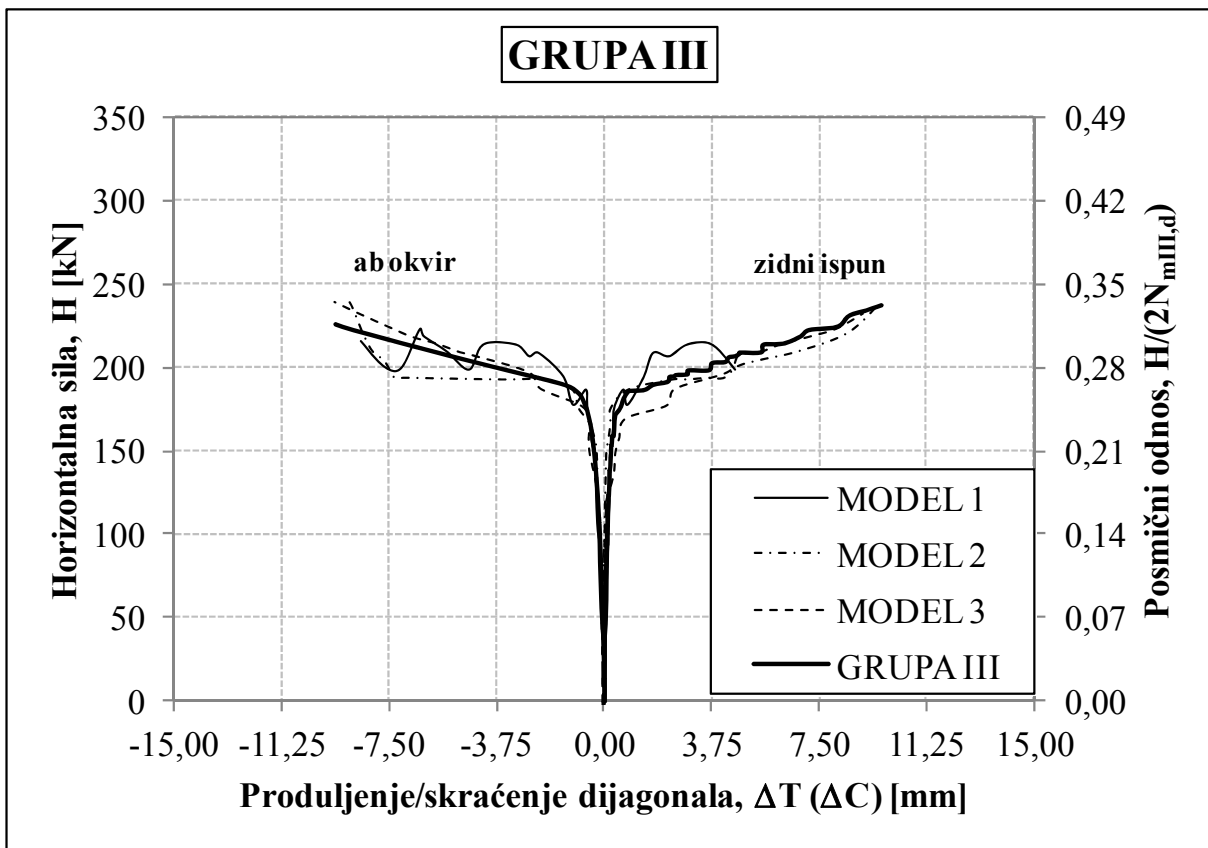
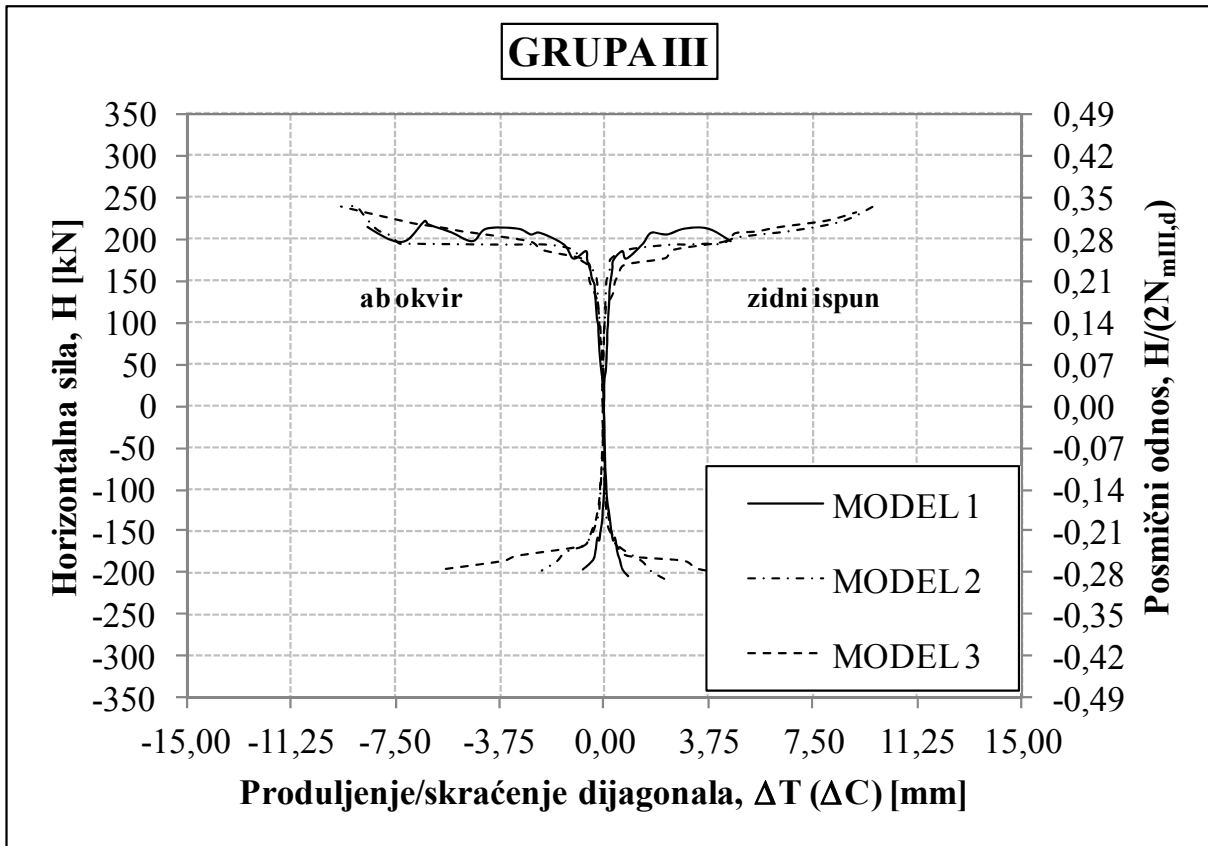
Slika 4.56 Primarne krivulje modela GRUPE IV i optimalizirana primarna krivulja modela GRUPE IV



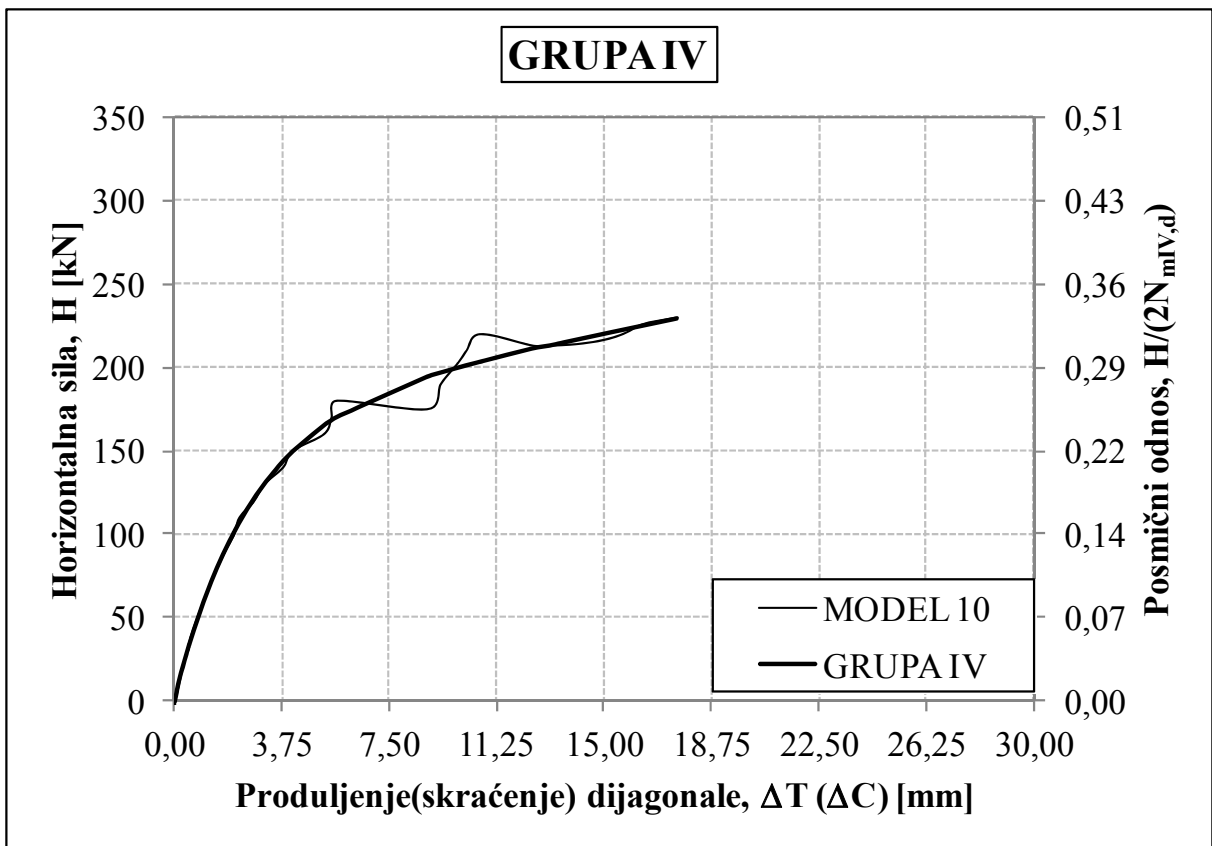
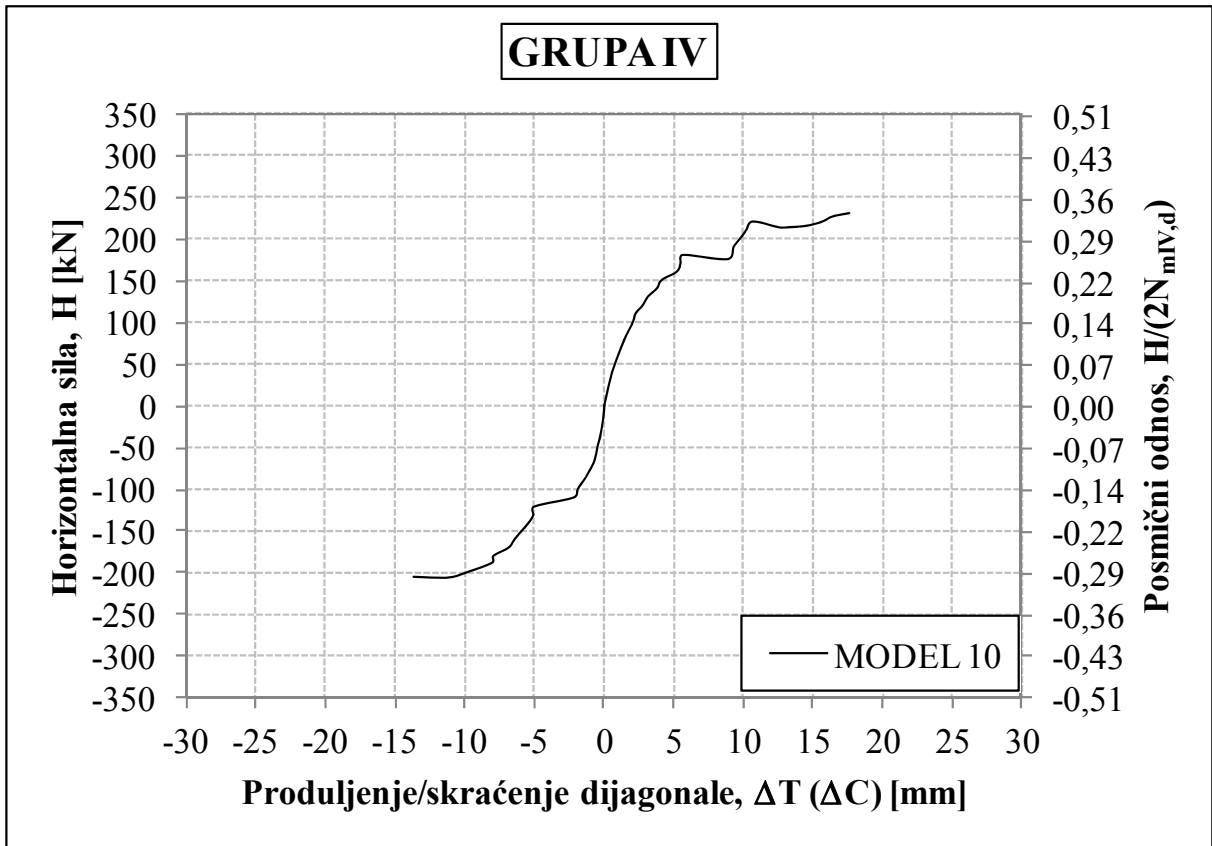
Slika 4.57 Krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE I i optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE I



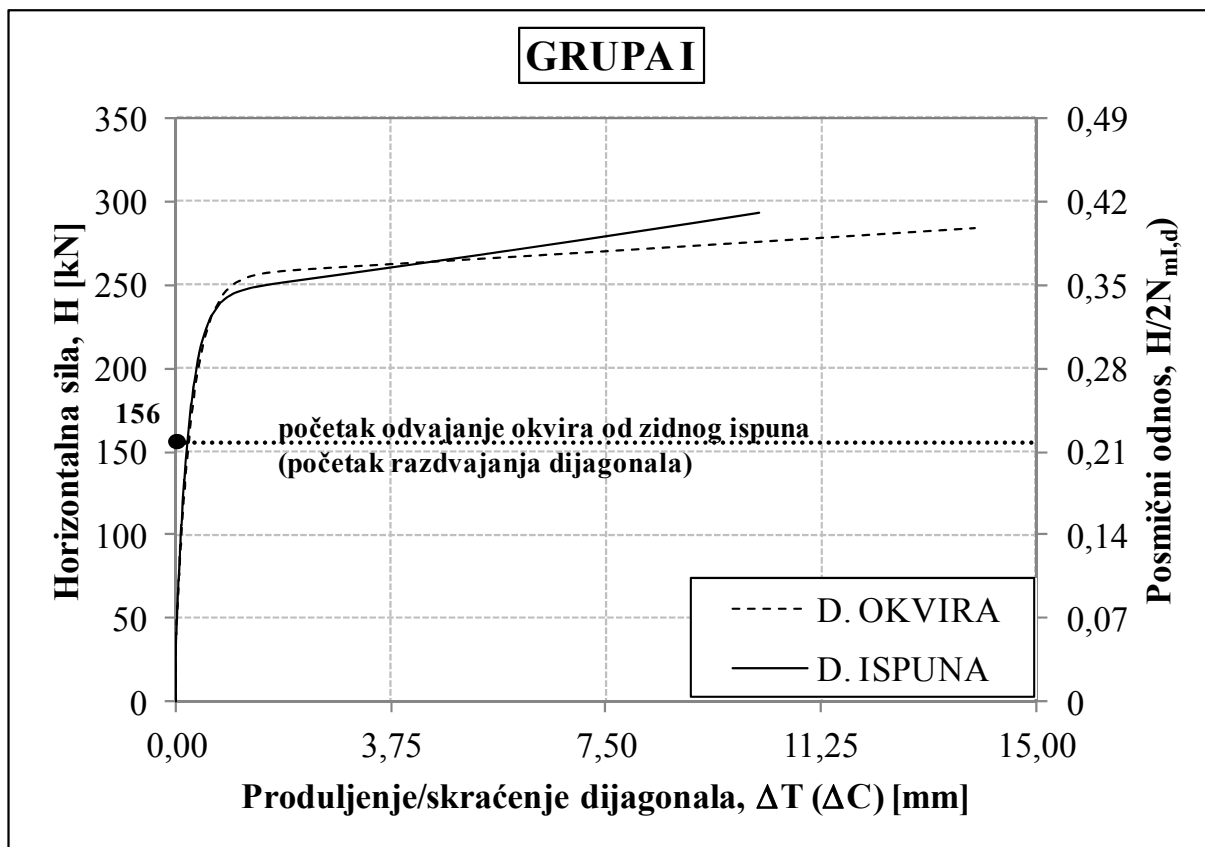
Slika 4.58 Krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE II i optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE II



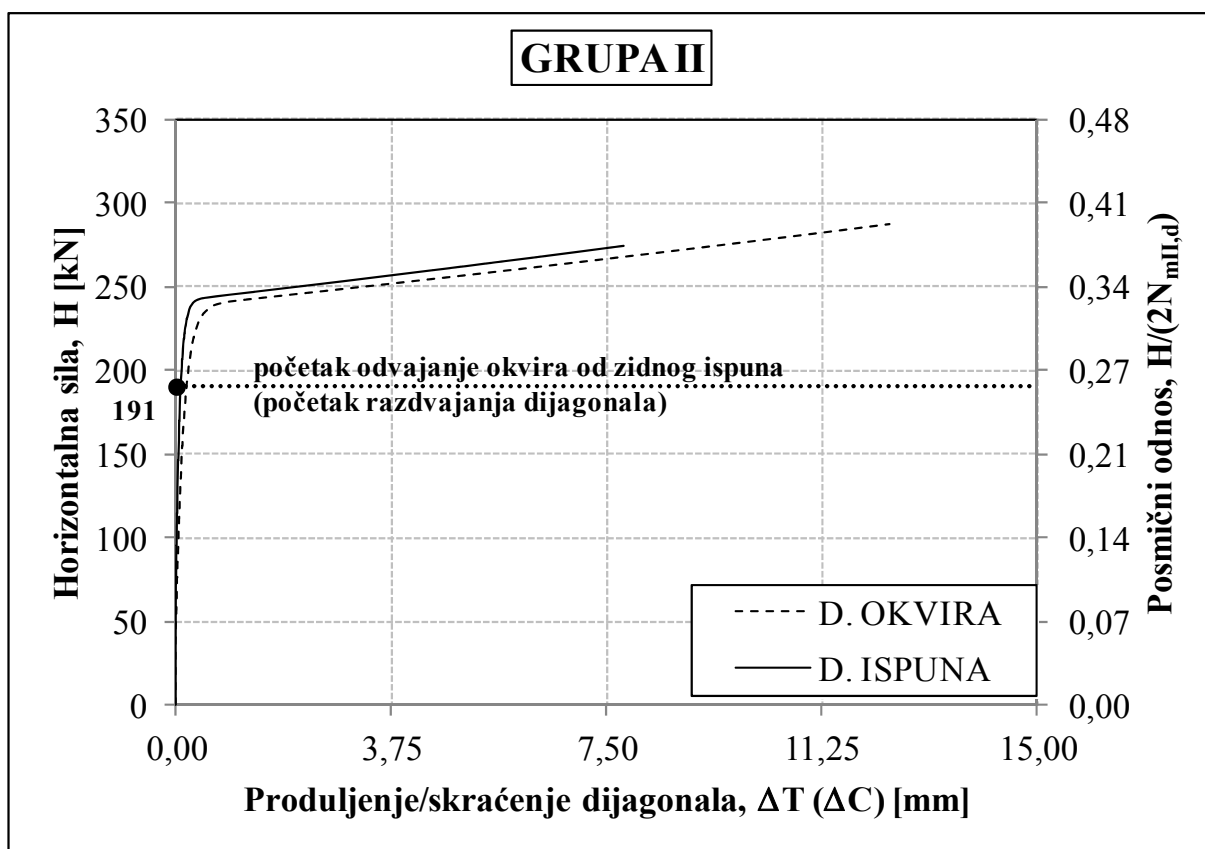
Slika 4.59 Krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE III i optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE III



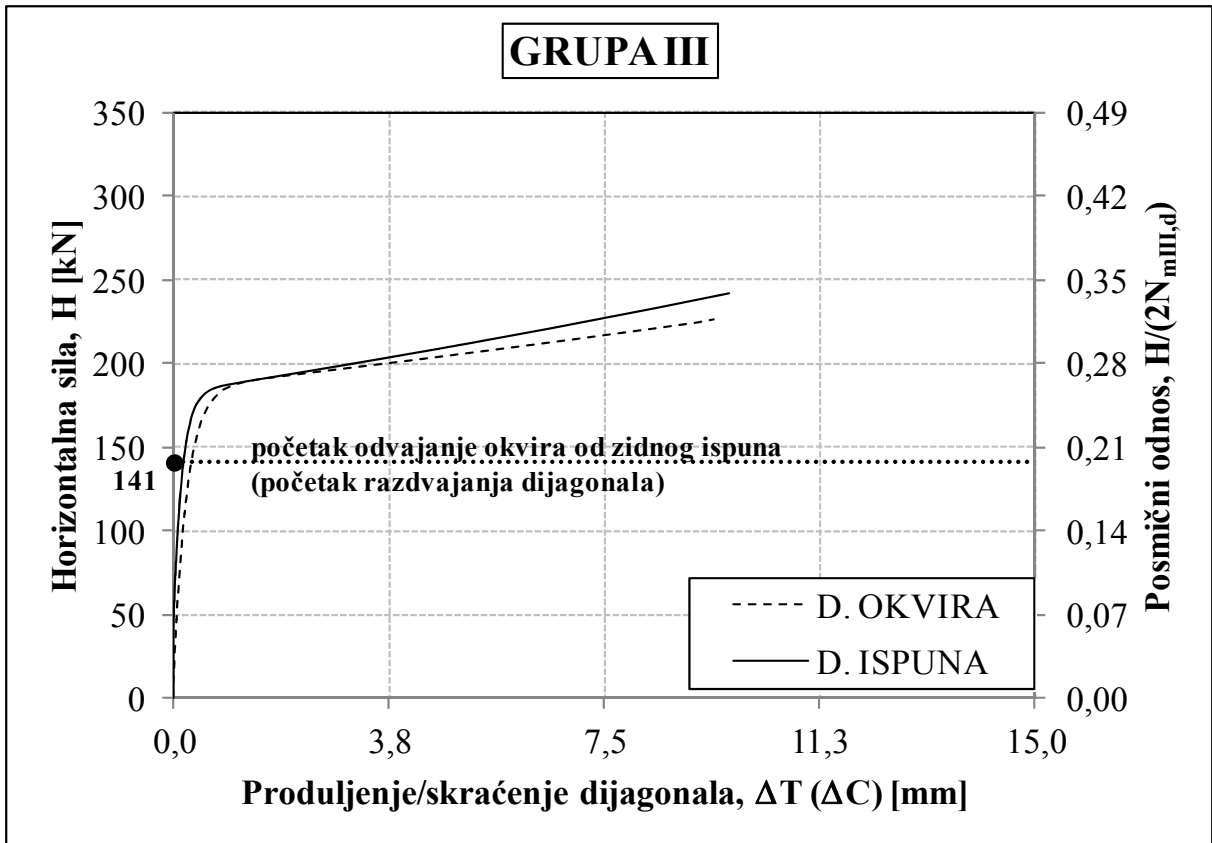
**Slika 4.60** Krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE IV i optimalizirana krivulja deformacija dijagonala modela GRUPE IV



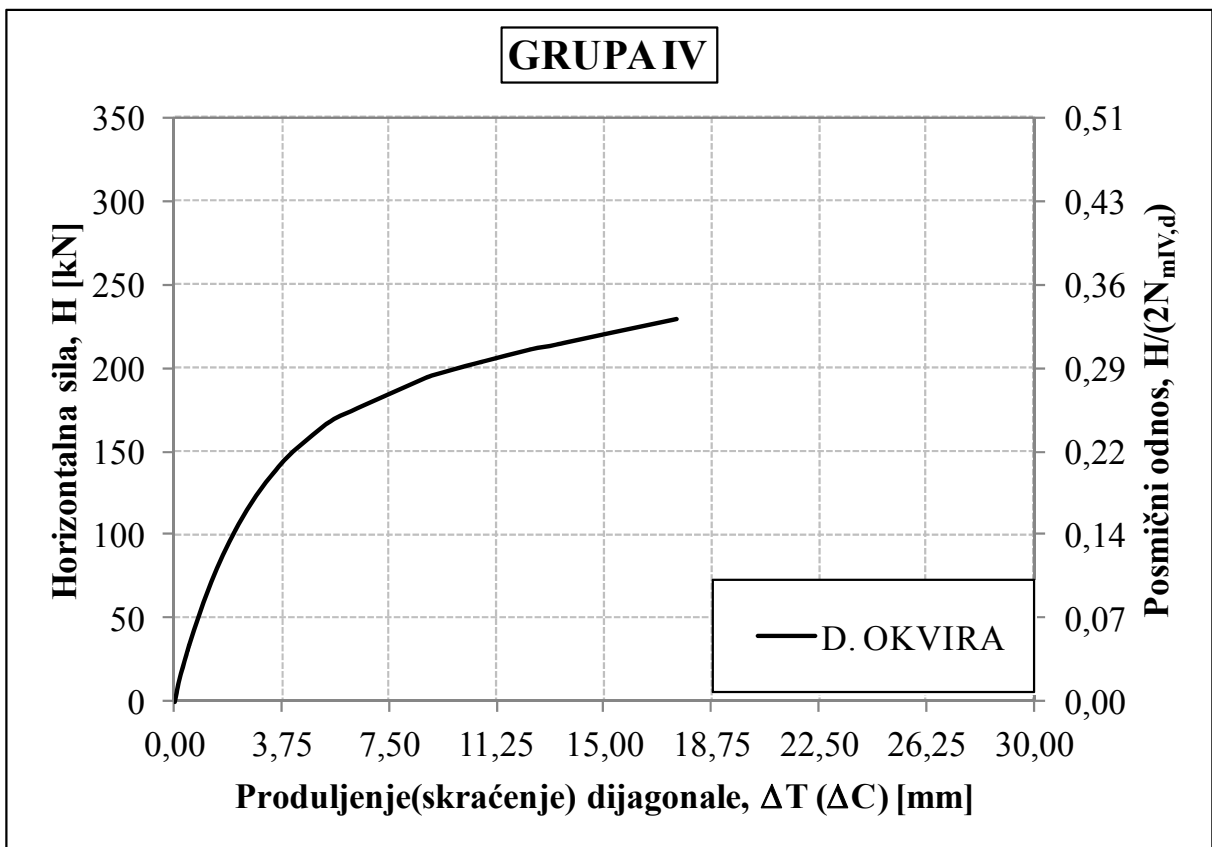
Slika 4.61 Optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE I, preklapljene



Slika 4.62 Optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE II, preklapljene



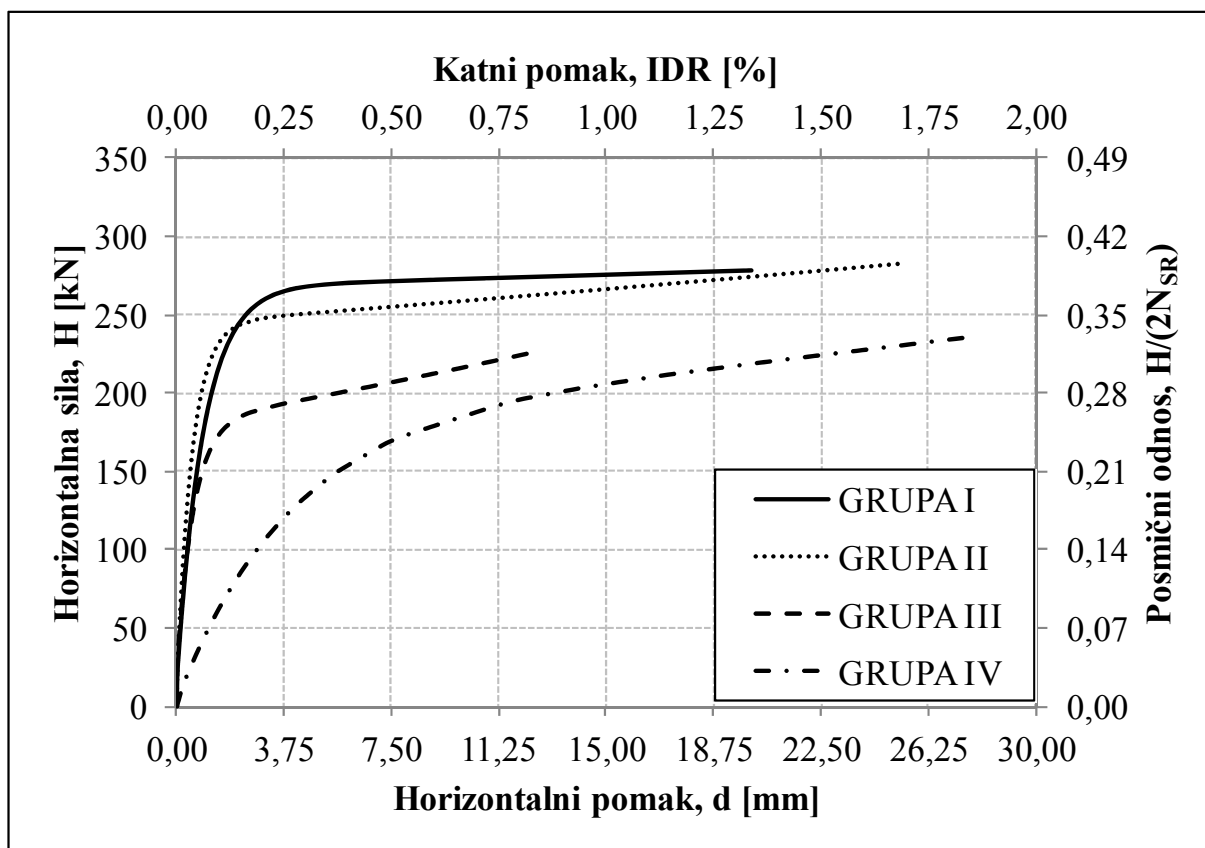
Slika 4.63 Optimalizirane krivulje deformacija dijagonala modela GRUPE III, preklopljene



Slika 4.64 Optimalizirana krivulja deformacije dijagonala modela GRUPE IV

### 4.5.3 Poprečna nosivost modela

Provedena ispitivanja pokazala su kako su poprečne nosivosti armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom puno veće od poprečne nosivosti praznoga armirano-betonskog okvira, osobito pri malim katnim pomacima (*slika 4.65*). Pri tome, početne poprečne nosivosti nisu ovisile o vrsti zidnoga ispuna.



Slika 4.65 Primarne krivulje (krivulje nosivosti) modela GRUPE I, II, III i GRUPE IV

Praćenjem primarnih krivulja (krivulja nosivosti) uočljiv je početni linearni dio, što ukazuje na to da se armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom ponaša kao kompozitni konstrukcijski sustav. Pojavom razdvajanja zidnoga ispuna od armirano-betonskoga okvira, te postupnim oštećivanjem zidnoga ispuna, a kasnije i elementa armirano-betonskoga okvira, dolazi do postupnog opadanja krutosti sustava do trenutka postizanja maksimalne vrijednosti poprečne nosivosti ( $H_{max}$ ). Veličina,  $H_{max}$ , ovisila je o čvrstoći zidnoga ispuna te je bila najveća kod jakog, a najmanja kod slaboga zidnoga ispuna. Nakon toga, a pri još uvijek malim katnim pomacima, slijedila je manje-više horizontalna grana krivulja. Taj dio krivulje ovisio je o procesu oštećivanja zidnoga ispuna, što je upućivalo na povećani udio armirano-betonskoga okvira u sveukupnoj poprečnoj nosivosti.



Nastojanjem utvrđivanja ponašanja armirano-betonskog okvira ispunjenoga zidnim ispunom mogu se razlučiti nosivosti za dva granična konstrukcijska stanja:

- (1) Nastanak, još uvijek, popravljivog konstrukcijskog oštećenja,
- (2) Nastanak značajnog oštećenja u konstrukcijskim dijelovima.

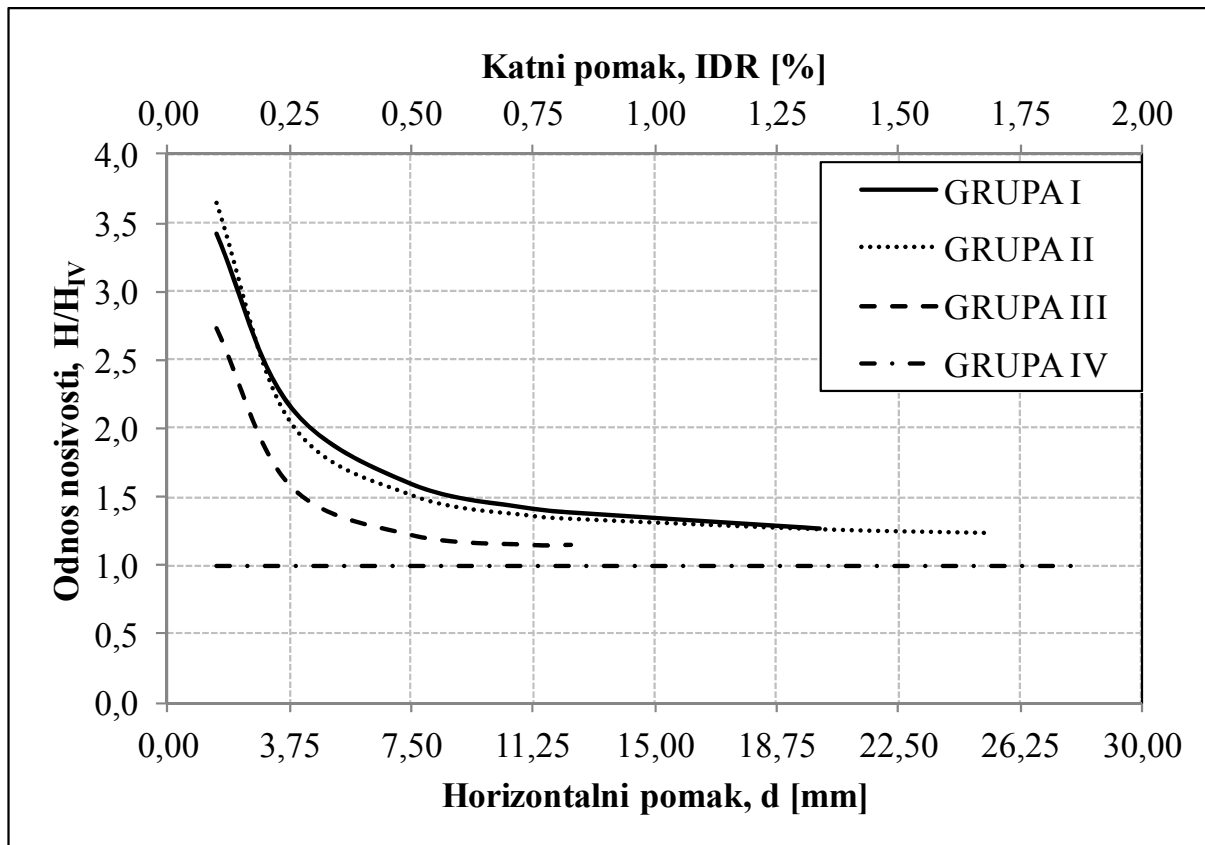
Kod svih ispitivanih modela vidljiva je pojava prvih pukotina pri katnom pomaku od približno 0,05%, kao i prvenstveno linearno elastično ponašanje. Sustav zadržava svoju poprečnu nosivost sve do katnih pomaka od 0,5%, ali s puno manjom krutošću. Rezultati prikazani na *slici 4.65* pokazuju kako armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom zadržavaju svoju nosivost sve do katnoga pomaka od cca. 1%, kada je već doprinos zidnoga ispuna izgubljen u potpunosti, a oštećenja nastala na njemu značajna su. Nakon te razine katnoga pomaka, pozitivnog doprinosa zidnoga ispuna više nema, dok negativni doprinos može prevladati ako armirano-betonski okvir nije pravilno dimenzioniran na djelovanje posmika. Prazan armirano-betonski okvir (GRUPA IV) ponašao se fleksibilnije (popustljivije) pri malim veličinama pomaka uz zadržavanje nosivosti sve do katnih pomaka od cca. 2%. Ovakvo ponašanje dodatno je potvrđeno analizom deformacija dijagonala armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna pretočenih u ekvivalentne relativne posmične deformacije, kao što je to prikazano na *slici 4.68*.

Poprečna nosivost armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom u usporedbi s onom praznoga armirano-betonskog okvira prikazana je u *tablici 4.20* za različite katne pomake. Ako nosivost praznoga armirano-betonskog okvira (GRUPA IV) obilježimo s vrijednošću 1,00, tada je nosivost modela GRUPE I pri katnome pomaku od 0,10%, 3,43 puta veća, i tako dalje. Vidljivo je opadanje doprinosa zidnoga ispuna s povećanjem katnih pomaka, što je dovelo do otprilike 30% pri katnom pomaku od cca. 1,00%, iako je pri tome zidni ispun već bio značajno oštećen te je zabilježeno njegovo ispadanje iz ravnine.

**Tablica 4.20** Poprečna nosivost,  $H$  [kN], pri određenim katnim pomacima

IDR [%]	0,10%	0,25%	0,50%	0,75%	0,83%	1,34%	1,68%	1,86%
GRUPA I	219 (3,43)	264 (2,17)	271 (1,60)	273 (1,42)	273 (1,39)	278 (1,27)	-	-
GRUPA II	233 (3,65)	250 (2,05)	256 (1,51)	261 (1,36)	263 (1,34)	275 (1,26)	283 (1,23)	-
GRUPA III	175 (2,73)	194 (1,59)	207 (1,22)	222 (1,15)	227 (1,15)	-	-	-
GRUPA IV	64 (1,00)	122 (1,00)	169 (1,00)	193 (1,00)	197 (1,00)	218 (1,00)	230 (1,00)	236 (1,00)

Opadanje poprečne nosivosti armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom (GRUPA I, II i III), u odnosu na prazan armirano-betonski okvir (GRUPA IV), možemo prikazati i grafički na osnovu podataka iz *tablice 4.20 (slika 4.66)*.



Slika 4.66 Opadanje poprečne nosivosti u odnosu na model GRUPE IV

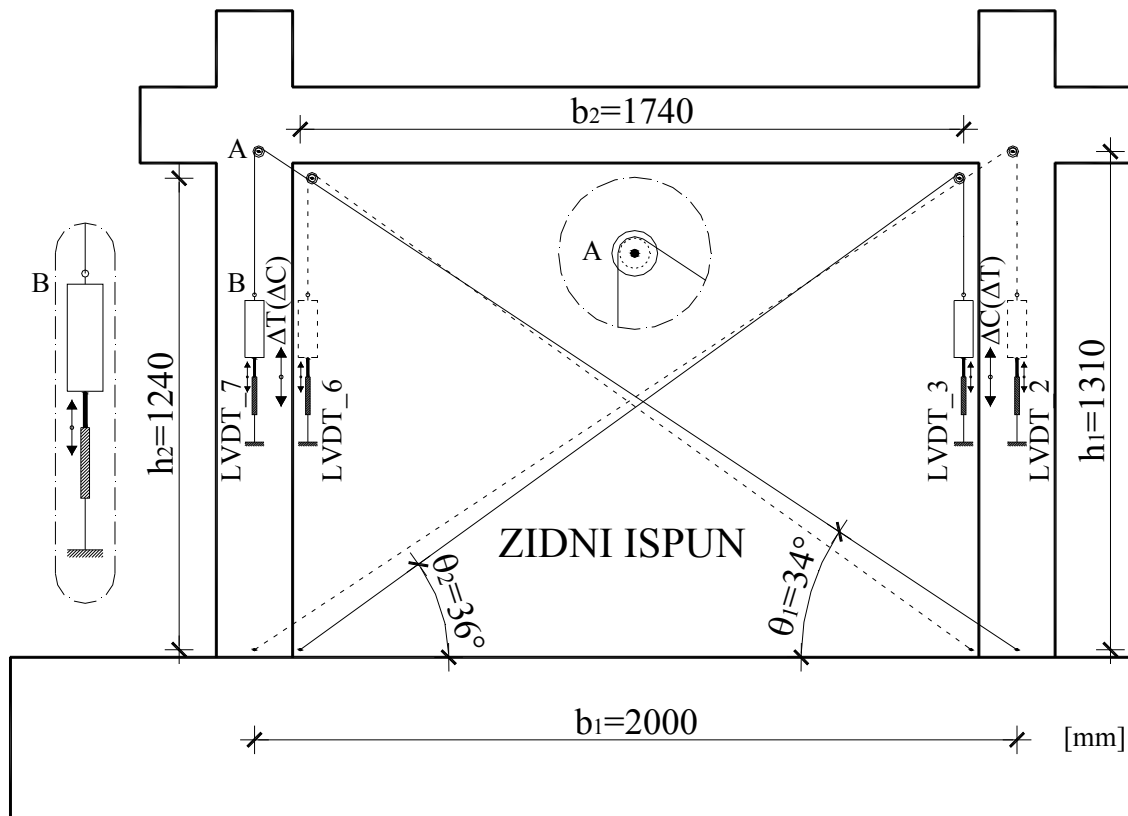
Ekvivalentne relativne posmične deformacije pojedinih GRUPA modela, prikazane na *slici 4.68*, proračunate su kao srednja vrijednost relativnih posmičnih deformacija armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna. Pripadajuće relativne posmične deformacije (koje uključuju i otvaranje pukotina, klizanje po sljubnicama, itd.) dobivene su mjerenjem dijagonalnih deformacija sukladno *slici 4.67* (s zanemarivim vertikalnim skraćanjem stupova), a prema izrazu:

$$\gamma = \frac{\gamma_I + \gamma_{II}}{2}, \quad \gamma_I = \frac{\Delta C + \Delta T}{2 \cdot h_1 \cdot \cos \theta_1} \quad \text{i} \quad \gamma_{II} = \frac{\Delta C + \Delta T}{2 \cdot h_2 \cdot \cos \theta_2} \quad (4.3)$$

gdje je:

- $\gamma$       ekvivalentna relativna posmična deformacija;
- $\gamma_I$      relativna posmična deformacija armirano-betonskoga okvira;
- $\gamma_{II}$     relativna posmična deformacija zidnoga ispuna;

- $\Delta T$  produljenje/skraćenje dijagonale armirano-betonskoga okvira (zidnog ispuna);  
 $\Delta C$  skraćenje/produljenje dijagonale armirano-betonskoga okvira (zidnog ispuna);  
 $h_1, h_2$  efektivne visine armirano-betonskoga okvira i njegovog zidnoga ispuna;  
 $\theta_1, \theta_2$  nagibi dijagonale armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna u odnosu na horizontalnu liniju modela.

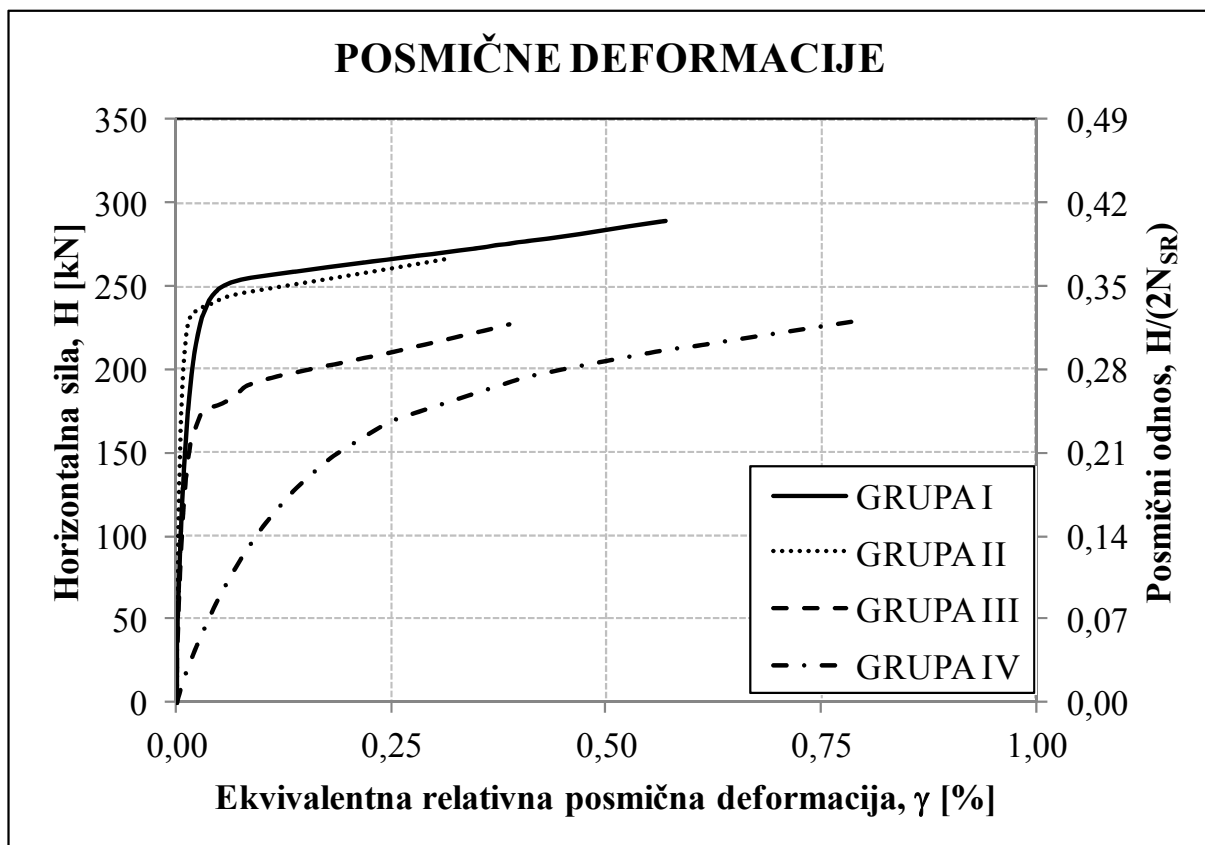


**Slika 4.67** Deformacije dijagonala i izračun relativni posmičnih deformacija

Ovojnice odnosa horizontalna (poprečna) sila - ekvivalentna relativna posmična deformacija (*slika 4.68*) ukazuju na različiti odziv armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom. Kao i kod poprečne nosivosti, u početku je vidljiv linearni odnos između poprečne sile i ekvivalentne relativne posmične deformacije. U odzivu sustava armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom, neovisno o vrsti zidnoga ispuna, ekvivalentne relativne posmične deformacije dominantne su sve do veličine sile pri pojavi prvih pukotina (*slike 4.61-4.63*). Premašivanjem tih veličina (što odgovara katnom pomaku 0,05%) zidni ispun postupno dolazi do točke prevladavanja armirano-betonskoga okvira (pri katnim pomacima od 1%). U tome opsegu ekvivalentnih relativnih posmičnih deformacija, ponašanje poprečna sila - ekvivalentna relativna posmična deformacija, može se idealizirati bilinearnim odnosom.

Trenutak kada „okvirni-zidni“ sustav gubi svoje zajedničko djelovanje odgovara trenutku u kojem poprečna sila i pripadajuće posmično naprezanje na kontaktu zidni ispun-beton dostiže početnu prionjivost morta (što sukladno Culonovom zakonu trenja odgovara približno  $0,70\text{N/mm}^2$ ).

Stoga, može se zaključiti kako bi posmično ponašanje kompozita bilo bolje uporabom nekog mehanizma prijenosa posmika između zidnoga ispuna i betona.



Slika 4.68 Odnos izmjerenih poprečnih sila i ekvivalentnih relativnih posmičnih deformacija

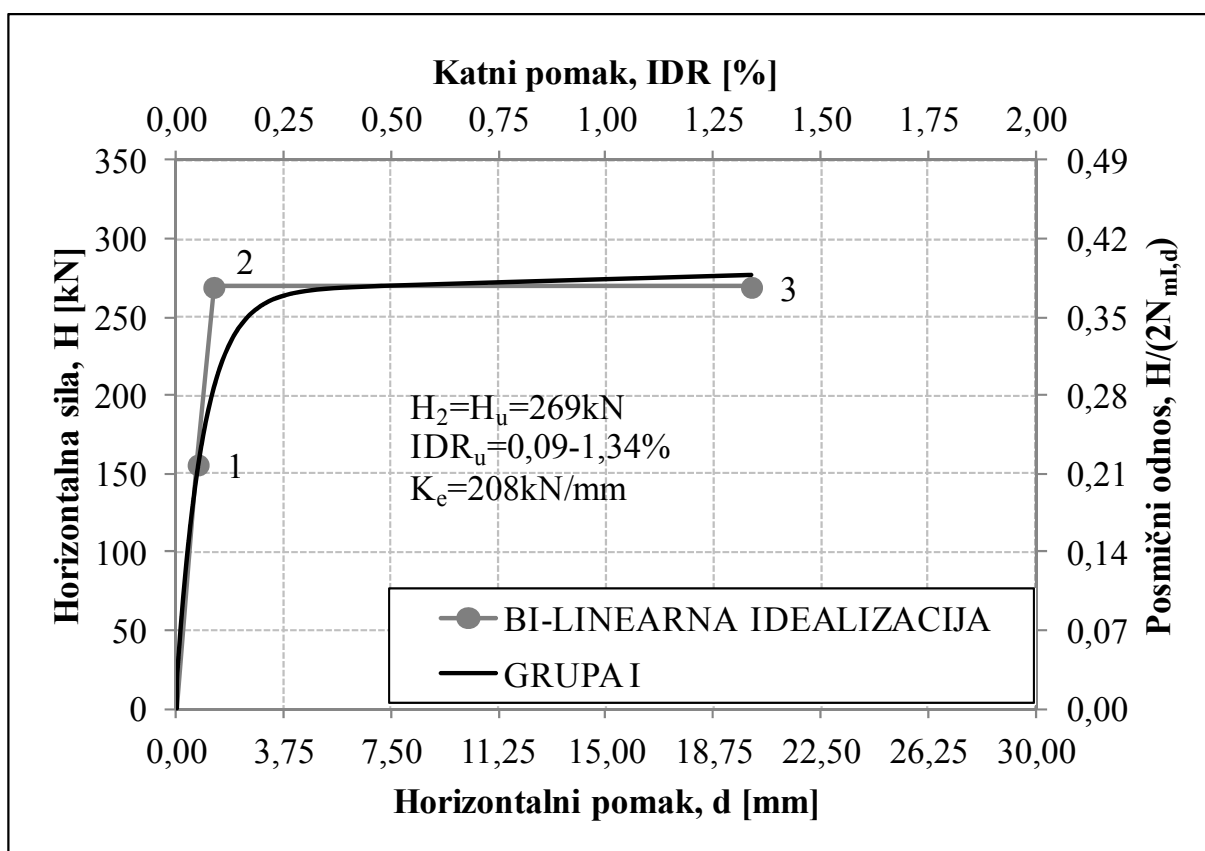
Na sekundarnoj okomitoj osi, na *slici 4.68*, prikazan je posmični odnos horizontalne i vertikalne sile. Promatrajući *sliku 4.68* i *sliku 4.65*, možemo uočiti gotovo identično ponašanje svih GRUPA modela, što možemo protumačiti ispravnim eksperimentalnim podacima, bez obzira gledamo li produljenja, odnosno skraćanja dijagonala ili horizontalne pomake.

#### 4.5.4 Idealizacija eksperimentalnih rezultata

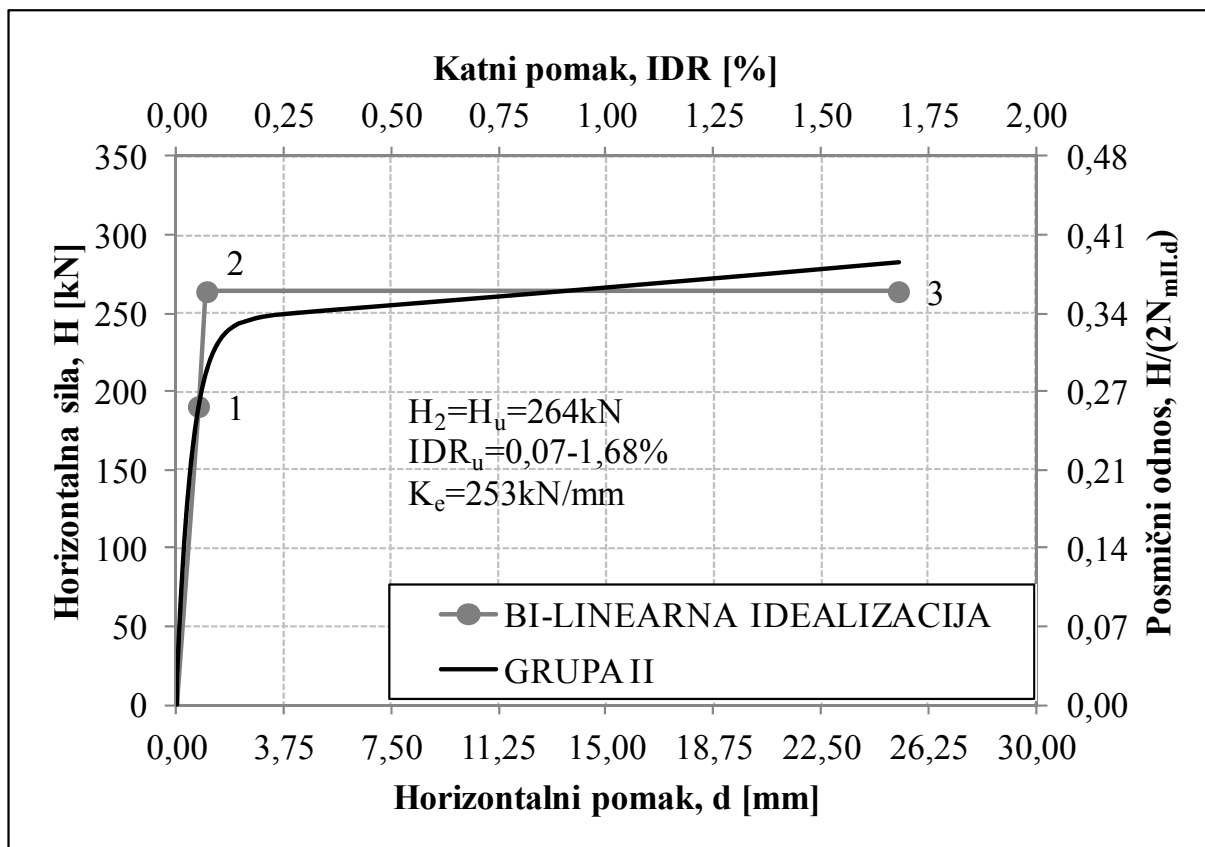
Eksperimentalne krivulje nosivosti (primarne krivulje) prikazane su svojim bilinearnim idealizacijama na *slikama 4.69* do *4.72*. Za idealizaciju eksperimentalnih krivulja nosivosti korištene su jednadžbe proračuna posmične otpornosti i deformabilnosti zida od opeke, kako je to opisano u Tomaževiću [70]. Idealizacije s konstantnom horizontalnom granom, nakon vršne vrijednosti, prikazane su na slikama.

Tri granična stanja idealiziranih eksperimentalnih krivulja nosivosti određena su kako slijedi:

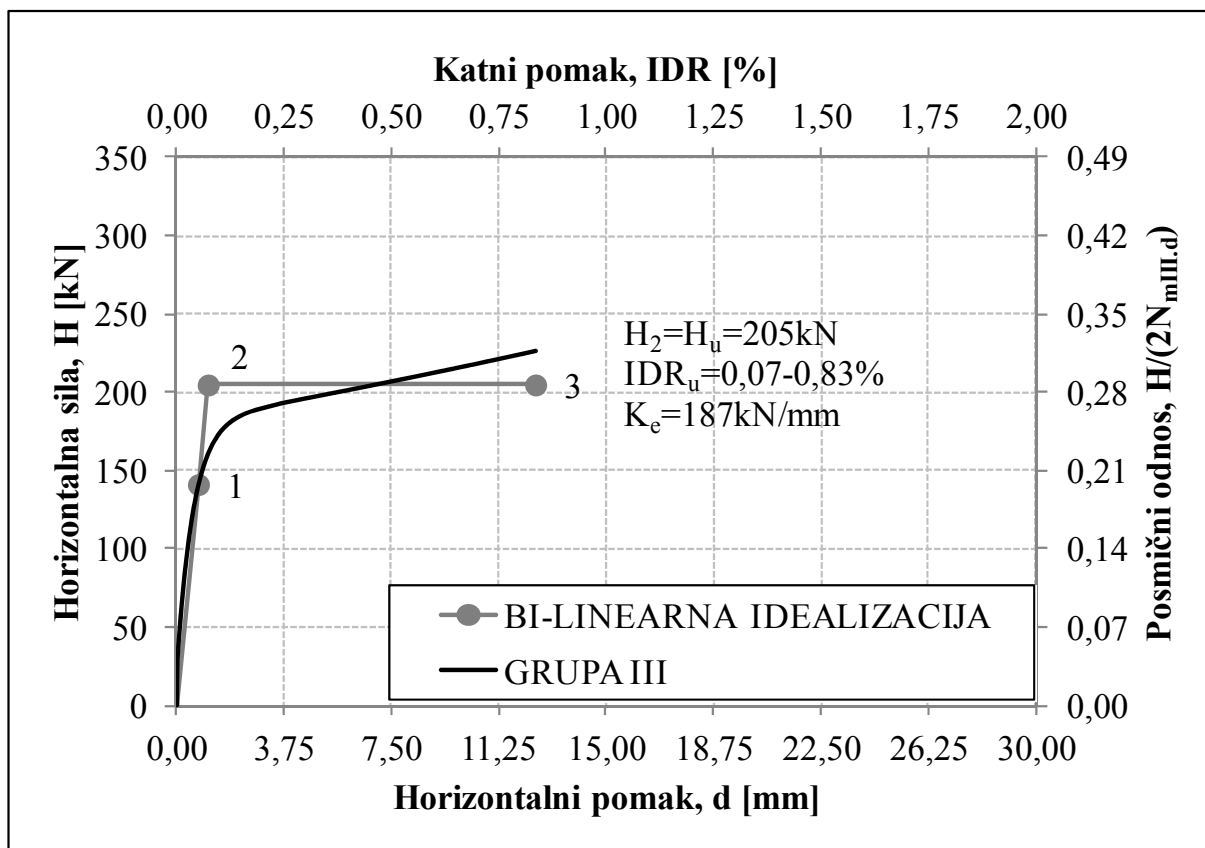
- 1 – Granično stanje pukotina, koje odgovara pomaku pri nastanku prve značajnije pukotine u zidnom ispunu kao dio maksimalne otpornosti ( $H_1/H_{\max}=0,60$  odnosno  $0,05\%$  katnoga pomaka);
- 2 – Granična nosivost, izračunata pomoću izjednačavanja ploština ispod eksperimentalne krivulje nosivosti i krivulje bilinearne idealizacije;
- 3 – Granično stanje nosivosti, određeno pomoću maksimalnoga pomaka postignutog tijekom samoga ispitivanja.



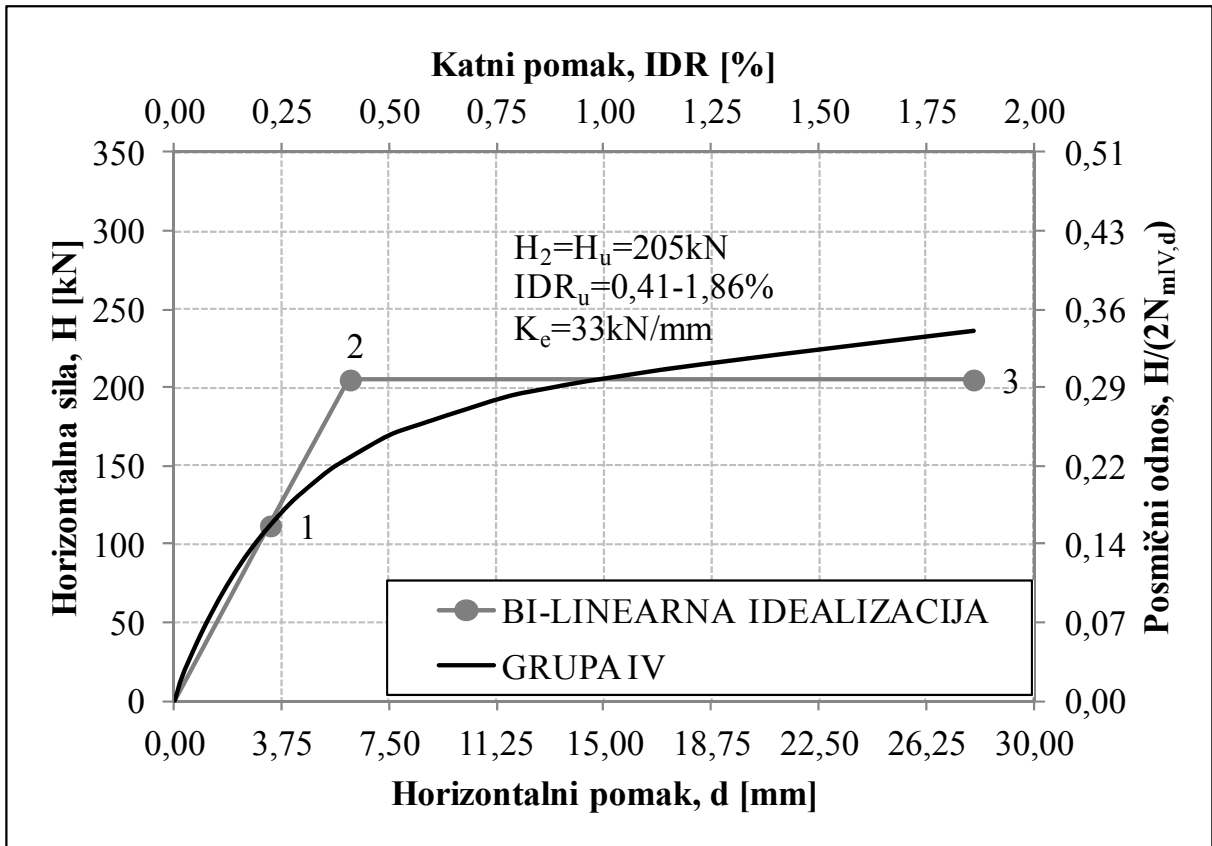
Slika 4.69 Idealizacija eksperimentalnog histereznog ponašanja modela GRUPE I



Slika 4.70 Idealizacija eksperimentalnog histereznog ponašanja modela GRUPE II



Slika 4.71 Idealizacija eksperimentalnog histereznog ponašanja modela GRUPE III



Slika 4.72 Idealizacija eksperimentalnog histereznog ponašanja modela GRUPE IV

Ciklički model u sebi sadržava i smanjivanje čvrstoće i krutosti, što dovodi do opadanja primarne krivulje kao funkcije oštećenja i disipacije energije u komponentama. Veličina do koje se cikličko oslabljivanje modelira u analizi određuje veličinu do koje se primarna krivulja kalibrira u odnosu na početne i oštećene komponente i način na koji karakteristične točke krivulje odgovaraju kriterijima prihvatljivosti komponenti s obzirom na nastanak oštećenja i značajnog oslabljivanja.

Prikaz poprečnih sila s pripadajućim katnim pomacima za granična stanja idealiziranih eksperimentalnih krivulja nosivosti, kao i maksimalne postignute poprečne sile, dane su u **tablici 4.21** za svaku GRUPU modela.

**Tablica 4.21** Poprečne sile u trenutku graničnih stanja idealiziranih eksperimentalnih krivulja nosivosti

GRUPA	$H_1$ [kN] / IDR[%]	$H_2$ [kN] / IDR[%]	$H_3$ [kN] / IDR[%]	$H_{max}$ [kN]
GRUPA I	156/0,05	269/0,09	269/1,34	278
GRUPA II	191/0,05	264/0,07	264/1,68	283
GRUPA III	141/0,05	205/0,07	205/0,83	227
GRUPA IV	112/0,22	205/0,41	205/1,86	236

Konstruktivno ponašanje nakon elastičnog područja obično se izražava pomoću koeficijenta duktilnosti,  $\mu$ . Kako nije zabilježeno opadanje poprečne nosivosti ispod 90% od  $H_{max}$ , koeficijent duktilnosti pomaka određen je kao omjer pomaka, pri kojem zidni ispun doživljava izrazito oslabljivanje, i idealiziranog pomaka tečenja (popuštanja).

Na temelju eksperimentalnih rezultata koeficijenti duktilnosti svake GRUPE modela prikazani su u **tablici 4.22** pomoću njihove bilinearne idealizacije. Veličina krajnjeg graničnog katnog pomaka određena je u trenutku gubitka cjelovitosti zidnoga ispuna, pri čemu je armirano-betonski okvir, još uvijek, gotovo netaknut izlaganjem tim pomacima, tj. pomoću maksimalnog pomaka postignutog tijekom ispitivanja.

Faktor konstruktivnog ponašanja,  $q$ , ukazuje na očigledan doprinos zidnoga ispuna te povoljno ponašanje svih ispitivanih modela uslijed djelovanja poprečnih sila kojima se simuliraju sile potresa, i reda je veličine vrijednosti koje se preporučuju za konstrukcije s armirano-betonskim zidovima.

**Tablica 4.22** Pregled koeficijenata duktilnosti i faktora ponašanja za GRUPE modela

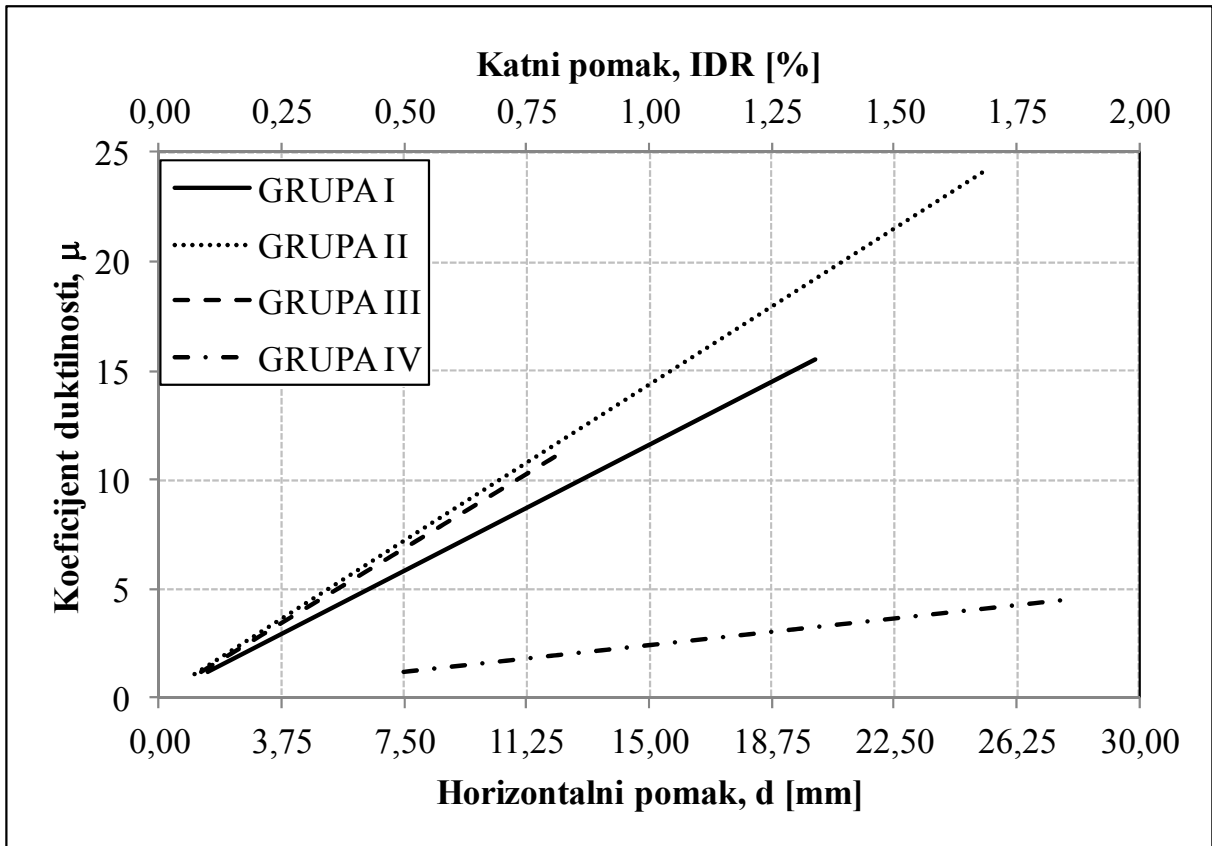
GRUPA	$H_2$ [kN]	$d_2$ [mm]	$H_3$ [kN]	$d_3$ [mm]	$\mu=d_3/d_2$	$q=(2\mu-1)^{0,5}$
GRUPA I	269	1,296	269	20,060	15,48	5,47
GRUPA II	264	1,046	264	25,180	24,08	6,87
GRUPA III	205	1,095	205	12,520	11,43	4,68
GRUPA IV	205	6,128	205	27,880	4,55	2,85

Kako vidimo, koeficijent duktilnosti ovisi, prije svega, o veličini krajnjeg graničnog katnog pomaka, odnosno o veličini opadanja poprečne nosivosti. U **tablici 4.23** (i na **slikama 4.73** i **4.74**) dane su vrijednosti koeficijenta duktilnosti i faktora ponašanja za različite katne pomake, a u odnosu na **točku 2** na bilinearnoj idealizaciji eksperimentalnih rezultata.

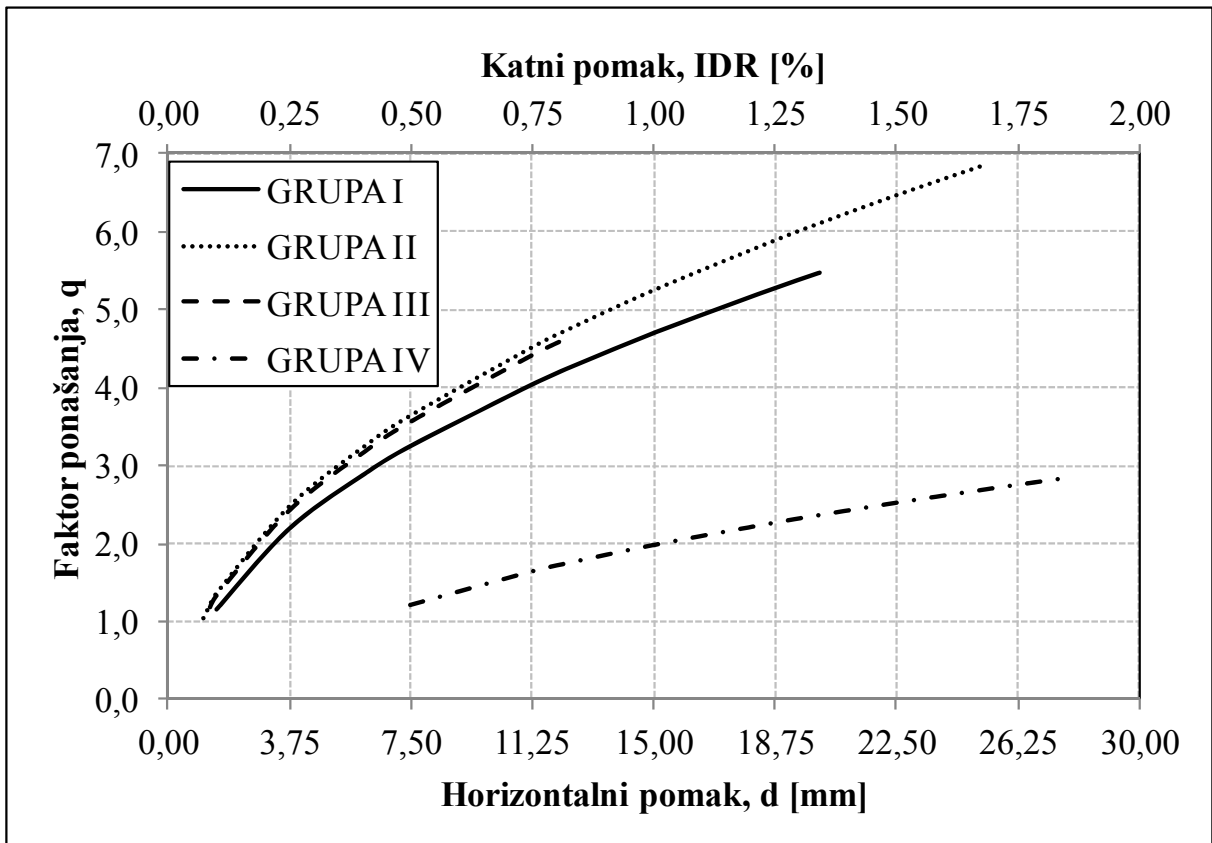
**Tablica 4.23** Pregled koeficijenata duktilnosti i faktora ponašanja pri različitim katnim pomacima za GRUPE modela

IDR [%]	0,50		0,75		0,83		1,34		1,68		1,86	
GRUPA	$\mu$	$q$	$\mu$	$q$	$\mu$	$q$	$\mu$	$q$	$\mu$	$q$	$\mu$	$q$
GRUPA I	5,79	3,25	8,68	4,05	9,61	4,28	15,51	5,47	-	-	-	-
GRUPA II	7,17	3,65	10,76	4,53	11,91	4,79	19,22	6,11	24,10	6,87	-	-
GRUPA III	6,85	3,56	10,27	4,42	11,37	4,68	-	-	-	-	-	-
GRUPA IV	1,22	1,20	1,84	1,63	2,03	1,76	3,28	2,36	4,11	2,69	4,55	2,85





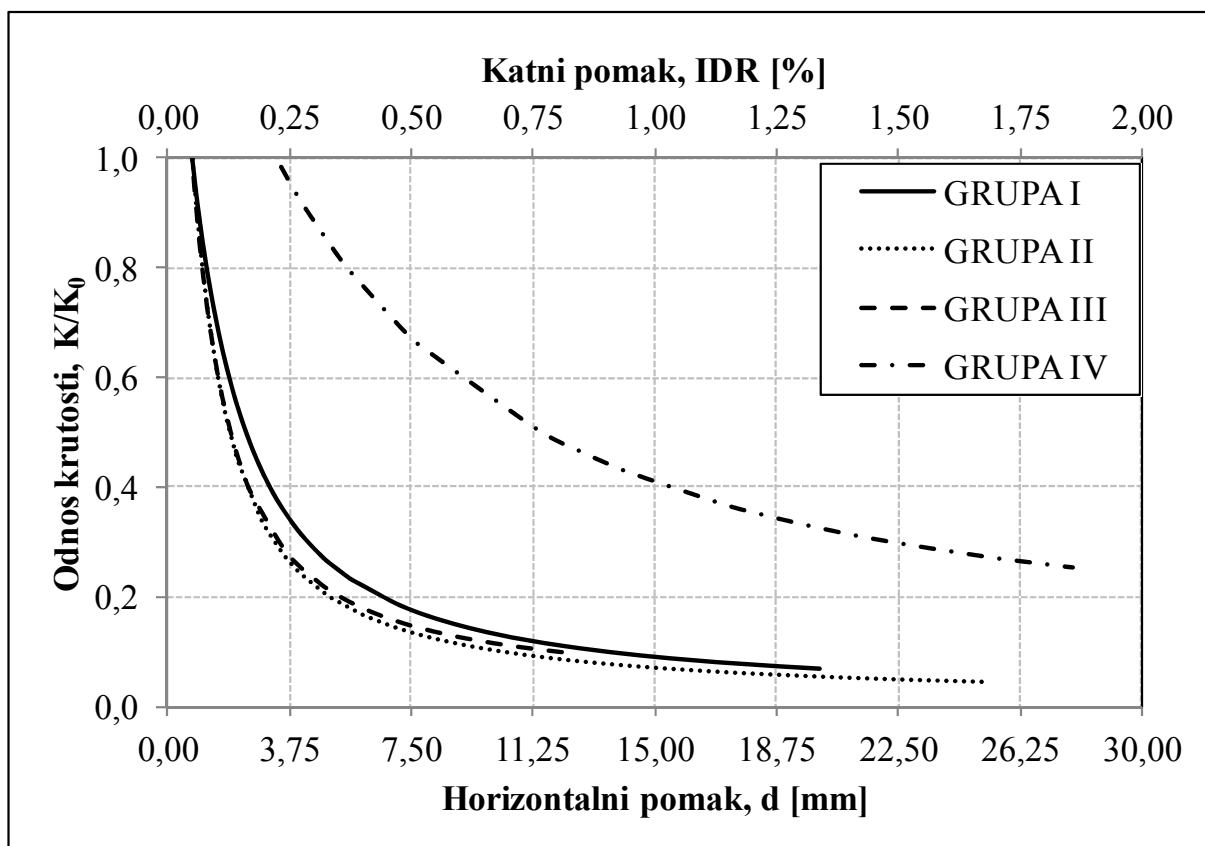
Slika 4.73 Ovisnost koeficijenta duktilnosti o horizontalnom, odnosno katnom pomaku



Slika 4.74 Ovisnost faktora ponašanja o horizontalnom, odnosno katnom pomaku tj. koeficijentu duktilnosti

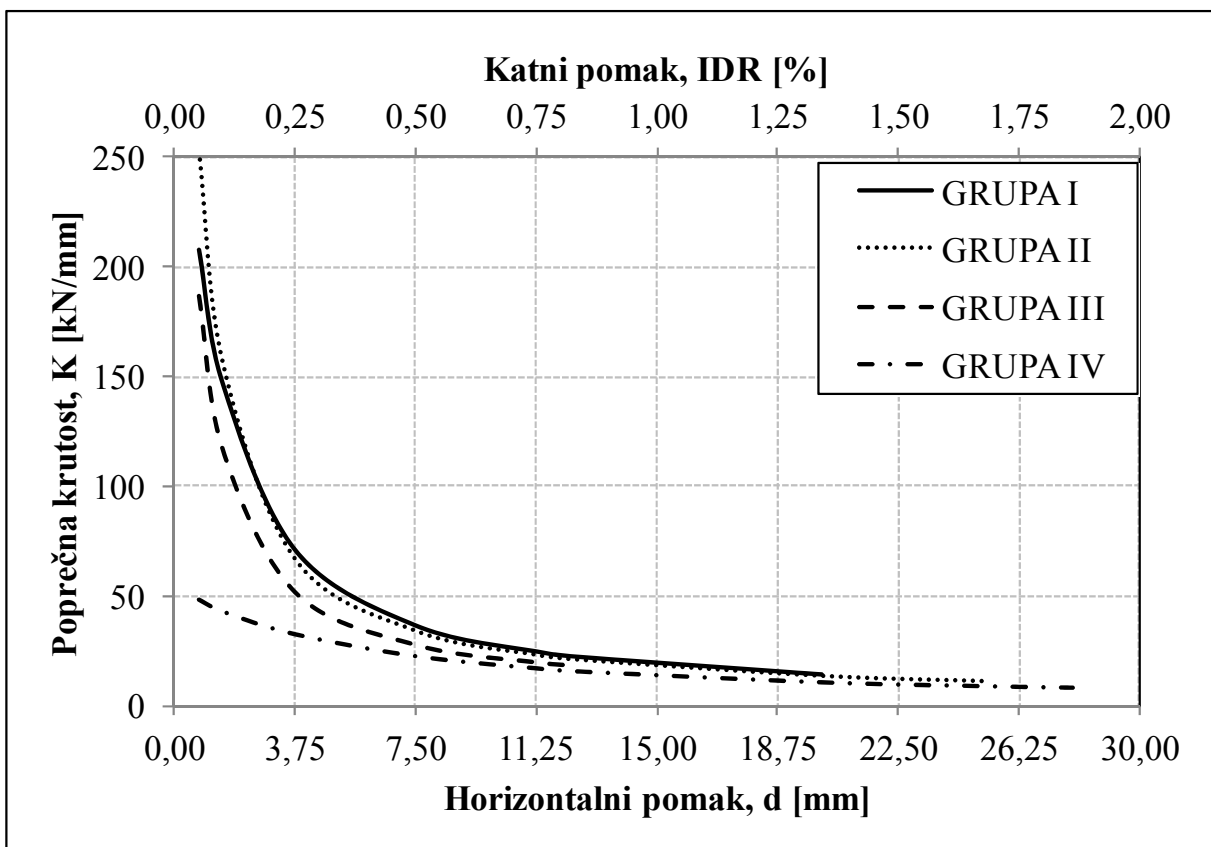
### 4.5.5 Poprečna krutost modela

Usporedba opadanja sekantnih krutosti svih GRUPA modela prikazana je na *slici 4.75*. Tijekom cikličkoga opterećenja izračunate su sekantne krutosti pri svakome nivou katnoga pomaka i normalizirane su u odnosu na početnu krutost (krutost pri pojavi prvih pukotina), a na osnovu optimaliziranih primarnih krivulja svake GRUPE modela. Sekantna krutost,  $K$ , računata je kao omjer horizontalne (poprečne) sile i pripadajućega horizontalnog pomaka ( $K=H/d$ ) za svaku GRUPU modela. Početna krutost,  $K_0$ , za svaku GRUPU modela izračunata je kao krutost pri katnome pomaku od 0,05%, odnosno 0,22% kod modela GRUPE IV (praznog armirano-betonskog okvira). Početna krutost, zapravo je elastična krutost ( $K_0=K_e$ ), čije su vrijednosti za svaku GRUPU modela prikazane na *slikama 4.69-4.72*. Kako je početna krutost modela armirano-betonskoga okvira sa zidnom ispunom (GRUPE I, II i III) znatno veća, također je kod istih opadanje krutosti puno izraženije u usporedbi s praznim armirano-betonskim okvirom (GRUPA IV). GRUPE modela II i III imaju nešto veće opadanje krutosti u odnosu na GRUPU I. Ovaj zaključak poklapa se sa zaključcima izvedenim u slučaju poprečne nosivosti GRUPE modela.



Slika 4.75 Opadanje krutosti modela po GRUPAMA u odnosu na početnu krutost

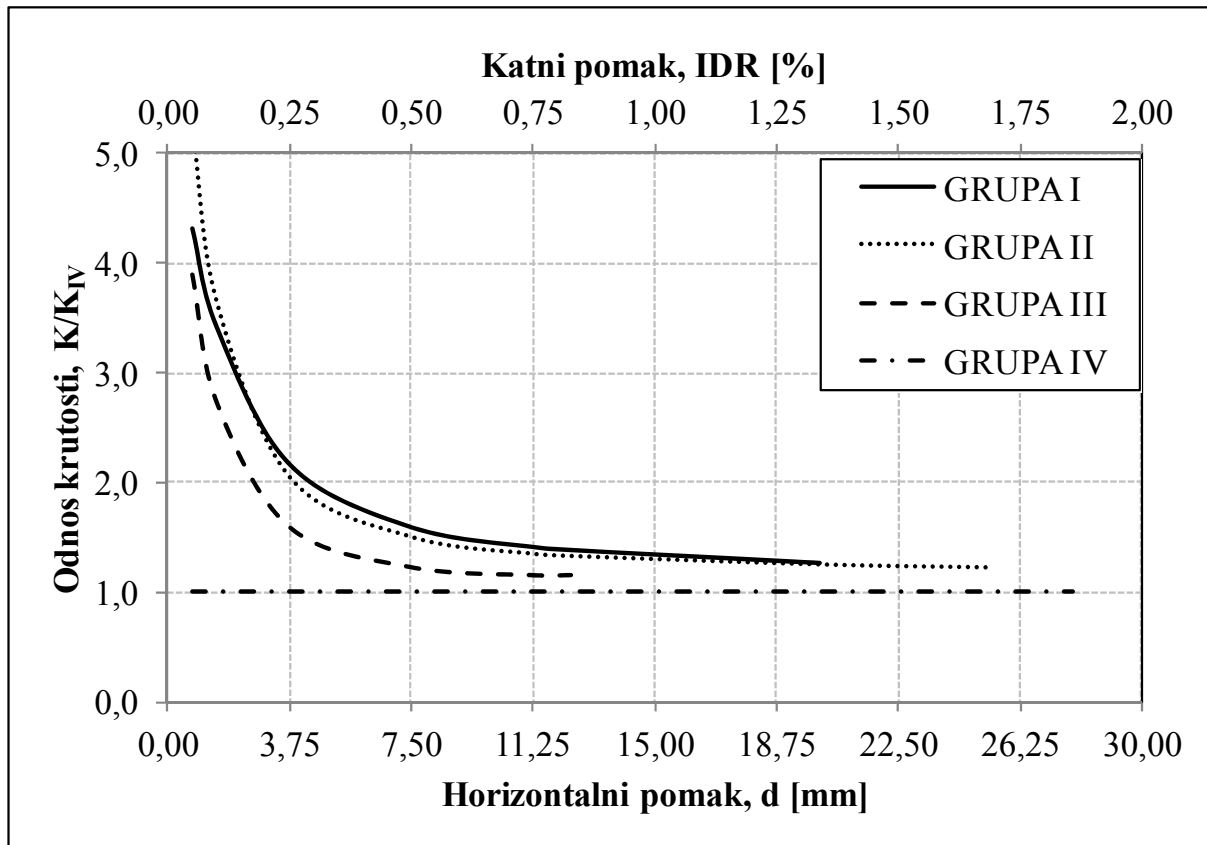
Opadanje krutosti modela po GRUPAMA prikazano je na *slici 4.76* u ovisnosti o horizontalnome pomaku, odnosno katnome pomaku prikazanom na sekundarnoj osi. Iz navedene slike, možemo zaključiti kako sekantna krutost modela GRUPE I i II približno jednako opada, s tim da brže opada u odnosu na GRUPU III. Najmanje izraženo opadanje krutosti je kod modela GRUPE IV, odnosno praznoga armirano-betonskog okvira. Također, možemo iz navedene slike zaključiti kako je za katni pomak od 0,25% krutost modela GRUPE I približno jednaka krutosti modela GRUPE II (razlika oko 6%), za oko 1,36 puta veća od krutosti modela GRUPE III, odnosno, 2,17 puta veća od modela GRUPE IV, i tako redom. Isto tako, važno je za primijetiti na *slici 4.76*, kako se sekantna krutost modela GRUPE I, II i III s povećanjem poprečne sile, odnosno katnoga pomaka približava sekantnoj krutosti modela GRUPE IV (praznom armirano-betonskom okviru), tj. smanjuje se. To je područje katnog pomaka od 1% pa na više.



Slika 4.76 Opadanje krutosti modela po GRUPAMA pri istom katnom pomaku

Ako se vrijednosti sekantne krutosti normaliziraju u odnosu na sekantnu krutost modela GRUPE IV (prazan armirano-betonski okvir), a za isti katni pomak, vidimo da je opadanje krutosti armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom od opečnih blokova (GRUPA I i II) sporije i približno jednako u odnosu na armirano-betonski okvir

ispunjen zidnim ispunom od porobetonskih blokova (GRUPA III), *slika 4.77*. Ovaj zaključak ovdje opet se poklapa sa zaključkom izvedenim u slučaju opadanja krutosti modela po GRUPAMA, odnosno u skladu je sa zaključcima izvedenima u slučaju poprečne nosivosti GRUPE modela.

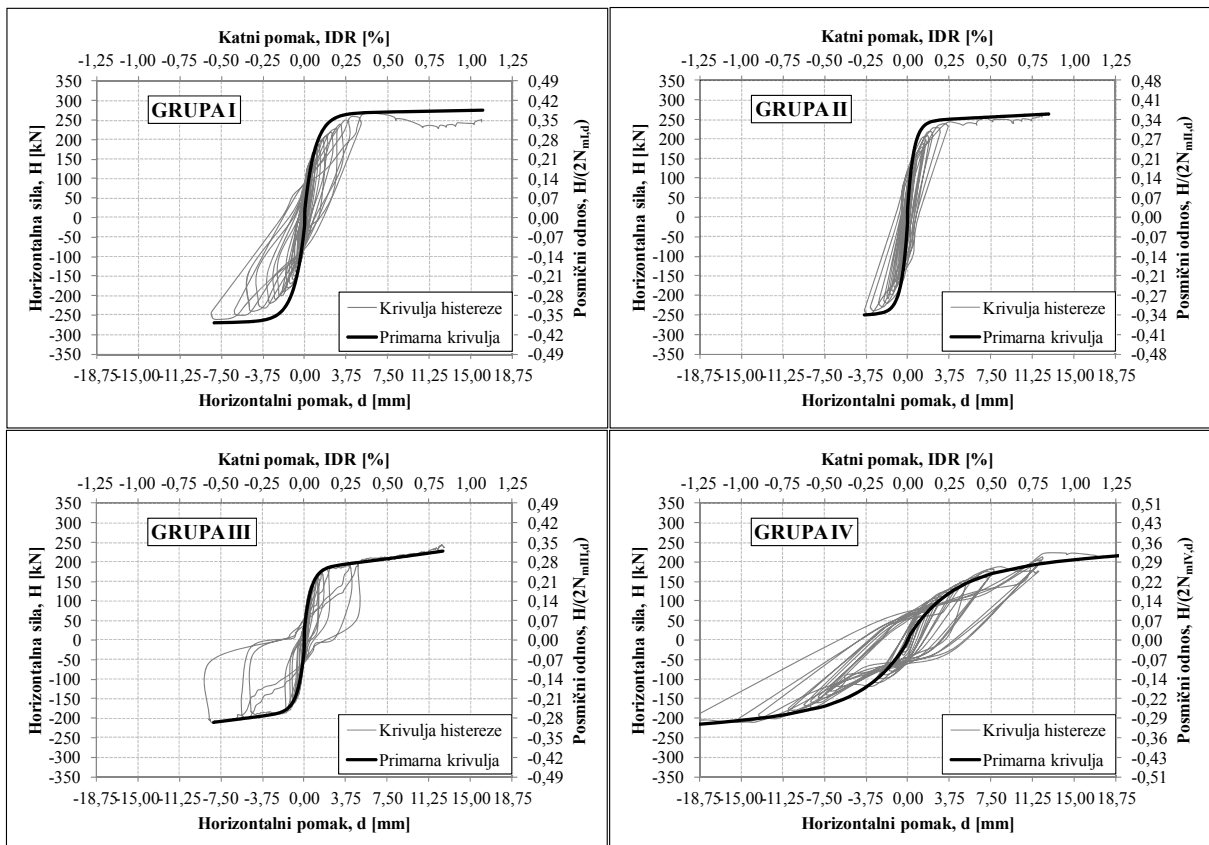


Slika 4.77 Opadanje krutosti u odnosu na referentni model (GRUPU IV) pri istom katnom pomaku

Sa *slike 4.77*, može se vidjeti i koliko je puta krutost armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom veća od praznoga armirano-betonskog okvira za isti katni pomak, a mogu se vidjeti i međusobni odnosi krutosti svih GRUPA modela (njihovi iznosi mogu se vidjeti na *slici 4.76*). Pa tako, za katni pomak od 0,25%, krutost modela GRUPE I je 2,17 puta veća od krutosti modela GRUPE IV, krutost modela GRUPE II je 2,05 puta veća od krutosti modela GRUPE IV i krutost modela GRUPE III je 1,59 puta veća od krutosti modela GRUPE IV. Možemo primijetiti kako se i normalizirana sekantna krutost GRUPE I, II i III s povećanjem poprečne sile, odnosno katnoga pomaka smanjuje, te se približava sekantnoj krutosti modela GRUPE IV (praznom armirano-betonskom okviru).

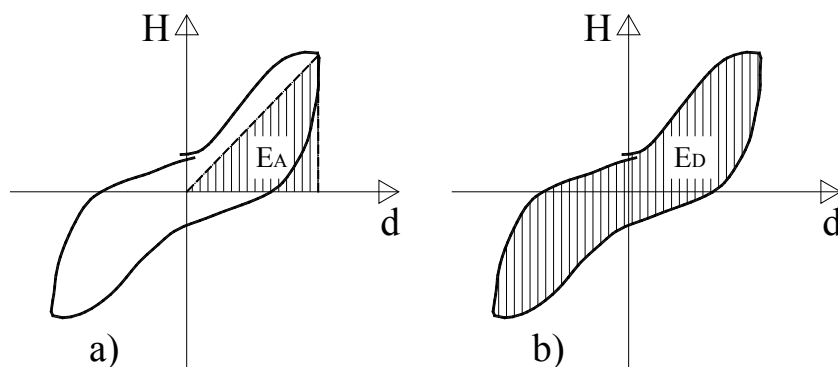
### 4.5.6 Histerezne energije modela

Da bi se odredila količina apsorbirane (primanje) i disipirane (trošenje) energije korištene su krivulje histereze MODELA 8, MODELA 4, MODELA 3 i MODELA 10. Navedeni modeli uzeti su kao referentni modeli koji predstavljaju pojedine grupe modela, tj. model 8 predstavlja GRUPU I, model 4 GRUPU II, model 3 GRUPU III i model 10 GRUPU IV. Ovo je napravljeno zbog zapisivanja podataka. Naime, za navedene modele raspoloživi su bili podatci koji su bilježili horizontalnu (poprečnu) silu i pripadajući pomak svake 2 sekunde. Na *slici 4.78* prikazane su krivulje histereze i primarne krivulje za navedene modele, odnosno GRUPE. Na istim slikama, primarne krivulje pojedinih GRUPA modela dobivene su optimizacijom eksperimentalnih rezultata kako je to opisano u *točki 4.5.2.1*. Kada tu krivulju (primarna krivulja) nacrtamo zajedno s krivuljama histereze za svaki model, odnosno GRUPU, onda s navedenih slika vidimo da nismo napravili veliku pogrešku jer se krivulje histereze jako dobro uklapaju u optimalizirane primarne krivulje.



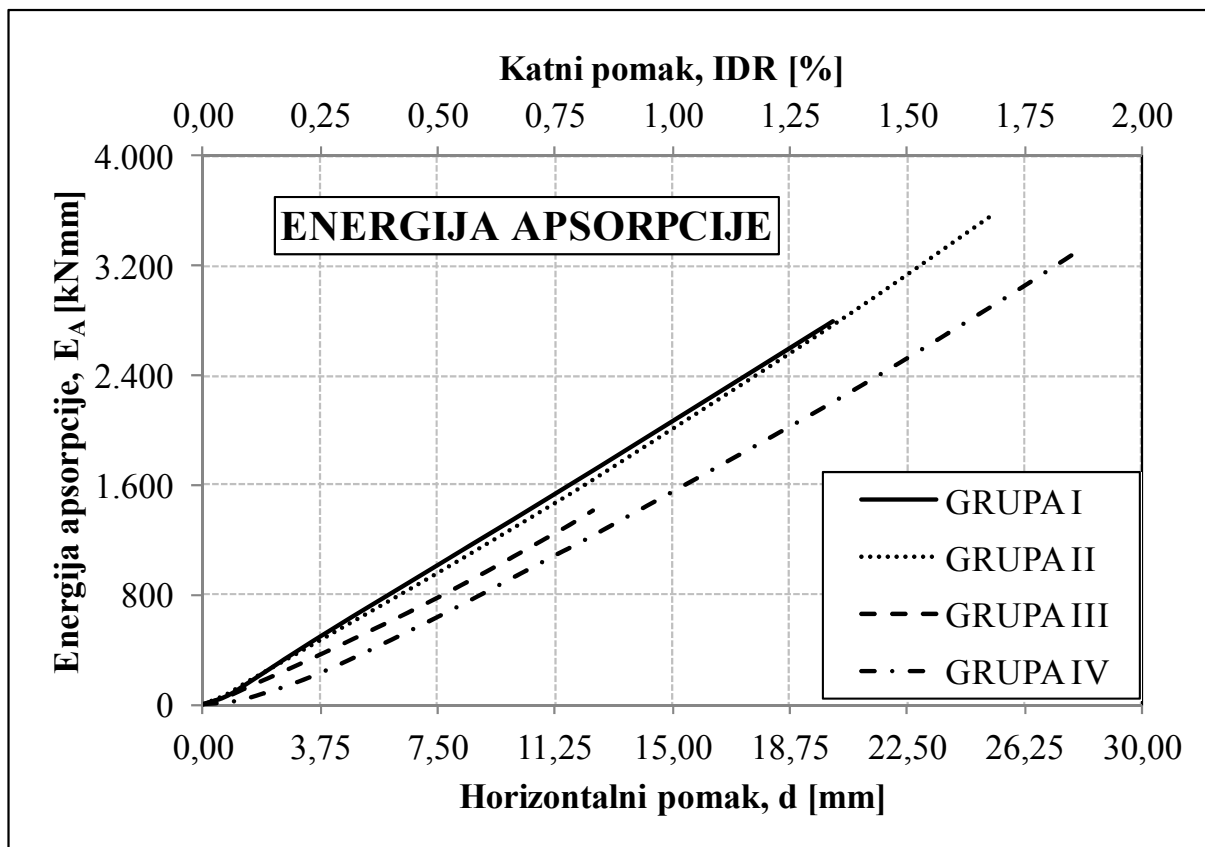
**Slika 4.78** Krivulje histereze i optimalizirane primarne krivulje pojedinih GRUPA modela

Količine apsorbirane i disipirane energije računane su prema *slici 4.79* [6]. Treba spomenuti, kako se disipirana energija računala kao ploština unutar krivulje histereze za svaki ciklus do određenoga katnoga pomaka (zbrajale su se površine svakog ciklusa).



Slika 4.79 Izračun apsorbirane i disipirane energije,  
 a) Energija apsorpcije (primanja), b) Energija disipacije (trošenja)

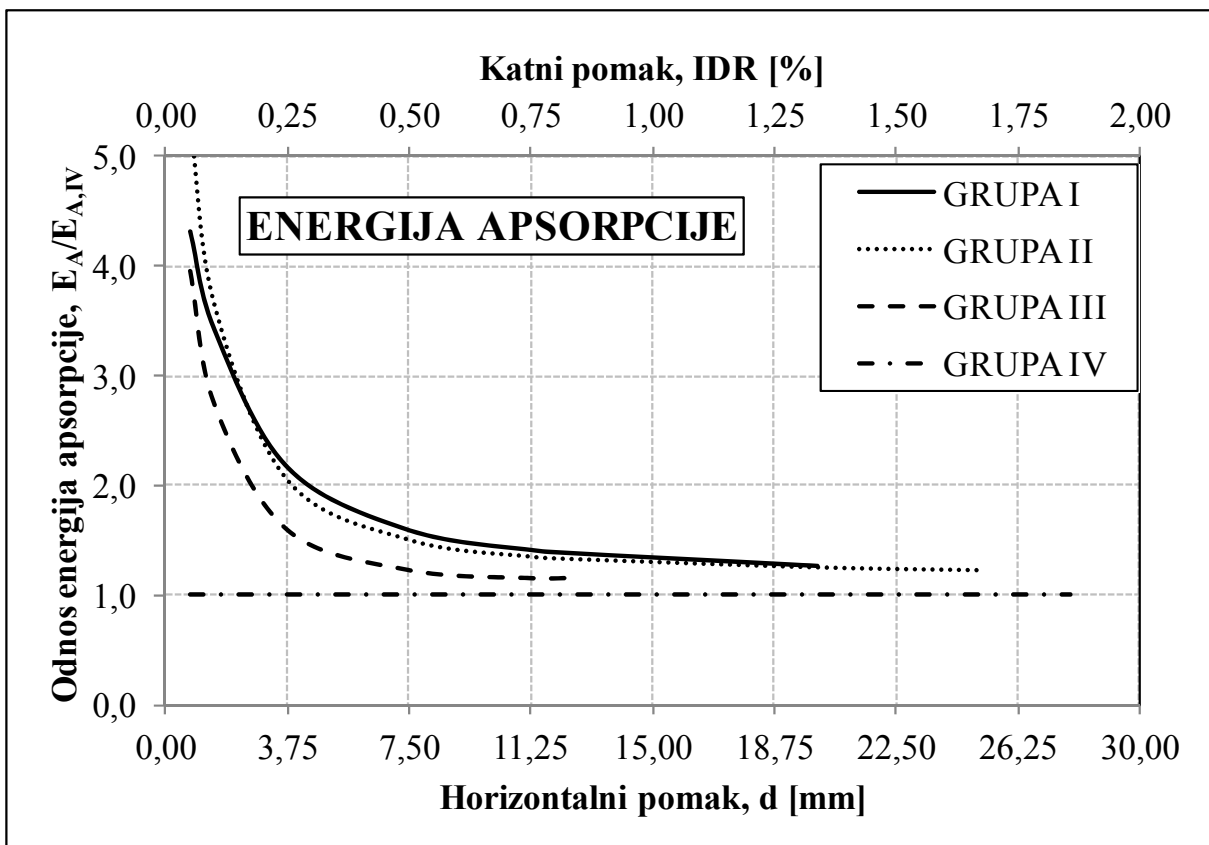
Na *slici 4.80* prikazane su količine apsorbirane energije za svaku grupu modela u ovisnosti o katnome pomaku. Na istoj slici možemo vidjeti kako je apsorbirana energija kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od opečnih blokova (GRUPA I i II), veća od one kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od porobetonskih blokova (GRUPA III). Isto tako, apsorbirana energija kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom veća je nego kod praznoga armirano-betonskoga okvira. Iz ovoga proizlazi i to da jači zidni ispun ima veći kapacitet apsorpcije (primanja) energije.



Slika 4.80 Količine apsorbirane energije pojedinih GRUPA modela

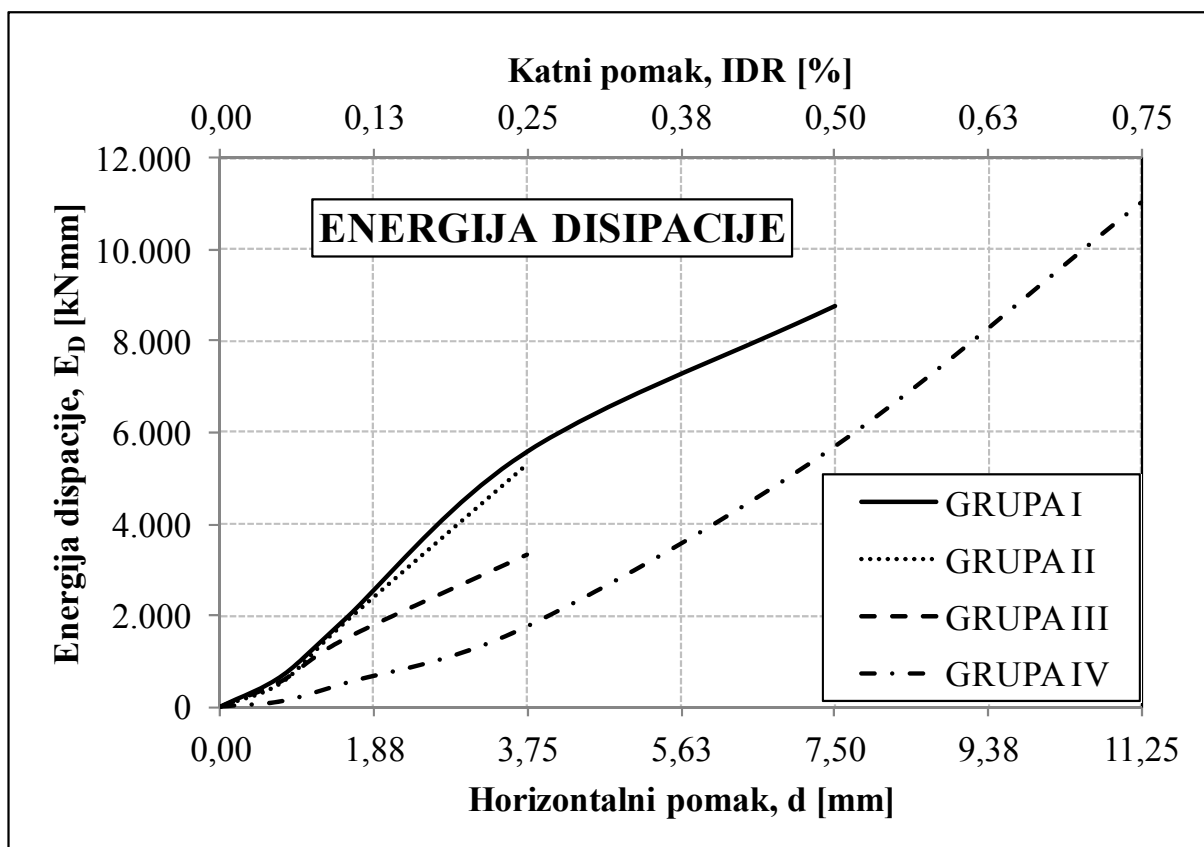
S povećavanjem nivoa katnoga pomaka, vidimo kako se povećava i količina apsorbirane energije kod svih GRUPA modela.

S druge strane, ako energije apsorpcije modela GRUPE I, II i III normaliziramo u odnosu na energiju apsorpcije modela GRUPE IV, *slika 4.81*, vidimo opadanje energije apsorpcije modela GRUPE I, II i III u odnosu na model GRUPE IV, a s povećanjem katnoga pomaka. To opadanje, približno je jednako za modele GRUPE I i II, dok je za model GRUPE III nešto izraženije (armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom od porobetona). Također, vidimo koliko je puta energija apsorpcije veća kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od praznoga armirano-betonskoga okvira, naročito pri malim katnim pomacima (do 0,25%). Drugim riječima, vidimo koliko se povećava kapacitet energije apsorpcije armirano-betonskog okvira dodavanjem zidnoga ispuna. S povećavanjem nivoa katnih pomaka (od 0,25%) taj se kapacitet smanjuje, odnosno približava se kapacitetu praznoga armirano-betonskoga okvira.



Slika 4.81 Opadanje apsorbirane energije modela GRUPE I, II i III u odnosu na referentni model (GRUPA IV)

Promatrajući energiju disipacije (trošenja), čije su količine prikazane na *slici 4.82*, možemo doći do sličnih zaključaka kao i kod energije apsorpcije (primanja).



Slika 4.82 Količine disipirane energije pojedinih GRUPA modela

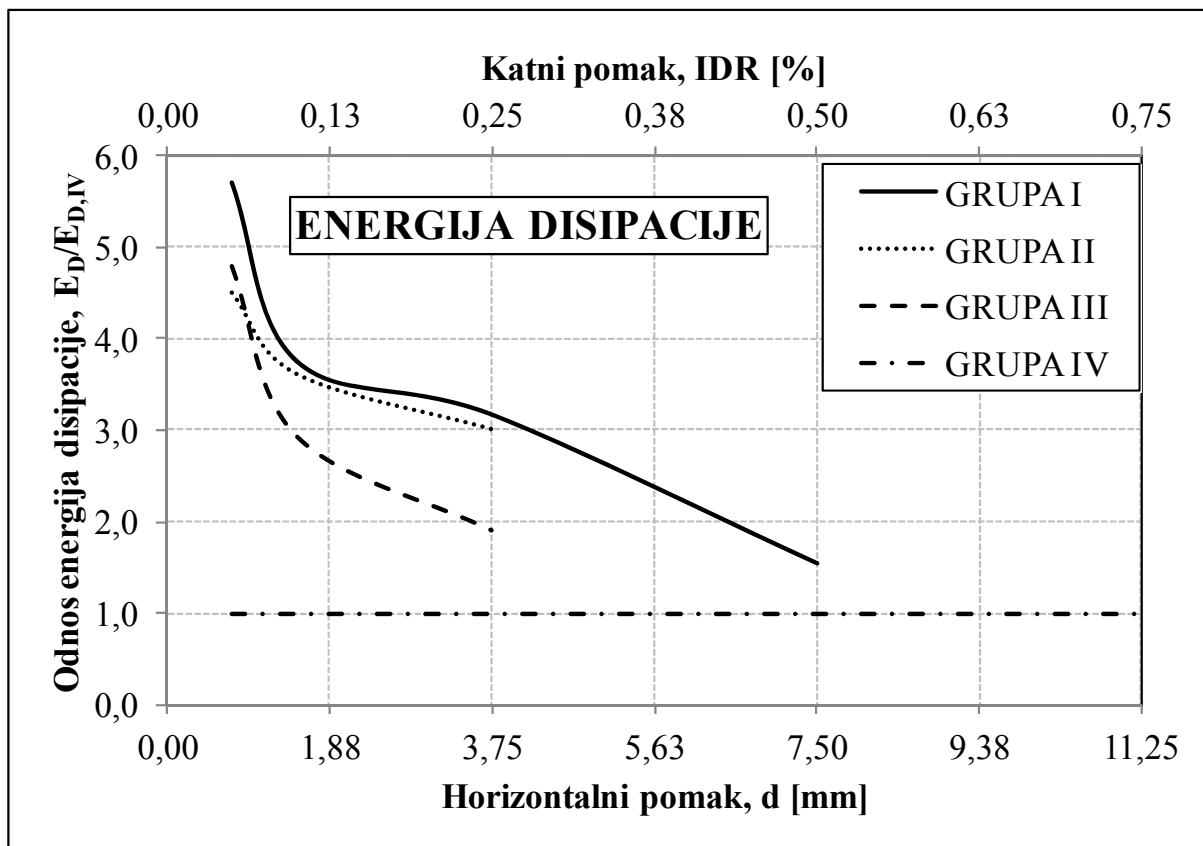
Pri malim nivoima katnih pomaka (do 0,25%) vidimo povećanje energije disipacije kod svih GRUPA modela. S povećanjem katnoga pomaka preko 0,25%, također, dolazi do povećanja energije disipacije (GRUPA I i GRUPA IV). Isto tako, energija disipacije kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom veća je nego kod praznoga armirano-betonskoga okvira. Iz ovoga opet proizlazi kako jači zidni ispun ima veći kapacitet disipacije (trošenja) energije isto kao i kod energije apsorpcije (primanja).

Ako energije disipacije modela GRUPE I, II i III, normaliziramo u odnosu na energiju disipacije modela GRUPE IV (kao i kod energije apsorpcije), *slika 4.83*, vidimo koliko je puta energija disipacije kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom veća od praznoga armirano-betonskoga okvira, naročito pri malim katnim pomacima (do 0,25%). Pri tako malim katnim pomacima, možemo reći, kako model GRUPE I ima najveću energiju disipacije, dok je kod modela GRUPE III najmanja ako promatramo armirano-betonski okvir ispunjen zidnim ispunom.

Ovdje sada imamo istu situaciju kao i kod energije apsorpcije, najveći kapacitet disipacije ima jaki zidni ispun (ne zaboravimo da se radi o malim nivoima katnih pomaka), što i nije iznenađujuće budući da se radi o modelima armirano-betonskoga okvira koji su ispunjeni zidnim ispunom od opečnih blokova MO10.



Jednostavnije rečeno, armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom imaju svojstvo boljeg trošenja i primanja energije u odnosu na prazan armirano-betonski okvir, naravno, do određenih nivoa katnih pomaka.



Slika 4.83 Opadanje disipirane energije modela GRUPE I, II i III u odnosu na referentni model (GRUPA IV)

Važno za primijetiti sa *slike 4.83*, kako energija disipacije (trošenja) svih GRUPA modela s povećanjem nivoa katnoga pomaka opada, kao i energija apsorpcije (primanja). Također, s povećanjem katnih pomaka približava se praznom armirano-betonskome okviru (GRUPA IV). Ne temelju ispitivanja sustava s jednim stupnjem slobode (SDOF) od armiranog betona na simulaciju potresa, Gulkan i Sozen (1976) otkrili su da je moguće opisati neelastični odziv sustava pomoću elastičnog SDOF sustava, sa smanjenom krutošću i povećanim prigušenjem dobivenim prema izrazu:

$$\xi_e = 0,2 \cdot \left(1 - 1/\sqrt{\mu}\right) + 0,02, \quad (4.4)$$

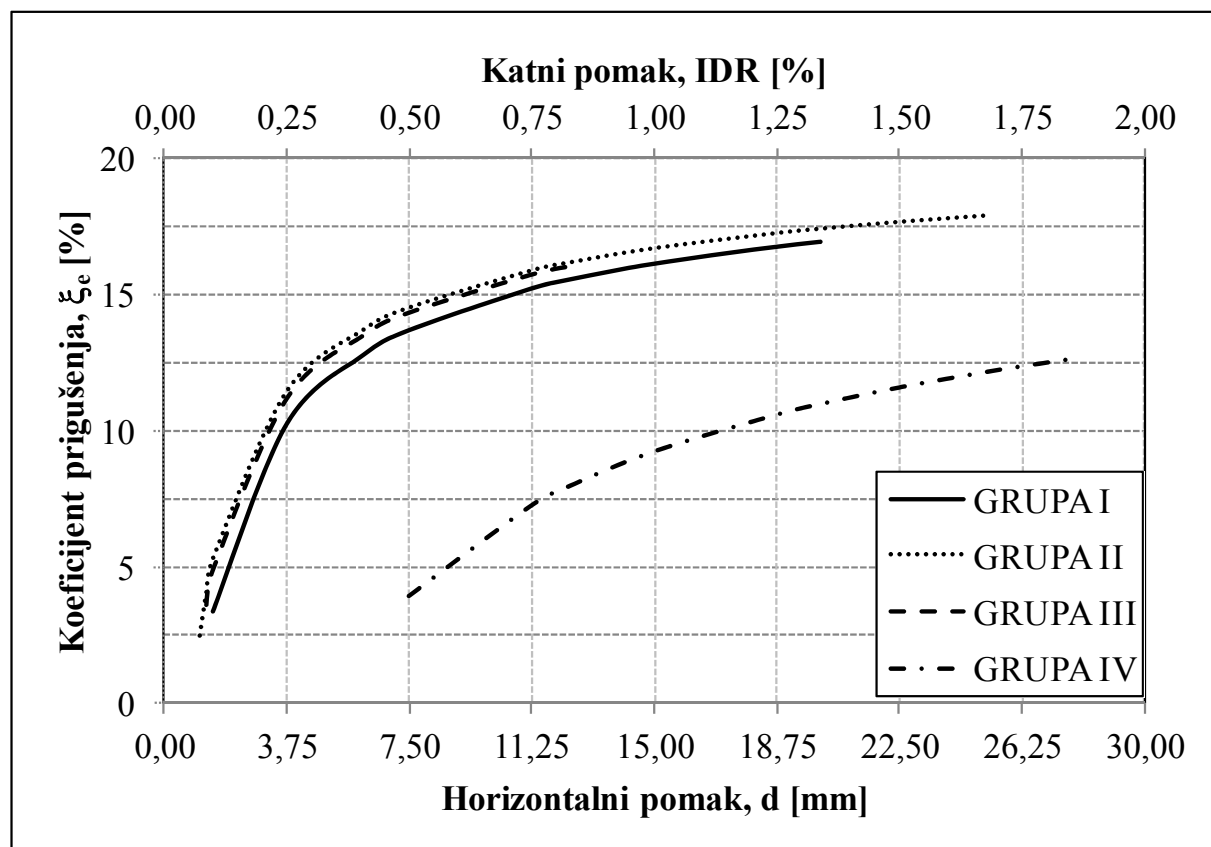
gdje je:  $\mu$  koeficijent duktilnosti koji je objašnjen u *točki 4.5.4*.

U *tablici 4.24* prikazane su vrijednosti koeficijenta prigušenja u ovisnosti o koeficijentu duktilnosti, a pri različitim katnim pomacima, na osnovu kojih smo dobili *sliku 4.84*. S navedene slike jasno se može vidjeti kako se povećava koeficijent prigušenja s povećanjem koeficijenta duktilnosti, odnosno katnoga pomaka.

Također, možemo vidjeti na *slici 4.84* kako je doprinos zidnoga ispuna na koeficijent prigušenja značajan u odnosu na prazan armirano-betonski okvir.

**Tablica 4.24** Pregled koeficijenata duktilnosti i koeficijenata prigušenja ( $\xi_e$  [%]) pri različitim katnim pomacima za GRUPE modela

IDR [%]	0,10		0,25		0,50		0,75	
GRUPA	$\mu$	$\xi_e$	$\mu$	$\xi_e$	$\mu$	$\xi_e$	$\mu$	$\xi_e$
GRUPA I	1,16	3,41	2,89	10,24	5,79	13,69	8,68	15,21
GRUPA II	1,43	5,30	3,59	11,44	7,17	14,53	10,76	15,90
GRUPA III	1,37	4,91	3,42	11,19	6,85	14,36	10,27	15,76
GRUPA IV	-	-	-	-	1,22	3,92	1,84	7,24
IDR [%]	0,83		1,34		1,68		1,86	
GRUPA	$\mu$	$\xi_e$	$\mu$	$\xi_e$	$\mu$	$\xi_e$	$\mu$	$\xi_e$
GRUPA I	9,61	15,55	15,51	16,92	-	-	-	-
GRUPA II	11,91	16,20	19,22	17,44	24,10	17,93	-	-
GRUPA III	11,37	16,07	-	-	-	-	-	-
GRUPA IV	2,03	7,97	3,28	10,96	4,11	12,14	4,55	12,63



**Slika 4.84** Ovisnost koeficijenta prigušenja o horizontalnom odnosno katnom pomaku

### 4.5.7 Kategorizacija oštećenja

Mnoge građevine doživljavaju, nakon snažnoga potresa, različite stupnjeve oštećenja, a neke i rušenje. Jedan od najtežih zadataka inspekcije nakon potresa je procijeniti i kvantificirati seizmičko oštećenje ili procijeniti potresnu sigurnost i daljnju uporabljivost, odnosno korištenje, te preostali kapacitet građevine. Razredba oštećenja, empirijska po svojoj osnovi, različita je od zemlje do zemlje ili od jedne inženjerske škole do druge. Razredba oštećenja mora se provoditi prema jedinstvenoj metodologiji za procjenu šteta od elementarnih nepogoda i svrha joj je obaviti stručnu ocjenu oštećenja s ciljem utvrđivanja veličine štete u naturalnim i vrijednosnim pokazateljima. Razine oštećenja, razvrstane definiranom metodologijom, mogu se prikazati ljestvicom od šest stupnjeva koji su definirani u hrvatskim propisima za procjenu katastrofalnih oštećenja poslije potresa.

Vrijednosti koeficijenta oštetljivosti ( $DR$ ), koje se koriste u analizi oštetljivosti prije i poslije potresa, povezane su s vrijednostima identifikacije razine oštećenja ( $S$ ), definiranim u hrvatskim propisima za procjenu katastrofalnih oštećenja poslije potresa, a što je prikazano **tablicom 4.25**.

**Tablica 4.25** Fizikalna interpretacija koeficijenata oštetljivosti

Koeficijent oštetljivosti, $DR$	Opis konstrukcijskog oštećenja	Mogućnosti tehničkoga i ekonomskoga popravka	Stupanj oštećenja, $S$ ( $1^0$ do $6^0$ )
$0 < DR \leq 0,3$	Beznačajno	Popravljivo	$1^0-2^0$
$0,3 < DR \leq 0,5$	Umjereno	Popravljivo	$3^0$
$0,5 < DR \leq 0,8$	Srednje teško	Popravljivo	$4^0$
$0,8 < DR < 1,0$	Teško	Popravljivo	$5^0$
$1,0 \leq DR$	Prekomjerno visok stupanj ili rušenje	Nepopravljivo	$6^0$

Povezivanje vrijednosti koeficijenta oštetljivosti s vrijednostima identifikacije razine oštećenja definiranim Europskom makroseizmičkom skalom EMS98 prikazano je u **tablici 4.26**.

**Tablica 4.26** Vrijednosti koeficijenata oštetljivosti povezane s EMS98

Koeficijent oštetljivosti, $DR$	Opis konstrukcijskog oštećenja	Mogućnosti tehničkoga i ekonomskoga popravka	Stupanj oštećenja, $S$ ( $1^0$ do $5^0$ )
$0 < DR \leq 0,3$	Beznačajno	Popravljivo	$1^0$
$0,3 < DR \leq 0,5$	Umjereno	Popravljivo	$2^0$
$0,5 < DR \leq 0,8$	Srednje teško	Popravljivo	$3^0$
$0,8 < DR < 1,0$	Teško	Popravljivo	$4^0$
$1,0 \leq DR$	Prekomjerno visok stupanj ili rušenje	Nepopravljivo	$5^0$

Pokazatelji su stupnja oštećenja prema hrvatskim propisima sažeto opisani kako slijedi (*tablica 4.25*):

- ✓ **Prvi stupanj** oštećenja obuhvaća zgrade s manjim oštećenjem obloga, morta, stakla i dimnjaka, bez vidljivih oštećenja konstrukcijskih elemenata. Moguće su fine pukotine u mortu zidova i stupova;
- ✓ **Drugi stupanj** oštećenja obuhvaća zgrade kod kojih je došlo do sljedećih oštećenja: pukotine u mortu zidova i stropova, opadanje većih komada žbuke sa zidnih i stropnih ploština, brojne pukotine pregradnih zidova i ispune, te manje pukotine konstrukcijskih elemenata zidanih zgrada;
- ✓ **Treći stupanj** obuhvaća zgrade s djelomičnim oštećenjem krovne konstrukcije, zidova ispune, zabatnih i pregradnih zidova, te deformiranje nosivih elemenata krovne konstrukcije. U armiranobetonskim stupovima postoje manje pukotine. Mogu se pojaviti jako izražene pukotine i djelomično rušenje pregradnih zidova i ispune, ispućani konstrukcijski zidovi, pukotine na međuprozorskim dijelovima konstrukcijskih zidova, manje pukotine konstrukcijskih elemenata armirano-betonskih konstrukcijskih sustava;
- ✓ **Četvrti stupanj** oštećenja obuhvaća zgrade s većim oštećenjima stupova i krovne konstrukcije. Moguće su velike deformacije i rušenje ili djelomično rušenje velikoga broja pregradnih zidova i zidova ispune, velike pukotine zidanih konstrukcijskih elemenata, brojne pukotine konstrukcijskih elemenata armiranobetonskih konstrukcijskih sustava;
- ✓ **Peti stupanj** obuhvaća zgrade kod kojih je došlo do rušenja pregradnih zidova i zidova ispune, velikih pukotina uz razdvajanje nosivih zidanih zidova, izraženih oštećenja i deformacija konstrukcijskih elemenata armiranobetonskih konstrukcijskih sustava, većih pukotina armiranobetonskih zidova, spojnih čvorova, plastificiranih zona stupova i greda uz manje dislokacije elemenata. Oštećenja se mogu sanirati.
- ✓ **Šesti stupanj** obuhvaća zgrade kod kojih je razoren konstrukcijski sustav s teško oštećenim, zdrobljenim i dislociranim konstrukcijskim elementima ili su zgrade srušene.

Građevine svrstane u prva tri stupnja oštećenja nisu opasne za korisnike, za njih je prihvatljiv postupak popravaka, odnosno rekonstrukcije do stanja prethodne otpornosti, te se uz manje popravke mogu i dalje koristiti. Građevine svrstane u četvrti i peti stupanj ozbiljno su ugrožene i treba ih iseliti. Sanaciju (rekonstrukciju, ojačanje) tako oštećenih građevina potrebno je obaviti na osnovi tehničke dokumentacije za koju je potreban uobičajeni postupak. Građevine svrstane u šesti stupanj oštećenja neuporabljive su i ne saniraju se.

#### 4.5.7.1 Metode utvrđivanja oštećenja

Nakon uvida u oblike oštećenja i njihove razredbe te definiranja ugroženih dijelova građevine, nameće se pitanje mogućnosti determinističkoga pristupa utvrđivanja stupnja oštećenja određene građevine. Naime, građevine su same po sebi složeni sustavi koji udovoljavaju zahtjevima nosivosti, funkcionalnosti i trajnosti, dok oštećene građevine imaju neke od navedenih osobina degradirane u većoj ili manjoj mjeri. Oštećenje konstrukcije mogli bi definirati kao razmjernu preobliku građevine pod djelovanjem potresnoga opterećenja određenoga intenziteta, ovisno o njezinim konstrukcijskim značajkama.

Ishod spomenutoga široko je područje za istraživanja koja se mogu provesti različitim metodama i s različitih gledišta. Tako je cilj ekonomskoga gledišta oštećenja, naravno, trošak, za razliku od konstruktera, koji pri analizi oštećenja sagledava preostali kapacitet ili energijski koncept, dok aspekt sigurnosti dovodi u prvi plan postotak uništenih arhitektonskih detalja, pregradnih zidova i, naravno, slom konstrukcije.

Metode utvrđivanja stupnja oštećenja zgrade od potresa mogu se podijeliti u tri skupine: empirijske, subjektivne i teorijske (Morić, 1985.).

Za potrebe ovoga rada, odnosno utvrđivanja oštećenja zidnoga ispuna u armirano-betonskom okviru koristit će se subjektivna metoda.

**Subjektivne metode** zasnovane su na osobnome iskustvu osobe koja ocjenjuje stupanj oštećenja. Do izražaja dolaze u slučaju pomanjkanja kvantitativnoga znanja o odnosu između oštećenja i nekoga parametra potresnoga intenziteta ili ako analitički izraz ne definira pravo stanje. Tada se pristupa subjektivnoj ocjeni zasnovanoj na osobnome iskustvu promatrača oštećenja. Određenoj se slici oštećenja građevine, koja je rezultat više ili manje podrobnoga vizualnoga pregleda bez uvida u tehničku dokumentaciju i bez prethodnih proračuna, pridružuje određeni stupanj oštećenja. Na taj način definirana probabilistička matrica oštećenja predstavlja funkciju oštećenja ovisnu o specifičnoj razini potresnoga gibanja. Podatci utvrđeni subjektivnom metodom najviše služe za razredbu građevina oštećenih potresom, a i podloga su za analize u empirijskoj metodi.

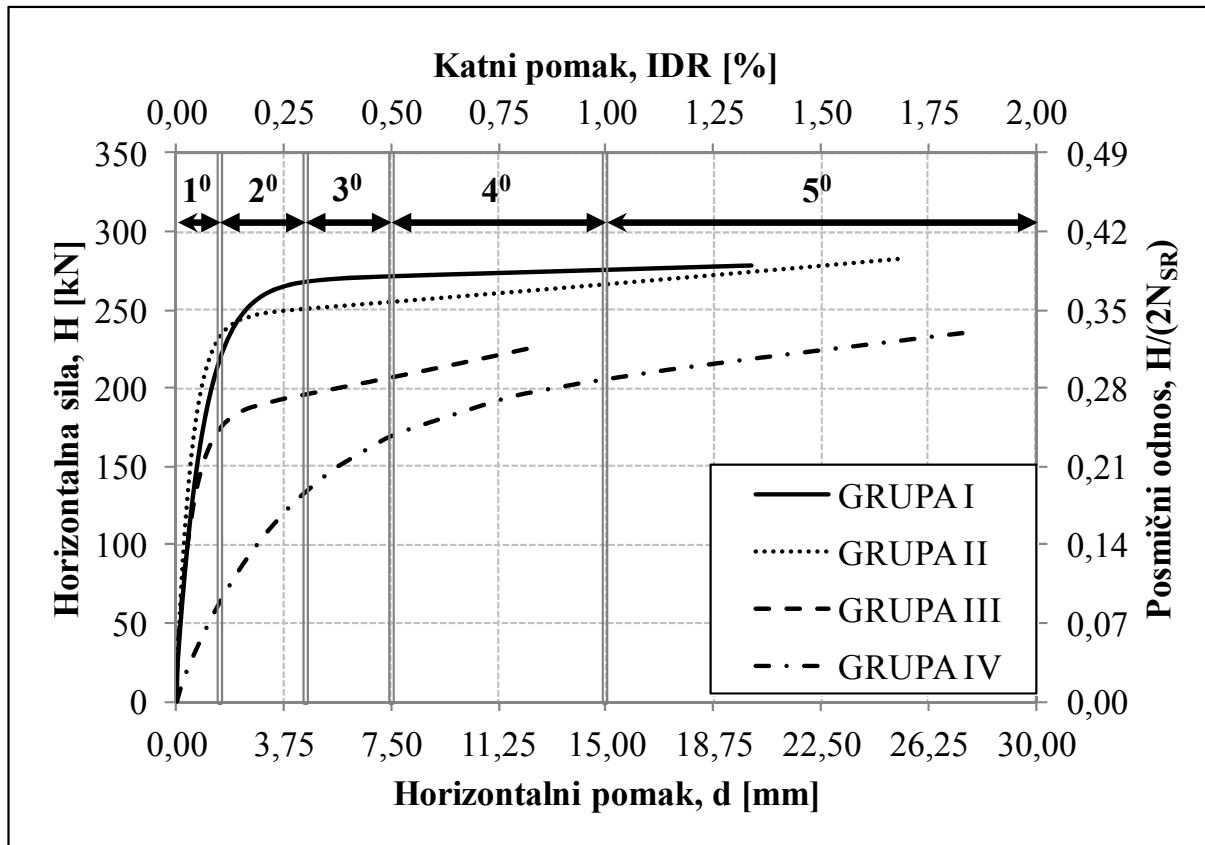
#### 4.5.7.2 Utvrđivanje oštećenja zidnog ispuna

Na osnovu svih obrađenih eksperimentalnih rezultata i opisane kategorizacije oštećenja kao i metoda utvrđivanja oštećenja, u ovome je radu utvrđivanje oštećenja zidnoga ispuna izvršeno na osnovu katnih pomaka.

Promatranjem razine oštećenja (pojavljivanjem pukotina u zidnome ispunu, odvajanje zidnoga ispuna od ab okvira, ispadanjem zidnoga ispuna, itd.) zidnoga ispuna u ovisnosti o nivou katnoga pomaka, definirana su sljedeća područja katnih pomaka gdje im je pridružen odgovarajući stupanj oštećenja:

- područje katnih pomaka od 0,00-0,10% → 1<sup>o</sup>,
- područje katnih pomaka od 0,10-0,30% → 2<sup>o</sup>,
- područje katnih pomaka od 0,30-0,50% → 3<sup>o</sup>,
- područje katnih pomaka od 0,50-1,00% → 4<sup>o</sup>,
- područje katnih pomaka od 1,00% → 5<sup>o</sup>.

Ovakvu podjelu, tj. stupnjeve oštećenja najjednostavnije je prikazati na primarnim krivuljama (krivulje nosivosti) svih GRUPA modela prema *slici 4.85*.



Slika 4.85 Stupanj oštećenja zidnog ispuna u ovisnosti o katnom pomaku i poprečnoj nosivosti

Sa *slike 4.85* možemo zaključiti sljedeće:

- ✓ Za stupanj oštećenja 1<sup>0</sup>, što odgovara katnome pomaku 0,00-0,10%, imamo beznačajno oštećenje zidnog ispuna i sustav se ponaša gotovo linearno (elastično).
- ✓ Za stupanj oštećenja 2<sup>0</sup>, što odgovara katnome pomaku 0,10-0,30%, imamo umjereno oštećenje zidnog ispuna. U tom području oštećivanjem zidnoga ispuna smanjuje se njegov doprinos pri čemu se poprečna nosivost i dalje održava doprinosom armirano-betonskog okvira.
- ✓ Za stupanj oštećenja 3<sup>0</sup>, što odgovara katnom pomaku 0,30-0,50%, imamo srednje teško oštećenje zidnoga ispuna. U tome području nema značajnog povećanja poprečne nosivosti.
- ✓ Za stupanj oštećenja 4<sup>0</sup>, što odgovara katnom pomaku 0,50-1,00%, imamo teško oštećenje zidnoga ispuna. U tome području, također nema povećanja poprečne nosivosti, doprinos zidnog ispuna sve je manji i može se zanemariti.
- ✓ Za stupanj oštećenja 5<sup>0</sup>, što odgovara katnom pomaku preko 1,00%, imamo prekomjerno visok stupanja oštećenja zidnoga ispuna (ispadanje elemenata zidnog ispuna) što postaje teško popravljivo. U tome području poprečna nosivost se još uvijek održava, ali doprinos zidnoga ispuna može se zanemariti. Važno je napomenuti kako je u ovome stupnju oštećenja armirano-betonski okvir, još uvijek, beznačajno oštećen.

Pridruženi katni pomaci pojedinim stupnjevima oštećenja zidnoga ispuna prikazani su sažeto u *tablici 4.27*.

**Tablica 4.27** Vrijednosti katnih pomaka povezanih s EMS98

Katni pomak, IDR [%]	Opis konstrukcijskog oštećenja	Mogućnosti tehničkoga i ekonomskoga popravka	Stupanj oštećenja, S (1 <sup>0</sup> do 5 <sup>0</sup> )
0<IDR<=0,1	Beznačajno	Popravljivo	1 <sup>0</sup>
0,1<IDR<=0,3	Umjereno	Popravljivo	2 <sup>0</sup>
0,3<IDR<=0,5	Srednje teško	Popravljivo	3 <sup>0</sup>
0,5<IDR<1,0	Teško	Popravljivo	4 <sup>0</sup>
1,0<=IDR	Prekomjerno visok stupanj ili rušenje	Nepopravljivo	5 <sup>0</sup>

## 4.6 ZAKLJUČAK POGLAVLJA

Za ispitivanja MODELA, koja su provedena i detaljno opisana u ovome poglavlju, sažeto možemo reći, odnosno ponoviti sljedeće:

- Svi MODELI napravljeni su u mjerilu 1:2,5 na osnovu modela prototipa iz *Poglavlja 2*.
- Upotrijebljene su tri vrste zidnoga ispuna. Jaki zidni ispun od opečnih blokova MO10, srednji zidni ispun od opečnih blokova MO5 i meki (slabi) zidni ispun od porobetonских blokova MO2,5.
- Ispitano je ukupno 10 modela, od svake vrste zidnoga ispuna po tri modela i jedan model koji predstavlja prazan armirano-betonski okvir.
- Ispitana su osnovna mehanička svojstva morta (ljepila) za zidanje zidnoga ispuna, betona i armature.
- Eksperimentalni rezultati dobiveni su na osnovu očitavanja rezultata na mjernim instrumentima. Pri tome su korištene dvije vertikalne preše s pretvaračima sile za unos stalnog vertikalnog opterećenja, dvije horizontalne preše s pretvaračima sile za unos promjenjivog (cikličkog) horizontalnog opterećenja, osam mjerača pomaka (po dva za horizontalne i vertikalne pomake i po dva za mjerenje dijagonalnih pomaka zidnog ispuna i armirano-betonskog okvira), i šest deformetara i jedna mikroura koji su služili kao kontrola.
- Mehanizam sloma zidnoga ispuna teško je odrediti, kod svih vrsta zidnoga ispuna uvijek je to bila, manje-više, kombinacija nekoliko mehanizama sloma. To su: dijagonalni slom zidnoga ispuna, stepeničasti posmični ili pak dijagonalni posmični slom.
- Histerežno ponašanje modela opisano je pomoću krivulja histereze na osnovu kojih smo dobili primarne krivulje (krivulje nosivosti). Te krivulje prikazane su kao odnos poprečne (horizontalne sile) sile i horizontalnoga pomaka na primarnim osima i posmičnog odnosa, odnosno katnog pomaka, na sekundarnim osima.
- Provedena ispitivanja pokazala su kako su poprečne nosivosti armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom puno veće od poprečne nosivosti praznoga armirano-betonskog okvira, osobito pri malim katnim pomacima. Pri tome, početne poprečne nosivosti nisu ovisile o vrsti zidnoga ispuna.



- Praćenjem primarnih krivulja (krivulja nosivosti) uočljiv je početni linearni dio, što ukazuje na ponašanje armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom kao kompozitnog konstrukcijskog sustava.
- Kod svih ispitivanih modela vidljiva je pojava prvih pukotina pri katnome pomaku od približno 0,05%, kao i prvenstveno linearno elastično ponašanje. Sustav zadržava svoju poprečnu nosivost sve do katnih pomaka od 0,5%, ali s puno manjom krutošću. Eksperimentalni rezultati pokazuju kako armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom zadržavaju svoju nosivost sve do katnoga pomaka od cca. 1,0% kada je već doprinos zidnoga ispuna izgubljen u potpunosti, a oštećenja nastala na njemu su značajna. Nakon te razine katnoga pomaka, pozitivnog doprinosa zidnoga ispuna više nema, dok negativni doprinos može prevladati ako armirano-betonski okvir nije pravilno dimenzioniran na djelovanje posmika. Prazan armirano-betonski okvir (GRUPA IV) ponašao se fleksibilnije (popustljivije) pri malim veličinama pomaka uz zadržavanje nosivosti sve do katnih pomaka od cca. 2,0%. Ovakvo ponašanje dodatno je potvrđeno analizom deformacija dijagonala armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna pretočenih u ekvivalentne relativne posmične deformacije.
- Također, vidljivo je opadanje doprinosa zidnoga ispuna s povećanjem katnih pomaka, što je dovelo do otprilike 30% pri katnom pomaku od cca. 1,00%, iako je pri tome zidni ispun već bio značajno oštećen, te je zabilježeno njegovo ispadanje iz ravnine.
- Bilinearnom idealizacijom eksperimentalnih rezultata dobiveni su koeficijenti duktilnosti i faktori ponašanja. Kako nije zabilježeno opadanje poprečne nosivosti ispod 90% od  $H_{max}$ , koeficijent duktilnosti pomaka određen je kao omjer pomaka, pri kojem zidni ispun doživljava izrazito oslabljivanje, i idealiziranog pomaka tečenja (popuštanja). Veličina krajnjeg graničnog katnog pomaka određena je u trenutku gubitka cjelovitosti zidnog ispuna pri čemu je armirano-betonski okvir, još uvijek, gotovo netaknut izlaganjem tim pomacima, tj. pomoću maksimalnog pomaka postignutog tijekom ispitivanja. Faktor konstruktivnog ponašanja,  $q$ , ukazuje na očigledni doprinos zidnoga ispuna te povoljno ponašanje svih ispitivanih modela uslijed djelovanja poprečnih sila kojima se simuliraju sile potresa, i reda je veličine vrijednosti koje se preporučuju za konstrukcije s armirano-betonskim zidovima.

- Pri cikličkom opterećenju izračunate su sekantne krutosti pri svakome nivou katnoga pomaka i normalizirane u odnosu na početnu krutost (krutost pri pojavi prvih pukotina), a na osnovu optimaliziranih primarnih krivulja svake GRUPE modela. Početna krutost,  $K_0$ , za svaku GRUPU modela izračunata je kao krutost pri katnome pomaku od 0,05%, odnosno 0,22% kod modela GRUPE IV (praznog armirano-betonskog okvira). Kako je početna krutost modela armirano-betonskoga okvira sa zidnom ispunom (GRUPE I, II i III) znatno veća, također je kod istih opadanje krutosti puno izraženije u usporedbi s praznim armirano-betonskim okvirom (GRUPA IV). GRUPE modela II i III imaju nešto veće opadanje krutosti u odnosu na GRUPU I. Za opadanje krutosti možemo reći kako sekantna krutost modela GRUPE I i II približno jednako opada, s tim da brže opada u odnosu na GRUPU III. Najizraženije opadanje krutosti vidljivo je kod modela GRUPE IV, odnosno praznoga armirano-betonskoga okvira. Isto tako, važno je za spomenuti, kako se sekantna krutost modela GRUPE I, II i III s povećanjem poprečne sile, odnosno katnoga pomaka približava sekantnoj krutosti modela GRUPE IV (praznom armirano-betonskom okviru), tj. smanjuje se. To je područje katnog pomaka od 1% pa na više.
- Količina apsorbirane energije kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od opečnih blokova (GRUPA I i II) veća je od one kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od porobetonskih blokova (GRUPA III). Isto tako, apsorbirana energija kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom, veća je nego kod praznoga armirano-betonskog okvira. Iz ovoga proizlazi da jači zidni ispun ima veći kapacitet apsorpcije (primanja) energije. S povećavanjem nivoa katnoga pomaka, vidimo da se povećava i količina apsorbirane energije kod svih GRUPA modela. S druge strane, ako energije apsorpcije modela GRUPE I, II i III normaliziramo u odnosu na energiju apsorpcije modela GRUPE IV, vidimo opadanje energije apsorpcije modela GRUPE I, II i III u odnosu na model GRUPE IV, a s povećanjem katnoga pomaka. To opadanje, približno je jednako za modele GRUPE I i II, dok je za model GRUPE III nešto izraženije (armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom od porobetona). Drugim riječima, vidimo koliko se povećava kapacitet energije apsorpcije armirano-betonskog okvira dodavanjem zidnoga ispuna. S povećavanjem nivoa katnih pomaka (od 0,25%) taj se kapacitet smanjuje, odnosno približava se kapacitetu praznoga armirano-betonskoga okvira.

- Promatrajući energiju disipacije (trošenja) možemo doći do sličnih zaključaka kao i kod energije apsorpcije (primanja). Jednostavnije rečeno, armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom imaju svojstvo boljšeg trošenja i primanja energije u odnosu na prazan armirano-betonski okvir, naravno, do određenih nivoa katnih pomaka. Važno je spomenuti još jednom, kako energija disipacije (trošenja), kod armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom s povećanjem nivoa katnoga pomaka opada kao i energija apsorpcije (primanja), a u odnosu na prazan armirano-betonski okvir. Također, s povećanjem katnih pomaka približava se praznome armirano-betonskom okviru (GRUPA IV).
- Promatrajući koeficijent ekvivalentnog prigušenja, također je jasno vidljiv doprinos zidnoga ispuna u odnosu na prazan armirano-betonski okvir. Povećanjem katnoga pomaka povećava se i koeficijent prigušenja kod svih GRUPA modela.
- Na osnovu svih obrađenih eksperimentalnih rezultata i opisane kategorizacije oštećenja, kao i metoda utvrđivanja oštećenja, u ovome radu utvrđivanje oštećenja zidnoga ispuna izvršeno je na osnovu katnih pomaka. Promatranjem razine oštećenja (pojavljivanjem pukotina u zidnom ispunu, odvajanje zidnog ispuna od ab okvira, ispadanjem zidnog ispuna, itd.) zidnoga ispuna u ovisnosti o nivou katnoga pomaka, definirana su sljedeća područja katnih pomaka, gdje im je pridružen odgovarajući stupanj oštećenja:
  - područje katnih pomaka od 0,00-0,10% → 1<sup>0</sup>,
  - područje katnih pomaka od 0,10-0,30% → 2<sup>0</sup>,
  - područje katnih pomaka od 0,30-0,50% → 3<sup>0</sup>,
  - područje katnih pomaka od 0,50-1,00% → 4<sup>0</sup>,
  - područje katnih pomaka od 1,00% → 5<sup>0</sup>.

Iz provedene analize eksperimentalnih rezultata kod svih GRUPA modela sa zidnim ispunom neosporno je vidljiv utjecaj i doprinos zidnoga ispuna (u pogledu čvrstoće zidnih elemenata, a i u pogledu čvrstoće zidnoga ispuna) na ponašanje armirano-betonskoga okvira.



---

## POGLAVLJE 5: ANALITIČKI MODEL

---

### 5.1 UVOD

U literaturi postoji veliki broj autora (Smith, Mehrabi, Šimić, Tomažević, Žarnić, Klinger, Abrams i dr.) koji su se bavili problemom nosivosti armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom u svojoj ravnini, rješavajući ga eksperimentalno i analitički [64].

Građevine izvedene od armirano-betonskih okvira, koji su ispunjeni zidnim ispunom, pružaju veći otpor horizontalnim silama nego zidane građevine bez armirano-betonskih okvira, tj. sam armirano-betonski okvir bez zidnoga ispuna. Tako izveden konstrukcijski element, osim što ima veću krutost, ima i veće svojstvo apsorpcije (primanja) i disipacije (trošenja) energije seizmičkih sila. Međutim, zbog veće krutosti armirano-betonski okvir ispunjen zidnim ispunom preuzima i veće seizmičke sile.

Nosivost ovih sustava ovisi o nizu čimbenika kao što su: dimenzije, kakvoća betona i armature, kakvoća i vrsta zidnih elemenata i morta, kakvoća zidanja, povezivanje zidnoga ispuna i armirano-betonskoga okvira itd.

### 5.2 NOSIVOST ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA ISPUNJENOGA ZIDNIM ISPUNOM

#### 5.2.1 Nosivost armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom prema Slovenskim istraživanjima

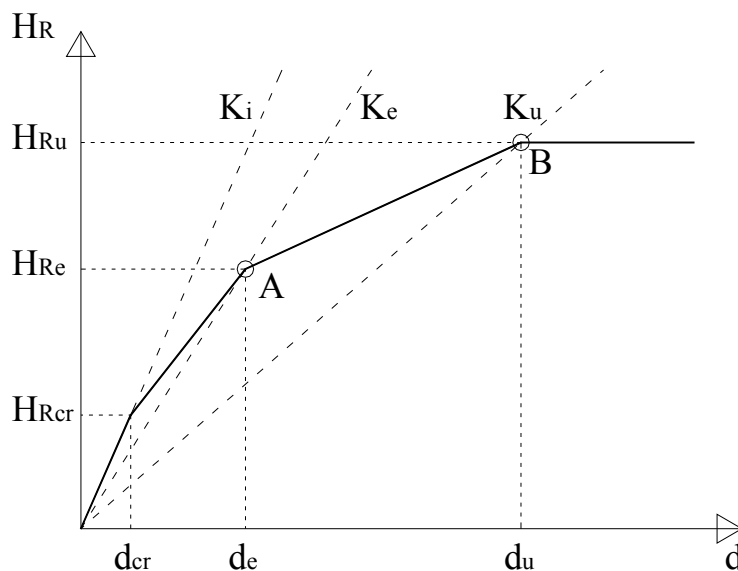
Na temelju vlastitih eksperimentalnih ispitivanja Žarnić daje dva modela simulacije neelastičnog ponašanja armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom. Prvi model, koji će se ovdje prikazati, daje odgovor konstrukcije u obliku sila-pomak, dok drugi omogućuje potpunu dinamičku analizu modelirajući zidni ispun kao skup dijagonalnih opruga. Trolinarni dijagram sile i pomaka prikazan je na *sluci 5.1*, gdje je:

$H_{Rcr}$  posmična otpornost armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom u trenutku pojave prvih pukotina,

$H_{Re}$  posmična otpornost armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom u trenutku odvajanja zidnoga ispuna od armirano-betonskog okvira,

$H_{Ru}$  granična poprečna sila tj. nosivost armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom,

- $K_i$  početna krutost armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom,  
 $K_e$  krutost armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom u trenutku odvajanja zidnog ispuna od armirano-betonskog okvira,  
 $K_u$  krutost armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom kod doseganja nosivosti.



Slika 5.1 Linearna idealizacija ponašanja armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom

Početna krutost armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom može se proračunati pomoću izraza (5.1) uzimajući u obzir zajednički rad armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna:

$$K_i = \frac{1}{\frac{h^3}{3 \cdot E \cdot I_e} + \frac{1,2 \cdot h}{G_i \cdot A_e}} \quad (5.1)$$

gdje je:

- $h$  visina zidnoga ispuna,  
 $E$  modul elastičnosti zidnoga ispuna,  
 $I_e$  računski moment tromosti horizontalnoga presjeka zidnoga ispuna zajedno s armirano-betonskim okvirom dan sljedećim izrazom:

$$I_e = I + 2 \cdot C_E \cdot \frac{E_f}{E} \left( I_f + A_f \cdot \frac{(l_c + l)^2}{4} \right), \quad (5.2)$$

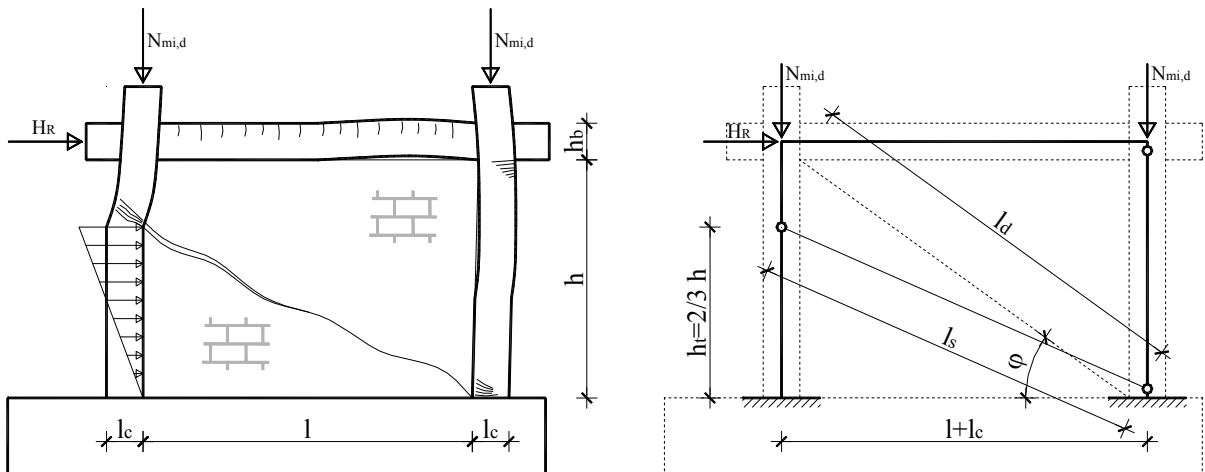
- $I$  moment tromosti horizontalnog presjeka zidnoga ispuna,  
 $C_E$  faktor utjecaja stupa armirano-betonskoga okvira na krutost zidnoga ispuna.

U slučaju idealnog prijanjanja  $C_E=1,0$ , no za praksu kada taj idealni spoj ne postoji, može se uzeti  $C_E=0,5$ . Ako nema spoja armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna, tada je  $C_E=0$ ,

- $A_f$  ploština presjeka armirano-betonskoga okvira (stupa),
- $E_i$  modul elastičnosti armirano-betonskoga okvira,
- $I_f$  moment tromosti armirano-betonskoga okvira (stupa),
- $l_c$  stranica (uzdužna, tj. u pravcu duljine zidnog ispuna) presjeka stupa armirano-betonskoga okvira (*slika 5.2*),
- $l$  duljina zidnoga ispuna,
- $A_e$  ploština horizontalnog presjeka zidnoga ispuna zajedno s armirano-betonskim okvirom (stupom) prema:

$$A_e = A_m + 2 \cdot C_E \cdot A_f \cdot \frac{G_f}{G_i}, \quad (5.3)$$

- $A_m$  ploština horizontalnog presjeka zidnoga ispuna ( $A_m=t l$ ),
- $G_f$  modul posmika armirano-betonskoga okvira,
- $t$  debljina zidnoga ispuna (*slika 5.3*),
- $G_i$  modul posmika zidnoga ispuna.



**Slika 5.2** Model mehanizma sloma armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom

U slučaju netaknutog zidnog ispuna, prema eksperimentalnim podacima, početni modul posmika varira između 10% i 30% od početnog modula elastičnosti zidnoga ispuna,  $E$ . EC6 [25] preporuča vrijednost posmičnog modula uzeti kao 40% vrijednosti modula elastičnosti, ali se ujedno preporuča da se pri proračunu na djelovanje potresa uzima modul posmika,  $G=0,167 E$ .

Računska krutost,  $K_e$ , armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom nakon prvih pukotina ovisi o modulu posmika,  $G_p$ , zidnoga ispuna u stanju manjeg oštećenja kada su sitne pukotine još raspršene po zidnome ispunu. Posmični modul,  $G_p$ , takvoga zidnoga ispuna računa se s pomoću izraza (5.4), koji je određen na osnovu eksperimentalnih podataka:

$$G_p = \frac{1,2}{\frac{A_m}{h \cdot K_m} - \frac{1}{E} \left( \frac{h}{l} \right)^2}, \quad (5.4)$$

gdje je:

$K_m$  računski krutost zidnoga ispuna dana izrazom:

$$K_m = \frac{1}{\frac{h^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{1,2 \cdot h}{G_i \cdot A_m}}. \quad (5.5)$$

Krutost armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom nakon prvih pukotina dana je izrazom:

$$K_e = \frac{1}{\frac{h^3}{3 \cdot E \cdot I_e} + \frac{1,2 \cdot h}{G_p \cdot A_e}}. \quad (5.6)$$

Krutost armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom s velikim pukotinama,  $K_u$ , proračunava se kao krutost neraspucanog armirano-betonskoga okvira, koji je poduprt zidnom ispunom do 2/3 svoje visine ( $h_t = 2/3 h$ ), kao što je prikazano na **sluci 5.2**:

$$K_u = \frac{1}{\frac{5 \cdot h_t^3}{12 \cdot E \cdot I} + \frac{1,2 \cdot h_t}{G_p \cdot A_m}}. \quad (5.7)$$

Ploština,  $A_d$ , presjeka tlačne dijagonale u zidnome ispunu i njena širina,  $w$ , računaju se izrazom (5.8). Dimenzije su prikazane na **sluci 5.3**:

$$A_d = K_u \cdot (l_d / E), \quad l_d = \sqrt{h^2 + l^2} \quad \text{i} \quad w = A_d / t, \quad (5.8)$$

gdje je:

$l_d$  duljina dijagonale zidnoga ispuna (**slika 5.2** i **slika 5.3**).

Granična sila,  $H_{Re}$ , popuštanja zidnoga ispuna izloženoga istodobnom vertikalnom i horizontalnom opterećenju, kod malih deformacija dana je sljedećim izrazom:

$$H_{Re} = C_R \cdot \frac{A_m \cdot f_t}{C_I \cdot b} \cdot \left\{ 1 + \sqrt{C_I^2 \left( 1 + \frac{\sigma_d}{f_t} \right) + 1} \right\}, \quad (5.9)$$

gdje je:



- $C_R$  koeficijent kakvoće zidanja. U slučaju visoke kakvoće zidanja taj koeficijent teži jedinici. No, njegova je praktična vrijednost u granicama između 0,5 i 1,0. Autori (Žarnič, Gostič) predlažu vrijednost,  $C_R=0,9$ ,
- b parametar odnosa posmičnih čvrstoća u zidnome ispunu. Za zidni ispun bez otvora, vrijednost mu je,  $b=1,1$ .

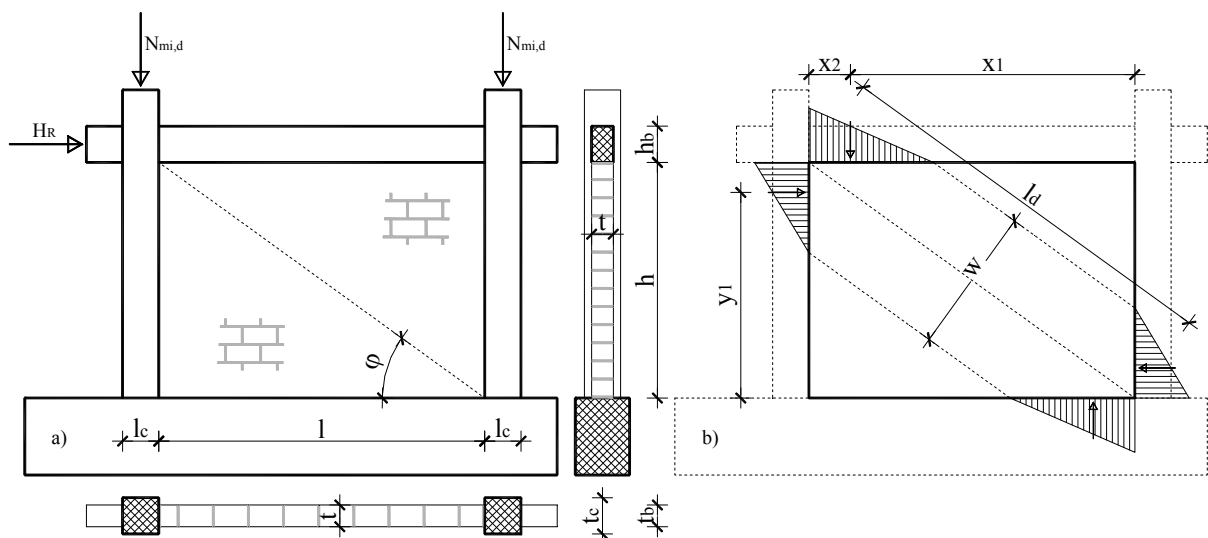
Međusobni utjecaj zidnoga ispuna i armirano-betonskoga okvira uzet je s koeficijentom,  $C_I$ :

$$C_I = 2 \cdot \alpha \cdot b \cdot \frac{l}{h}, \quad (5.10)$$

gdje je:

$\alpha$  koeficijent geometrijskih omjera, a dan je izrazom:

$$\alpha = \frac{(x_1 - x_2)}{y_1 \cdot l}. \quad (5.11)$$



**Slika 5.3** a) Skica armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom, b) Idealizirana naprezanja u uglovima tlačne dijagonale

Duljine,  $x_1$ ,  $x_2$  i  $y_1$ , prikazane su na **slici 5.3 b)**. Približne vrijednosti tih duljina mogu se izračunati iz izraza:

$$x_1 \approx l - w / (6 \cdot \sin \varphi); \quad x_2 \approx w / (6 \cdot \sin \varphi); \quad y_1 \approx h - w / (6 \cdot \cos \varphi). \quad (5.12)$$

$$\sigma_d = a \cdot \frac{N}{A_m}, \quad (5.13)$$

gdje je:

- a koeficijent prijenosa vertikalnog opterećenja na zidni ispun. Za neoštećen zidni ispun  $a=0,3$ , dok se kod oštećenog zidnog ispuna uzima  $a=0$ ;
- N vertikalna sila koju preuzima zidni ispun.

Grafičnu poprečnu silu pri slomu armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom Žarnič daje izrazom:

$$H_{Ru} = H_{Rf} + H_{Re}, \quad (5.13)$$

gdje je:

$H_{Rf}$  grafična sila otpora armirano-betonskog okvira (bez zidnog ispuna). Tu silu moguće je proračunati pomoću izraza:

$$H_{Rf} = \frac{3 \cdot M_R}{\left(h + \frac{h_b}{2}\right)}, \quad (5.14)$$

gdje je:

$h_b$  ukupna visina grede armirano-betonskoga okvira iznad zidnoga ispuna,  
 $M_R$  grafični moment savijanja za armirano-betonski okvir. Pretpostavlja se da otkazivanje armirano-betonskog okvira nastupa otkazivanjem armature u stupovima.

$$M_R = A_s \cdot f_y \cdot \left(\frac{l_c}{2} - d_1\right) + f_{ck} \cdot t_c \cdot x \cdot \left(\frac{l_c}{2} - \frac{x}{2}\right), \quad (5.15)$$

gdje je:

$A_s$  vlačna armatura u stupu armirano-betonskoga okvira,  
 $f_y$  granica popuštanja armature,  
 $f_{ck}$  tlačna čvrstoća betonskoga valjka,  
 $l_c$  stranica presjeka stupa u smjeru duljine zidnoga ispuna,  
 $t_c$  stranica presjeka stupa okomito na smjer duljine zidnoga ispuna,  
 $d_1$  udaljenost težišta vlačne armature do bližeg ruba presjeka,  
 $x$  visina tlačnog područja presjeka stupa armirano-betonskoga okvira prema:

$$x = \frac{N_f + A_s \cdot f_y}{f_{ck} \cdot t_c}, \quad (5.16)$$

gdje je:

$N_f = N_{mi,d}$  vertikalna sila u stupu armirano-betonskoga okvira.

Poprečna sila kod koje nastaju prve pukotine može se približno odrediti sljedećim izrazom:

$$H_{Rcr} \approx H_{Re} / 3. \quad (5.17)$$

Kada su izračunate sve sile i krutosti, moguće je odrediti pomake koji se događaju kod određenih sila. Tako je pomak kod kojeg nastaju prve pukotine:

$$d_{cr} = H_{Rcr} / K_i . \quad (5.18)$$

Pomak kod sile,  $H_{Re}$ , određuje se:

$$d_e = H_{Re} / K_e . \quad (5.19)$$

Na kraju, pomak kod granične sile popuštanja armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom,  $H_{Ru}$ , određuje se:

$$d_u = H_{Ru} / K_u . \quad (5.20)$$

### 5.2.1.1 Određivanje nosivosti modela GRUPE I, II i III

Rezultati proračuna nosivosti armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom prema analitičkom modelu iz prethodne točke (točka 5.2.1), za svaku GRUPU, prikazani su u **tablici 5.1**.

**Tablica 5.1** Ulazni podaci i nosivost modela svake GRUPE

	GRUPA I	GRUPA II	GRUPA III
t [mm]	120		125
h [mm]	1300		
l [mm]	1800		
$h_f=2/3 h$ [mm]	866,67		
$A_m=t l$ [mm]	216000		225000
$f_k$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	2,62	2,14	1,19
$f_t=0,1 f_k$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>2)</sup>	0,262	0,214	0,119
E [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>3)</sup>	6572	5608	1379
$G_f=0,4 E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2628,8	2243,2	551,6
$I=t l^3/12$ [mm <sup>4</sup> ]	58320000000		60750000000
$C_E$	0,5		
$t_c$ [mm]	200		
$l_c$ [mm]	200		
$A_f=t_c l_c$ [mm <sup>2</sup> ]	40000		

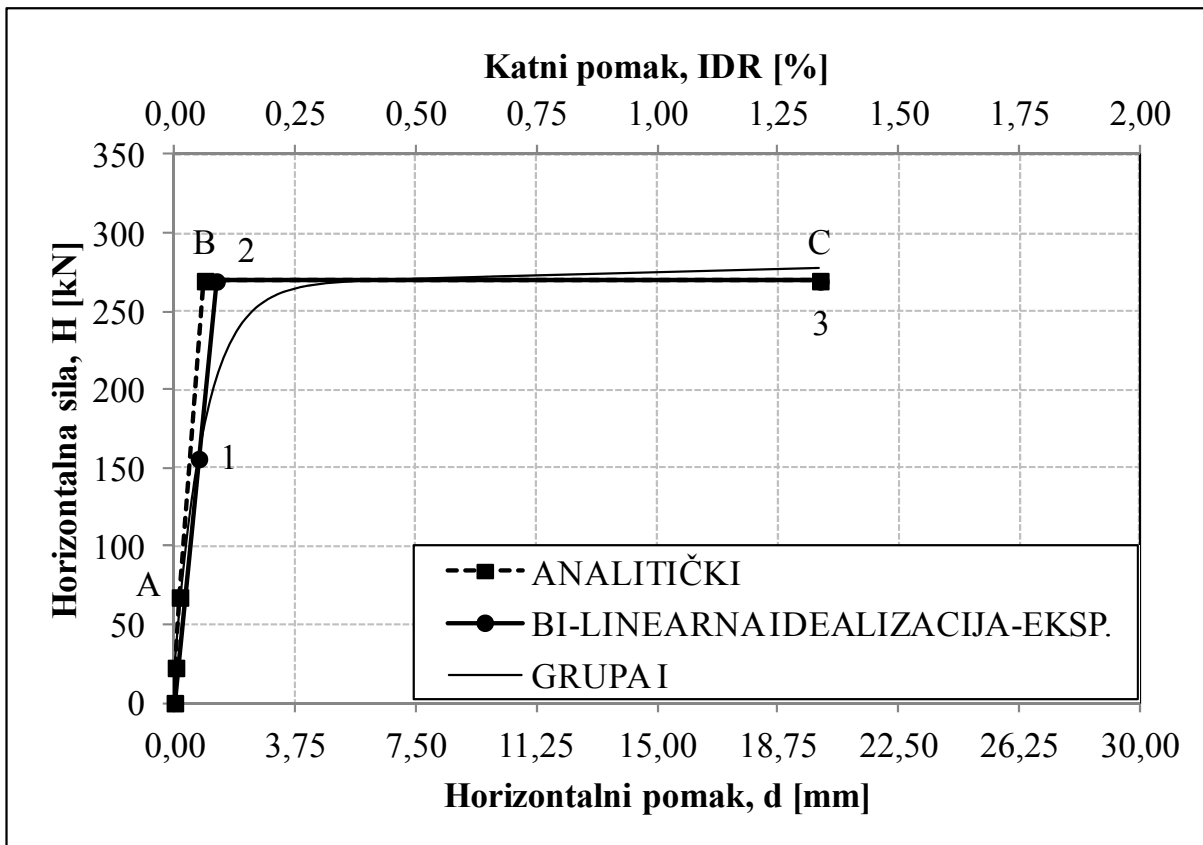
	GRUPA I	GRUPA II	GRUPA III
$I_f = t_c l_c^3 / 12$ [mm <sup>4</sup> ]	13333333,33		
$E_f$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>4)</sup>	37720,87	37478,29	35091,38
$G_f = 0,4 E_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]	15088,35	14991,31	14036,55
$A_e$ [mm <sup>2</sup> ] (prema 5.3)	445585,34	483320,16	1242879,05
$I_e$ [mm <sup>4</sup> ] (prema 5.2)	2,88671E+11	3,26531E+11	1,08202E+12
$K_i$ [N/mm] (prema 5.1)	582136,48	543834,96	361496,79
$K_m$ [N/mm] (prema 5.5)	214682,06	183191,87	46923,59
$G_p$ [N/mm <sup>2</sup> ] (prema 5.4)	1727,65	1474,23	362,51
$K_e$ [N/mm] (prema 5.6)	414511,36	386202,52	252961,31
$K_u$ [N/mm] (prema 5.7)	286157,00	244182,66	62546,05
$A_d$ [mm <sup>2</sup> ] (prema 5.8)	96678,58		100706,86
$w$ [mm] (prema 5.8)	805,65		
$l_d$ [mm] (prema 5.8)	2220,36		
$C_R$	0,5		
$b$	1,1		
$\varphi = \tan^{-1}(h/l)$ [°]	35,84		
$x_1$ [mm] (prema 5.12)	1570,66		
$x_2$ [mm] (prema 5.12)	229,34		
$y_1$ [mm] (prema 5.12)	1134,37		
$C_1$ (prema 5.10)	2,60		
$\alpha$ (prema 5.11)	0,85		
$\sigma_d$ [N/mm <sup>2</sup> ] (prema 5.13)	0		
$H_{Re}$ [kN] (prema 5.9)	67405,13	55056,10	31890,94
$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	942,48 (u jednom stupu - 12 $\phi$ 10mm)		
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>5)</sup>	584,00		
$f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>6)</sup>	54,60	53,40	42,40
$d_1$ [mm]	25,00		
$N_f$ [kN] <sup>7)</sup>	357000,00	364000,00	359000,00
$x$ [mm] (prema 5.16)	83,10	85,62	107,24
$h_b$ [mm]	200,00		

	GRUPA I	GRUPA II	GRUPA III
$M_R$ [Nmm] (prema 5.15)	94320336,83	93576089,29	83458191,17
$H_{Rf}$ [N] (prema 5.14)	202115,01	200520,19	178838,98
$H_{Rcr}$ [N] (prema 5.17)	22468,38	18352,03	10630,31
$H_{Ru}$ [N] (prema 5.13)	269520,14	255576,29	210729,92
$d_{cr}$ [mm] (prema 5.18)	0,039	0,034	0,029
$d_e$ [mm] (prema 5.19)	0,163	0,143	0,126
$d_u$ [mm] (prema 5.20)	0,942	1,047	3,369
<sup>1)</sup> Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost tlačne čvrstoće zidnog ispuna, <b>tablica 3.36</b> . <sup>2)</sup> Pretpostavljena vrijednost vlačne čvrstoće. <sup>3)</sup> Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost modula elastičnosti, <b>tablica 3.37</b> . <sup>4)</sup> Srednja vrijednost izračunatog modula elastičnosti od K_7, K_5 i K_8 za grupu I; K_2, K_6 i K_4 za grupu II i K_1, K_3 i K_9 za grupu III, a sve prema <b>tablici 4.4</b> . <sup>5)</sup> Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost granice popuštanja armature, <b>tablica 4.5</b> . <sup>6)</sup> Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost tlačne čvrstoće betona od K_7, K_5 i K_8 za grupu I; K_2, K_6 i K_4 za grupu II i K_1, K_3 i K_9 za grupu III, a sve prema <b>tablici 4.3</b> . <sup>7)</sup> Ostvarena srednja uzdužna sila na stupu armirano-betonskog okvira, <b>tablica 4.10</b> .			

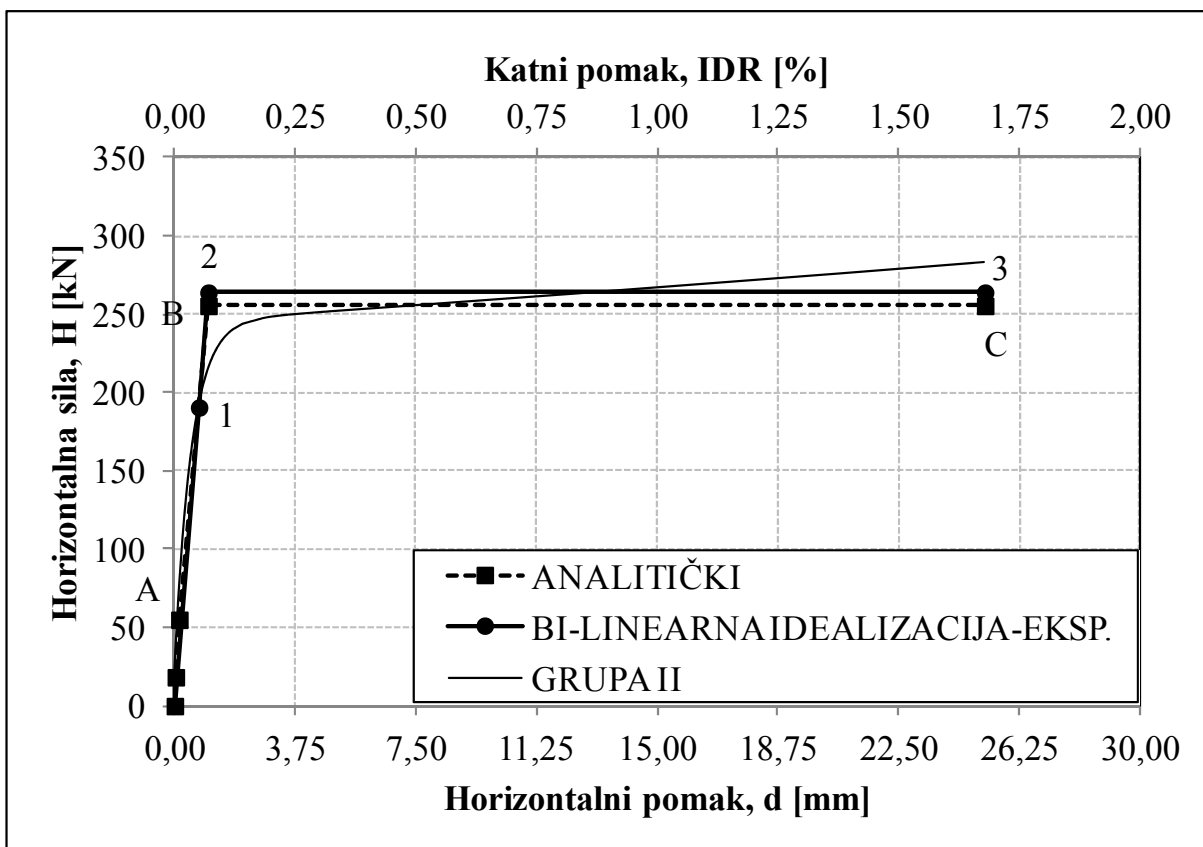
### 5.3 USPOREDBA ANALITIČKIH I EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Dobiveni analitički rezultati (prije svega granična poprečna nosivost i krutost) uspoređeni su s eksperimentalnima, a koje opisuje bi-linearna idealizirana krivulja [70].

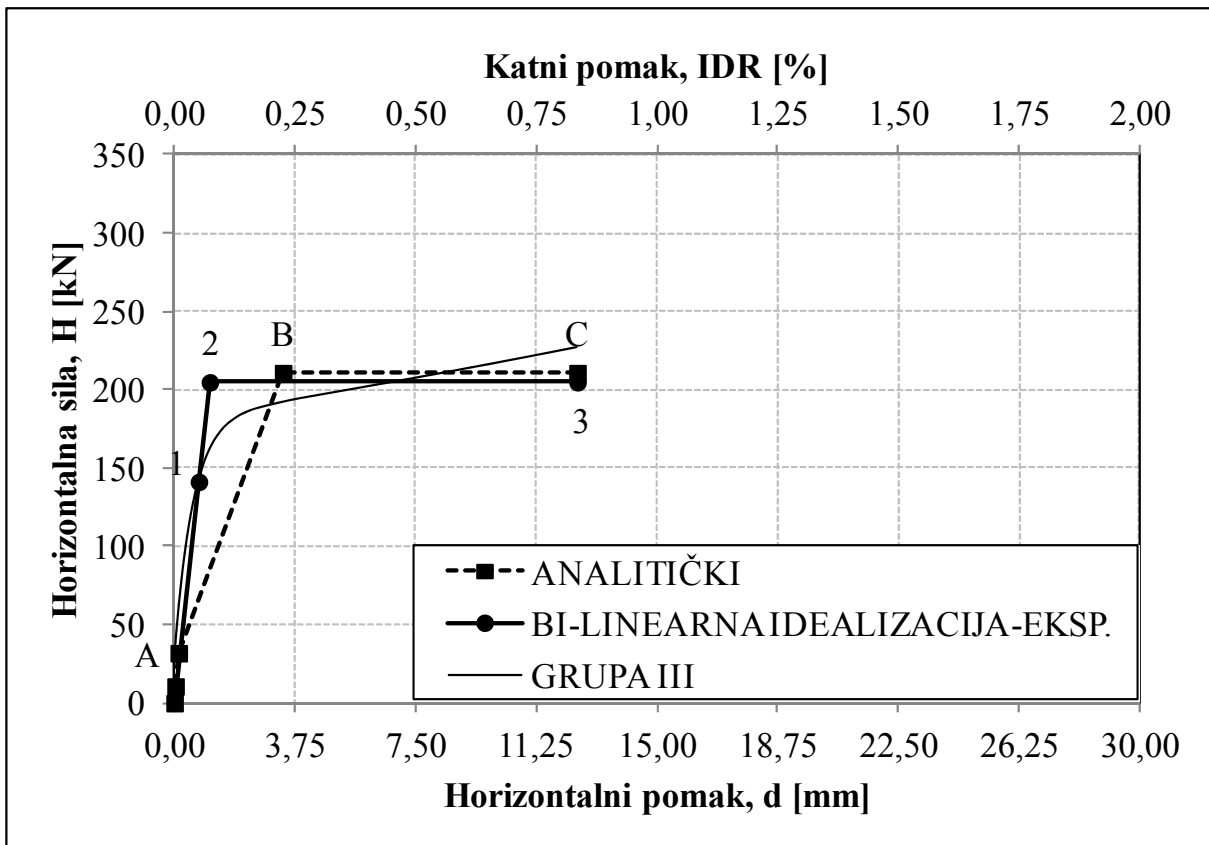
Usporedba rezultata prikazana je na **slikama 5.4 – 5.6**. U **tablici 5.2** nalaze se vrijednosti za pojedine točke prikazane na navedenim slikama. Iz tablice, a i sa slika, možemo vidjeti kako analitički model vrlo dobro pogađa konačnu graničnu poprečnu nosivost, razlika koja se pojavljuje između granične poprečne nosivosti analitičke i eksperimentalne krivulje manja je od 5% za sve GRUPE modela.



Slika 5.4 Usporedba poprečne nosivosti dobivene eksperimentalno i analitički za GRUPU I



Slika 5.5 Usporedba poprečne nosivosti dobivene eksperimentalno i analitički za GRUPU II



Slika 5.6 Usporedba poprečne nosivosti dobivene eksperimentalno i analitički za GRUPU III

Na slikama 5.4 – 5.6 i u tablici 5.2, pojedine točke imaju sljedeće značenje:

A= $H_{Re}$  - granična sila popuštanja zidnoga ispuna izloženog istodobnom vertikalnom i horizontalnom opterećenju, kod malih deformacija;

B= $H_{Ru}$  – granična poprečna sila pri slomu armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom;

C – produžena horizontalna grana točke B, do završnog katnog pomaka eksperimentalne krivulje;

1 – poprečna sila pri katnome pomaku od 0,05%, kod pojave prvih pukotina u zidnome ispunu, odnosno 0,22% kod praznoga armirano-betonskog okvira (GRUPA IV);

2 – granična poprečna sila dobivena na osnovu bi-linearne idealizacije eksperimentalnih krivulja;

3 – produžena horizontalna grana točke 2, do završnog katnoga pomaka eksperimentalne krivulje.

**Tablica 5.2** Prikaz analitičkih i eksperimentalno dobivenih poprečnih nosivosti

GRUPA	ANALITIČKI			EKSPERIMENTALNO		
	H <sub>A</sub> /IDR [kN/%]	H <sub>B</sub> /IDR [kN/%]	H <sub>C</sub> /IDR [kN/%]	H <sub>1</sub> /IDR [kN/%]	H <sub>2</sub> /IDR [kN/%]	H <sub>3</sub> /IDR [kN/%]
GRUPA I	67/0,01	270/0,06	270/1,34	156/0,05	269/0,09	269/1,34
GRUPA II	55/0,01	256/0,07	256/1,68	191/0,05	264/0,07	264/1,68
GRUPA III	32/0,01	211/0,22	211/0,83	141/0,05	205/0,07	205/0,83

Što se tiče krutosti, tu nam analitički model daje manje i veće vrijednosti, nego što bismo ih dobili eksperimentalno. Za modele GRUPE I dobivamo veće vrijednosti krutosti analitičkim modelom, dok za GRUPU III dobivamo manje vrijednosti. Za GRUPU II dobivamo približno jednake vrijednosti. Razlika koja se pojavljuje između analitičkih i eksperimentalnih rezultata, kao i njihove vrijednosti, prikazana je u **tablici 5.3**. Razliku u krutosti kod modela GRUPE III možemo pripisati zidnome ispunu od porobetonkih blokova i njegovome znatno manjem modulu elastičnosti u odnosu na zidni ispun od opečnih blokova.

**Tablica 5.3** Usporedba analitičkih i eksperimentalno dobivenih krutosti

GRUPA	ANALITIČKI	EKSPERIMENTALNO	RAZLIKA
	K <sub>u</sub> [kN/mm]	K <sub>u</sub> =K <sub>e</sub> [kN/mm]	[%]
GRUPA I	286,16	207,83	38
GRUPA II	244,18	252,57	3
GRUPA III	62,55	187,15	67

U **tablici 5.3**, K<sub>u</sub>, predstavlja krutost armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom s velikim pukotinama.

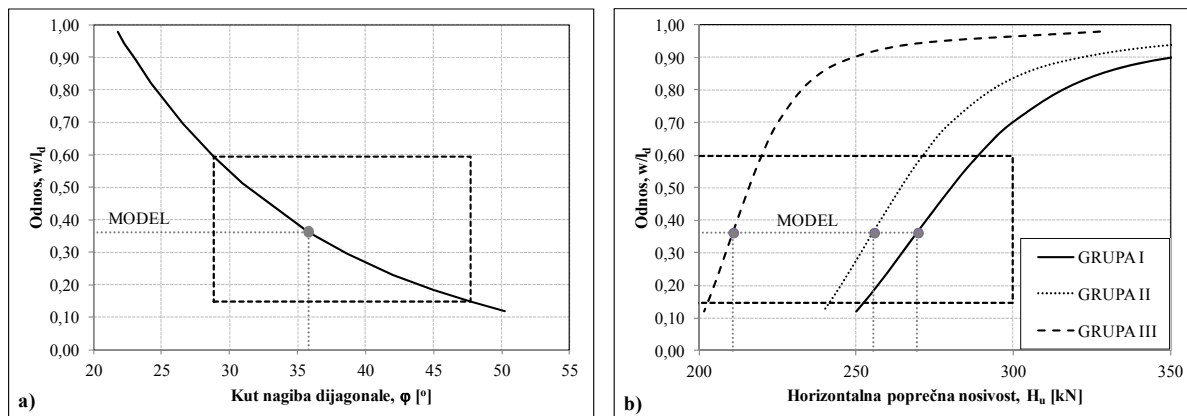
### 5.3.1 Osvrt na širinu tlačne dijagonale

U ovoj točki poglavlja dat će se prikaz granične poprečne nosivosti armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom ovisno o bezdimenzionalnom odnosu širine i duljine tlačne dijagonale ( $w/l_d$ ). Također, vidjet ćemo i ovisnost širine i duljine tlačne dijagonale ( $w/l_d$ ) o kutu nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu ( $\varphi$ ).

Rezultati koji su prikazani na **slici 5.7**, dobiveni su na osnovu ranije opisanoga analitičkoga modela i dobivenih analitičkih rezultata za pojedine GRUPE.



Dakle, širina i duljina tlačne dijagonale računata je pomoću izraza (5.8), a kut nagiba dobiven je iz odnosa visine i duljine zidnoga ispuna ( $\varphi = \tan^{-1}(h/l)$  [°]). Npr., da bi se dobio kut od  $45^\circ$  odnos između visine i duljine zidnoga ispuna je 1,0, i tako redom.



**Slika 5.7** a) Ovisnost širine i duljine tlačne dijagonale o kutu nagiba tlačne dijagonale, b) Ovisnost poprečne nosivosti o odnosu širinu i duljinu tlačne dijagonale

Prvo što se može primijetiti sa *slike 5.7 a*), jest da bezdimenzionalni odnos ( $w/l_d$ ) ovisi o geometriji zidnoga ispuna (njegovoj visini i duljini), odnosno kutu nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu ( $\varphi$ ). Vidimo da se s povećanjem kuta nagiba bezdimenzionalni odnos smanjuje i obrnuto. Također, taj odnos nije linearan.

U praksi najčešće primjenjivani armirano-betonski okviri ispunjeni zidnim ispunom, imaju odnos visine i duljine zidnoga ispuna od cca. 0,55-1,10, tj. nagib tlačne dijagonale od  $29^\circ$ - $48^\circ$ , crtkano područje na *slici 5.7 a*) i *b*). Ako promatramo to područje na *slici 5.7 b*), onda vidimo da je u tom području prirast granične poprečne nosivosti približno linearan u odnosu na bezdimenzionalni odnos ( $w/l_d$ ). Također, s iste slike vidimo kako taj približno linearan prirast nije isti za sve GRUPE- GRUPA I ima najveći, dok GRUPA III ima najmanji prirast. Na kraju, vidimo kako se s povećanjem bezdimenzionalnog odnosa ( $w/l_d$ ) povećava i granična poprečna nosivost ( $H_u$ ).

Na *slici 5.7* prikazan je bezdimenzionalni odnos i kut nagiba tlačne dijagonale, odnosno granične poprečne nosivosti za MODELE (GRUPE) koje smo ispitivali, a čiji su rezultati prikazani u *tablici 5.1*.

## 5.4 ZAKLJUČAK POGLAVLJA

Za usvojeni analitički model, koji je ovdje detaljno izložen ne zanemarujući analitičke modele ostalih autora koji su dostupni u literaturi, možemo reći sljedeće:

- Neophodni su „eksperimentalni“ ulazni podatci, prije svega, tlačna čvrstoća zidnoga ispuna, vlačna čvrstoća zidnoga ispuna, modul elastičnosti i modul posmika zidnoga ispuna, tlačna čvrstoća betona, modul elastičnosti i modul posmika betona, vlačna čvrstoća armature.
- Opisani trolinearni dijagram sile i pomaka vrlo dobro opisuje ponašanje armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom.
- Dobiveni rezultati analitičkog modela vrlo dobro opisuju dobivene eksperimentalne rezultate koji su predstavljeni s bi-linearnom idealizacijom u pogledu granične poprečne nosivosti.
- Razlike, koje se pojavljuju kod usporedbe rezultata, najveće su kod usporedbe krutosti armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom s velikim pukotinama ( $K_u$ ).
- Granična poprečna nosivost ( $H_u$ ), dobivena analitički i eksperimentalno, gotovo je identična za sve GRUPE. Razlike koje se pojavljuju manje su od 5%.

Na kraju, opisana je ovisnost granične poprečne nosivosti o bezdimenzionalnom odnosu širine i duljine dijagonale, kao i ovisnost bezdimenzionalnog odnosa širine i duljine tlačne dijagonale o kutu nagiba tlačne dijagonale.

Konačno, usvojeni analitički model daje vrlo dobre rezultate u usporedbi s eksperimentalnim što se tiče poprečne nosivosti, dok pomake ne prognozira dovoljno dobro, što daje razlike u odnosima, odnosno usporedbi krutosti.

---

## POGLAVLJE 6: NUMERIČKI MODEL (MAKRO-MODEL)

---

### 6.1 UVOD

Glavni ciljevi eksperimentalnih ispitivanja armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom na skaliranim uzorcima i uzorcima do pune veličine nisu samo dobivanje mehanizma sloma takvih konstrukcija podvrgnutih horizontalnom cikličkom opterećenju, nego i korištenje eksperimentalnih rezultata za kalibraciju i prijedlog jednostavne metode kojom se simulira eksperimentalno ponašanje takvih konstrukcija, prije svega ponašanje zidnoga ispuna. Takve jednostavne metode mogu se kasnije koristiti za predviđanje ponašanja sličnih konstrukcija podvrgnutih horizontalnome cikličkom opterećenju.

Razvijeno je nekoliko metoda za modeliranje zidnoga ispuna, a one su podijeljene u dvije glavne kategorije:

- I) Makro-model, metoda na temelju ekvivalentne tlačne dijagonale,
- II) Mikro-model, metoda na temelju konačnih elemenata.

Metoda ekvivalentne tlačne dijagonale, odnosno makro-model, puno je jednostavniji za primjenu u praksi od mikro-modela. Kod odabira modela, osnovne karakteristike numeričkoga modela za opsežnu analizu seizmičkog ponašanja armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom bile su usmjerene na jednostavnost i pouzdanost.

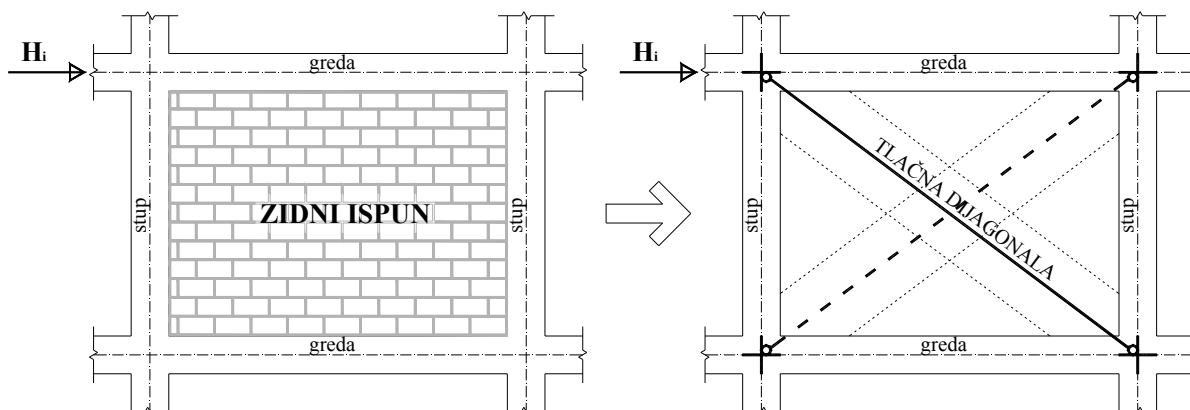
Glavne prednosti makro-modeliranja su računalna jednostavnost i korištenje mehaničkih svojstava zidnoga ispuna dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima. Zidni ispun vrlo je heterogen materijal pa je raspodjelu materijalnih svojstava sastavnih elemenata teško predvidjeti.

### 6.2 MODELI PONAŠANJA ZIDNOGA ISPUNA

Ovdje ćemo detaljno prikazati teorijske pozadine o numeričkome modeliranju zidnoga ispuna pomoću pristupa makro-modela.

Nekoliko makro-modela predloženo je i trenutno dostupno u znanstvenoj literaturi da simulaciju globalnoga seizmičkoga odgovora armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom. Takvi modeli općenito se temelje na pretpostavci dvaju ekvivalentnih tlačnih dijagonala koje povezuju dva nasuprotna ugla okvira (*slika 6.1*). Iako su u principu, takvi makro-modeli puno jednostavniji nego mikro-modeli, kalibracija ekvivalentne tlačne

dijagonale nije lak zadatak, a posebno njezina ekvivalentna širina i duljina, koji su glavni geometrijski parametri.

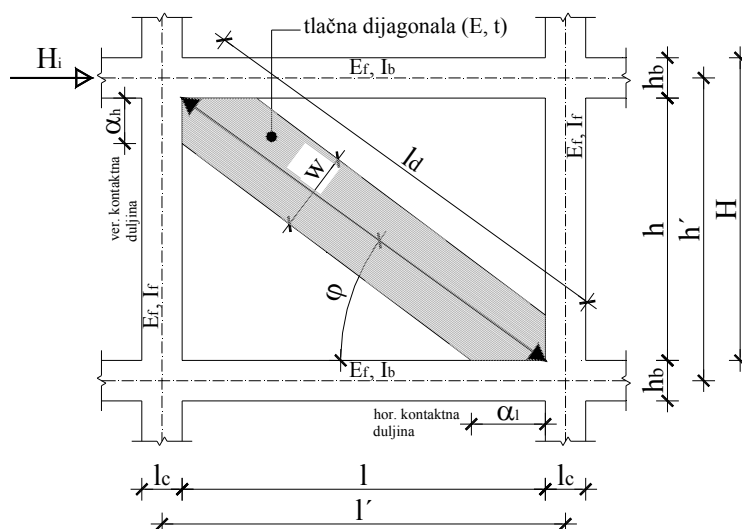


**Slika 6.1** Makro-model zidnog ispuna kroz ekvivalentne tlačne dijagonale

Neka istraživanja provedena su u smislu definiranja geometrijskih parametara ekvivalentne tlačne dijagonale. Dakle, alternativni i vrlo raznoliki prijedlozi trenutno su dostupni u znanstvenoj literaturi za definiranje ekvivalentne širine tlačne dijagonale,  $w$ , kao glavnoga geometrijskoga parametra.

### 6.2.1 Model ekvivalentne tlačne dijagonale

Model ekvivalentne tlačne dijagonale temelji se na konceptu zamjene zidnoga ispuna s ekvivalentnom tlačnom dijagonalom, a koji je prikazan na **slici 6.2**. Određivanje širine tlačne dijagonale, prema dostupnim podacima u znanstvenoj literaturi, bit će kronološki prikazano u nastavku.



**Slika 6.2** Model ekvivalentne tlačne dijagonale

Na *sllici 6.2* oznake imaju sljedeće značenje:

E	modul elastičnosti zidnog ispuna,
t	debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),
w	širina tlačne dijagonale zidnog ispuna,
$\varphi$	kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu,
h	visina zidnog ispuna,
l	duljina zidnog ispuna,
$l_d$	duljina tlačne dijagonale zidnog ispuna,
$\alpha_h$	kontaktna duljina zidnog ispuna i stupa armirano-betonskog okvira,
$\alpha_l$	kontaktna duljina zidnog ispuna i grede armirano-betonskog okvira,
$E_f$	modul elastičnosti armirano-betonskog okvira,
$I_f$	moment inercije stupa armirano-betonskog okvira,
$I_b$	moment inercije grede armirano-betonskog okvira,
$h'$	osna visina stupa armirano-betonskog okvira,
$l'$	osna duljina grede armirano-betonskog okvira,
H	katna visina.

Stafford Smith (1967) [65, 66] pokazao je kako efektivna širina,  $w$ , ekvivalentne tlačne dijagonale koja predstavlja zidni ispun ovisi o kontaktnoj duljini između okvira i zidnoga ispuna. Ova, pak, kontaktna duljina ovisi o relativnoj krutosti zidnoga ispuna i elemenata armirano-betonskoga okvira. Koristeći pristup grede na elastičnoj podlozi, Stafford Smith predložio je sljedeći izraz odnosa kontaktne duljine,  $\alpha_h$ , i relativne krutosti,  $\lambda$ :

$$\frac{\alpha_h}{h'} = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda \cdot h'}, \quad (6.1)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E \cdot t \cdot \sin(2 \cdot \varphi)}{4 \cdot E_f \cdot I_f \cdot h}}. \quad (6.2)$$

### 6.2.1.1 Određivanje širine ekvivalentne tlačne dijagonale

Glavna geometrijska karakteristika tlačne dijagonale je njezina širina,  $w$ . Kako je rečeno, u dostupnoj znanstvenoj literaturi postoje razni izrazi za njezino određivanje, a koje su predložili razni autori. Uglavnom, možemo reći da većina autora širinu tlačne dijagonale povezuje s njezinom duljinom i relativnom krutošću, dok kod manjeg broja autora to nije slučaj.

Među prvima Holmes (1961) je izveo odnos između širine i duljine tlačne dijagonale pomoću izraza [37]:

$$w = \frac{1}{3} \cdot l_d, \quad (6.3)$$

gdje je:  $l_d$  duljina tlačne dijagonale prema *slici 6.2*.

Godinu dana kasnije, Smith (1962) je na osnovu eksperimentalnih ispitivanja definirao znatno manji odnos širine i duljine tlačne dijagonale, čija se vrijednost pretpostavlja da se kreće prema izrazu [65, 66]:

$$w = (0,1 - 0,25) \cdot l_d. \quad (6.4)$$

gdje je:  $l_d$  duljina tlačne dijagonale prema *slici 6.2*.

Prema modelu Smitha (1966), širina tlačne dijagonale može se procijeniti na osnovu sljedećeg izraza [65, 66]:

$$w = 2 \cdot \alpha_h \cdot \sin \varphi = \frac{\pi}{\lambda} \sin \varphi, \quad (6.5)$$

gdje je:  $\alpha_h = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda}$  kontaktna duljina zidnog ispuna i stupa armirano-betonskoga okvira prema *slici 6.2*,

$\varphi$  kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema *slici 6.2*,

$\lambda$  relativna krutost prema izrazu (6.2).

Daljnji razvoj osigurao je Mainstone (1971) koji ocjenjuje širinu tlačne dijagonale pomoću izraza [50, 51]:

$$w = 0,16 \cdot (\lambda \cdot H)^{-0,3} \cdot l_d, \quad (6.6)$$

gdje je:  $\lambda$  relativna krutost prema izrazu (6.2),

H katna visina prema *slici 6.2*,

$l_d$  duljina tlačne dijagonale prema *slici 6.2*.

Kasnije, Mainstone (1971) predlaže empirijski odnos kako bi se utvrdila širina tlačne dijagonale nakon vrlo sličnog pristupa Stafford Smitha. Za armirano-betonske okvire sa zidnim ispunom predložio je sljedeći izraz [50, 51]:

$$w = 0,175 \cdot (\lambda \cdot H)^{-0,4} \cdot l_d, \quad (6.7)$$

gdje je:  $\lambda$  relativna krutost prema izrazu (6.2),  
 $H$  katna visina prema *slici 6.2*,  
 $l_d$  duljina tlačne dijagonale prema *slici 6.2*.

Kadir (1974) je razvio model u kojem geometrijske karakteristike ekvivalentne tlačne dijagonale ovise o krutosti oba stupa i grede okvira koji su ispunjeni zidnim ispunom. Uglavnom, širina tlačne dijagonale ovisi o utjecaju relativne krutosti stupa i zidnoga ispuna kako je definirano izrazom (6.2) i odgovarajućom relativnom krutosti grede i zidnoga ispuna kako slijedi [39]:

$$\lambda_b = \sqrt[4]{\frac{E \cdot t \cdot \sin(2 \cdot \varphi)}{4 \cdot E_f \cdot I_b \cdot l}} \quad (6.8)$$

te se širina tlačne dijagonale izračunava na sljedeći način:

$$w = \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{1}{4 \cdot \lambda} + \frac{1}{\lambda_b} \right) \quad (6.9)$$

gdje je:  $\lambda$  relativna krutost prema izrazu (6.2),  
 $\lambda_b$  relativna krutost prema izrazu (6.8).

Mainstone (1974) definira tri različite vrijednosti širine tlačne dijagonale ovisno o stvarnim uvjetima napreznja prema dobivenim rezultatima eksperimentalnih ispitivanja armirano-betonskih okvira ispunjenima zidnim ispunom. Konkretno, autor definira širinu tlačne dijagonale pri pojavi prve pukotine (6.10), u sredini ispitivanja (6.11) i na kraju (6.12) prema izrazima [50, 51]:

$$w_{first-cracking} = 0,76 \cdot \sin(2 \cdot \varphi) \cdot \left( \frac{E \cdot t \cdot h^4 \cdot \sin(2 \cdot \varphi)}{E_f \cdot I_f \cdot h} \right)^{-0,22} \cdot l_d \quad (6.10)$$

$$w_{intermediate} = 0,20 \cdot \sin(2 \cdot \varphi) \cdot \left( \frac{E \cdot t \cdot h^4 \cdot \sin(2 \cdot \varphi)}{E_f \cdot I_f \cdot h} \right)^{-0,10} \cdot l_d \quad (6.11)$$

$$w_{ultimate} = 0,192 \cdot \sin(2 \cdot \varphi) \cdot \left( \frac{E \cdot t \cdot h^4 \cdot \sin(2 \cdot \varphi)}{E_f \cdot I_f \cdot h} \right)^{-0,10} \cdot l_d \quad (6.12)$$

gdje je:  $\varphi$  kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema *slici 6.2*,  
 $E$  modul elastičnosti zidnog ispuna,  
 $t$  debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),

- h      visina zidnog ispuna prema **slici 6.2**,  
 E<sub>f</sub>    modul elastičnosti armirano-betonskog okvira,  
 I<sub>f</sub>    moment inercije stupa armirano-betonskog okvira,  
 l<sub>d</sub>    duljina tlačne dijagonale prema **slici 6.2**.

Klingner i Bertero (1978) na temelju eksperimentalnoga istraživanja koja su provedena na skaliranim modelima, predlažu sljedeći izraz za širinu tlačne dijagonale [45]:

$$w = 0,175 \cdot (\lambda \cdot h)^{-0,4} \cdot l_d, \quad (6.13)$$

- gdje je:
- λ      relativna krutost prema izrazu (6.2),  
 h      visina zidnog ispuna prema **slici 6.2**,  
 l<sub>d</sub>    duljina tlačne dijagonale prema **slici 6.2**.

Tassios (1984) je analizirao rezultate istraživanja parametara temeljenih na metodi konačnih elemenata, a koje su dobili Bazan i Meli (1980), te predložio izraz za širinu tlačne dijagonale u nastavku [69]:

$$w = 0,20 \cdot \sin \varphi \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot A_f}{G_i \cdot A_m}} \cdot l_d, \quad (6.14)$$

- gdje je:
- φ      kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema **slici 6.2**,  
 E<sub>f</sub>    modul elastičnosti armirano-betonskog okvira,  
 A<sub>f</sub>    ploština stupa armirano-betonskog okvira,  
 G<sub>i</sub>    modul posmika zidnog ispuna ( $G_i = 0,4E$ ),  
 A<sub>m</sub>    ploština horizontalnog presjeka zidnog ispuna ( $A_m = t \cdot l$ ),  
 l<sub>d</sub>    duljina tlačne dijagonale prema **slici 6.2**.

Pri tome, mora biti ispunjen uvjet:  $1 < \frac{E_f \cdot A_f}{G_i \cdot A_m} < 5$ .

Liauw i Kwan (1984) predložili su numerički model za simulaciju odgovora djelomično ispunjenog armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom. Model se temelji na smanjenju širine tlačne dijagonale uzimajući u obzir stvarni učinak takvog zidnog ispuna. Dakle, predložen je izraz za širinu tlačne dijagonale kako slijedi [47]:

$$w = \frac{0,95 \cdot h \cdot \cos \varphi}{\sqrt{\lambda \cdot H}}, \quad (6.15)$$

- gdje je:      h      visina zidnog ispuna prema **slici 6.2**,



- $\varphi$  kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema *slici 6.2*,  
 $\lambda$  relativna krutost prema izrazu (6.2),  
H katna visina prema *slici 6.2*.

Alternativni prijedlog, koji se temeljio na rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, dali su Decanini i Fantin (1986). Oni provode ispitivanja na armirano-betonskim okvirima sa zidnim ispunom i istražuju njihov odgovor pod horizontalnim opterećenjem. Rezultate tih ispitivanja kalibrirali su za dva stanja (stanje bez pukotina i stanje s pukotinama) kako bi definirali širinu tlačne dijagonale [13]:

*Stanje bez pukotina:*

$$w = \left( \frac{0,748}{\lambda \cdot H} + 0,085 \right) \cdot l_d \text{ ako je } \lambda \cdot H \leq 7,85, \quad (6.16)$$

$$w = \left( \frac{0,393}{\lambda \cdot H} + 0,130 \right) \cdot l_d \text{ ako je } \lambda \cdot H > 7,85, \quad (6.17)$$

*Stanje sa pukotina:*

$$w = \left( \frac{0,707}{\lambda \cdot H} + 0,010 \right) \cdot l_d \text{ ako je } \lambda \cdot H \leq 7,85, \quad (6.18)$$

$$w = \left( \frac{0,470}{\lambda \cdot H} + 0,040 \right) \cdot l_d \text{ ako je } \lambda \cdot H > 7,85, \quad (6.19)$$

- gdje je:  $\lambda$  relativna krutost prema izrazu (6.2),  
H katna visina prema *slici 6.2*,  
 $l_d$  duljina tlačne dijagonale prema *slici 6.2*.

Nekoliko godina kasnije, Dowe i Seah (1989) predlažu alternativni izraz koji uključuje iste parametre, a koje je već razmatrao Kadir (1974) [20, 39]:

$$w = \frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot \left( \frac{\cos \varphi}{\lambda} + \frac{\sin \varphi}{\lambda_b} \right), \quad (6.20)$$

- gdje je:  $\varphi$  kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema *slici 6.2*,  
 $\lambda$  relativna krutost prema izrazu (6.2),  
 $\lambda_b$  relativna krutost prema izrazu (6.8),

Jedan od najvažnijih usvojenih odnosa trenutno dostupnih za definiranje širine tlačne dijagonale kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom, onaj je Paulaya i Priestleya (1992) [56]:

$$w = 0,25 \cdot l_d, \quad (6.21)$$

gdje je:  $l_d$  duljina tlačne dijagonale prema **slici 6.2**.

Decanini (1993) je na osnovu eksperimentalnih ispitivanja i numeričkih simulacija za stanje s i bez pukotina predložio sljedeći izraz za širinu tlačne dijagonale [13]:

$$w = \left( \frac{k_1}{\lambda \cdot h} + k_2 \right) \cdot l_d, \quad (6.22)$$

gdje je:  $\lambda$  relativna krutost prema izrazu (6.2),

$h$  visina zidnog ispuna prema **slici 6.2**,

$l_d$  duljina tlačne dijagonale prema **slici 6.2**,

$k_1$  i  $k_2$  koeficijenti dobiveni kalibracijom koji su dani u **tablici 6.1**.

**Tablica 6.1** Vrijednosti koeficijenata  $k_1$  i  $k_2$

	$\lambda h < 3,14$	$3,14 \leq \lambda h \leq 7,85$	$\lambda h > 7,85$
$k_1$	1,300	0,707	0,470
$k_2$	-0,178	0,010	0,040

Durrani i Luo (1994) predložili su proširenje navedenoga modela po Mainstoneu (1974). Također, oni su sljedeći izraz kalibrirali na rezultatima numeričke analize [22]:

$$w = 0,32 \cdot \sin^{1,5}(2 \cdot \varphi) \cdot \left( \frac{E \cdot t \cdot H^4}{m \cdot E_f \cdot I_f \cdot h} \right)^{-0,1} \cdot l_d, \quad (6.23)$$

$$\text{gdje je: } m = 6 \cdot \left( 1 + \frac{6}{\pi} \cdot \arctan \frac{I_b \cdot H}{I_f \cdot l} \right),$$

$\varphi$  kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema **slici 6.2**,

$E$  modul elastičnosti zidnog ispuna,

$t$  debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),

$H$  katna visina prema **slici 6.2**,

$E_f$  modul elastičnosti armirano-betonskog okvira,

$I_f$  moment inercije stupa armirano-betonskog okvira,

- $I_b$  moment inercije grede armirano-betonskog okvira,  
 $h$  visina zidnog ispuna prema *slici 6.2*,  
 $l$  duljina zidnog ispuna prema *slici 6.2*,  
 $l_d$  duljina tlačne dijagonale prema *slici 6.2*.

Zatim, Penelis i Kappos (1997) predlažu izraz s nešto izmijenjenom vrijednošću odnosa širine i duljine tlačne dijagonale u odnosu na Paulaya i Priestleya (1992) [59]:

$$w = 0,20 \cdot l_d, \quad (6.24)$$

gdje je:  $l_d$  duljina tlačne dijagonale prema *slici 6.2*.

Drysdale (1999) je predložio izraz za širinu tlačne dijagonale u ovisnosti o kontaktnoj duljini između zidnoga ispuna i stupa, odnosno grede armirano-betonskoga okvira oblika:

$$w = \frac{1}{2} \sqrt{\alpha_h^2 + \alpha_l^2}, \quad (6.25)$$

gdje je:  $\alpha_h = \frac{\pi}{2} \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_f \cdot I_f \cdot h}{E \cdot t \cdot \sin(2 \cdot \varphi)}}$  kontaktna duljina zidnog ispuna i stupa armirano-betonskog okvira prema *slici 6.2*,

$\alpha_l = \frac{\pi}{2} \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_f \cdot I_b \cdot l}{E \cdot t \cdot \sin(2 \cdot \varphi)}}$  kontaktna duljina zidnog ispuna i grede armirano-betonskog okvira prema *slici 6.2*,

- $E_f$  modul elastičnosti armirano-betonskog okvira,  
 $I_f$  moment inercije stupa armirano-betonskog okvira,  
 $I_b$  moment inercije grede armirano-betonskog okvira,  
 $h$  visina zidnog ispuna prema *slici 6.2*,  
 $l$  duljina zidnog ispuna prema *slici 6.2*,  
 $E$  modul elastičnosti zidnog ispuna,  
 $t$  debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),  
 $\varphi$  kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema *slici 6.2*.

Štoviše, Papia i Cavaleri (2001) dali su značajan inovativan doprinos po pitanju učinka zidnoga ispuna na odgovor armirano-betonskog okvira na horizontalnu pobudu. Njihov model doveo je do definicije širine tlačne dijagonale koja se ne temelji samo na savojnoj krutosti

armirano-betonskoga okvira i zidnoga ispuna nego uzima u obzir i aksijalnu krutost armirano-betonskoga okvira i posmičnu krutost zidnoga ispuna (potonji se uzima kroz Poissonov omjer). Dakle, eksperimentalni rezultati koje su proveli Papić i Cavaleri (2001) doveli su do sljedećeg izraza za definiciju širine tlačne dijagonale:

$$w = \left( \frac{c}{z} \cdot \frac{1}{(\lambda^*)^\beta} \right) \cdot l_d, \quad (6.26)$$

gdje je: 
$$\lambda^* = \frac{E \cdot t \cdot h'}{E_f \cdot A_f} \cdot \left( \frac{h'^2}{l'^2} + \frac{A_f \cdot l'}{4 \cdot A_b \cdot h'} \right),$$

$$c = 0,249 - 0,0116 \cdot \mu + 0,567 \cdot \mu^2,$$

$$\beta = 0,146 + 0,0073 \cdot \mu + 0,126 \cdot \mu^2,$$

$$z = \begin{cases} 1 & \text{za } \frac{l}{h} = 1 \\ 1,125 & \text{za } \frac{l}{h} = 1,5 \end{cases},$$

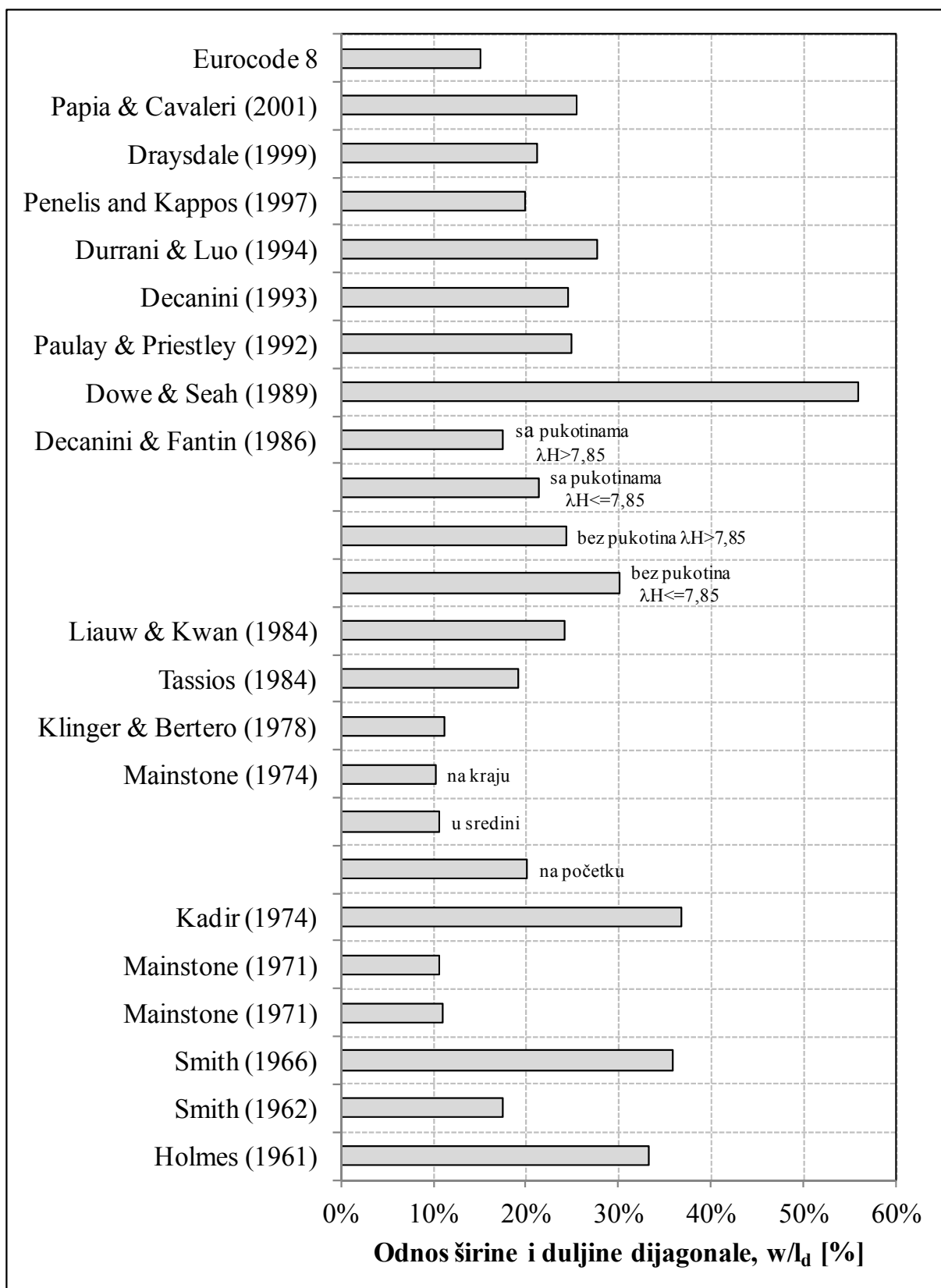
- E modul elastičnosti zidnog ispuna,  
t debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),  
h' osna visina stupa armirano-betonskog okvira,  
l' osna duljina grede armirano-betonskog okvira,  
E<sub>f</sub> modul elastičnosti armirano-betonskog okvira,  
A<sub>f</sub> ploština poprečnog presjeka stupa armirano-betonskog okvira,  
A<sub>b</sub> ploština poprečnog presjeka grede armirano-betonskog okvira,  
μ poissonov koeficijent (0,20),  
h visina zidnog ispuna prema  **slici 6.2**,  
l duljina zidnog ispuna prema  **slici 6.2**.

Eurocode 8 [26] daje sljedeći izraz za širinu tlačne dijagonale u ovisnosti o njezinoj duljini:

$$w = 0,15 \cdot l_d, \quad (6.27)$$

gdje je: l<sub>d</sub> duljina tlačne dijagonale prema  **slici 6.2**.

Ako prema svim navedenim izrazima izračunamo širinu tlačne dijagonale (npr. za modele GRUPE I prema ulaznim podacima iz  **tablice 5.1**) i stavimo je u odnos s njezinom duljinom, onda dobijemo  **sliku 6.3**.



Slika 6.3 Prikaz odnosa širine i duljine tlačne dijagonale prema raznim autorima

Sa *slike 6.3* jasno se mogu vidjeti razlike u vrijednostima odnosa širine i duljine tlačne dijagonale, a samim time i zadatak koju vrijednost odabrati.

### 6.2.2 Krutost zidnoga ispuna (ekvivalentne tlačne dijagonale)

Početnu krutost tlačne dijagonale možemo odrediti ako znamo odnos širine i duljine tlačne dijagonale prema izrazu:

$$K_s = \frac{E \cdot w \cdot t}{l_d}, \quad (6.28)$$

gdje je:

- E      modul elastičnosti zidnog ispuna,
- w      širina tlačne dijagonale prema  *slici 6.2*,
- t      debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),
- l<sub>d</sub>    duljina tlačne dijagonale prema  *slici 6.2*.

Horizontalnu krutost zidnoga ispuna na temelju svojstava tlačne dijagonale možemo odrediti prema sljedećem izrazu:

$$K_m = K_s \cdot \cos^2 \varphi, \quad (6.29)$$

gdje je:

- K<sub>s</sub>    početna krutost tlačne dijagonale prema prethodnom izrazu,
- φ      kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema  *slici 6.2*.

Međutim, neki znanstvenici potvrdili su kako je podcijenjena krutost zidnoga ispuna na temelju prethodnoga izraza zbog činjenice kako nije uzeta u obzir posmična deformacija zidnoga ispuna, te se predlažu izrazi ovisno o rubnim uvjetima. Za upete rubne uvjete predlaže se sljedeći izraz:

$$K_m = \frac{1}{\frac{h^3}{12 \cdot E \cdot I} + \frac{1,2 \cdot h}{G_i \cdot A_m}}. \quad (6.30)$$

gdje je:

- h      visina zidnog ispuna prema  *slici 6.2*,
- E      modul elastičnosti zidnog ispuna,
- I      moment tromosti horizontalnog presjeka zidnog ispuna,
- G<sub>i</sub>    modul posmika zidnog ispuna ( $G_i = 0,4E$ ),
- A<sub>m</sub>    ploština horizontalnog presjeka zidnog ispuna ( $A_m = t l$ ).

Za, s jedne strane upeto, a s druge zglobovno stanje predlaže se sljedeći izraz:

$$K_m = \frac{1}{\frac{h^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{1,2 \cdot h}{G_i \cdot A_m}}. \quad (6.31)$$

Zadnja dva izraza obično se koriste za modeliranje elastičnog ponašanja zidnoga ispuna kod armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom. Međutim, eksperimentalna zapažanja pokazuju kako se zidni ispun kod armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom ponaša vrlo neelastično. Najvažniji čimbenici nelinearnog ponašanja armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom proizlaze iz materijalne nelinearnosti. Ovi čimbenici ovise o neelastičnom ponašanju zidnoga ispuna, elemenata armirano-betonskoga okvira i kontakta između zidnoga ispuna i armirano-betonskoga okvira.

### 6.2.3 Čvrstoća zidnog ispuna (ekvivalentne tlačne dijagonale)

Provedena eksperimentalna ispitivanja raznih autora pokazuju da horizontalna čvrstoća armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom uvelike ovisi o mehanizmu sloma zidnoga ispuna, što pak ovisi o interakciji između armirano-betonskog okvira i zidnoga ispuna. Općenito, postupci prikazani u literaturi određuju maksimalno horizontalno opterećenje koje može izdržati armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom, kojeg predstavlja tlačna dijagonala i to:

- I) Prvo, analiziraju se mogući mehanizmi sloma zidnoga ispuna od kojih su najčešći prikazani u *Poglavljju 4*. Na temelju tih mehanizama sloma, pojedini autori predlažu izraze za određivanje čvrstoće dijagonale ovisno o tipu mehanizma sloma zidnoga ispuna, a samim time se na osnovu površine i čvrstoće dijagonale može odrediti i sila u tlačnoj dijagonali. *Najčešće se uzima da je tlačna čvrstoća dijagonale jednaka tlačnoj čvrstoći zidnoga ispuna* što je i praktično primjenjivo, a što će i u ovome radu biti primijenjeno kod numeričkoga modeliranja.
- II) Drugo, analizira se čvrstoća armirano-betonskoga okvira koji okružuje zidni ispun na temelju mogućih mehanizama sloma armirano-betonskog okvira, poput smicanja ili savijanja

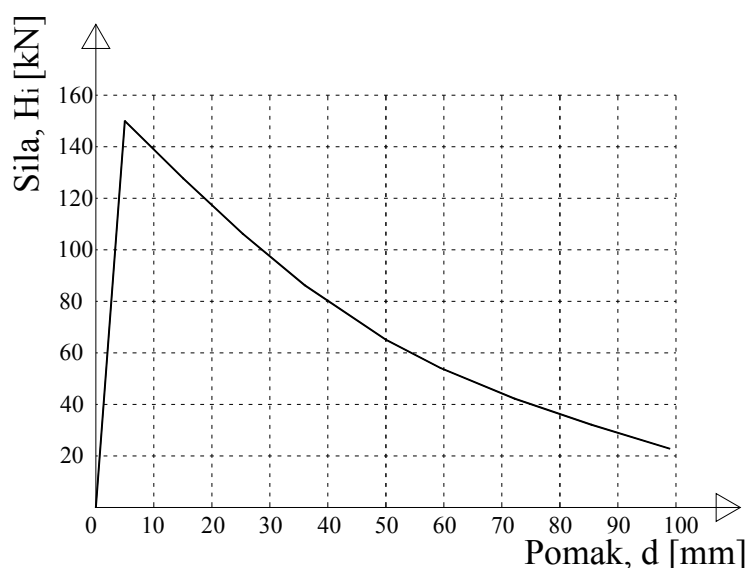
Konačno, za maksimalnu horizontalnu nosivost uzima se manja vrijednost od nosivosti zidnoga ispuna, odnosno nosivosti armirano-betonskoga okvira promatranih kako je navedeno pod I) i II). U literaturi najčešći je slučaj otkazivanja nosivosti zbog zidnoga ispuna, odnosno nosivost zidnog ispuna puno je manja od nosivosti armirano-betonskoga okvira.

## 6.2.4 Teorijski modeli nelinearnog ponašanja zidnog ispuna

Za provedbu nelinearne statičke ili dinamičke seizmičke analize armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom treba biti definiran nelinearni odnos sila-pomak kod ekvivalentne tlačne dijagonale koja zamjenjuje zidni ispun u armirano-betonskome okviru. Dakle, osim raznim alternativnim definicijama omjera širine i duljine tlačne dijagonale te horizontalne krutosti tlačne dijagonale, daljnje formulacije potrebne su kako bi se opisalo ponašanje dijagonale u tlaku i eventualno simuliralo njezino histereznno ponašanje pri cikličkom opterećenju uzimajući u obzir neelastično ponašanje i oštećivanje. Sljedeća poglavlja opisuju četiri dostupna modela u znanstvenoj literaturi za opisivanje nelinearnoga ponašanja zidnoga ispuna kod armirano-betonskih okvira.

### 6.2.4.1 Model po Klingneru i Berteru (1976)

Model po Klingneru i Berteru (1976) [45] jedan je od prvih koji se pojavljuje u smjernicama rješavanja pitanja simuliranja ponašanja zidnoga ispuna kod armirano-betonskih okvira. Temelji se na rezultatima ispitivanja uzoraka u mjerilu 1:3 pod cikličkim opterećenjem i doživio je niz poboljšanja prije postizanja svoga konačnoga oblika. Analitički detalji ovdje su izostavljeni radi sažetosti, ali *slika 6.4* pokazuje tipičan odnos sile i pomaka dobivenog primjenom razmatranoga modela. Također, vidljivo je da model zapravo zanemaruje moguće smanjenje krutosti uzrokovane početnim pukotinama i pretpostavlja linearni odnos sve do postizanja maksimalne tlačne čvrstoće. Zatim, slijedi omekšavanje u obliku eksponencijalne grane kojom se pretpostavlja simulacija učinka uzdužne (aksijalne) sile nastale pri porastu pomaka.



**Slika 6.4** Krivulja odnosa sila-pomak prema modelu Klingnera i Bertera (1976)



### 6.2.4.2 Model po Decaniniu (1993)

Odnos sila-pomak, koji je predložio Decanini (1993) [13] formuliran je s obzirom na rezultate numeričke analize dvorasponskog armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom, a čiji je broj katova varirao od 2 do 24. Odnos sila-pomak jedne ekvivalentne tlačne dijagonale temelji se na dva ključna parametra  $K_m$  i  $H_m$  koji predstavljaju horizontalnu (bočnu) krutost i čvrstoću dijagonale, odnosno silu u dijagonali (*slika 6.5*). Kalibrirani analitički izrazi imaju sljedeći oblik:

$$K_m = \frac{E \cdot w \cdot t}{l_d} \cdot \cos^2 \varphi, \quad (6.32)$$

za krutost, dok je za drugi parametar definicija složenija. Naime, temelji se na definiciji četiriju mogućih načina mehanizama sloma zidnoga ispuna, a samim time na definiranju četiriju graničnih čvrstoća,  $f_m$ , tlačne dijagonale kako slijedi:

*Drobljenje zidnog ispuna u sredini zida (tlačni slom u sredini zidnog ispuna):*

$$f_{m1} = \frac{1,16 \cdot f_k \cdot \tan \varphi}{k_1 + k_2 \cdot \lambda \cdot H}, \quad (6.33)$$

*Drobljenje zidnog ispuna u uglovima okvira:*

$$f_{m2} = \frac{1,12 \cdot f_k \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{k_1 \cdot (\lambda \cdot H)^{-0,12} + k_2 \cdot (\lambda \cdot H)^{0,88}}, \quad (6.34)$$

*Klizanje po horizontalnoj sljubnici morta:*

$$f_{m3} = \frac{1,2 \cdot f_{vk} \cdot \sin \varphi + 0,45 \cdot f_{vk} \cdot \cos \varphi + 0,3 \cdot \sigma_o}{\frac{k_1}{\lambda \cdot H} + k_2}, \quad (6.35)$$

*Dijagonalno klizanje po horizontalnoj sljubnici morta:*

$$f_{m4} = \frac{0,6 \cdot f_{vko} + 0,3 \cdot \sigma_o}{\frac{k_1}{\lambda \cdot H} + k_2}, \quad (6.36)$$

gdje je:

- E modul elastičnosti zidnog ispuna,
- w širina tlačne dijagonale prema *slici 6.2*,
- t debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),
- $\varphi$  kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema *slici 6.2*.
- $f_k$  tlačna čvrstoća zidnog ispuna,
- $\varphi$  kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema *slici 6.2*,
- $k_1$  i  $k_2$  koeficijenti dobiveni kalibracijom koji su dani u *tablici 6.1*,

- $\lambda$  relativna krutost prema izrazu (6.2),  
 $H$  katna visina prema  *slici 6.2*,  
 $f_{vk}$  posmična čvrstoća zidnog ispuna,  
 $f_{vk0}$  početna posmična čvrstoća zidnog ispuna,  
 $\sigma_0$  vertikalno opterećenje na zidni ispun.

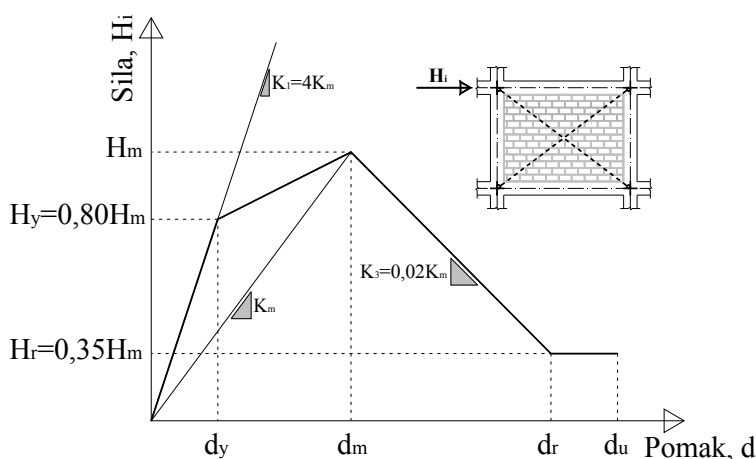
Na temelju definicije četiriju čvrstoća zidnog ispuna prema prethodnim izrazima, stvarna vrijednost čvrstoće dijagonale može se definirati na sljedeći način:

$$(f_m)_{\min} = \min[f_{m1}; f_{m2}; f_{m3}; f_{m4}]. \quad (6.37)$$

Tada, horizontalna projekcija granične horizontalne sile može se izvesti na sljedeći način:

$$H_m = (f_m)_{\min} \cdot t \cdot w \cdot \cos \varphi, \quad (6.38)$$

- gdje je:  $(f_m)_{\min}$  minimalna čvrstoća dijagonale,  
 $t$  debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),  
 $w$  širina tlačne dijagonale prema  *slici 6.2*,  
 $\varphi$  kut nagiba tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu prema  *slici 6.2*.



Slika 6.5 Krivulja odnosa sila-pomak prema modelu Decaninia (1993)

Ostale točke na krivulji odnosa sila-pomak, prikazane na  *slici 6.5* mogu se odrediti iz sljedećih odnosa:

$$H_y = 0,8 \cdot H_m, \quad (6.39)$$

$$H_r = 0,35 \cdot H_m, \quad (6.40)$$

$$K_1 = 4 \cdot K_m, \quad (6.41)$$

$$K_3 = 0,02 \cdot K_m. \quad (6.42)$$

#### 6.2.4.3 Model po Panagiotakosu i Fardisu (1996)

Na temelju prethodnih istraživanja ponašanja armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom (Panagiotakos & Fardis, 1994), Panagiotakos i Fardis (1996) predložili su nelinearni odnos sila-pomak kako bi opisali ponašanje tlačne dijagonale. Predložena krivulja sastoji se od nekoliko linearnih dijelova koji opisuju ponašanje dijagonale na tlak. U ovome prijedlogu na krivulji se mogu prepoznati tri grane koje opisuju ponašanje sljedećih stanja naprezanja (*slika 6.6*):

- početno elastično ponašanje neraspucanoga zidnog ispuna;
- post-elastični linearni odgovor, karakterizira ga smanjenje početne krutosti;
- linearni post-granični odgovor,
- zaostala aksijalna čvrstoća nakon određene vrijednosti pomaka.

Dakle, za opisivanje nelinearne krivulje, prema ovome prijedlogu, potrebno je definirati šest parametara odnosa sila-pomak. U stvari, početna krutost može se definirati na sljedeći način:

$$K_1 = \frac{G_i \cdot t \cdot l}{h}, \quad (6.43)$$

gdje je:

$G_i$	modul posmika zidnog ispuna ( $G_i=0,4E$ ),
$t$	debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),
$l$	duljina zidnog ispuna prema <i>slici 6.2</i> ,
$h$	visina zidnog ispuna prema <i>slici 6.2</i> .

Zatim, vrijednost opterećenja na početku oštećenja zidnog ispuna definirana je na sljedeći način, kroz posmičnu čvrstoću,  $f_{ws}$ , dobivenu iz dijagonalno tlačnih ispitivanja:

$$H_y = f_{ws} \cdot t \cdot l. \quad (6.44)$$

gdje je:

$f_{ws}$	posmična čvrstoća dobivena iz dijagonalno tlačnog ispitivanja,
$t$	debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),
$l$	duljina zidnog ispuna prema <i>slici 6.2</i> .

Tada, nakon oštećenja zidnoga ispuna krutost se može definirati prema sljedećem odnosu:

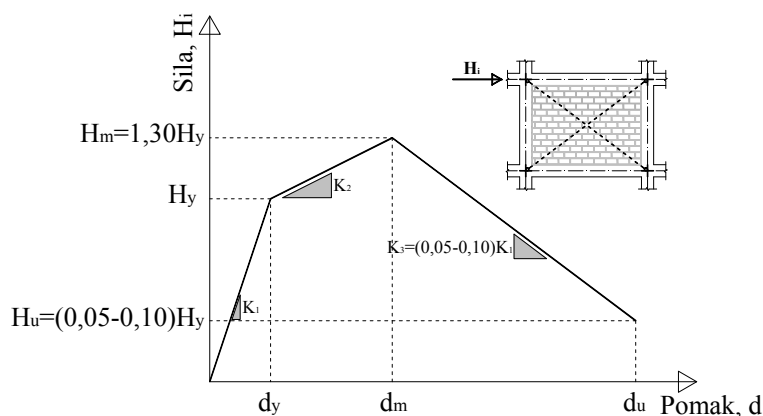
$$K_2 = \frac{E \cdot w \cdot t}{l_d}, \quad (6.45)$$

gdje je: E modul elastičnosti zidnog ispuna,  
 w širina tlačne dijagonale prema  *slici 6.2*,  
 t debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),  
 l<sub>d</sub> duljina tlačne dijagonale prema  *slici 6.2*.

Dio krivulje poslije oštećenja raste do sljedeće vrijednosti sile:  
 $H_m = 1,3 \cdot H_y$ , (6.46)

Zatim, slijedi omekšavanje, čiju negativnu krutost možemo izraziti na sljedeći način:  
 $K_3 = (0,05 - 0,10) \cdot K_1$ . (6.47)

Krajnja, zaostala sila može se odrediti na sljedeći način:  
 $H_u = (0,05 - 0,10) \cdot H_y$ . (6.48)



**Slika 6.6** Krivulja odnosa sila-pomak prema modelu Panagiotakosu i Fardisu (1996)

#### 6.2.4.4 Model po Dolseku i Fajfaru (2008)

Još ne tako davno Dolsek i Fajfar (2008) [15, 17, 18] predlažu alternativni model za simulaciju nelinearnog ponašanja zidnoga ispuna. Zapravo, model je formalno sličan onome Panagiotakosovom i Fardisovom (1996), samo su ključne razlike u pretpostavci nulte zaostale čvrstoće tlačne dijagonale zidnoga ispuna, odnosno sile u tlačnoj dijagonali (*slika 6.7*). Početna krutost definirana je kao i kod modela Panagiotakosa i Fardisa (1996):

$$K_1 = \frac{G_i \cdot t \cdot l}{h}, \quad (6.49)$$

gdje je:

- $G_i$  moduli posmika zidnog ispuna ( $G_i=0,4E$ ),
- $t$  debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),
- $l$  duljina zidnog ispuna prema *slici 6.2*,
- $h$  visina zidnog ispuna prema *slici 6.2*.

Maksimalna granična sila određuje se prema prijedlogu Žarniča i Gostića (1997), a prema izrazu:

$$H_m = 0,818 \cdot \frac{f_{ws} \cdot t \cdot l}{C_l} \cdot (1 + \sqrt{C_l^2 + 1}), \quad (6.50)$$

gdje je:

- $f_{ws}$  posmična čvrstoća dobivena iz dijagonalno tlačnog ispitivanja,
- $t$  debljina tlačne dijagonale (uzima se da je jednaka debljini zidnog ispuna),
- $l$  duljina zidnog ispuna prema *slici 6.2*,
- $C_l = 1,925 \cdot \frac{l}{h}$  koeficijent omjera duljine i visine zidnog ispuna,
- $h$  visina zidnog ispuna prema *slici 6.2*.

Ostali parametri za definiranje krivulje na *slici 6.7* mogu se definirati kroz jednostavne analitičke odnose. Sila na početku oštećenja zidnoga ispuna definira se kako slijedi:

$$H_y = 0,6 \cdot H_m, \quad (6.51)$$

dok je maksimalni horizontalni pomak,  $d_m$ , definiran kao postotak visine od zidnoga ispuna (0,2% za obične zidove, 0,15% za zidove s otvorima za prozore i 0,10% za zidove s otvorima za vrata).

Konačno, utjecaj otvora na nelinearni odgovor uzet je u obzir uvođenjem sljedećeg parametra:

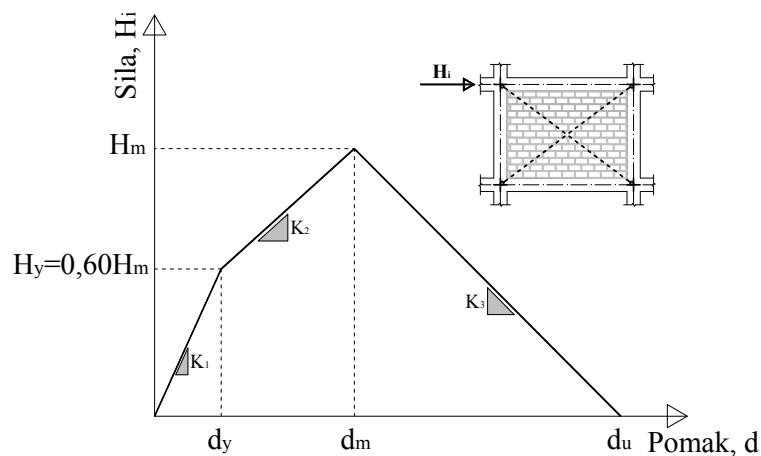
$$\lambda_o = 1 - \frac{1,5 \cdot L_0}{l} \geq 0, \quad (6.52)$$

gdje je:  $L_0$  ukupna horizontalna projekcija otvora u zidnom ispunu,  
 $l$  duljina zidnog ispuna prema *slici 6.2*.

Nadalje, model po Dolsek i Fajfaru (2008) predviđa smanjenje početne krutosti i maksimalne granične sile već ranije danih izraza prema:

$$K_1 = \lambda_o \cdot \frac{G_i \cdot t \cdot l}{h}, \quad (6.53)$$

$$H_m = 1,3 \cdot \lambda_o \cdot f_{ws} \cdot t \cdot l. \quad (6.54)$$



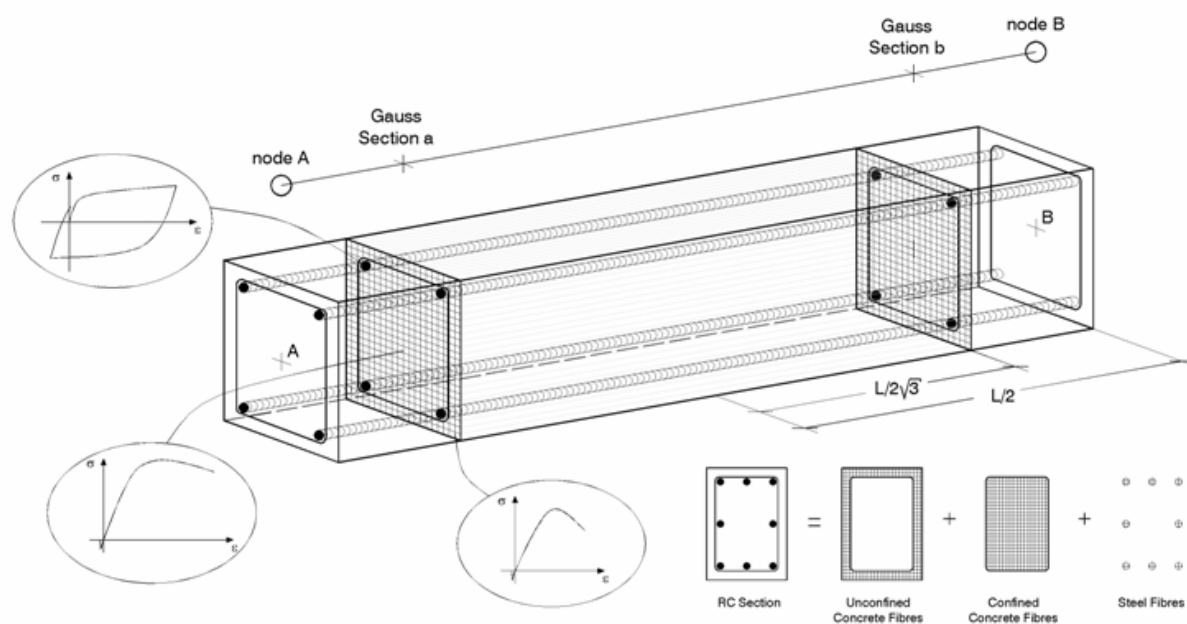
**Slika 6.7** Krivulja odnosa sila-pomak prema modelu Dolsek i Fajfara (2008)

### 6.3 NUMERIČKI MODEL AB OKVIRA SA ZIDNIM ISPUNOM

Kod odabira odgovarajućega numeričkoga modela za analizu seizmičkoga ponašanja armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom prvenstveno se vodilo računa o njegovoj jednostavnosti i pouzdanosti. Pri tome smo se koristili analizom i rezultatima analize pomoću računalnog programa SEISMOSTRUCT Version 6 (Seismosoft 2012). Seismostruct je računalni program temeljen na metodi konačnih elemenata za procjenu ponašanja ravninskih i prostornih okvira pri djelovanju statičkog i dinamičkog opterećenja, pri čemu se uzima u obzir kako geometrijska, tako i materijalna nelinearnost.

#### 6.3.1 Materijalna nelinearnost

Modeliranje elemenata sastoji se u podjeli njihovih poprečnih presjeka na pojedinačne vlaknaste (tzv. „fiber“) elemente. Svakom od tih pojedinačnih elemenata pridružuju se odgovarajuća svojstva jednoosnog ponašanja (odnosa naprezanja i deformacija). Ukupno stanje naprezanja (deformacija) po poprečnom presjeku dobije se integracijom svih nelinearnih rezultata po pojedinačnim „fiber“ elementima.



**Slika 6.8** Podjela poprečnog presjeka na vlakna s definiranjem jedoosnog ponašanja materijala

Primjena elemenata okvirnih konstrukcija s raspodijeljenom neelastičnošću temelji se na dvjema različitim formulacijama ponašanja konačnih elemenata: klasičnoj metodi pomaka (DB – displacement based) i nešto novijoj metodi sila (FB – force based).

Prednost pristupa temeljenom na metodi sila (FB) jest u jednostavnijem modelu s obzirom da ne zahtijeva diskretizaciju po duljini elementa. Osim navedenih elemenata, moguća je i primjena elemenata s područjima plastičnih zglobova koncentriranjem neelastičnosti na fiksnoj duljini, odnosno na krajevima elemenata.

Modeli s konačnim elementima za nelinearni materijalni odgovor štapnih (grednostupnih) elemenata mogu se podijeliti u dvije skupine:

- 1) Modeli s koncentriranom plastičnošću i
- 2) Modeli s raspodijeljenom plastičnošću.

U slučaju koncentrirane plastičnosti, nelinearno ponašanje elemenata grupirano je u rotacijskim oprugama na krajevima linearno-elastičnih elemenata. Raspodijeljena plastičnost elementa greda-stup bazira se ili na DB ili FB formulaciji, pri čemu obje dopuštaju nastajanje plastičnih zglobova u bilo kojoj točki duž osi elementa integracijom odgovora sila-pomak po poprečnom presjeku. U linearno-elastičnoj analizi, oba pristupa daju iste rezultate. Međutim u neelastičnom području, polje je pomaka kod metoda pomaka (DB) izraženo kao funkcija čvornih pomaka, izrazito nelinearno. Stoga je u cilju povećanja točnosti, neophodna daljnja podjela elemenata na više dijelova kako bi se što realnije prikazale deformacije u području plastičnoga zgloba. Nasuprot tome, elementi temeljeni na pristupu metode sila (FB) interpoliraju sile u presjeku pomoću baznih sila, zadovoljavajući uvjete ravnoteže, čak i u uvjetima nelinearnog materijalnoga odgovora. Prednost FB elemenata nad DB leži u mogućnosti primjene samo jednog FB elementa za simulaciju materijalnoga nelinearnog odgovora elemenata okvira u usporedbi s nekoliko DB podelemenata.

### **6.3.2 Vrste proračuna (analiza)**

U softveru SeismoStruct trenutno je dostupno 7 različitih vrsta proračuna (analiza). Različiti proračuni zahtijevaju različito modeliranje elemenata konstrukcije. Također, o vrsti proračuna ovisi i zadavanje opterećenja na modelima. Za potrebe ovoga rada korištene su dvije analize (proračuni), i to:

1. Statička pushover analiza ,
2. Statička time-history analiza.

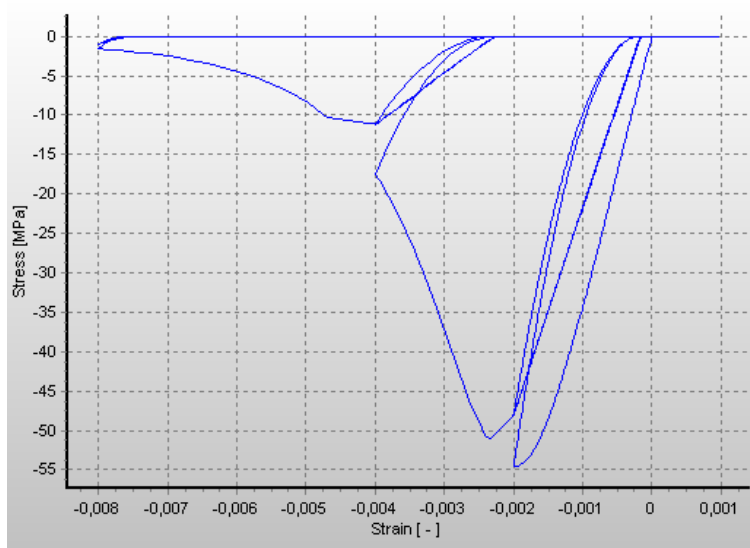
Treba spomenuti kako je naglasak stavljen na statičku pushover analizu.



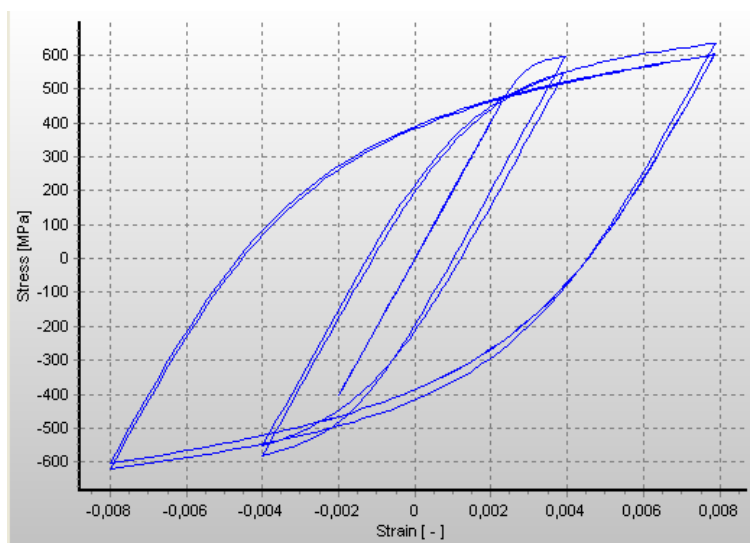
### 6.3.3 Materijal

Program ima svoju bazu različitih modela ponašanja. Korištenjem tih modela korisnik je u mogućnosti stvoriti neograničen broj različitih materijala koji se koriste za definiranje poprečnog presjeka elemenata konstrukcije.

Materijali dostupni u programu dolaze s definiranim svojstvima - prije svega mehaničkim karakteristikama, pri čemu se one za određeni model materijala mogu i mijenjati (npr. modul elastičnosti, čvrstoće itd.). Za dobivanje numeričkih rezultata za beton korišten je nelinearni model betona prema Manderu (*slika 6.9*), dok je za čelik korišten model čelika prema Menegotto-Pinto (*slika 6.10*).



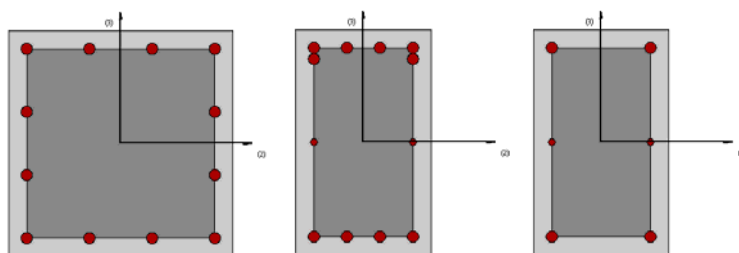
**Slika 6.9** Prikaz odnosa naprezanje-deformacija za model betona prema Manderu



**Slika 6.10** Prikaz odnosa naprezanje-deformacija za model čelika prema Menegotto-Pinto

### 6.3.4 Poprečni presjek

Za analizu je odabran armirano betonski pravokutni poprečni presjek kojem su pridružena materijalna svojstva poprečnog presjeka (betona i armature), dimenzije poprečnog presjeka, količina i raspodjela armature po poprečnom presjeku, kao i zaštitni sloj armature.



Slika 6.11 Prikaz karakterističnih poprečnih presjeka stupa i grede na ležaju i u polju

### 6.3.5 Neelastični elementi okvira

Svaki element konstrukcije (stup, greda) obično je diskretiziran samo jednim elementom čije je ponašanje kontrolirano pridruženim modelima ponašanja u određenim kritičnim presjecima. Osim globalnog odgovora cjelokupne konstrukcije, modeli elemenata daju uvid u ponašanje samoga elementa na lokalnome nivou, kao što su lokalna duktilnost i ocjena oštetljivosti, te raspodjelu istih po konstrukciji.

Postoji mnogo prijedloga za modeliranje elemenata, neki od njih uzimaju za pretpostavku neelastično ponašanje samo u definiranim područjima na krajevima elemenata, dok ostali uzimaju u obzir neelastičnost duž cijelog elementa kako bi se na što bolji način prikazalo stvarno ponašanje.

#### 6.3.5.1 Neelastični elementi okvira – *infrmFB*, *infrmDB*

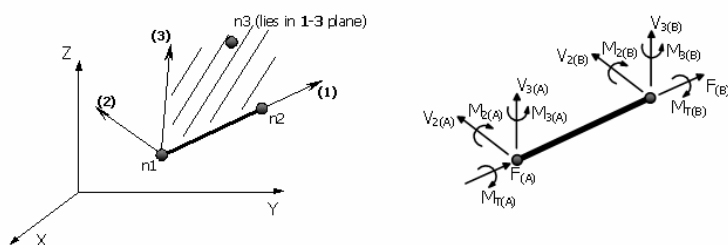
Neelastični elementi okvira su 3D štapni elementi s kojima je moguće modelirati elemente prostornih okvirnih konstrukcija uzimajući u obzir njihove geometrijske i materijalne nelinearnosti. Odnos naprezanje-deformacija na razini presjeka ovih elemenata dobiva se integracijom nelinearnog jednoosnog odziva pojedinih vlakana na koja je presjek podijeljen – ovime se uzima u obzir promjena neelastičnosti kako duž elementa, tako i po širini presjeka.

*InfrmFB* je češće korišten element jer ne zahtjeva njegovu naknadnu diskretizaciju, što osigurava znatno manju veličinu modela i time znatno bržu analizu, za razliku od elemenata *InfrmDB*.

Korištenje samo jednoga konačnoga elementa po elementu konstrukcije, osim ovih prednosti, omogućava i izravno očitavanje parametara seizmičkog ponašanja, kao i oštetljivosti konstrukcija (rotacije krajnjih čvorova elementa) ugrađenih u pojedine seizmičke propise. Kada se konstrukcijski element mora diskretizirati u dva ili više elemenata (što je potrebno kod *InfrmDB* elemenata) korisnik mora provesti naknadne proračune pomaka/rotacija čvorova kako bi procijenio rotacije krajeva elemenata.

Kod primjene obje vrste elemenata, za proračun ravnoteže u svakoj od integracijskih točaka elemenata, potrebno je zadati određeni broj vlakana od kojih je izgrađen poprečni presjek. Idealni broj vlakana presjeka, dovoljno dobar za prikaz raspodjele naprezanje-deformacija duž poprečnog presjeka elementa, u funkciji je oblika presjeka i svojstava materijala, a ovisan je i o stupnju neelastičnosti do kojega će element biti izložen. Kod presjeka elemenata od istog materijala može biti dovoljno već i stotinjak vlakana, ali za složenije presjeke u izrazito neelastičnim područjima potrebno je najmanje dvjestotinjak pa i više vlakana. Međutim, treba imati na umu da je za određivanje optimalnoga broja vlakana najbolje provesti pojedinačnu analizu osjetljivosti rezultata na broj vlakana.

Osim toga, za element *InfrmFB* treba odrediti i broj integracijskih točaka. Obično je dovoljno 4-5 presjeka, no lokacije takvih integracijskih presjeka ovise o pretpostavljenim presjecima u kojima se očekuje pojava plastifikacije. Ukoliko korisnici diskretiziraju element (npr. kako bi uzeli u obzir promjenu detalja armiranja na svojstva grede), potrebno je odrediti od 3 (najmanji prihvatljiv, kako bi se izbjegla pod-integracija) do najviše 4 integracijska presjeka kako bi se izbjegle poteškoće s konvergencijom.



**Slika 6.12** Štapni elementi s oznakama lokalnih osi i unutarnjih sila

### 6.3.6 Model zidnog ispuna - neelastični panel element

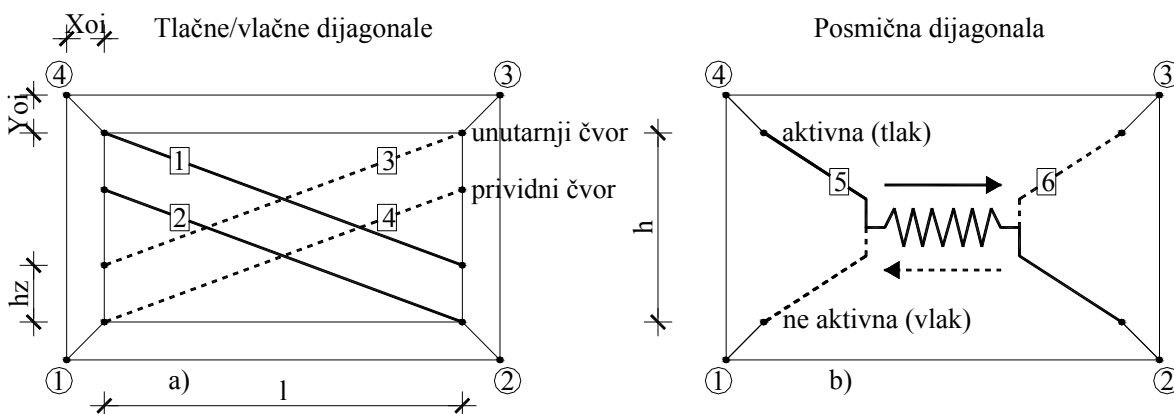
Istraživanja su pokazala da je jedan od najprihvatljivijih načina analize armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom analogija s dijagonalno pridržanim okvirom, odnosno zamjena zidnog ispuna s tlačnom dijagonalom.

Cikličko ponašanje zidnog ispuna modelirano je histereznim pravilom koje je predložio Crisafulli (1997) [6] kako bi simulirao aksijalni odgovor zidnoga ispuna. Ovaj model uzima u obzir nelinearni odgovor zidnoga ispuna u tlaku, uključujući efekte kontaktne duljine u raspucalom materijalu.

#### 6.3.6.1 Neelastični panel element

Panel element s četiri čvora za modeliranje nelinearnog odziva zidnoga ispuna u okvirnim konstrukcijama prvobitno je programirao i razvio Crisafulli 1997. [6], a u SeismoStruct je implementiran 2005. godine. Svaki panel element zapravo predstavlja šest dijagonala; svaki od dijagonalnih smjerova ima dva paralelna elementa za prijenos uzdužnog opterećenja preko dva dijagonalno suprotna kuta, te dva elementa za prijenos posmika s vrha na dno panela, *slika 6.13*. Opterećenje se prenosi samo preko dijagonale koja je u tlaku, tako da „aktivacija“ dijagonala ovisi o deformaciji panela. Histerežno ponašanje dijagonalnih i posmičnih elemenata panela definira se zasebno.

Kao što se može vidjeti na *slici 6.13*, četiri unutarnja čvora koriste se kako bi se uzele u obzir stvarne točke kontakta između okvira i zidnoga ispuna (tj. na ovaj način se pri proračunima u obzir uzimaju stvarne dimenzije elemenata okvira, odnosno širina stupova i visina grede), a četiri prividna čvora u modelu služe za uzimanje u obzir duljine kontakta ( $h_z$ ) između okvira i zidnoga ispuna. Sve unutarnje sile prenose se na četiri čvora u kojima je panel element spojen s okvirom.



**Slika 6.13** Neelastični panel element, a) tlačne/vlačne dijagonale, b) posmična dijagonala

Kako bi se u potpunosti opisala ova vrsta elementa, potrebno je definirati sljedeće parametre:

- *Parametri ponašanja dijagonala u tlaku*: koriste se za određivanje modela histereznog ponašanja dijagonale zidnoga ispuna na tlak (*slika 6.14*), a ona se modelira s krivuljom odziva koja će biti naknadno opisana.
- *Parametri ponašanja dijagonala na posmik*: koriste se za određivanje modela histereznog ponašanja dijagonale zidnoga ispuna na posmik (*slika 6.15*), a ona se modelira s krivuljom odziva koja će, također, biti naknadno opisana.
- *Debljina panela koja predstavlja debljinu zidnoga ispuna,  $t$* : može se uzeti kao jednaka širini opeke ili opečnog bloka od koje je zidni ispun načinjen (npr. 12 cm), ili jednaka širini opeke uzimajući u obzir debljinu žbuke (npr.  $12+2 \times 1,5=15$ ).
- *Pomak izvan ravnine pri slomu*: zadaje se u postotku od visine kata, a njegova svrha je određivanje trenutka deaktivacije elementa, odnosno trenutka kada zidani ispun više ne doprinosi otpornosti niti krutosti konstrukcije - smatra se kako je do otkazivanja nosivosti zidanog ispuna došlo njegovim slomom izvan ravnine.
- *Ploština tlačne dijagonale,  $A_1$* : određuje se kao umnožak debljine zidnoga ispuna i širine ekvivalentne tlačne dijagonale, a ona se uobičajeno kreće u području od 10 % do 40 % od površine dijagonale zidnog ispuna – ovo je zaključak brojnih istraživača zasnovan na rezultatima ispitivanja i analitičkim proračunima. Za određivanje površine dijagonale može se koristiti veliki broj empirijskih izraza, raznih stupnjeva složenosti koje su predlagali razni autori, a koji su detaljno opisani u *točki 6.2.1.1*.
- *Reducirana ploština tlačne dijagonale,  $A_2$* : određuje se kao postotak od površine,  $A_1$ , a uzima u obzir činjenicu da se uslijed raspucavanja zidnoga ispuna duljina kontakta okvira i zidnoga ispuna smanjuje kako se bočni pomaci povećavaju, utječući tako na površinu ekvivalentne tlačne dijagonale. Pretpostavlja se kako ploština mijenja vrijednost linearno u funkciji osne deformacije dijagonale (*slika 6.14*), i to na takav način da se dvije deformacije, između kojih se ova izmjena odvija, definiraju kao ulazni podatci modela histereznog ponašanja dijagonale zidnoga ispuna u tlaku.
- *Duljina kontakta između okvira i zidnog ispuna,  $h_z$* : unosi se kao postotak od vertikalne visine panela, a njom se djelotvorno uzima u obzir udaljenost između unutarnjih i prividnih čvorova, *slika 6.13*. Razumni rezultati dobivaju se za vrijednosti od 1/3 do 1/2 stvarne duljine kontakta koja se definira kao:

$\alpha_h = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda}$ , gdje je  $\lambda$  bezdimenzionalni parametar relativne krutosti čiji se proračun vrši pomoću izraza (6.2).

- *Horizontalni i vertikalni odmak,  $X_{oi}$  i  $Y_{oi}$* : zadaje se kao postotak od horizontalne i vertikalne dimenzije zidanoga ispuna, a predstavlja smanjenje spomenutih dimenzija zbog širine elemenata okvira. Drugim riječima, ovi parametri uzimaju u obzir udaljenost između osnih čvorova okvirne konstrukcije i rubnih čvorova zidanoga ispuna.
- *Udio krutosti dodijeljen posmiku,  $\gamma_s$* : predstavlja udio krutosti zidnoga ispuna (program ju sam računa) koji treba biti dodijeljen posmičnoj opruzi (uobičajeno se usvaja vrijednost 0,2 i 0,60). Drugim riječima, krutost dijagonale,  $K_A$ , i posmična krutost,  $K_S$ , računaju se na sljedeći način:

$$K_A = (1 - \gamma_s) \cdot \frac{A_m \cdot E}{2 \cdot l_d}, \quad K_S = \gamma_s \cdot \frac{A_m \cdot E}{l_d} \cdot \cos^2 \varphi.$$

- *Specifična težina,  $\gamma$* : predstavlja obujamsku težinu zidnoga ispuna (s obzirom da se ovom elementu ne pridružuje niti presjek pa stoga niti materijal, vlastita težina definira se na ovaj način). Zadana vrijednost je 10 kN/m<sup>3</sup>.

U dijaloškom okviru panel elementa moguće je zadati njemu svojstveno prigušenje. Zadavanje prigušenja vrši se pomoću podizbornika „Damping“ – ovdje je moguće odabrati vrstu prigušenja koja najbolje odgovara razmatranom elementu (u istom izborniku moguće je pronaći različite vrste prigušenja i natuknice o tome koje prigušenje koristiti). Na ovaj način definirano prigušenje (na razini elementa) program uzima primarno ispred globalnog prigušenja, odnosno globalno proračunati koeficijenti matrice prigušenja povezani sa stupnjevima slobode danog elementa biti će zamijenjeni s onima proračunatima kroz množenje matrice masa elementa pomoću parametra proporcionalnosti masa, ili kroz množenje matrice krutosti elementa pomoću parametra proporcionalnosti krutosti, ili kroz proračun Rayleigh-eve matrice prigušenja elementa.

Ranije spomenuta mogućnost određivanja trenutka aktivacije (ili deaktivacije) zadana je klasama panel elementa. Zadane vrijednosti su 0,00 (za aktivaciju) i 1E20 (za deaktivaciju); ovo znači da se panel element aktivira na početku analize (0,00) i da neće biti deaktiviran do (1E20).

Napomene autora programa:

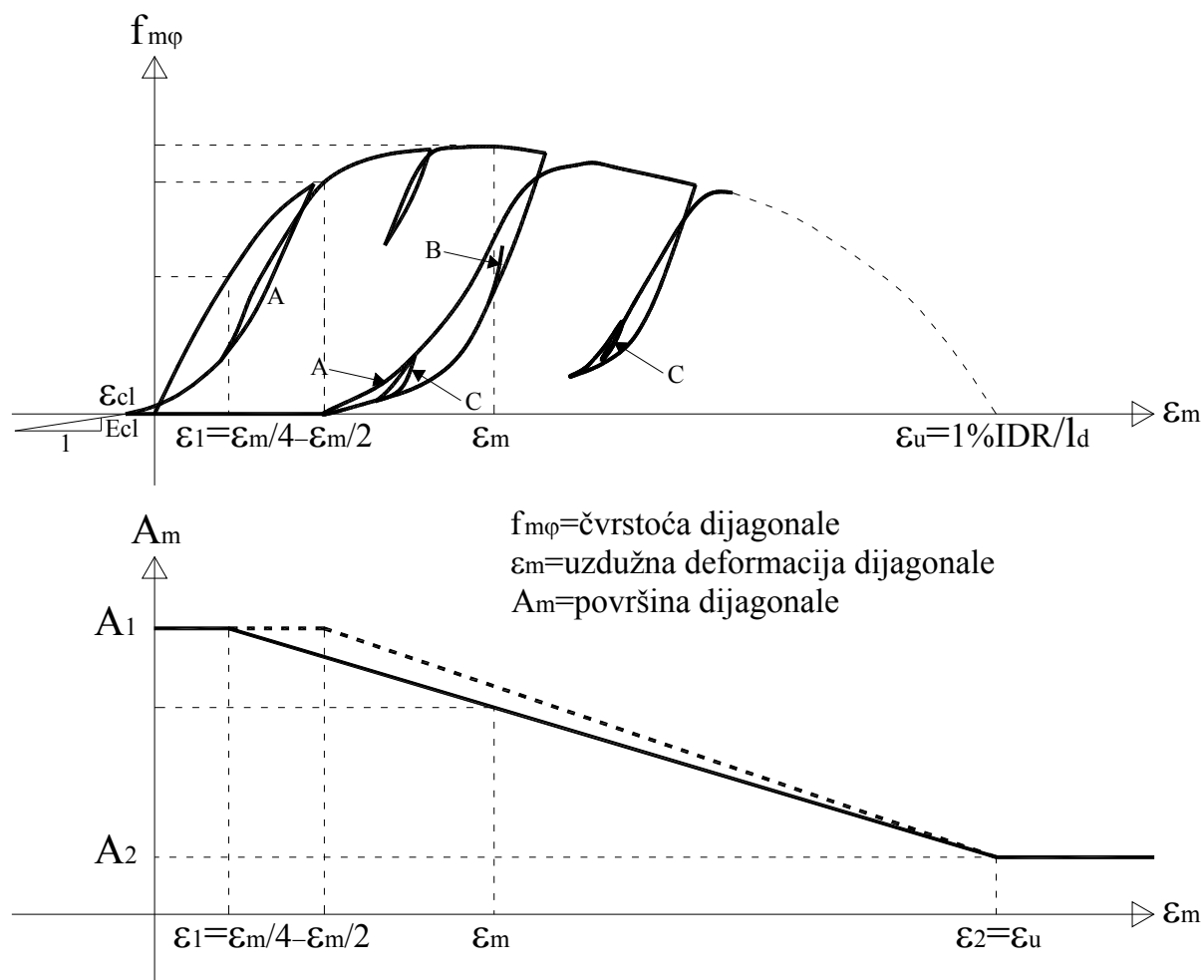
- 1) Treba imati na umu kako ovaj model (sa svojom konfiguracijom dijagonala) može uzeti u obzir samo najčešće načine sloma - model koji uzima u obzir sve vrste sloma zidnoga ispuna ne bi bio praktičan zbog visoke razine složenosti i dugotrajnih proračuna.
- 2) Doprinosa krutosti okviru od zidnoga ispuna uzima se u obzir tek nakon nanošenja početnih opterećenja, što znači da zidni ispun ne pruža otpor gravitacijskim opterećenjima (njih uobičajeno preuzima okvir, koji se i modelira prvi).
- 3) Pushover analizom se pri proračunu okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom preporučuje korištenje algoritma s kontrolom pomaka.
- 4) Kada su u pitanju modeli koji teže velikoj točnosti korisnicima se, zbog činjenice da zidni ispun uobičajeno nije kruto povezan s okvirom, preporučuje korištenje „link“ elemenata između okvira i čvorova zidnoga ispuna.
- 5) Korisnici bi trebali provjeriti premašuju li vrijednosti ubrzanja izvan ravnine prag koji uzrokuje slom panela izvan ravnine (deaktivacija panela elementa-zidnog ispuna može se podesiti na vrijeme koje je potrebno za dostizanje vrijednosti takvih ubrzanja).

### ***Model histereznog ponašanja dijagonale zidnog ispuna na tlak***

Kako je rečeno prije, ponašanje zidanog ispuna na tlak definira se zadavanjem preko modela histereznog ponašanja dijagonale zidnoga ispuna na tlak, koji je implementiran u ovome računalnom programu (*slika 6.14*).

Kako bi se u potpunosti opisalo ponašanje zidanog ispuna u dijagonalnom smjeru potrebno je definirati 17 parametara:

- *Početni (Youngov) modul elastičnosti,  $E$* : S obzirom na to da je zidani ispun kompozitni materijal sačinjen od opeka ili blokova i morta, od kojih svaki ima različita svojstva, procjena ovoga parametra nije jednostavna, a vrijednosti se kreću unutar velikoga raspona. Nekoliko ga je znanstvenika procijenilo zbrajanjem deformacije opeke/bloka i morta te izjednačavanjem s tlačnom deformacijom zida, uz usvajanje linearno elastičnog ponašanja oba materijala. Drugi su, pak, istraživači smatrali da je modul elastičnosti zidanog ispuna povezan s tlačnom čvrstoćom materijala. U programu je usvojena vrijednost modula elastičnosti,  $E$ , od 1,6 GPa.



Slika 6.14 Model histereznog ponašanja dijagonale zidnog ispuna na tlak i smanjenje površine ekvivalentne tlačne dijagonale uslijed pukotina

- *Tlačna čvrstoća,  $f_{m\varphi}$* : Ova tlačna čvrstoća odnosi se na dijagonalnu nosivost zidanog panela te ne predstavlja uobičajenu tlačnu čvrstoću zidnoga ispuna. Ako ne postoje eksperimentalni rezultati vrijednosti ovoga parametra, tada je najtočniji pristup proračun ove vrijednosti povezan sa svim mogućim mehanizmima sloma pri čemu je mjerodavna najniža vrijednost tlačne čvrstoće (to je otpornost koja odgovara najvjerojatnijem mehanizmu sloma zidnog ispuna). Za četiri oblika sloma daju se četiri izraza (6.33-6.36). U ovom radu bit će usvojena vrijednost jednaka tlačnoj čvrstoći zidnoga ispuna.
- *Vlačna čvrstoća,  $f_t$* : Vlačna čvrstoća predstavlja vlačnu čvrstoću zida ili vlačnu čvrstoću na kontaktu između okvira i zidanog ispuna. Njena vrijednost može biti jednaka nuli (zadana vrijednost) jer je znatno manja od tlačne čvrstoće i ima relativno mali učinak na cjelokupno ponašanje sustava.



- *Deformacija pri najvećem naprezanju,  $\varepsilon_m$* : Ovaj parametar predstavlja deformaciju pri najvećem naprezanju, utječe preko izmjene sekantne krutosti na ulaznu granu krivulje naprezanje-deformacija. Vrijednost mu se može kretati u području od 0,001 do 0,005, a treba biti kalibrirana uzimajući u obzir rezultate ispitivanja. U programu je uvedena zadana vrijednost od 0,0012 mm/mm.
- *Granična (krajnja) deformacija,  $\varepsilon_{ult}$* : Ova deformacija koristi se za nadziranje silazne grane krivulje naprezanje-deformacija – ona je modelirana kao parabola kako bi se omogućio bolji nadzor odziva dijagonale; npr. za relativno velike vrijednosti (kao  $20\varepsilon_m$ ) smanjenje tlačne čvrstoće postaje ugladenije, a analiza stabilnija. Zadana vrijednost je 0,024 mm/mm.
- *Deformacija zatvaranja pukotina,  $\varepsilon_{cl}$* : Ovaj parametar određuje deformaciju nakon koje se pukotine djelomično zatvaraju, pri čemu se dopušta razvoj tlačnih naprezanja. Njena vrijednost može se kretati u intervalu od 0 do 0,004. Usvojena zadana vrijednost iznosi 0,004 mm/mm.
- *Deformacija umanjenja površine dijagonale i deformacija reducirane površine dijagonale,  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$* : Ove dvije deformacije povezane su s umanjenjem površine dijagonale, *slika 6.14*. Ploština poprečnog presjeka dijagonale,  $A_1$ , ostaje nepromijenjena sve do dosezanja uzdužne deformacije dijagonale,  $\varepsilon_1$ , nakon čega se ploština presjeka počinje linearno smanjivati do deformacije,  $\varepsilon_2$ . Pri deformacijama jednakim i većim od,  $\varepsilon_2$ , ploština presjeka dijagonale poprima vrijednost umanjene površine,  $A_2$ . Uzimajući u obzir empirijsku prirodu načina umanjenja površine dijagonale za te parametre teško je pronaći podatke iz ispitivanja. Prihvatljive vrijednosti,  $\varepsilon_1$ , nalaze se u području od 0,0003 do 0,008, dok se vrijednosti,  $\varepsilon_2$ , nalaze u području od 0,0006 do 0,016. Za deformaciju umanjenja površine dijagonale usvojena je zadana vrijednost od 0,0006, a za deformaciju preostale površine dijagonale 0,001.
- *Empirijski parametri*: Definiranje ponašanja zidanoga ispuna u dijagonalnom smjeru zahtijeva zadavanje 9 empirijskih faktora kalibracije. Svi oni povezani su s cikličkim opterećenjem i kao takvi imaju malo utjecaja kada se vrši statička monotona analiza (drugim riječima, za pushover analizu ovi parametri nisu potrebni). Osim toga, ispitivanja osjetljivosti pokazala su kako, čak i u slučajevima kada se vrši ciklička/dinamička analiza, samo tri parametra od navedenih ispod ( $\gamma_{un}$ ,  $\alpha_{ch}$ ,  $\varepsilon_{x1}$ ),

imaju značajnu ulogu pri kvantificiranju sposobnosti trošenja energije zidnog ispuna (odnosno, ostalih šest parametara vjerojatno ne treba mijenjati).

Empirijski faktori kalibracije krivulje su:

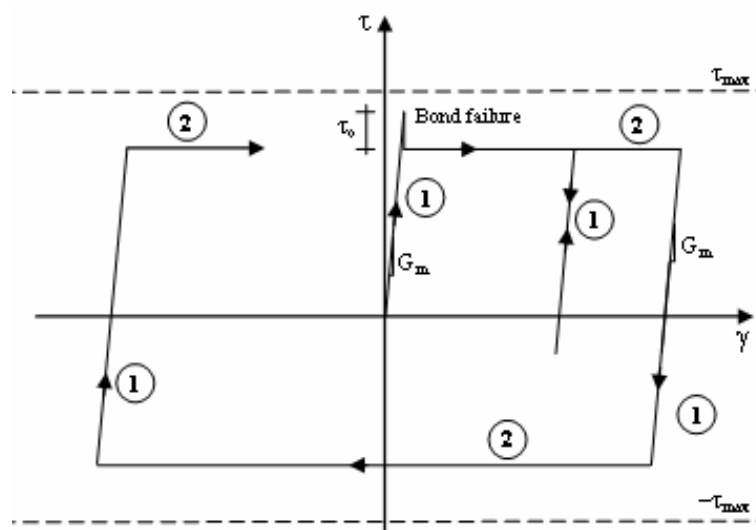
- *faktor krutosti rasterećenja*,  $\gamma_{un}$ : koristi se za određivanje modula krutosti pri rasterećenju kao udio u krutosti pri opterećenju. Njegova vrijednost obično se kreće u području između 1,5 i 2,5 (iako bilo koja vrijednost iznad navedenih predstavlja valjan unos), a zadana vrijednost u programu je 1,5.
- *faktor deformacije ponovnoga opterećenja*,  $\alpha_{re}$ : koristi se za predviđanje deformacije koju doseže petlja anvelope (ovojnice histereze) nakon rasterećenja. Njegova vrijednost obično se kreće od 0,2 do 0,4 (iako bilo koja vrijednost iznad nule predstavlja valjan unos), a za zadanu usvojena je 0,2.
- *faktor infleksije deformacije*,  $\alpha_{ch}$ : koristi se pri proračunu naprezanja pri kojem krivulja ponovnog opterećenja treba imati točku infleksije, a time se djelotvorno nadzire debljina petlje. Njegova vrijednost nalazi se unutar intervala od 0,1 do 0,7, a gornja granica usvojena je kao zadana vrijednost u programu, čime se osigurava najveći kapacitet trošenja energije.
- *faktor deformacija potpunog rasterećenja*,  $\beta_a$ : koristi se pri proračunu plastične deformacije nakon potpunog rasterećenja. Njegova vrijednost uobičajeno se nalazi u području od 1,5 do 2,0 (iako bilo koja vrijednost iznad nule predstavlja valjan unos). Zadana vrijednost je 1,5.
- *faktor infleksije naprezanja*,  $\beta_{ch}$ : koristi se pri proračunu naprezanja pri kojem krivulja ponovnog opterećenja treba imati točku infleksije. Njegova vrijednost uobičajeno se kreće unutar intervala od 0,5 do 0,9. Gornja granica od 0,9 predstavlja zadanu vrijednost u programu.
- *faktor krutosti ponovnog opterećenja*,  $\gamma_{plu}$ : koristi se za određivanje krutosti pri ponovnom opterećivanju nakon što je opterećenje u potpunosti nanijeto (predstavlja udio od prethodnog opterećenja). Vrijednosti se kreću od 1,1 do 1,5 (iako bilo koja vrijednost iznad navedenih predstavlja valjan unos), a vrijednost od 1,1 usvojena je kao zadana u programu.
- *faktor krutosti pri nultom naprezanju*,  $\gamma_{plr}$ : koristi se za određivanje krutosti pri nultom naprezanju nakon što se okvir u potpunosti rastereti. Vrijednosti mu se kreću unutar intervala 0 do 1,0. Usvojena vrijednost je 1,0.

- *faktor krutosti plastičnog rasterećenja,  $\varepsilon_{x1}$* : koristi se za određivanje tangentskog modula rasterećenja koji odgovara plastičnoj deformaciji. U analizama se koriste vrijednosti od 1,5 do 3,0 (iako bilo koja vrijednost iznad nule predstavlja valjan unos). U programu je usvojena vrijednost od 3,0.
- *faktor deformacije ponavljajućeg ciklusa,  $\varepsilon_{x2}$* : koristi se pri proračunu deformacije koju anvelopna krivulja treba dosegnuti nakon ponovljenog ciklusa. Njegova vrijednost kreće se od 1,0 do 1,5 (iako bilo koja vrijednost iznad nule predstavlja valjan unos), a usvojena je vrijednost od 1,4.

### ***Model histereznog ponašanja dijagonale zidnog ispuna na posmik***

Ponašanje zidanog ispuna pri posmiku definira se zadavanjem modela histereznog ponašanja dijagonale zidnog ispuna na posmik koji je implementiran u ovom računalnom programu (*slika 6.15*). Posmična čvrstoća može se izraziti kao zbroj početne posmične čvrstoće,  $f_{vko}$  (kohezijske čvrstoće) i umnoška koeficijenta trenja,  $\mu$ , s vrijednošću normalnoga tlačnog naprezanja u smjeru okomitom na horizontalne sljubnice zidnog ispuna. Ovakav praktičan pristup procjene posmične otpornosti usvojen je u normama, neovisno o mehanizmu sloma (slom prekoračenjem posmične otpornosti, slom dijagonalnim vlačnim raspucavanjem, slom prekoračenjem tlačne čvrstoće) koji nastaje u zidnome ispunu.

Vrijednosti početne posmične čvrstoće i koeficijenta trenja moguće je odrediti eksperimentalnim ispitivanjem na posmik ili pomoću izraza iz normi. Takve vrijednosti treba uzimati s rezervom jer se pomoću prve metode one precjenjuju, a prema drugoj se podcjenjuju.



**Slika 6.15** Model histereznog ponašanja dijagonale zidnog ispuna na posmik

Kako bi se opisalo ponašanje zidnoga ispuna pri posmičnim naprezanjima, potrebno je zadati četiri parametra:

- *Početna posmična čvrstoća,  $f_{vk0}$* : Brojni istraživači ispitali su posmične čvrstoće različitih materijala na velikome broju uzoraka. Prema nekim istraživačima ova vrijednost kreće se od 0,3 do 0,6 MPa, prema nekima pokazalo se kako se ova vrijednost obično kreće od 0,1 do 1,5 MPa, dok je prema nekima ovo područje ograničeno na vrijednosti od 0,1 do 0,7 MPa. SeismoStruct za ovaj parametar kao zadanu vrijednost koristi relativno konzervativnih 0,3 MPa.
- *Koeficijent trenja,  $\mu$* : Zbog nedostatka jasnog i neosporenog dogovora oko toga koji faktori utječu na koeficijent trenja, u prošlim desetljećima ispitivanjima su se dobivali relativno kontradiktorni rezultati. Razni istraživači ovu vrijednost svrstavali su u područje od 0,1 do 1,2. Prema nekima predlaže se da se kao pouzdana donja granica uzme vrijednost od 0,7 (zaključak interpretacije rezultata eksperimenata širokog spektra materijala u kojima je uočeno da se vrijednost,  $\mu$ , kreće između 0,7 i 0,85), a upravo je ta vrijednost usvojena u programu (treba napomenuti da je znatno niža vrijednost od 0,3 namijenjena za dimenzioniranje, a ne procjenu ponašanja).
- *Maksimalna posmična čvrstoća,  $f_{v,max}$* : Ovo je najveće posmično naprezanje koje zidani ispun može preuzeti, a ono ovisi o mehanizmu sloma (slom prekoračenjem posmične nosivosti, slom dijagonalnim vlačnim raspucavanjem, slom prekoračenjem tlačne čvrstoće) koji nastaje u zidnome ispunu. U nedostatku dodatnih i točnijih informacija može se pretpostaviti kako je ova vrijednost jednaka zbroju početne posmične čvrstoće i umnošku koeficijenta trenja s normalnom tlačnom čvrstoćom zidnog elementa. Vrijednost od 0,6 MPa zadana je vrijednost u SeismoStruct\_u (suma zadanih vrijednosti početne posmične čvrstoće od 0,3 MPa i čvrstoće na posmik trenjem koja je pretpostavljena u iznosu od 0,3 MPa).
- *Faktor redukcije posmika,  $\alpha_s$* : Ovaj empirijski parametar predstavlja omjer najvećeg posmičnog naprezanja i prosječnog naprezanja u zidnome ispunu, a vrijednost mu se kreće od 1,4 do 1,65. U SeismoStruct-u zadana vrijednost od 1,5, u najvećem broju slučajeva, ne zahtjeva intervencije korisnika.

## 6.4 MODELIRANJE ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA SA ZIDNIM ISPUNOM POMOĆU USVOJENOG MAKRO-MODELA

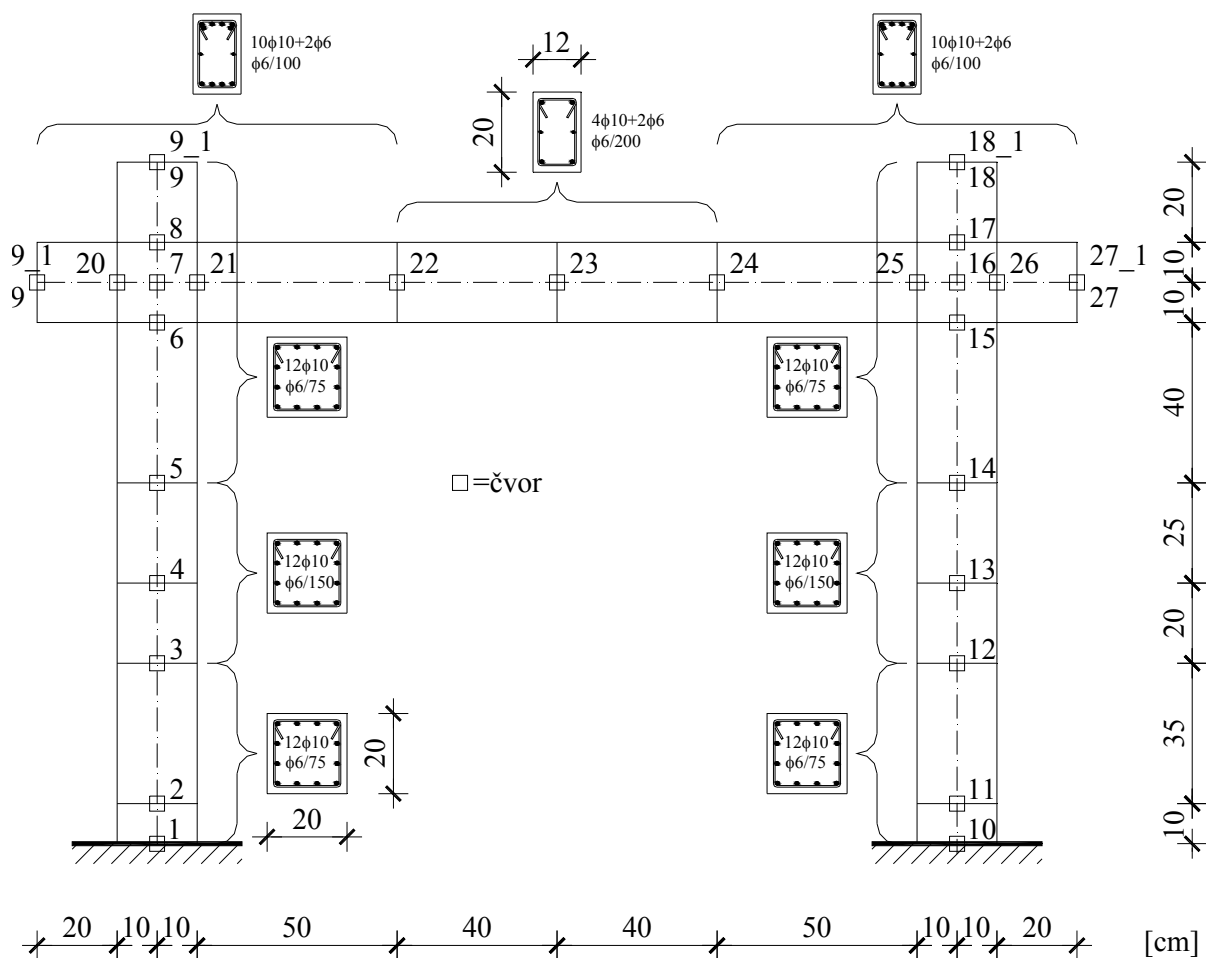
Za numeričku analizu pojedinih GRUPA modela pristupilo se modeliranju elemenata armirano-betonskoga okvira (stupovi i grede) i zidnoga ispuna u softveru SismoStruct. U nastavku će biti prikazani i detaljno opisani svi parametri koji su korišteni kao ulazni podatci za dobivanje numeričkih rezultata. Također, naglasak će biti stavljen na parametre koji su kalibrirani kako bi se dobili numerički rezultati, koji će biti što bliži onim eksperimentalnima.

### 6.4.1 Ulazni podatci o armirano-betonskom okviru

Ulazni podatci potrebni za analizu opisani su u nastavku redoslijedom zadavanja.

- *Geometrija:*

Geometrijske karakteristike (dimenzije) armirano-betonskoga okvira iste su za sve GRUPE modela i zadane su prema ranije opisanim ulaznim podacima o modelima, *slika 4.2*, odnosno prema *slici 6.16*.



Slika 6.16 Dimenzije armirano-betonskog okvira

- *Svojstva materijala:*

Za definiranje ponašanja betona kroz odnos naprezanje-deformacija, korišten je model betona prema Manderu (*slika 6.9*). Zadani su sljedeći parametri prema *tablici 6.2*.

**Tablica 6.2** Parametri za definiranje odnosa naprezanje-deformacija modela betona prema Manderu

	GRUPA I	GRUPA II	GRUPA II	GRUPA IV
Tlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	54,60	53,60	42,40	35,00
Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	0			
Deformacija pri max. naprezanju [mm/mm]	0,002			
Faktor ovijenosti	1,000 – presjek stupa i grede u polju 1,2361 – presjek stupa u blizini spoja sa gredom (ležajem) 1,1284 – presjek grede u blizini spoja sa stupom			
Specifična težina [kN/m <sup>3</sup> ]	24			
<sup>1)</sup> Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost tlačne čvrstoće betona od K_7, K_5 i K_8 za grupu I; K_2, K_6 i K_4 za grupu II; K_1, K_3 i K_9 za grupu III i K_9 za grupu IV, a sve prema <i>tablici 4.3</i> .				

Za definiranje ponašanja čelika (armature) kroz odnos naprezanje-deformacija, korišten je model čelika prema Menegotto-Pinto (*slika 6.10*), s parametrima prema *tablici 6.3*.

**Tablica 6.3** Parametri za definiranje odnosa naprezanje-deformacija modela čelika prema Menegotto-Pinto

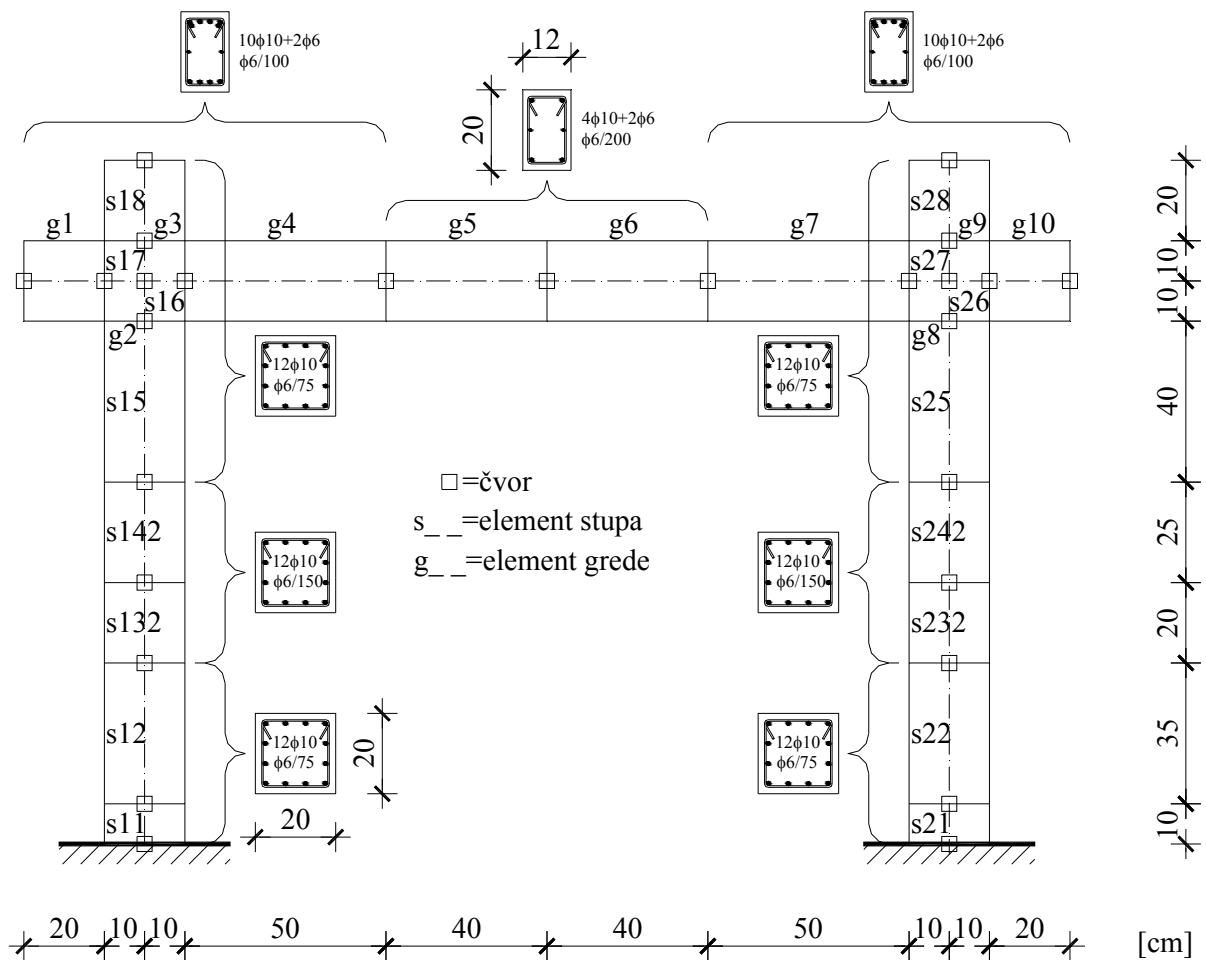
	GRUPA I	GRUPA II	GRUPA II	GRUPA IV
Modul elastičnosti [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	202314			
Granica popuštanja [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	584			
Deformacija nakon otvrdnjavanja armature <sup>2)</sup>	0,06			
Ostali parametri	Ostali parametri nisu mijenjani u odnosu na zadane u SeismoStructu			
<sup>1)</sup> Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost modula elastičnosti i granice popuštanja armature, a sve prema <i>tablici 4.5</i> .				
<sup>2)</sup> Kalibracijom usvojena vrijednost.				

- *Poprečni presjeci:*

Dimenzije poprečnih presjeka stupova i grede, kao i raspored armature u istima, također, u svemu su napravljeni prema *slici 4.2*, odnosno prema *slici 6.17*. U programu je odabran armirano-betonski poprečni presjek sa zaštitnim slojem armature od 16mm za stupove i grede. Svi podatci isti su za sve GRUPE modela.

- *Elementi okvira:*

Za elemente armirano-betonskoga okvira (stupove i grede) korišteni su neelastični elementi okvira, *infrmDB*, koji su ranije opisani u *točki 6.3.5.1*. Prikaz elemenata stupova i greda dan je na *slici 6.17*.



**Slika 6.17** Prikaz elemenata armirano-betonskog okvira

### 6.4.2 Ulazni podatci o zidnom ispunu

Za definiranje zidnoga ispuna (*slika 6.18*) korišten je model neelastičnog panel elementa prema Crisafulliu (*slika 6.13*) [6], s parametrima prema *tablici 6.4*.

**Tablica 6.4** Parametri za definiranje neelastičnog panel elementa prema Crisafulliu [6]

Parametar	GRUPA I	GRUPA II	GRUPA III
Debljina panel elementa, $t$ [mm] <sup>1)</sup>	120	120	125
Pomak izvan ravnine pri slomu, [%]	2	2	2
Ploština tlačne dijagonale, $A_1 = t \cdot w$ [mm <sup>2</sup> ] <sup>2)</sup>	$= 120 \cdot 388,56 = 46227,57$		$= 125 \cdot 388,56 = 48570,38$
Reducirana ploština tlačne dijagonale, $A_2 = \% \cdot A_1$ [%]	10	10	10
Kontaktna duljina, $h_z = 100 \cdot \frac{\alpha_h}{3 \cdot h'}$ [%]	$= 100 \cdot \frac{679,10}{3 \cdot 1400} = 16,169$	$= 100 \cdot \frac{705,43}{3 \cdot 1400} = 16,796$	$= 100 \cdot \frac{975,41}{3 \cdot 1400} = 23,224$
Horizontalni odmak, $X_0 = 100 \cdot \frac{t_c}{2 \cdot l'}$ [%]	$= 100 \cdot \frac{200}{2 \cdot 2000} = 5,000$		
Vertikalni odmak, $Y_0 = 100 \cdot \frac{h_b}{2 \cdot h'}$ [%]	$= 100 \cdot \frac{200}{2 \cdot 1400} = 7,143$		
Udio krutosti dodijeljen posmiku, [%] <sup>3)</sup>	20	60	60
Specifična težina [kN/m <sup>3</sup> ]	16	11	5

Svi navedeni parametri detaljno su objašnjeni u *točki 6.3.6.1*.

<sup>1)</sup> Debljina panel elementa uzeta je kao jednaka debljini zidnoga ispuna pojedine grupe.

<sup>2)</sup> Za širinu tlačne dijagonale, kalibracijom numeričkih modela, odabrana je vrijednost koja se dobije prema izrazu Smitha (1962):

$$w = (0,1 - 0,25) \cdot l_d = 0,175 \cdot l_d = 0,175 \cdot 2220,36 = 388,56 \text{ mm} .$$

<sup>3)</sup> Postotci udjela krutosti, također, su dobiveni na osnovu kalibracije numeričkih modela.



**Tablica 6.4** Parametri za definiranje neelastičnog panel elementa prema Crisafulliu [6]

Parametar	GRUPA I	GRUPA II	GRUPA III
<i>Definiranje parametara modela histereznog ponašanja dijagonale zidnog ispuna na tlak</i>			
Modul elastičnosti, $E$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>4)</sup>	6572	5608	1379
Tlačna čvrstoća dijagonale, $f_{m\phi}$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>5)</sup>	2,62	2,14	1,19
Vlačna čvrstoća, $f_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0		
Deformacija pri maksimalnom naprezanju, $\varepsilon_m = \varepsilon_k$ <sup>6)</sup>	0,0012	0,0011	0,0010
Granična deformacija, $\varepsilon_u$ <sup>7)</sup>	0,0068	0,0068	0,0068
Deformacija zatvaranja pukotine, $\varepsilon_{cl}$	0,004		
Deformacija umanjena površine dijagonale, $\varepsilon_1 = \varepsilon_m / (4 \text{ do } 2)$	0,0003	0,0003	0,0005
Deformacija reducirane površine dijagonale, $\varepsilon_2 = \varepsilon_u$	0,0068	0,0068	0,0068

Svi navedeni parametri detaljno su objašnjeni u *točki 6.3.6.1.*

4) Za modul elastičnosti odabrana je ispitivanjem dobivena srednja vrijednost modula elastičnosti prema **tablici 3.37.**

5) Za tlačnu čvrstoću dijagonale uzeta je ispitivanjem dobivena srednja vrijednost tlačne čvrstoće zidnog ispuna prema **tablici 3.36.**

6) Deformacija pri maksimalnom naprezanju određena je prema izrazu:  $\varepsilon_m = \varepsilon_k$ , gdje je

$$\varepsilon_k = \frac{C_m \cdot f_{m\phi}}{E^{0,7}}$$

pripadajuća maksimalna deformacija zidnog ispuna.

Koeficijent,  $C_m$ , dobiven je prema izrazu:  $C_m = 0,27 / (f_m^{0,25})$ , gdje je  $f_m$  tlačna čvrstoća morta odnosno ljepila za zidanje za pojedine grupe modela (**tablice 4.8-4.10**). Tada

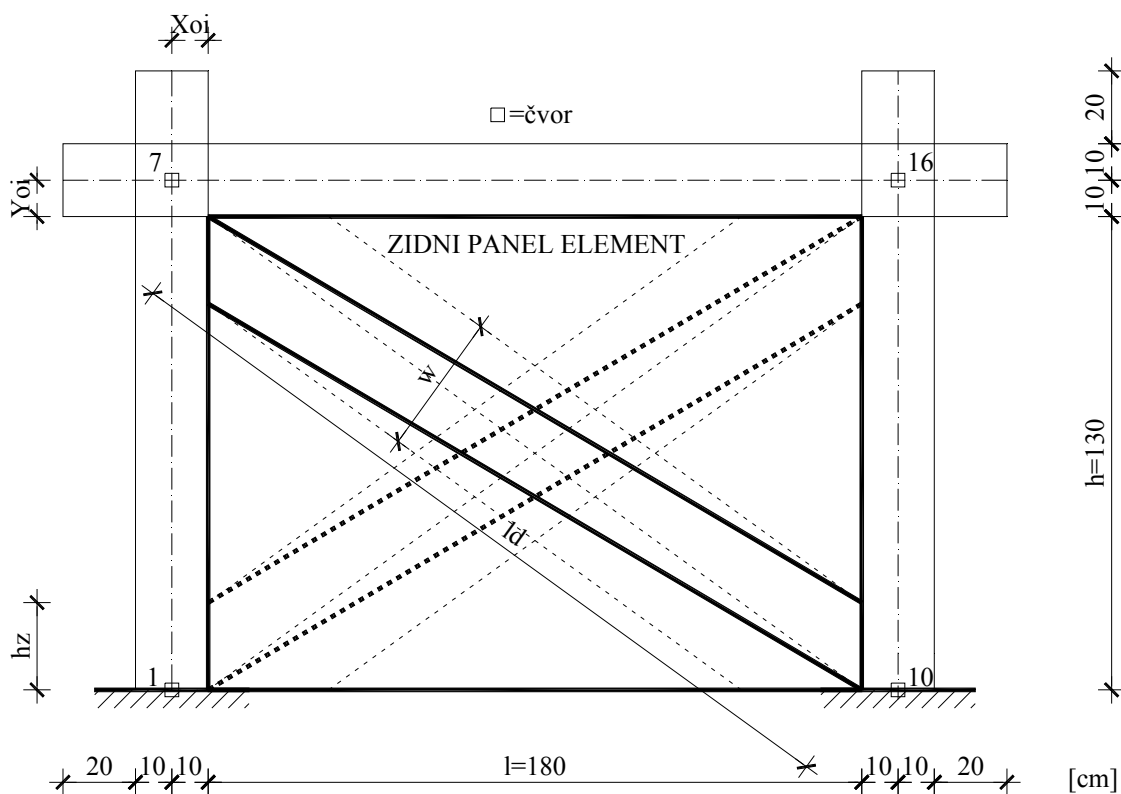
$$\text{slijedi: } C_{m,I} = \frac{0,27}{2,92^{0,25}} = 0,207; C_{m,II} = \frac{0,27}{2,76^{0,25}} = 0,209; C_{m,III} = \frac{0,27}{14,20^{0,25}} = 0,139;$$

$$\varepsilon_{k,I} = \frac{0,207 \cdot 2,62}{6572^{0,7}} = 0,00115; \varepsilon_{k,II} = \frac{0,209 \cdot 2,14}{5608^{0,7}} = 0,00107; \varepsilon_{k,III} = \frac{0,139 \cdot 1,19}{1379^{0,7}} = 0,0010$$

7) Za graničnu deformaciju odabrana je vrijednost deformacije pri katnome pomaku (IDR) od 1,00%, tj.:  $\varepsilon_u = 15/2220,36 = 0,0068 \text{ mm/mm}$ .

**Tablica 6.4** Parametri za definiranje neelastičnoga panel elementa prema Crisafulliu [6]

Parametar	GRUPA I	GRUPA II	GRUPA III
<i>Empirijski parametri</i>			
Faktor rasterećenja krutosti, $\gamma_{un}$	1,5		
Faktor deformacije ponovnog opterećenja, $\alpha_{re}$	0,2		
Faktor infleksije deformacije, $\alpha_{ch}$	0,7		
Faktor deformacija potpunog rasterećenja, $\beta_a$	1,5		
Faktor infleksije naprezanja, $\beta_{ch}$	0,9		
Faktor krutosti ponovnoga opterećenja, $\gamma_{plu}$	1,0		
Faktor krutosti pri nultom naprezanju, $\gamma_{plr}$	1,5		
Faktor krutosti plastičnoga rasterećenja, $\varepsilon_{x1}$	3,0		
Faktor deformacije ponavljajućega ciklusa, $\varepsilon_{x2}$	1,4		
<i>Definiranje parametara modela histereznog ponašanja dijagonale zidnog ispuna na posmik</i>			
Početa posmična čvrstoća, $f_{vk0}$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>8)</sup>	0,536	0,271	0,493
Koeficijent trenja, $\mu = \operatorname{tg} \alpha$ <sup>9)</sup>	$=\operatorname{tg} 22,17^\circ = 0,407$	$=\operatorname{tg} 21,73^\circ = 0,401$	$=\operatorname{tg} 54,65^\circ = 1,410$
Maksimalna posmična čvrstoća, $f_{vk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,60		
Faktor redukcije posmika, $\alpha_s$	1,50		
Svi navedeni parametri detaljno su objašnjeni u <i>točki 6.3.6.1</i> . Empirijski parametri nisu mijenjani u odnosu na zadane u SeismoStructu.			
<sup>8)</sup> Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost početne posmične čvrstoće prema <b>tablici 3.50</b> .			
<sup>9)</sup> Ispitivanjem dobivena srednja vrijednost kuta unutarnjega trenja prema <b>tablicama 3.40, 3.43 i 3.49</b> .			



Slika 6.18 Prikaz i dimenzije zidnog ispuna - panel elemenata

### 6.4.3 Zadani rubni uvjeti i ograničenja

Nepomični (upeti) oslonci (ležajevi), kojima su spriječeni svi pomaci i sve rotacije, zadani su u čvorovima 1 i 10.

Čvorovi 7 i 16 odabrani su kao glavni čvorovi koji služe za ograničavanje određenih stupnjeva slobode podređenih čvorova na glavni čvor pomoću krute veze (Rigid Link). Glavnom su čvoru („master“) 7 podređeni („slave“) čvorovi 6, 8, 20 i 21; glavnom čvoru 16 podređeni su čvorovi 15, 17, 25 i 26. Drugim riječima, rotacija u podređenom čvoru jednaka je rotaciji glavnoga čvora, dok se pomaci izračunavaju pod pretpostavkom krute veze s glavnim čvorom. Prema tome, kod korištenja ove opcije zajedničkoga ponašanja potrebno je definirati glavni i podređene čvorove, kao i stupnjeve slobode koji se na taj način ograničavaju. U našem primjeru, spiječene su sve tri rotacije, kao i sva tri pomaka.

Temeljem rezultata ispitivanja, a s ciljem postizanja ekvivalentnog ponašanja eksperimentalnoga i numeričkoga modela, na mjestima unosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja, postavljeni su korekcijski „Gap“ elementi, *slika 6.19*. Oni se definiraju krivuljom pomoću koje se može modelirati dilatacija, ali i razna ograničenja slobode pomaka.

Četiri parametra moraju biti definirana:

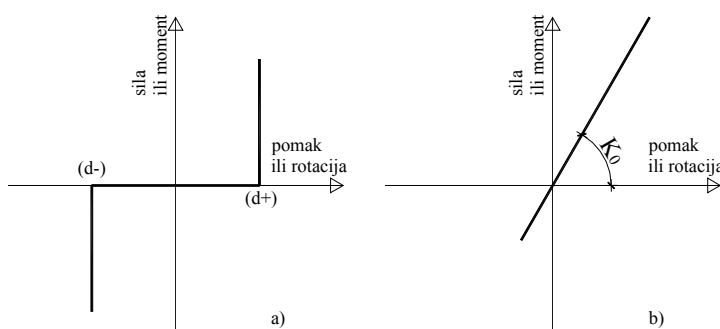
- Sprječavanje / zadavanje pomaka u pozitivnom smjeru (d+),

- Krutost „Gap“ elementa u pozitivnom smjeru (K+),
- Sprječavanje / zadavanje pomaka u negativnom smjeru (d-),
- Krutost „Gap“ elementa u negativnom smjeru smjeru (K-).

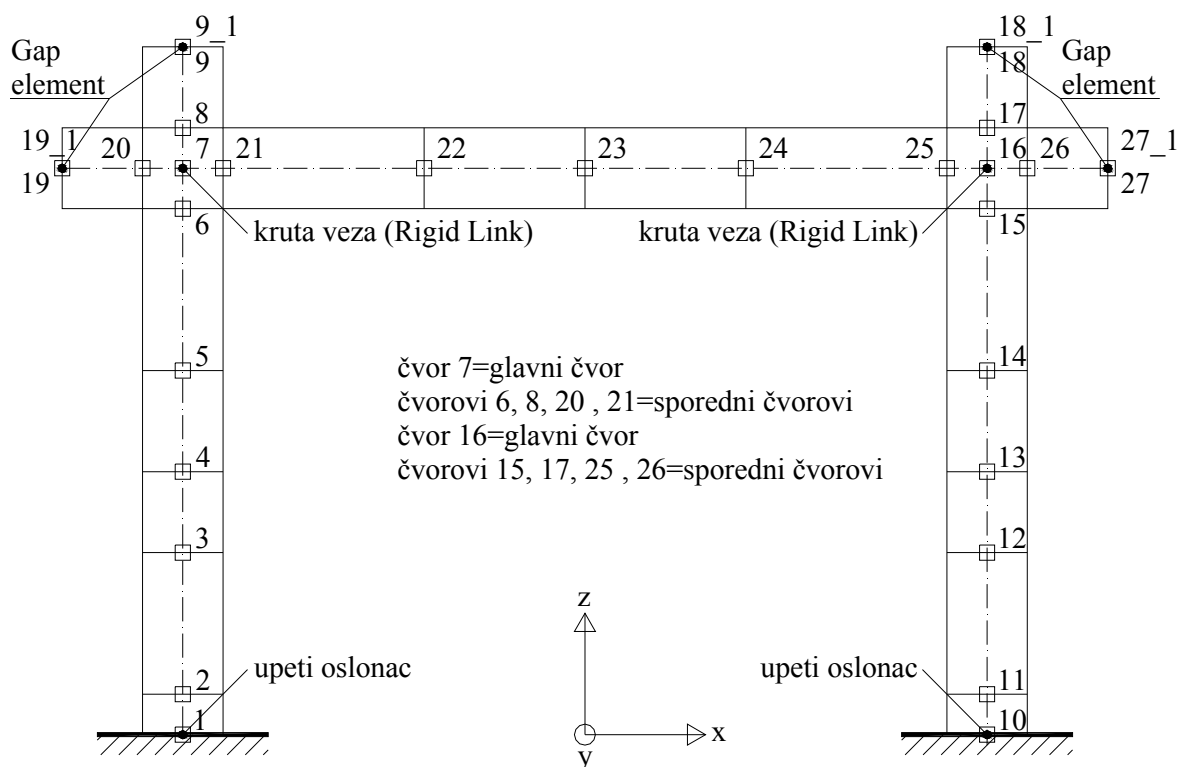
*Napomena:* Vrijednosti krutosti (K+ i K-) moraju biti pozitivne.

U čvorovima 19\_1 i 27\_1 (mjesto unosa horizontalnog opterećenja) definiran je Gap element za vertikalni smjer (os z) i rotaciju oko osi y (os koja je okomita na ravninu okvira) sa sljedećim parametrima: (d+)=0; (K+)=10; (d-)=0; (K-)=0 i  $K_0(M_y)=1e^{15}$ .

U čvorovima 9\_1 i 18\_1 (mjesto unosa vertikalnog opterećenja) definiran je Gap element za vertikalni smjer (os z) i rotaciju oko osi y (os koja je okomita na ravninu okvira) sa sljedećim parametrima: (d+)=0; (K+)=1000000; (d-)=0; (K-)=0 i  $K_0(M_y)=1e^{15}$ .



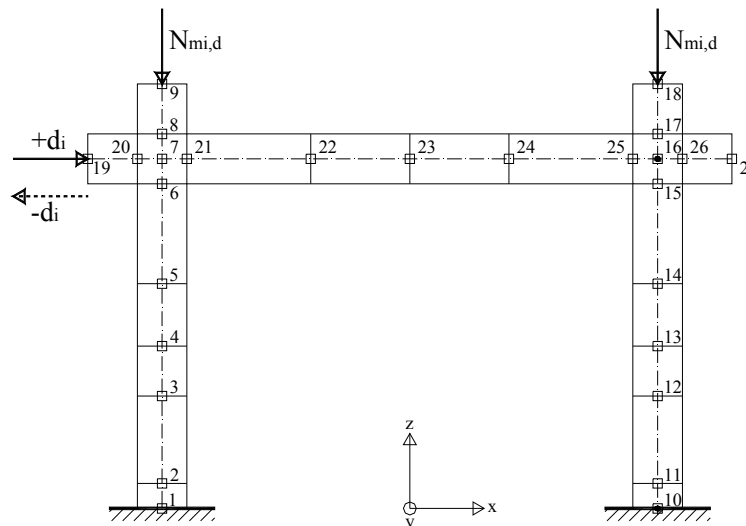
**Slika 6.19** Gap element, a) gap krivulja, b) linearna krivulja



**Slika 6.20** Prikaz rubnih uvjeta i ograničenja na modelu armirano-betonskog okvira

### 6.4.4 Zadavanje opterećenja

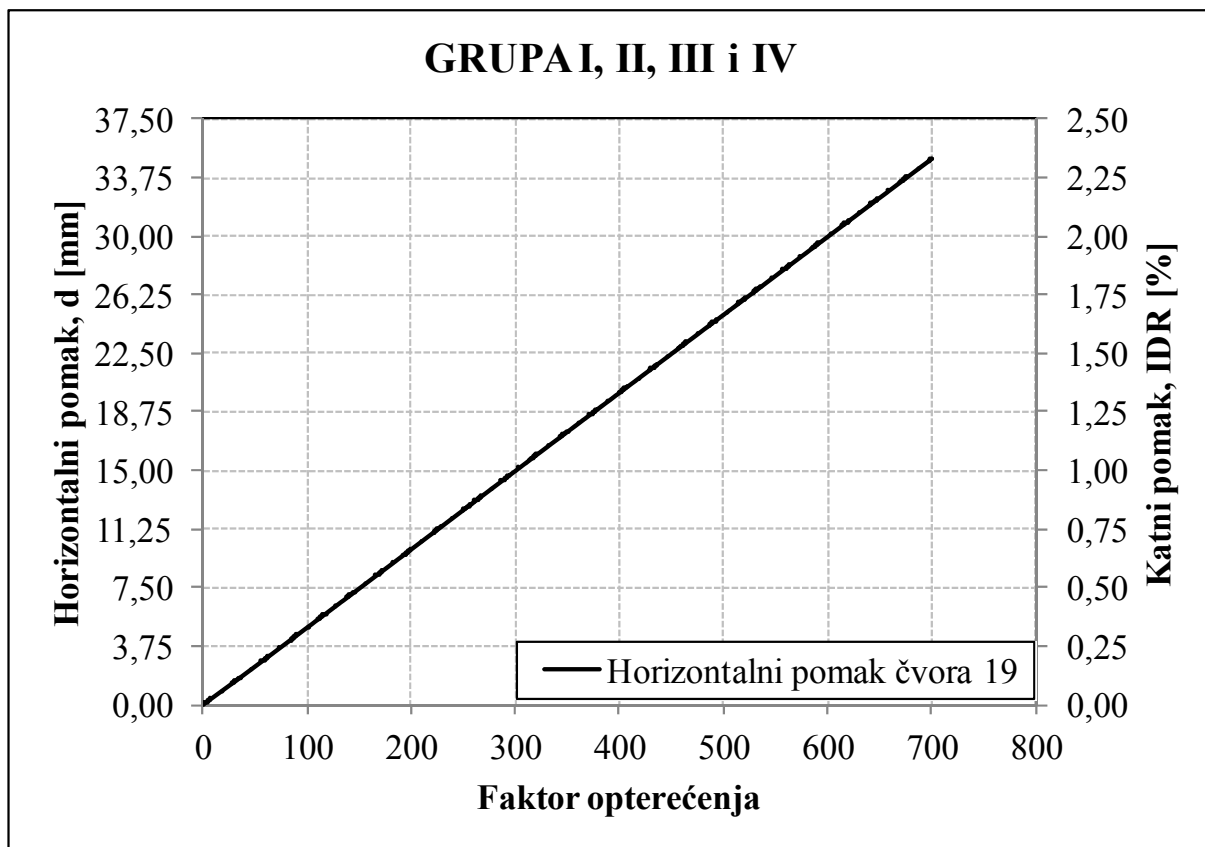
Položaj opterećenja numeričkog modela prikazan je na **slici 6.21**. U **tablici 6.5** prikazane su vrijednosti opterećenja ovisno o vrsti proračuna (analize).



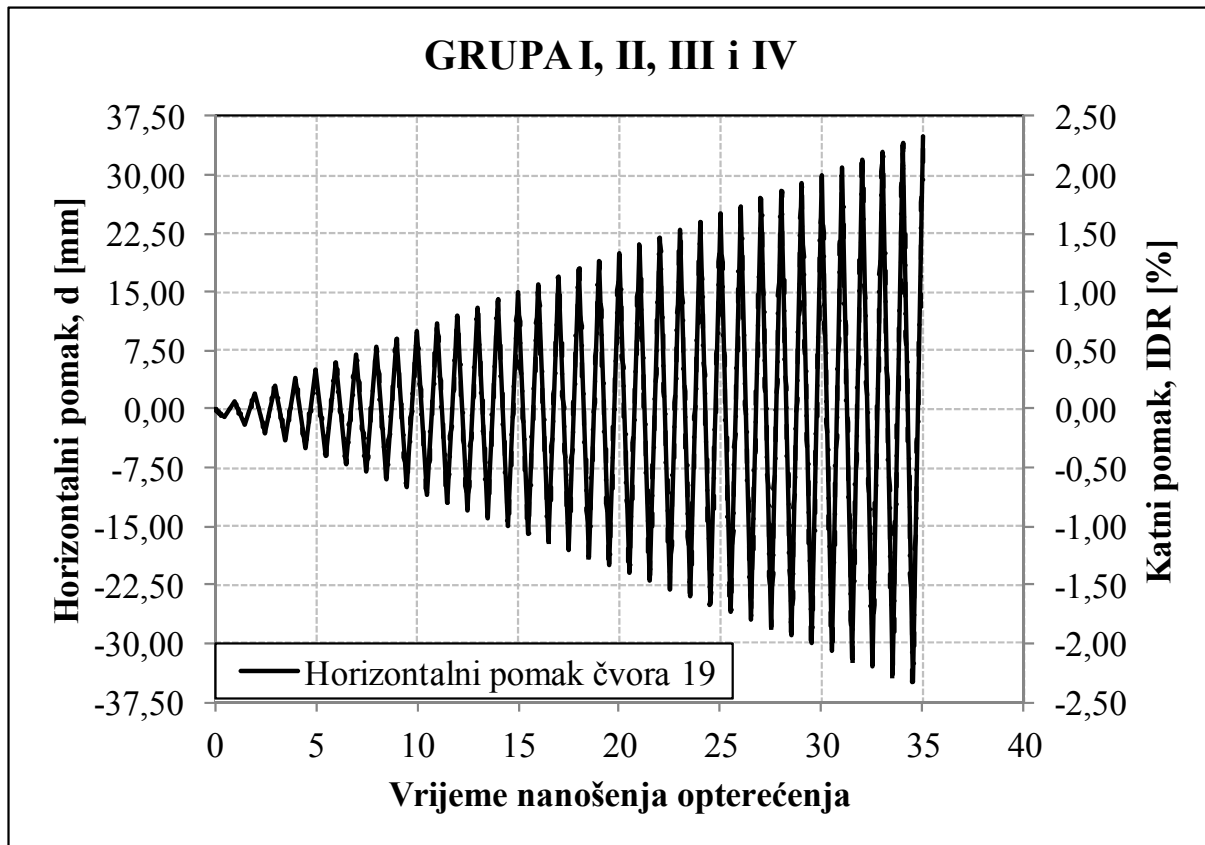
**Slika 6.21** Prikaz opterećenja na numeričkom modelu

**Tablica 6.5** Prikaz vrijednosti opterećenja na modelima

	GRUPA I	GRUPA II	GRUPA III	GRUPA IV
<i>Stalno opterećenje na modelu</i>				
Vertikalno opterećenje, $N_{mi,d}$ [kN] <sup>1)</sup>	357	364	359	346
<i>Promjenjivo opterećenje na modelu</i>				
Horizontalno opterećenje, $d_i$ [mm] <sup>2) 3)</sup>		0,05 (0,1)		
<sup>1)</sup> Vrijednosti vertikalnog stalnog opterećenja za pojedine grupe modela uzete su prema <b>tablici 4.15</b> , neovisno o vrsti proračuna <sup>2)</sup> Kod statičke pushover analize rađena je kontrola pomaka kao i kod statičke time-history analize. Početna vrijednost pomaka je 0,05mm, pomak se povećavao u 1750 koraka (svake 0,02 sekunde) sve do 35mm u jednome smjeru, <b>slika 6.22</b> . <sup>3)</sup> Kod statičke time-history analize zadano je cikličko horizontalno opterećenje u obliku pomaka (+/- $d_i$ ). Početna vrijednost pomaka je 0,1mm, pomak se povećavao u 1750 koraka (svake 0,02 sekunde) sve do 35mm u oba smjera, <b>slika 6.23</b> .				



Slika 6.22 Prikaz djelovanja opterećenja na modelu kod statičke pushover analize



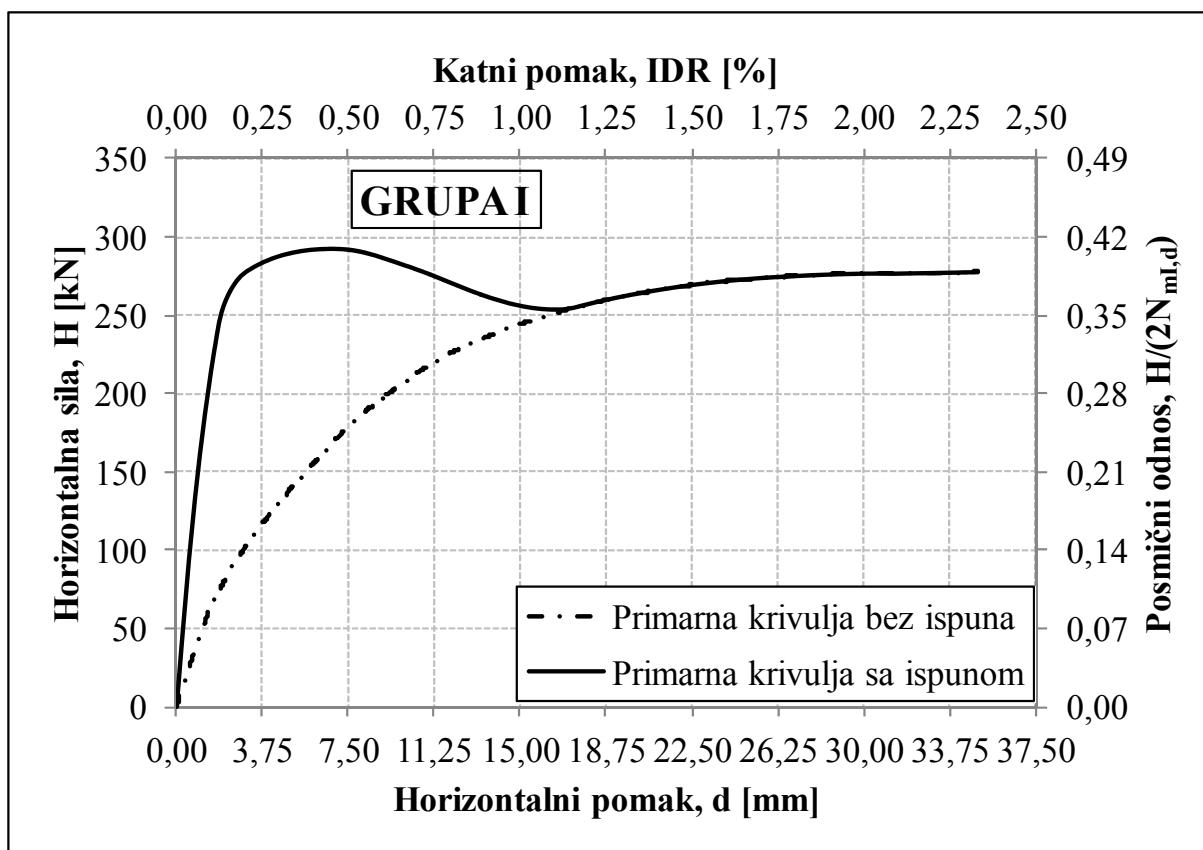
Slika 6.23 Prikaz djelovanja opterećenja na modelu kod statičke time-history analize

## 6.5 REZULTATI NUMERIČKIH MODELA

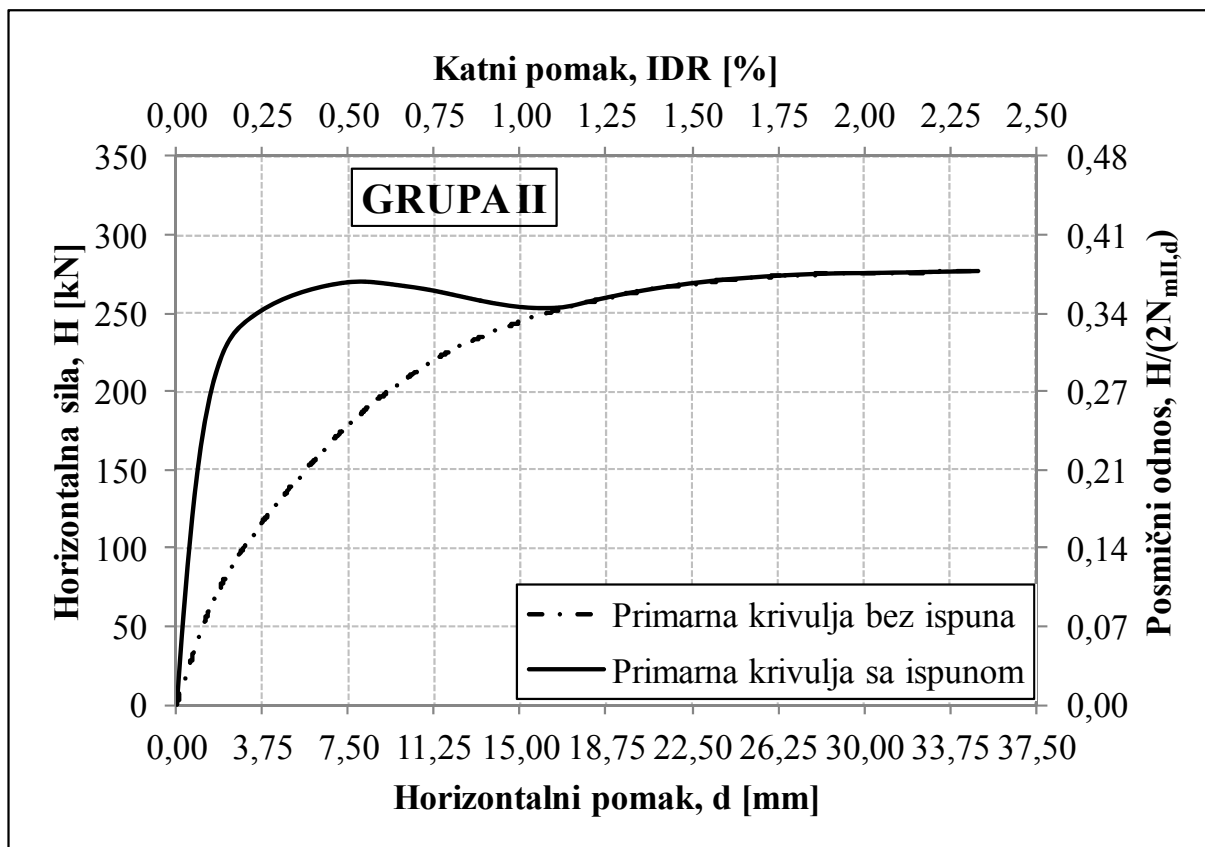
Za numeričke modele, koji su opisani u prethodnoj točki, razmatrani su rezultati u pogledu: poprečne nosivosti, poprečne krutosti, histerezne energije pojedinih grupa modela kao i ponašanja dijagonala zidnoga ispuna. Svi rezultati, koji će biti prikazani, dobiveni su statičkom pushover analizom numeričkoga makro-modela kako je to ranije opisano.

### 6.5.1 Poprečna nosivost modela

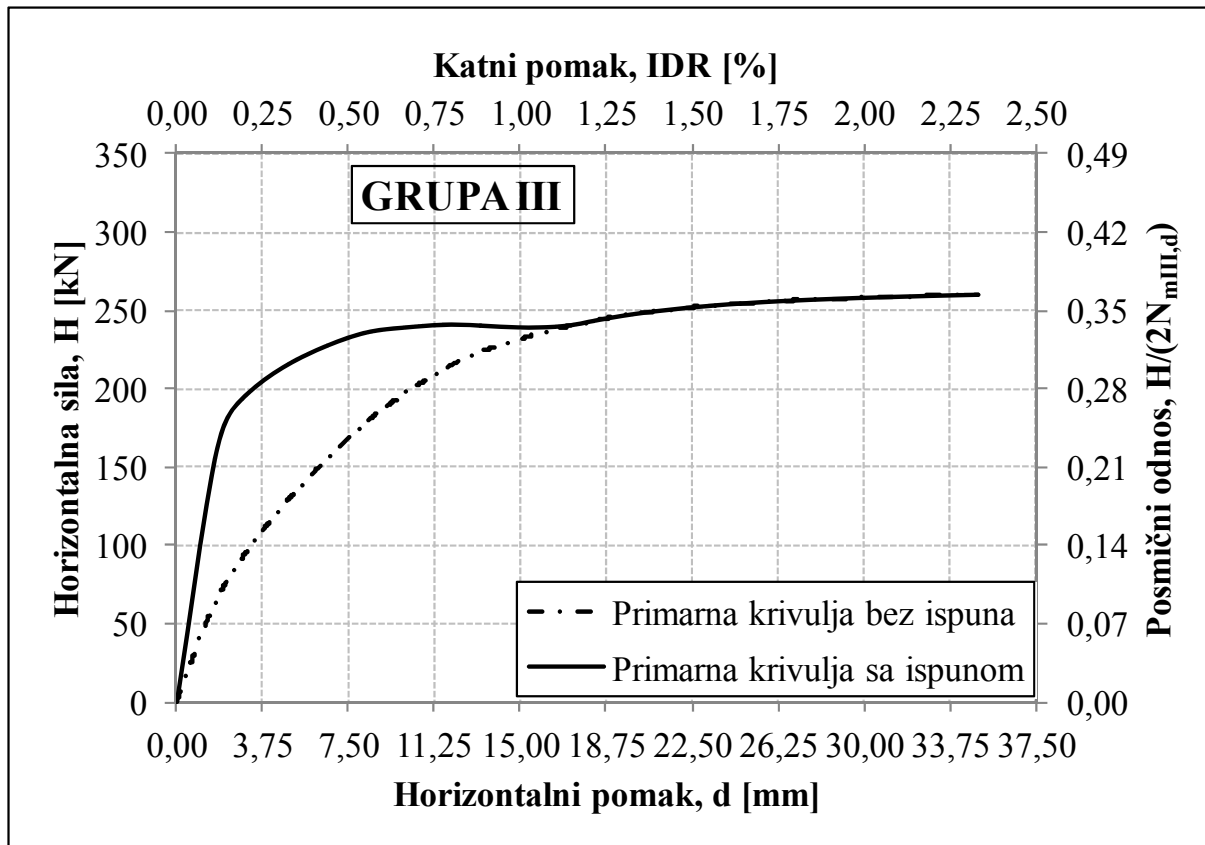
Poprečna nosivost izražava se pomoću primarne krivulje koju, pak, opisuje odnos poprečne (horizontalne) sile i horizontalnoga pomaka. Primarne krivulje, za sve GRUPE modela, prikazane su na *slikama 6.24-6.27*. Na istim slikama (*slike 6.24-6.26*), s ciljem usporedbe, paralelno je prikazana i primarna krivulja praznog armirano-betonskoga okvira. Primarne krivulje za GRUPE modela prikazane su kao odnos poprečne (horizontalne) sile i pripadajućeg horizontalnog pomaka čvora 7 (glavni čvor spoja stupa i grede, *slika 6.16*). Na sekundarnim osima na *slikama 6.24-6.27* prikazani su horizontalna sila u odnosu na ukupnu težinu (posmični odnos) i katni pomak. Težina, odnosno zadana vertikalna sila za svaku GRUPU modela, prikazana je u *tablici 6.5*.



Slika 6.24 Primarne krivulje modela GRUPE I

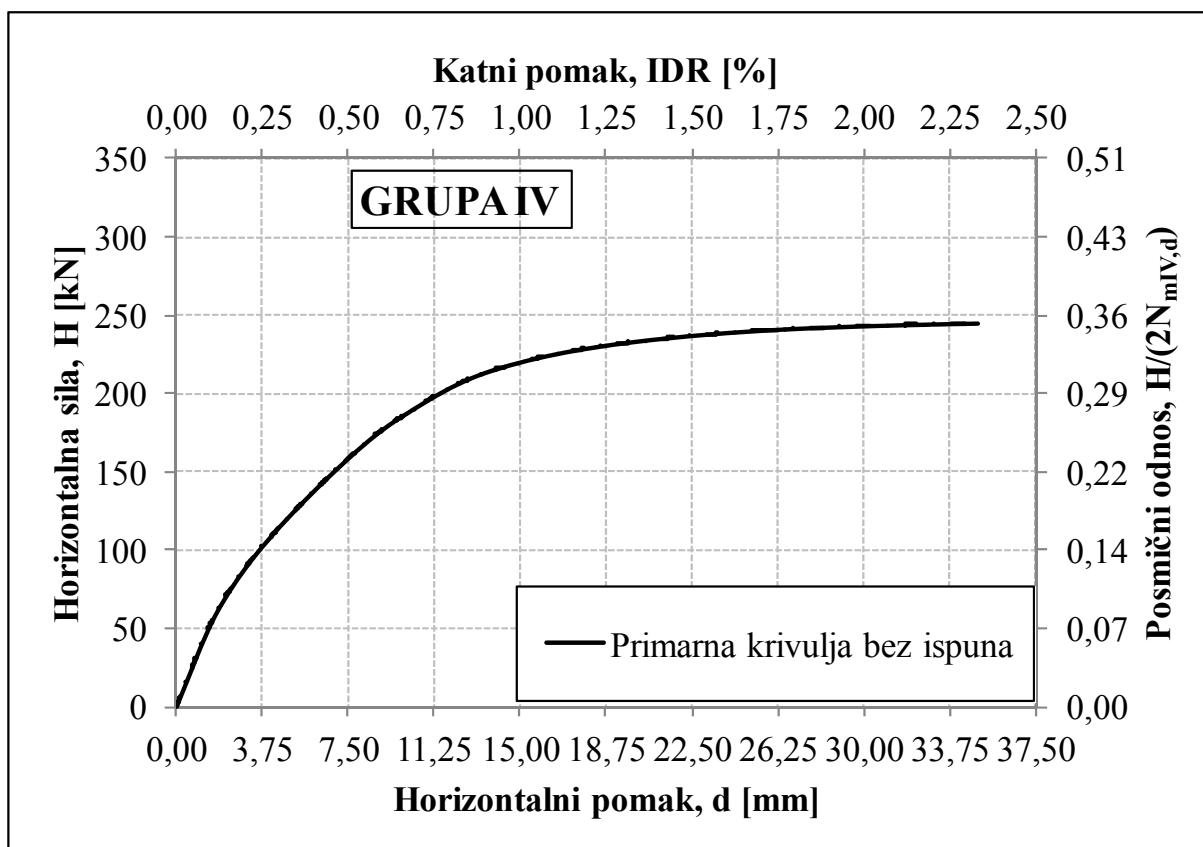


Slika 6.25 Primarne krivulje modela GRUPE II



Slika 6.26 Primarne krivulje modela GRUPE III



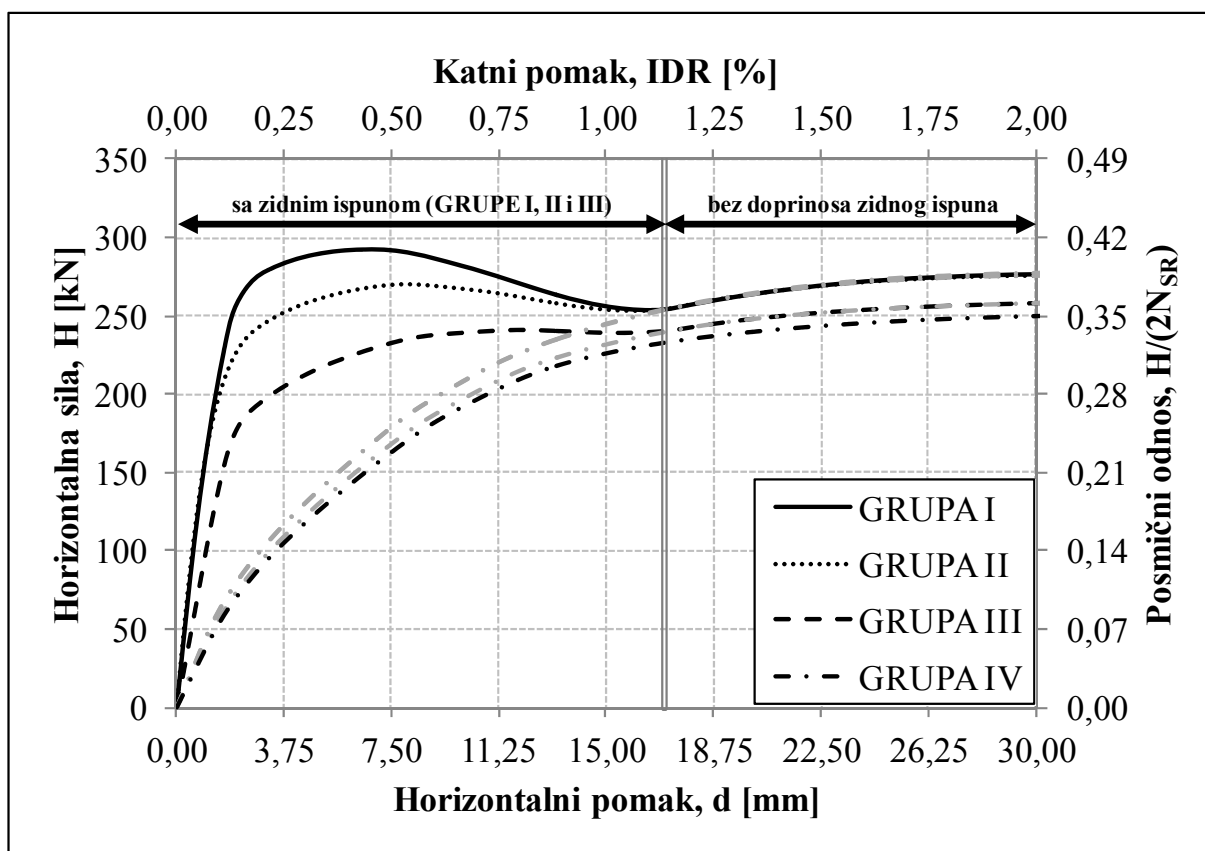


Slika 6.27 Primarna krivulja modela GRUPE IV

Dobiveni numerički rezultati pokazuju kako su poprečne nosivosti armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom puno veće od poprečne nosivosti praznog armirano-betonskoga okvira, osobito pri malim katnim pomacima (*slika 6.28*). Pri tome, početne poprečne nosivosti neznatno su ovisile o vrsti zidnoga ispuna, kod modela GRUPE III ta je nosivost manja u odnosu na GRUPU I i II.

Praćenjem primarnih krivulja (krivulja nosivosti) uočljiv je početni linearni dio, što ukazuje na to da se armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom (koji je modeliran pomoću tlačnih i posmičnih dijagonala zidnog ispuna) ponaša kao kompozitni konstrukcijski sustav. Pretpostavkom pojave razdvajanja zidnoga ispuna od armirano-betonskoga okvira (što su eksperimentalna ispitivanja i potvrdila), te postupnim oštećivanjem dijagonala zidnoga ispuna (smanjenjem njihove površine) kasnije i elementa armirano-betonskoga okvira, dolazi do postupnog opadanja krutosti sustava, sve do trenutka postizanja maksimalne vrijednosti poprečne nosivosti ( $H_{max}$ ). Veličina,  $H_{max}$ , ovisila je o čvrstoći i površini dijagonala zidnoga ispuna te je bila najveća kod jakog, a najmanja kod slaboga zidnoga ispuna. Nakon toga, a pri još uvijek relativno malim katnim pomacima, slijedila je opadajuća grana krivulje sve do potpunoga oštećenja dijagonala zidnoga ispuna (dosezanja nosivosti tlačnih dijagonala zidnoga ispuna). Taj dio krivulje ovisio je, dakle, o procesu oštećivanja dijagonala zidnoga

ispuna (smanjenju površine tlačnih dijagonala zidnog ispuna) što je upućivalo na povećani udio armirano-betonskoga okvira u sveukupnoj poprečnoj nosivosti, a koji se na kraju i vidi na **slici 6.28**. Točka u kojoj su tlačne dijagonale zidnoga ispuna dosegle svoju krajnju nosivost je točka gdje se spajaju primarne krivulje s ispunom i bez ispuna (**slike 6.24-6.26, 6.28**). Ta točka (točka nakon koje poprečnu nosivost preuzima sam armirano-betonski okvir), na **slici 6.28**, nastaje pri katnome pomaku od cca. 1,10% i unaprijed je definirana na osnovu eksperimentalnih ispitivanja zadavanjem granične deformacije dijagonala zidnoga ispuna,  $\varepsilon_u$ , kod definiranja parametara modela histereznog ponašanja dijagonale zidnoga ispuna na tlak.



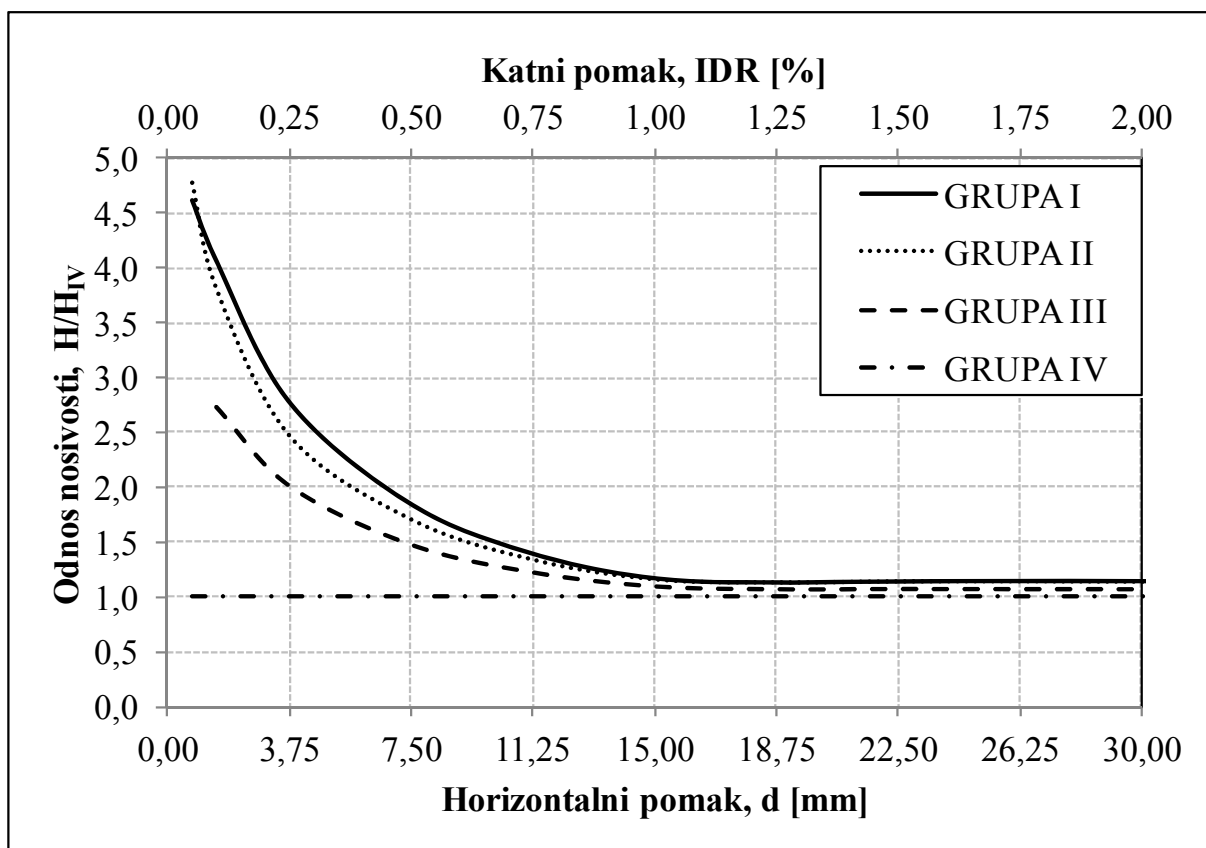
Slika 6.28 Primarne krivulje (krivulje nosivosti) modela GRUPE I, II, III i GRUPE IV

Poprečna nosivost armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom u usporedbi s onom praznog armirano-betonskoga okvira, prikazana je u **tablici 6.6** za različite katne pomake. Ako nosivost praznog armirano-betonskoga okvira (GRUPA IV) obilježimo s vrijednošću 1,00, tada je nosivost modela GRUPE I pri katnome pomaku od 0,10%, 4,07 puta veća, i tako dalje. Vidljivo je opadanje doprinosa zidnoga ispuna s povećanjem katnih pomaka, najizraženije opadanje ima najslabiji zidni ispun, dok jaki zidni ispun ima najsporije opadanje poprečne nosivosti. Također, ovdje se jasno može vidjeti (**slika 6.29**) doprinos čvrstoće zidnoga ispuna poprečnoj nosivosti.

**Tablica 6.6** Poprečna nosivost,  $H$  [kN], pri određenim katnim pomacima

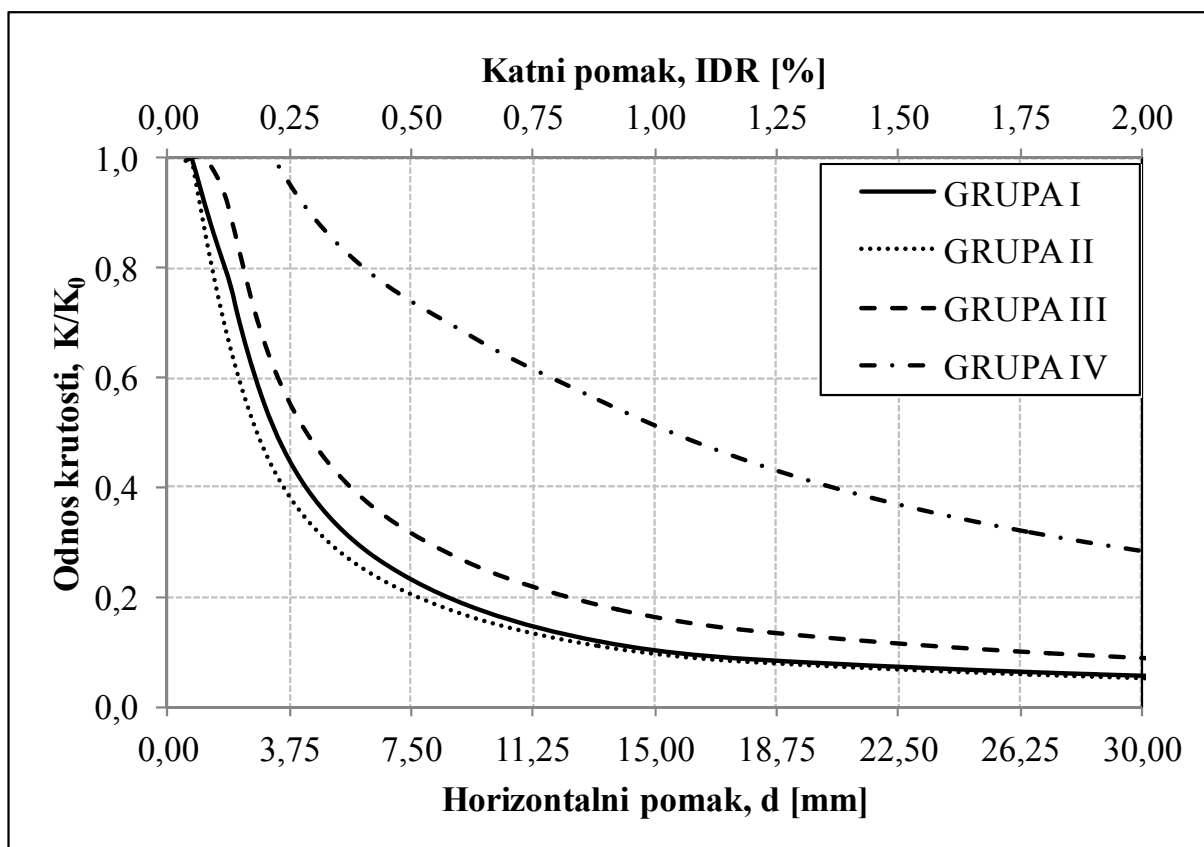
IDR [%]	0,05%	0,10%	0,25%	0,50%	0,75%	1,00%
GRUPA I	127 (4,63)	214 (4,07)	284 (2,78)	292 (1,84)	275 (1,39)	256 (1,17)
GRUPA II	131 (4,78)	200 (3,81)	252 (2,46)	270 (1,70)	264 (1,33)	254 (1,15)
GRUPA III	73 (2,65)	144 (2,73)	205 (2,01)	233 (1,47)	241 (1,22)	239 (1,09)
GRUPA IV	28 (1,00)	53 (1,00)	102 (1,00)	159 (1,00)	198 (1,00)	220 (1,00)
IDR [%]	1,25%	1,50%	1,75%	2,00%	2,25%	2,33%
GRUPA I	260 (1,13)	270 (1,14)	275 (1,14)	277 (1,14)	277 (1,13)	278 (1,13)
GRUPA II	260 (1,13)	269 (1,13)	274 (1,14)	275 (1,13)	276 (1,13)	277 (1,13)
GRUPA III	245 (1,06)	252 (1,06)	256 (1,06)	258 (1,06)	260 (1,06)	260 (1,06)
GRUPA IV	231 (1,00)	237 (1,00)	241 (1,00)	243 (1,00)	245 (1,00)	245 (1,00)

Opadanje poprečne nosivosti armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom (GRUPA I, II i III) u odnosu na prazan armirano-betonski okvir (GRUPA IV), možemo prikazati i grafički na osnovu podataka iz *tablice 6.6 (slika 6.29)*.

**Slika 6.29** Opadanje poprečne nosivosti u odnosu na model GRUPE IV

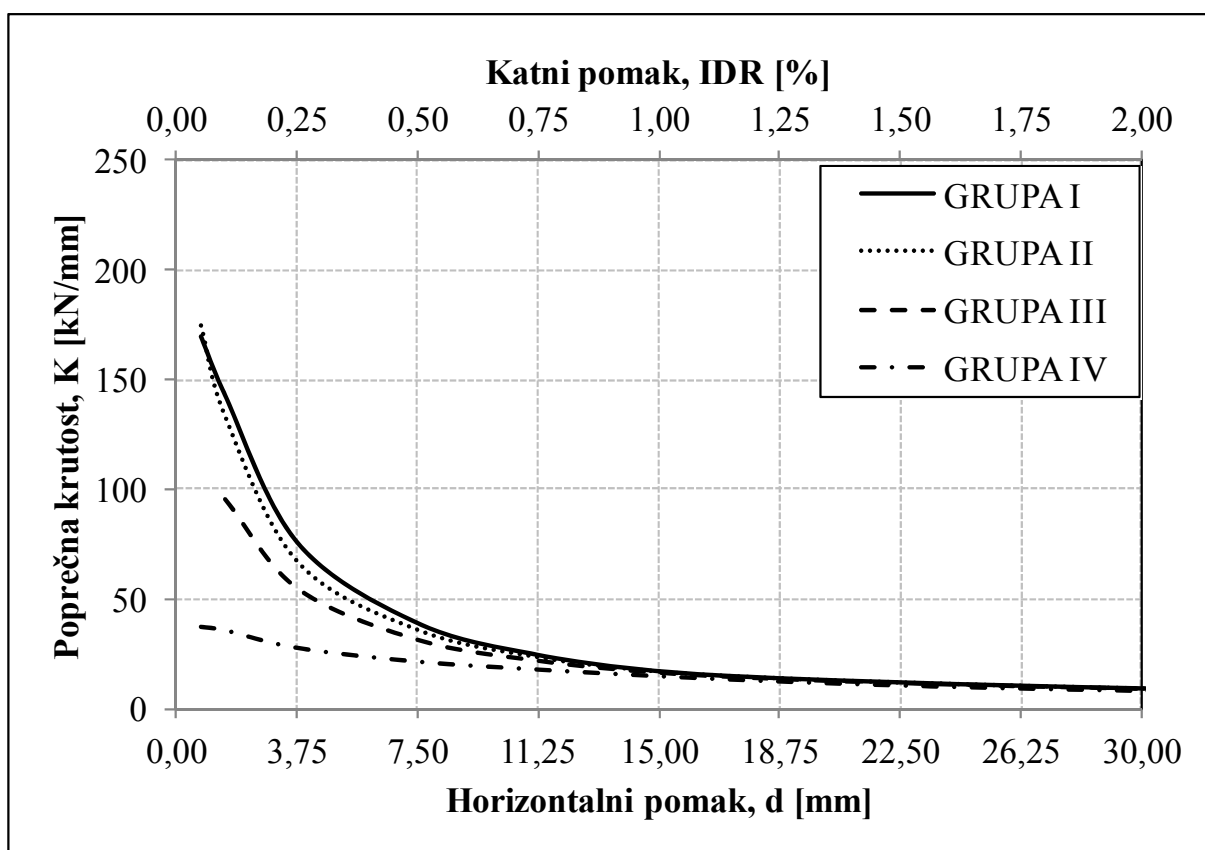
### 6.5.2 Poprečna krutost modela

Usporedba opadanja normaliziranih sekantnih krutosti svih GRUPA modela prikazana je na *slici 6.30*. Izračunate su sekantne krutosti pri svakome nivou katnoga pomaka i normalizirane su u odnosu na početnu krutost (krutost pri pojavi prvih pukotina), a na osnovu primarnih krivulja svake GRUPE modela. Sekantna krutost,  $K$ , računata je kao omjer horizontalne (poprečne) sile i pripadajućega horizontalnoga pomaka ( $K=H/d$ ) za svaku GRUPU modela. Početna krutost,  $K_0$ , za svaku GRUPU modela, izračunata je kao krutost pri katnome pomaku od 0,05% (do ovog pomaka se došlo na osnovu eksperimentalnih ispitivanja odnosno obrade eksperimentalnih rezultata), odnosno 0,22% kod modela GRUPE IV (praznog armirano-betonskog okvira). Početna krutost, ustvari je elastična krutost ( $K_0=K_e$ ), čiji se iznosi za svaku GRUPU modela mogu izračunati iz *tablice 6.6*. Kako je početna krutost modela armirano-betonskoga okvira sa zidnom ispunom (GRUPE I, II i III) znatno veća, također je kod istih opadanje krutosti puno izraženije u usporedbi s praznim armirano-betonskim okvirom (GRUPA IV). GRUPE modela I i II imaju nešto veće opadanje krutosti u odnosu na GRUPU III. Ovo možemo objasniti time što je početna krutost modela GRUPE III znatno manja od početne krutosti modela GRUPE I i II pa je samim time i opadanje manje izraženo.



Slika 6.30 Opadanje krutosti modela po GRUPAMA u odnosu na početnu krutost

Opadanje krutosti modela po GRUPAMA prikazano je na *slici 6.31* u ovisnosti o horizontalnome pomaku, odnosno katnome pomaku prikazanome na sekundarnoj osi. S navedene slike, možemo reći kako sekantna krutost modela GRUPE I i II približno jednako opada, s tim da brže opada u odnosu na GRUPU III. Najmanje izraženo opadanje krutosti je kod modela GRUPE IV, odnosno praznoga armirano-betonskoga okvira. Također, možemo iz navedene slike iščitati da je za katni pomak od 0,25% krutost modela GRUPE I približno jednaka krutosti modela GRUPE II (razlika oko 11%), te da je za oko 1,38 puta veća od krutosti modela GRUPE III, odnosno, 2,78 puta veća od modela GRUPE IV, i tako redom. Isto tako, važno je za primijetiti na *slici 6.31*, kako se sekantna krutost modela GRUPE I, II i III s povećanjem poprečne sile, odnosno katnoga pomaka, približava sekantnoj krutosti modela GRUPE IV (praznom armirano-betonskom okviru), tj. smanjuje se. To je područje katnoga pomaka od 1,00% pa na više.

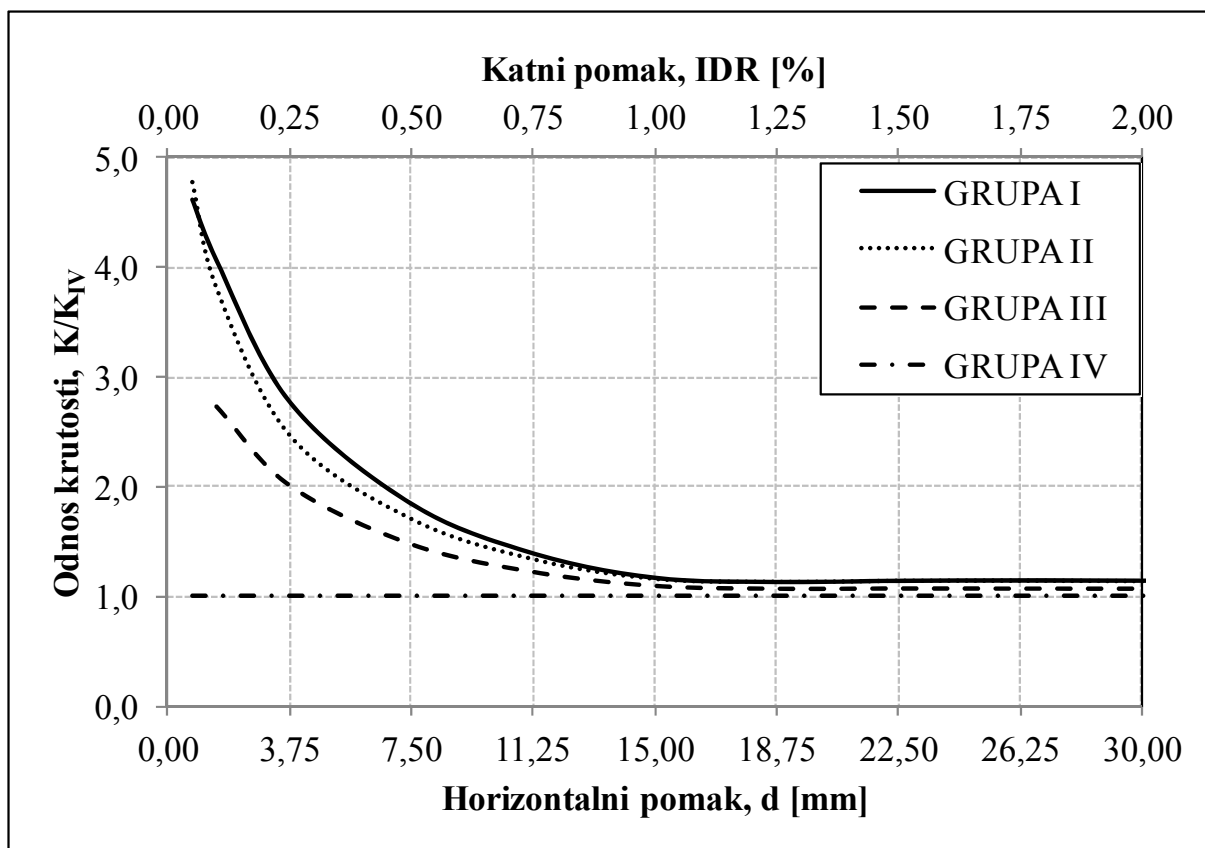


Slika 6.31 Opadanje krutosti modela po GRUPAMA pri istom katnom pomaku

Ako se vrijednosti sekantne krutosti normaliziraju u odnosu na sekantnu krutost modela GRUPE IV (prazan armirano-betonski okvir), a za isti katni pomak, vidljivo je sporije i približno jednako opadanje krutosti armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim

ispunom od opečnih blokova (GRUPA I i II) u odnosu na armirano-betonski okvir ispunjen zidnim ispunom od porobetonskih blokova (GRUPA III), *slika 6.32*.

Ovaj zaključak poklapa se sa zaključkom izvedenim u slučaju opadanja krutosti modela po GRUPAMA, odnosno u skladu je sa zaključcima izvedenima u slučaju poprečne nosivosti GRUPE modela.



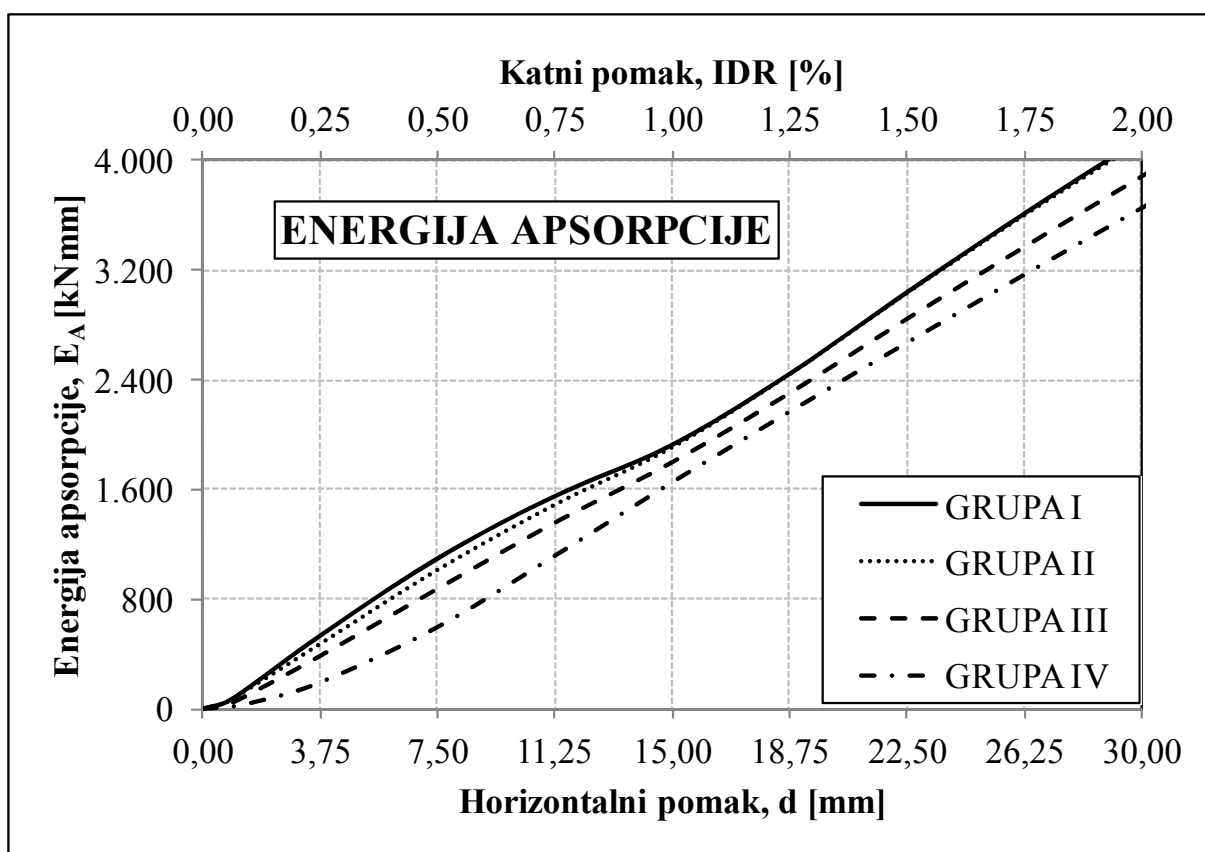
Slika 6.32 Opadanje krutosti u odnosu na referentni model (GRUPU IV) pri istom katnom pomaku

Sa *slike 6.32*, može se vidjeti i koliko je puta krutost armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom veća od praznoga armirano-betonskoga okvira za isti katni pomak, a mogu se vidjeti i međusobni odnosi krutosti svih GRUPA modela (njihovi iznosi mogu se vidjeti na *slici 6.31*). Pa tako, za katni pomak od 0,25%, krutost modela GRUPE I je 2,78 puta veća od krutosti modela GRUPE IV, krutost modela GRUPE II je 2,46 puta veća od krutosti modela GRUPE IV i krutost modela GRUPE III je 2,01 puta veća od krutosti modela GRUPE IV. Možemo primijetiti kako se i normalizirana sekantna krutost GRUPE I, II i III s povećanjem poprečne sile, odnosno katnoga pomaka, smanjuje te se približava sekantnoj krutosti modela GRUPE IV (praznom armirano-betonskom okviru).

### 6.5.3 Histerezne energije modela (energije apsorpcije)

Kako bi se dobila količina apsorbirane energije (energije primanja) korištene su primarne krivulje pojedinih GRUPA modela prikazane na *slici 6.28*. Količine apsorbirane energije računane su prema *slici 4.77*, tj. računane su kao površine trokuta ispod primarne krivulje pri određenome katnome pomaku.

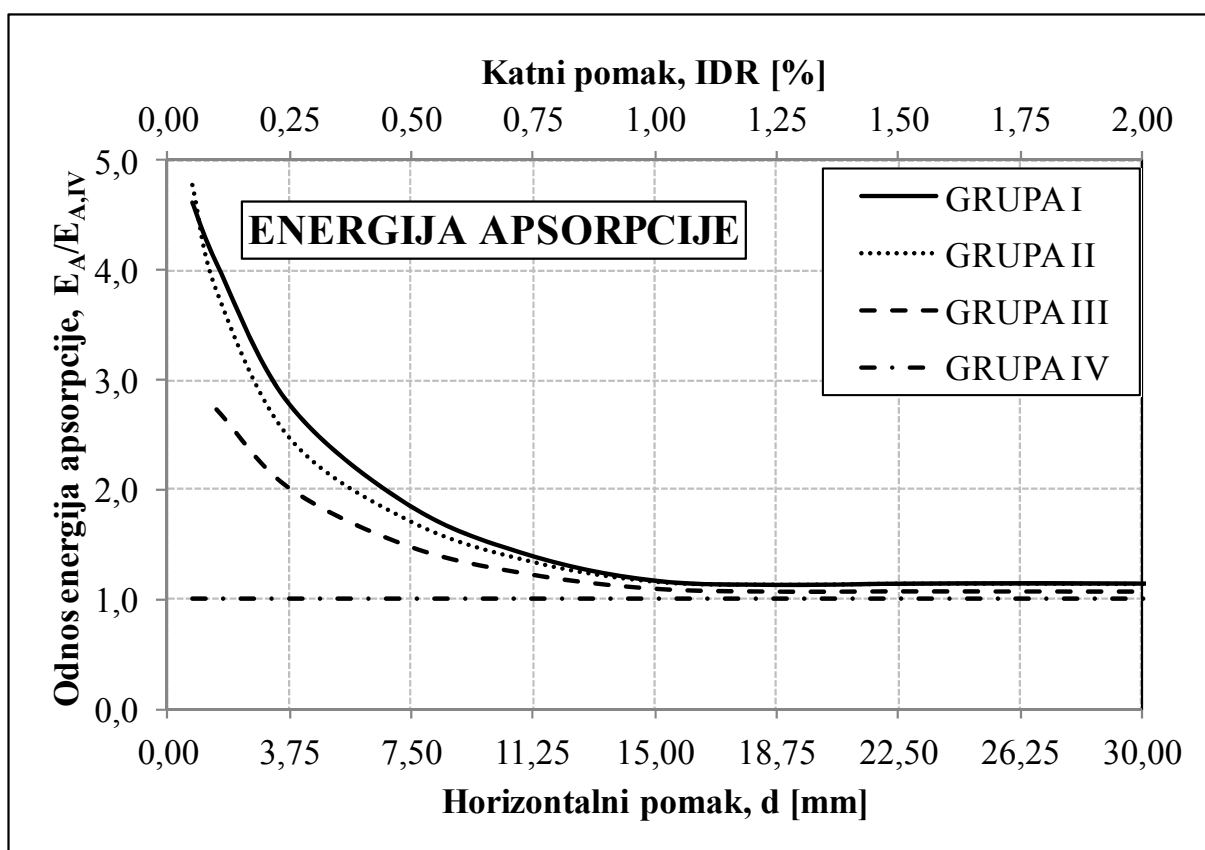
Na *slici 6.33* prikazane su količine apsorbirane energije za svaku grupu modela u ovisnosti o katnome pomaku. Na istoj slici možemo vidjeti da je apsorbirana energija kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od opečnih blokova (GRUPA I i II) veća od one kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od porobetonskih blokova (GRUPA III). Isto tako, apsorbirana energija kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom veća je nego kod praznoga armirano-betonskoga okvira. Iz ovoga možemo zaključiti kako jači zidni ispun ima veći kapacitet apsorpcije (primanja) energije.



Slika 6.33 Količine apsorbirane energije pojedinih GRUPA modela

S povećavanjem nivoa katnoga pomaka vidimo da se povećava i količina apsorbirane energije kod svih GRUPA modela.

S druge strane, ako energije apsorpcije modela GRUPE I, II i III normaliziramo u odnosu na energiju apsorpcije modela GRUPE IV, *slika 6.34*, vidimo opadanje energije apsorpcije modela GRUPE I, II i III u odnosu na model GRUPE IV, s povećanjem katnoga pomaka. To opadanje, približno je jednako za modele GRUPE I i II, dok je za model GRUPE III nešto izraženije (armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom od porobetona). Također, vidimo koliko je puta energija apsorpcije veća kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od praznoga armirano-betonskoga okvira, naročito pri malim katnim pomacima (do 0,25%). Drugim riječima, vidimo koliko se povećava kapacitet energije apsorpcije armirano-betonskog okvira dodavanjem zidnoga ispuna. S povećavanjem nivoa katnih pomaka (od 0,25%) taj se kapacitet smanjuje, odnosno približava se kapacitetu praznoga armirano-betonskoga okvira.



Slika 6.34 Opadanje apsorbirane energije modela GRUPE I, II i III u odnosu na referentni model (GRUPA IV)

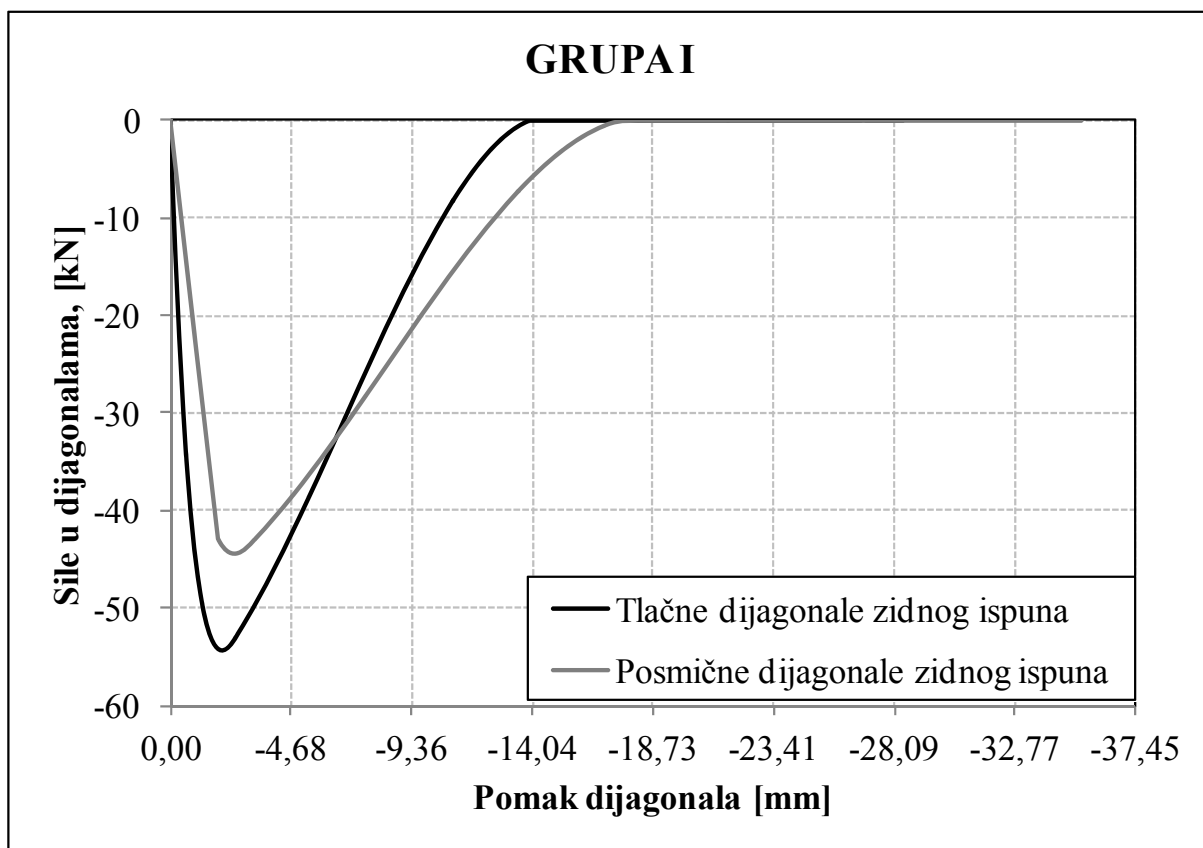
Najveći kapacitet apsorpcije ima jaki zidni ispun, što i nije iznenađujuće budući da se radi od modelima armirano-betonskog okvira koji su ispunjeni zidnim ispunom od opečnih blokova MO10. Jednostavnije rečeno, armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom imaju svojstvo boljeg primanja energije u odnosu na prazan armirano-betonski okvir, naravno, do određenih nivoa katnih pomaka.



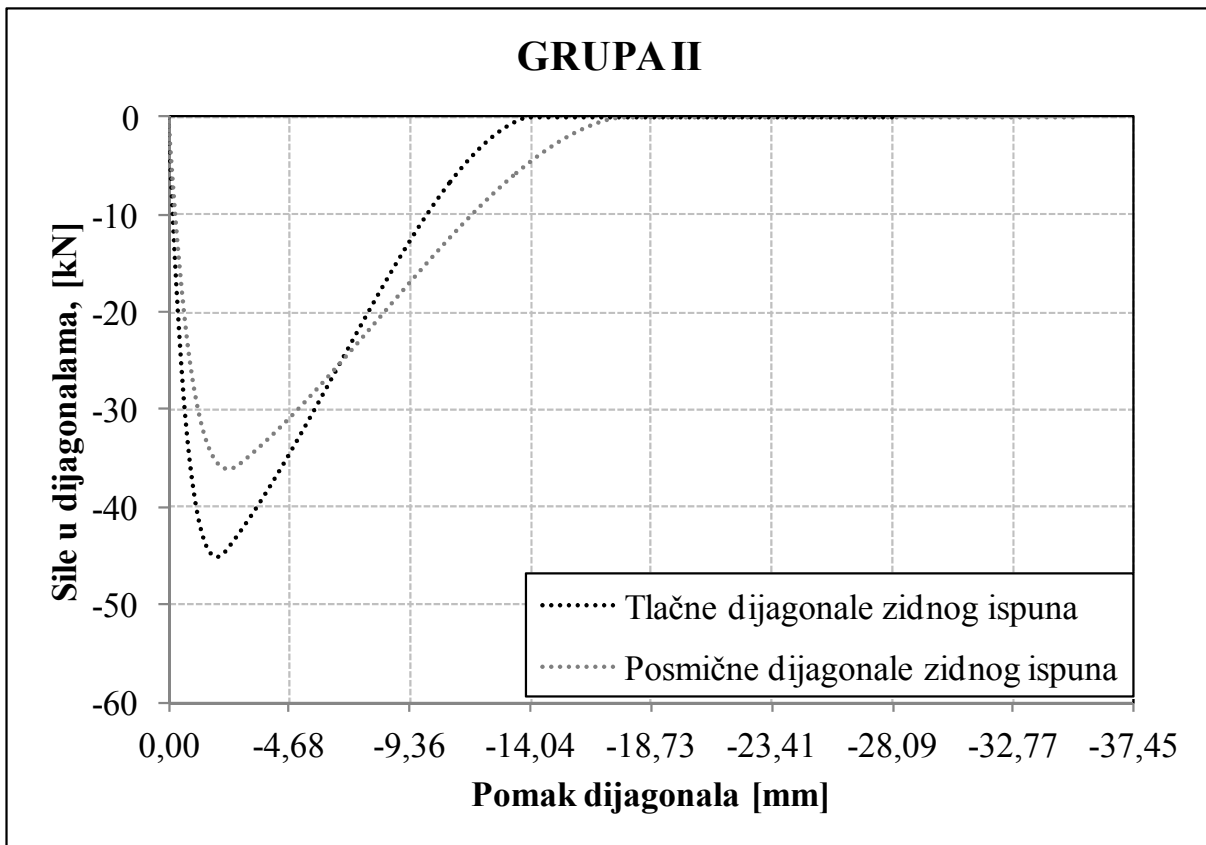
### 6.5.4 Ponašanje dijagonala zidnoga ispuna

Ponašanje zidnoga ispuna usvojenog makro-modela detaljno je opisano ranije. Ovdje će se prikazati ponašanje zidnoga ispuna kroz sile u dijagonalama zidnoga ispuna, a za usvojeni neelastični panel element, *točka 6.3.6.*

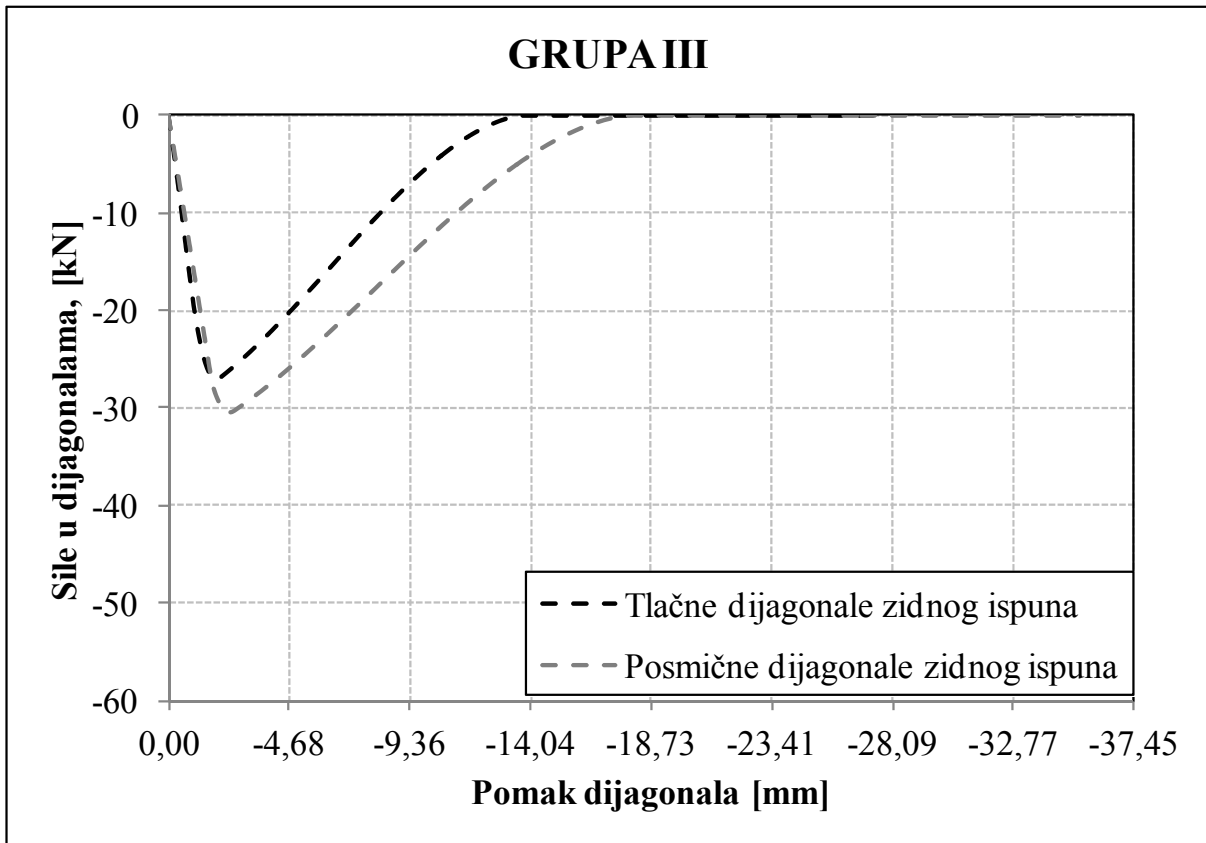
Na *slikama 6.35-6.37* prikazane su uzdužna tlačna sila i posmična sila u dijagonalama zidnoga ispuna u obliku krivulje odnosa sila-pomak. Treba spomenuti kako se radi o dvije tlačne dijagonale u kojima su sile približno jednake (zanemarive razlike) pa su sile prikazane samo za jednu tlačnu dijagonalu zidnoga ispuna. Što se tiče posmičnih dijagonala, imamo dvije posmične dijagonale, a sile u njima su identične, samo suprotnoga predznaka. Pomaci se odnose na uzdužnu os dijagonale što se tiče tlačnih dijagonala zidnoga ispuna, dok su kod posmičnih dijagonala pomaci jednaki horizontalnim pomacima cijeloga sustava, što će se i vidjeti kasnije, odnosno kod prikaza odnosa sila-pomak u ovisnosti o katnome pomaku. Na istim slikama možemo iščitati maksimalne vrijednosti sila u dijagonalama zidnoga ispuna kao i njihovu krajnju nosivost, a pri određenome pomaku (skraćanju). Također, mogu se vidjeti doprinosi dijagonala u nosivosti pri određenome pomaku, kao i prestanak njihovoga doprinosa



**Slika 6.35** Prikaz sila u dijagonalama zidnoga ispuna za modele GRUPE I



Slika 6.36 Prikaz sile u dijagonalama zidnoga ispuna za modele GRUPE II

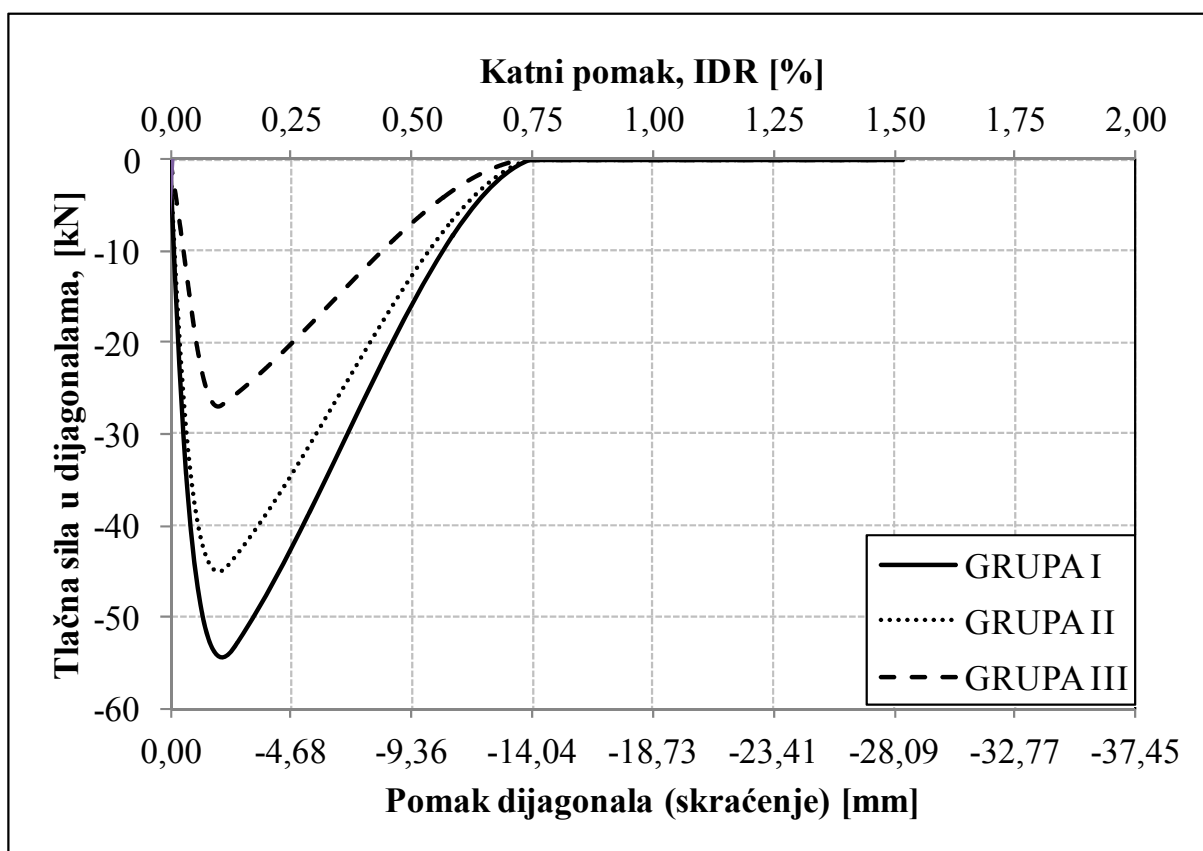


Slika 6.37 Prikaz sile u dijagonalama zidnoga ispuna za modele GRUPE III

Na *slici 6.38* prikazane su uzdužne tlačne sile u tlačnim dijagonalama zidnoga ispuna za sve GRUPE modela, kao i njihove deformacije, odnosno uzdužni pomaci (pomaci dijagonala). S navedene slike možemo prvo primijetiti da je najveća uzdužna tlačna sila u dijagonalama jakoga zidnoga ispuna, zatim kod srednjeg i na kraju kod slaboga zidnoga ispuna. Ovo nam govori kako najveću tlačnu silu može prihvatiti najjači zidni ispun, odnosno zidni ispun s najvećom tlačnom čvrstoćom, što je i očekivano.

U početku, pri malim nivoima katnih pomaka (do cca. 0,15%) vidljiv je linearan prirast tlačne sile kod svih grupa modela. Iznos prirasta sile približno je jednak kod zidnoga ispuna od opečnih blokova (GRUPA I i II), dok je manji kod porobetonskih blokova (GRUPA III). Ovo je jednostavno za objasniti, moduli elastičnosti opečnih blokova, kao i čvrstoća, znatno su veći nego kod porobetonskih blokova.

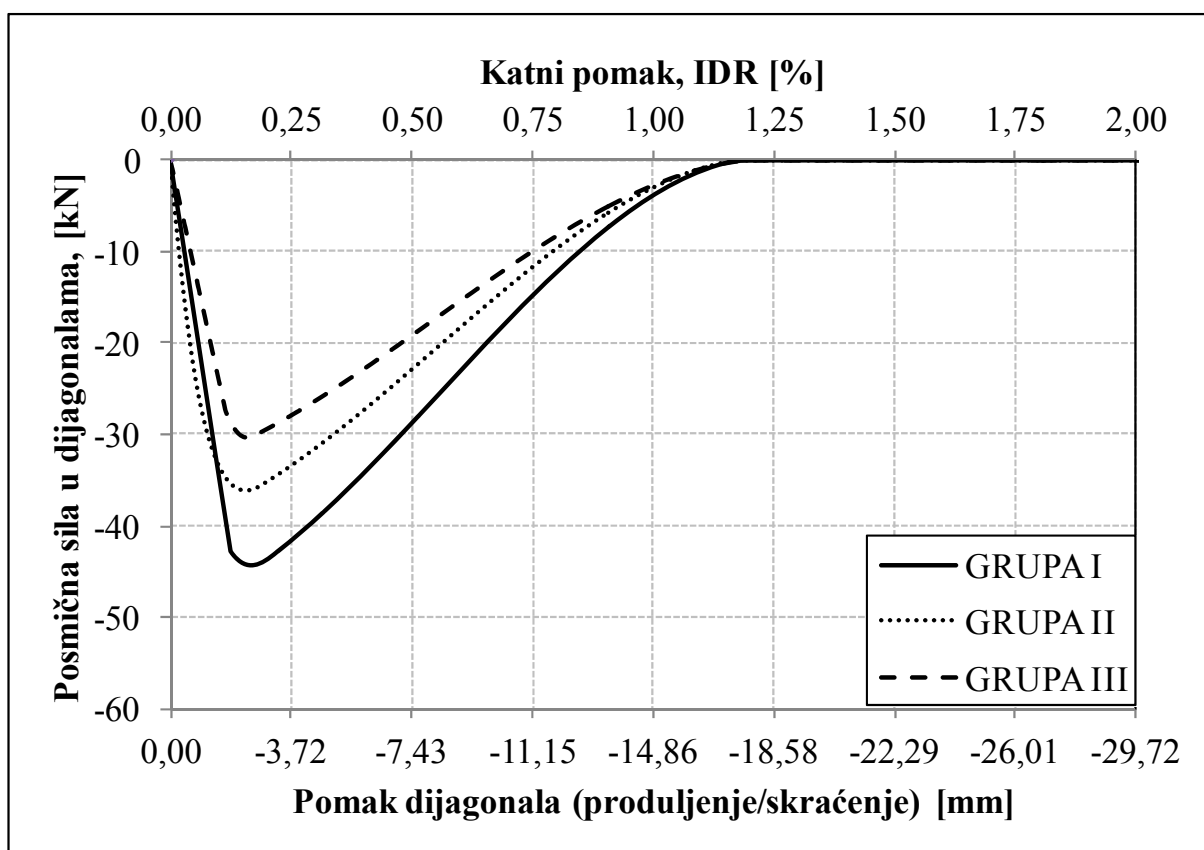
Nakon dosezanja maksimalne tlačne sile u dijagonalama slijedi opadajuća grana krivulje sve do katnih pomaka od cca. 0,75% , kada dijagonale zidnoga ispuna u tlaku više ne sudjeluju u nosivosti na tlak, poprečno opterećenje tada još uvijek preuzimaje dijagonale na posmik i sam (prazan) armirano-betonski okvir.



Slika 6.38 Prikaz uzdužne sile u dijagonalama zidnog ispuna za modele GRUPE I, II i III

Ako promatramo ponašanje dijagonala zidnoga ispuna na posmik, također, u obliku krivulje odnosa sila-pomak, tada su na *slici 6.39* prikazane posmične sile u dijagonalama zidnog ispuna za sve GRUPE modela, kao i njihove deformacije, odnosno pomaci (produljenje/skraćenje). S navedene slike možemo izvesti iste ili blaže rečeno slične zaključke kao i sa *slike 6.38*. Za primijetiti je kako je najveća posmična sila u dijagonalama jakoga zidnoga ispuna, zatim slijedi srednji i na kraju slabi zidni ispun. U promatranju ovoga slučaja vidimo da je iznos prirasta sile pri malim nivoima katnih pomaka (do cca. 0,15%) približno jednak za sve GRUPE modela, što nije bio slučaj kod dijagonala u tlaku.

Nakon dosezanja maksimalne posmične sile u dijagonalama slijedi opadajuća grana krivulje sve do katnih pomaka od cca. 1,10%, kada dijagonale zidnoga ispuna više ne sudjeluju u nosivosti na posmik (dijagonale na tlak sudjeluju do 0,75% katnog pomaka), a poprečno opterećenje tada u potpunosti preuzima sam (prazan) armirano-betonski okvir.



Slika 6.39 Prikaz posmične sile u dijagonalama za modele GRUPE I, II i III

Također, važno za primijetiti promatrajući *slike 6.38* i *6.39*, jest da je kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od porobetonskih blokova (GRUPA III) dominantnija dijagonala zidnoga ispuna na posmik (posmična sila veća je od tlačne sile u dijagonalama zidnoga ispuna, *slika 6.37*).

Ovo, pak, možemo objasniti time što je čvrstoća ljepila kojim je zidan zidni ispun od porobetonskih blokova znatno veća od čvrstoće morta kojim su zidani zidni ispuni od opečnih blokova. U konačnici to se odražava na početnu posmičnu čvrstoću, odnosno koeficijent trenja zidnoga ispuna koji su uzeti u obzir u numeričkom modelu pri modeliranju, tj. definiranju parametara modela histereznog ponašanja dijagonale zidnoga ispuna na posmik, kako je ranije objašnjeno i prikazano.

## 6.6 ZAKLJUČAK POGLAVLJA

Glavni zadatak ovoga poglavlja bio je definirati numerički makro-model kojim se dovoljno dobro mogu opisati dobiveni eksperimentalni rezultati. Takav, kalibrirani numerički makro-model poslužit će za daljnje numeričke analize vezane uz armirano-betonske okvire ispunjene zidnim ispunom, kao i za opisivanje ponašanja, odnosno utjecaja zidnog ispuna u armirano-betonskim okvirima. Za usvojeni i detaljno opisani numerički makro-model na osnovu kojeg su dobiveni numerički rezultati možemo reći sljedeće:

- Glavne prednosti makro-modela su: računalna jednostavnost i korištenje mehaničkih svojstava zidnoga ispuna dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima. Kao što znamo, zidni ispun vrlo je heterogen materijal, te je raspodjelu materijalnih svojstava sastavnih elemenata teško predvidjeti.
- U znanstvenoj literaturi dostupno je i predloženo nekoliko makro-modela za simulaciju globalnoga seizmičkog odgovora armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom. Takvi modeli općenito se temelje na pretpostavci dviju ekvivalentnih tlačnih dijagonala koje povezuju dva nasuprotna ugla okvira.
- Najvažniji geometrijski parametar ekvivalentne tlačne dijagonale je definiranje njezine širine,  $w$ . Trenutno su dostupni razni prijedlozi u znanstvenoj literaturi za definiranje ekvivalentne širine tlačne dijagonale, a koji su u ovome poglavlju detaljno opisani. Uglavnom, možemo reći kako većina autora širinu tlačne dijagonale povezuje s njezinom duljinom i relativnom krutošću, dok kod manjega broja autora to nije slučaj. Za sve razmatrane numeričke modele korištena je ista definicija širine ekvivalentne tlačne dijagonale prema Smithu (1962).
- Početna elastična krutost zidnog ispuna ovisi o geometrijskim i mehaničkim karakteristikama zidnog ispuna. Međutim, eksperimentalna zapažanja pokazuju da se zidni ispun kod armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom ponaša vrlo neelastično. Najvažniji čimbenici nelinearnog ponašanja armirano-betonskih

okvira sa zidnim ispunom proizlaze iz materijalne nelinearnosti. Ovi čimbenici ovise o neelastičnom ponašanju: zidnoga ispuna, elemenata armirano-betonskog okvira i kontakta između zidnoga ispuna i armirano-betonskoga okvira.

- Tlačna čvrstoća dijagonale zidnog ispuna za sve numeričke modele uzeta je kao jednaka tlačnoj čvrstoći zidnoga ispuna, što je i praktično primjenjivo.
- Za opisivanje nelinearnog ponašanja zidnoga ispuna kod armirano-betonskih okvira, korišteni su i detaljno opisani dostupni nelinearni modeli u znanstvenoj literaturi. Svi modeli temelje se na definiranju krivulje odnosa sila-pomak.
- Za usvojeni numerički model vodilo se računa o: materijalnoj nelinearnosti, vrsti proračuna (analizi), samome materijalu, poprečnim presjecima, neelastičnim elementima armirano-betonskoga okvira, kao i neelastičnom panel elementu zidnoga ispuna.
- Cikličko ponašanje zidnoga ispuna modelirano je histereznim pravilom koje je predložio Crisafulli (1997) kako bi simulirao aksijalni odgovor zidnoga ispuna. Ovaj model uzima u obzir nelinearni odgovor zidnoga ispuna u tlaku, uključujući efekte kontaktne duljine u raspucanom materijalu.
- Najvažniji parametri kod definiranja neelastičnog panel elementa zidnoga ispuna (osim geometrijskih parametara) odnose se na definiranje parametara modela histereznog ponašanja dijagonale zidnoga ispuna na tlak. Nakon tih parametara slijedi definiranje parametara modela histereznog ponašanja dijagonale zidnoga ispuna na posmik.
- Kod modeliranja armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom vodilo se računa da numerički makro-model bude što sličniji eksperimentalnome modelu. Prije svega, tu se misli na ulazne podatke o armirano-betonskome okviru, zidnome ispunu, rubnim uvjetima i ograničenjima, kao i o nanošenju opterećenja. Svi ulazni podatci, koji su se koristili vezano uz materijal i njegove mehaničke karakteristike, dobiveni su na osnovu provedenih eksperimentalnih ispitivanja.
- Numerički rezultati, koji su dobiveni na osnovu kalibriranog numeričkog makro-modela statičkom pushover analizom u pogledu poprečne nosivosti modela, pokazuju kako su poprečne nosivosti armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom puno veće od poprečne nosivosti praznoga armirano-betonskoga okvira, osobito pri malim katnim pomacima. Vidljivo je opadanje doprinosa zidnoga ispuna s povećanjem katnih pomaka, najizraženije opadanje ima najslabiji zidni

ispun, dok jaki zidni ispun ima najsporije opadanje poprečne nosivosti. Također, jasno se vidi doprinos čvrstoće zidnoga ispuna na poprečnu nosivost. Doprinos zidnoga ispuna u poprečnoj nosivosti je do cca. 1,10% katnoga pomaka.

- U pogledu poprečne krutosti modela možemo reći da je početna krutost modela armirano-betonskog okvira sa zidnom ispunom (GRUPE I, II i III) znatno veća, također je kod istih opadanje krutosti puno izraženije u usporedbi s praznim armirano-betonskim okvirom (GRUPA IV). GRUPE modela I i II imaju nešto veće opadanje krutosti u odnosu na GRUPU III. Isto tako, možemo reći da sekantna krutost modela GRUPE I i II približno jednako opada, s time da brže opada u odnosu na GRUPU III. Najmanje izraženo opadanje krutosti vidimo kod modela GRUPE IV, odnosno praznoga armirano-betonskoga okvira.
- Promatrajući histereznu energiju modela (energije apsorpcije), najveći kapacitet apsorpcije ima jaki zidni ispun, što i nije iznenađujuće budući da se radi od modelima armirano-betonskog okvira koji su ispunjeni zidnim ispunom od opečnih blokova MO10. Jednostavnije rečeno, armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom imaju svojstvo boljega primanja energije u odnosu na prazan armirano-betonski okvir, naravno, do određenih nivoa katnih pomaka.
- Kod ponašanja dijagonala zidnoga ispuna na tlak, odnosno promatrajući sile u dijagonalama zidnoga ispuna, možemo reći kako je najveća uzdužna tlačna sila u dijagonalama jakog zidnoga ispuna, zatim kod srednjega i na kraju kod slaboga zidnoga ispuna. Isti zaključak vrijedi i za ponašanje dijagonala zidnog ispuna na posmik. Također, važno je spomenuti kako je samo kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od porobetonskih blokova (GRUPA III) dominantnija dijagonala zidnoga ispuna na posmik (posmična sila veća je od tlačne sile u dijagonali zidnog ispuna). Ovo se objašnjava time što je čvrstoća ljepila kojim je zidan zidni ispun od porobetonskih blokova znatno veća od čvrstoće morta kojim su zidani zidni ispuni od opečnih blokova.

Na kraju, usvojeni i opisani numerički makro-model, koji je kalibriran na osnovu eksperimentalnih rezultata, daje numeričke rezultate koji vrlo dobro opisuju ponašanje armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom ako ih uspoređujemo sa sličnim numeričkim rezultatima u znanstvenoj literaturi. Ovaj zaključak ćemo potkrijepiti u sljedećem poglavlju uspoređujući eksperimentalne i numeričke rezultate u ovome radu promatranih GRUPA modela.





## POGLAVLJE 7: USPOREDBA EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH REZULTATA

---

### 7.1 UVOD

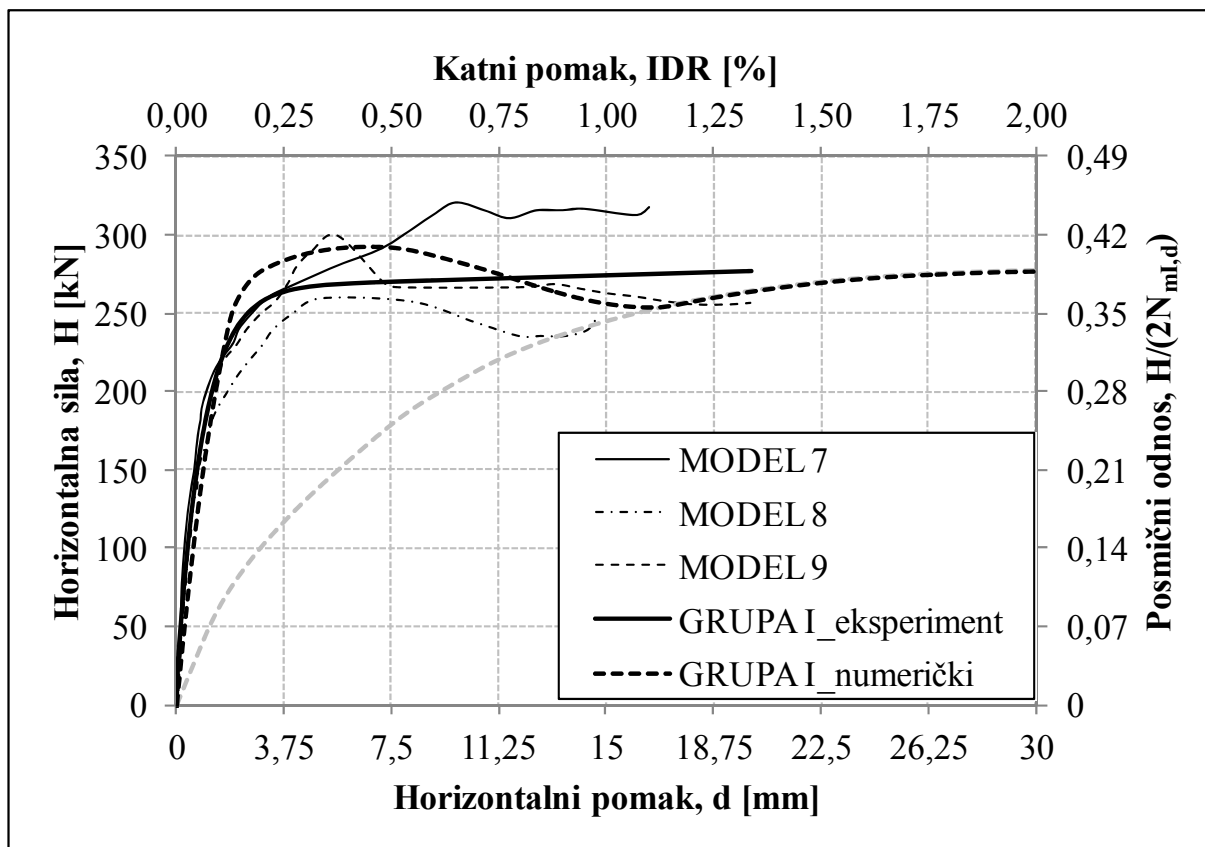
Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata izvršena je na osnovu dobivenih eksperimentalnih rezultata iz *Poglavlja 4 (točka 4.5)* i numeričkih rezultata iz *Poglavlja 6 (točka 6.5)*. Ovdje će se prikazati usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata u pogledu poprečne nosivosti, poprečne krutosti i energije apsorpcije (energije primanja). Svi rezultati bit će grafički prikazani, njihovi iznosi nalaze se u tablicama u navedenim poglavljima, odnosno točkama. Svaka usporedba rezultata (poprečne nosivosti, poprečne krutosti i energije apsorpcije) u nastavku bit će kronološki izložena.

### 7.2 USPOREDBA REZULTATA POPREČNE NOSIVOSTI

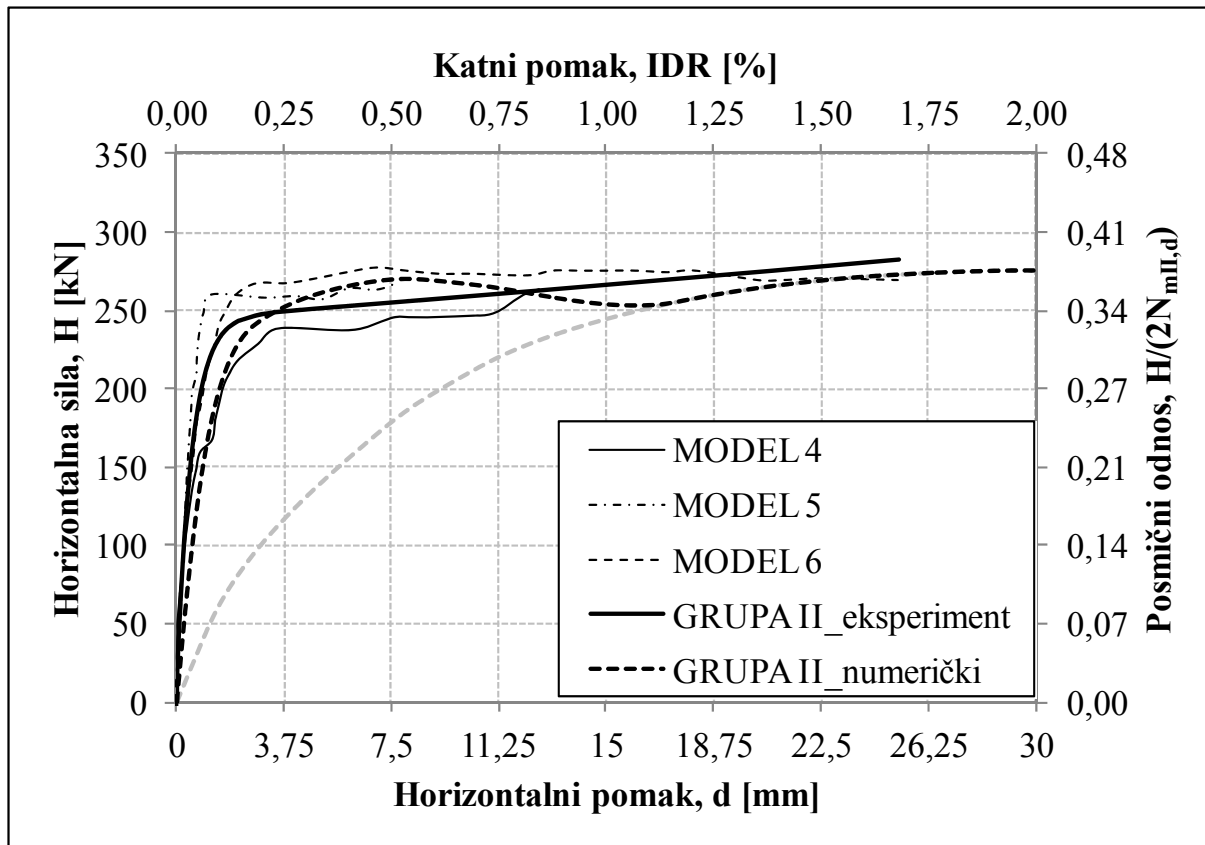
Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne nosivosti prikazani su na *slikama 7.1 do 7.4*. Poprečna nosivost iskazana je u obliku primarnih krivulja (krivulja nosivosti) koje su definirane odnosom poprečne (horizontalne) sile i horizontalnog pomaka na glavnim osima, dok se na sekundarnim osima nalaze posmični odnos (odnos vertikalnog i horizontalnog opterećenja) i katni pomak (horizontalni pomak kroz katna visina). Na istim slikama prikazane su primarne krivulje za svaki pojedinačni model (MODEL 1-10), kao i primarna krivulja dobivena optimalizacijom eksperimentalnih rezultata kao je to opisano u *Poglavlju 4 (točka 4.5.2.1)*, a koja predstavlja eksperimentalne rezultate pojedine grupe modela (GRUPA I-IV\_eksperiment), također, prikazani su i numerički rezultati za svaku grupu modela (GRUPA I-IV\_numerički).

Podsjetimo se, modeli GRUPE I su modeli armirano-betonskog okvira ispunjenog sa zidnim ispunom od opečnih blokova MO10 (jaki zidni ispun), GRUPA II su modeli armirano-betonskog okvira ispunjenoga sa zidnim ispunom od opečnih blokova MO5 (srednji zidni ispun), GRUPA III su modeli armirano-betonskog okvira ispunjenog sa zidnim ispunom od porobetonskih blokova MO2,5 (slabi-meki zidni ispun) dok je GRUPA IV model praznog armirano-betonskoga okvira.

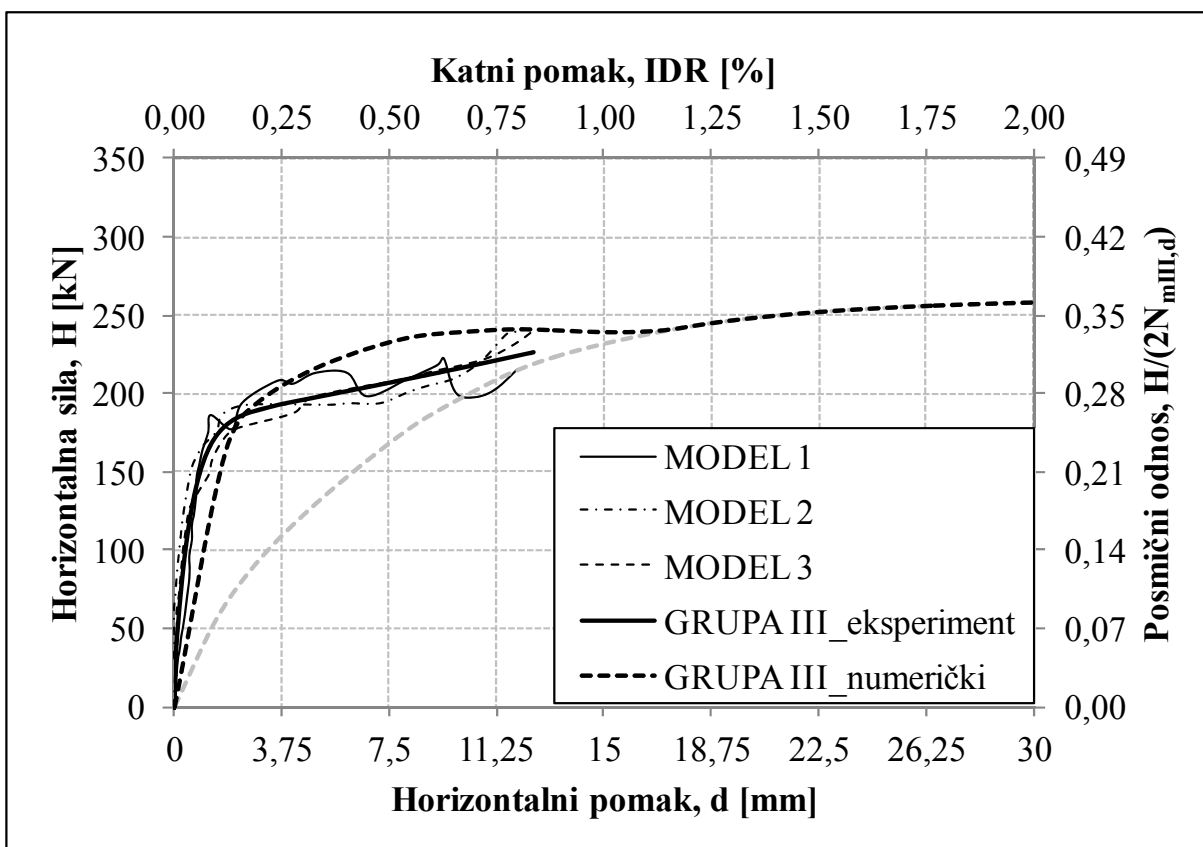
Na *slikama 7.1 do 7.4* može se vidjeti razlika poprečne nosivosti dobivene na osnovu eksperimentalnih i numeričkih rezultata, koja će u nastavku biti detaljnije objašnjena i prikazana u iznosima.



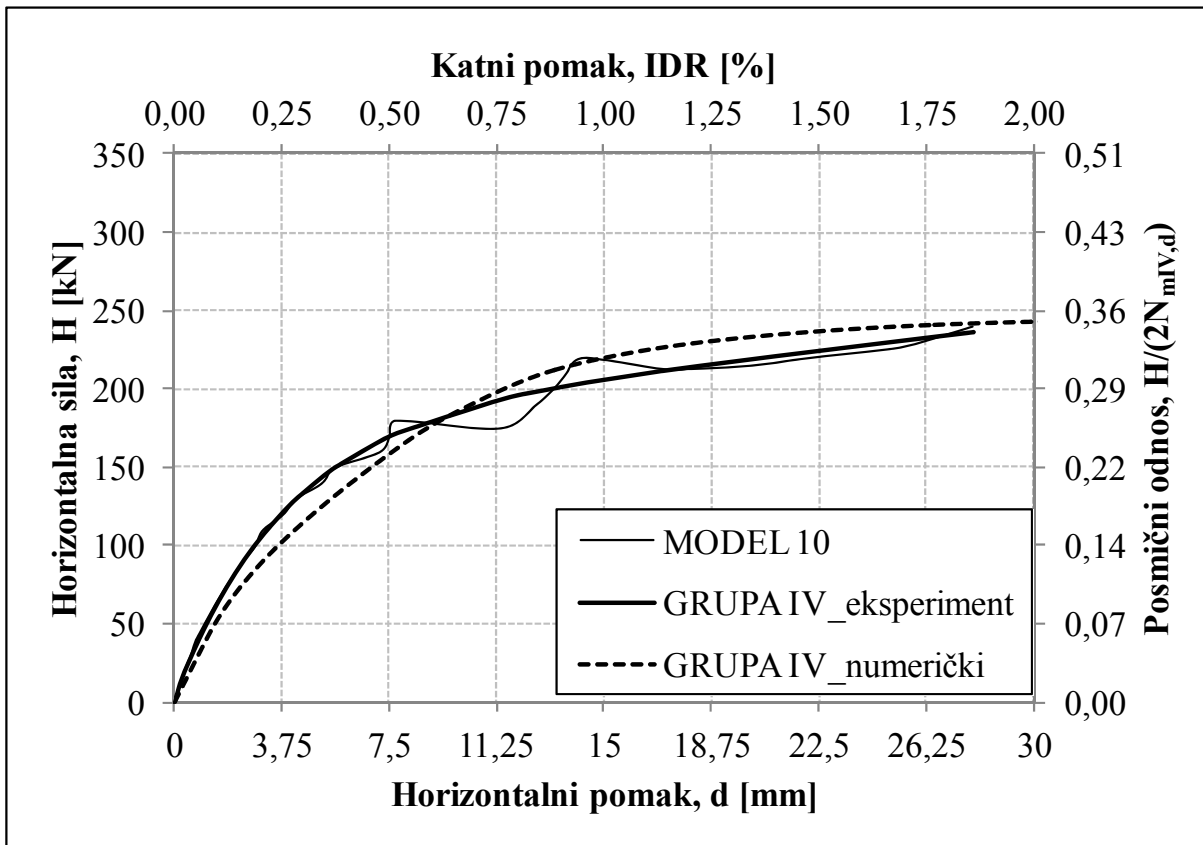
Slika 7.1 Eksperimentalnih i numerički rezultati poprečne nosivosti za modele GRUPE I



Slika 7.2 Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne nosivosti za modele GRUPE II

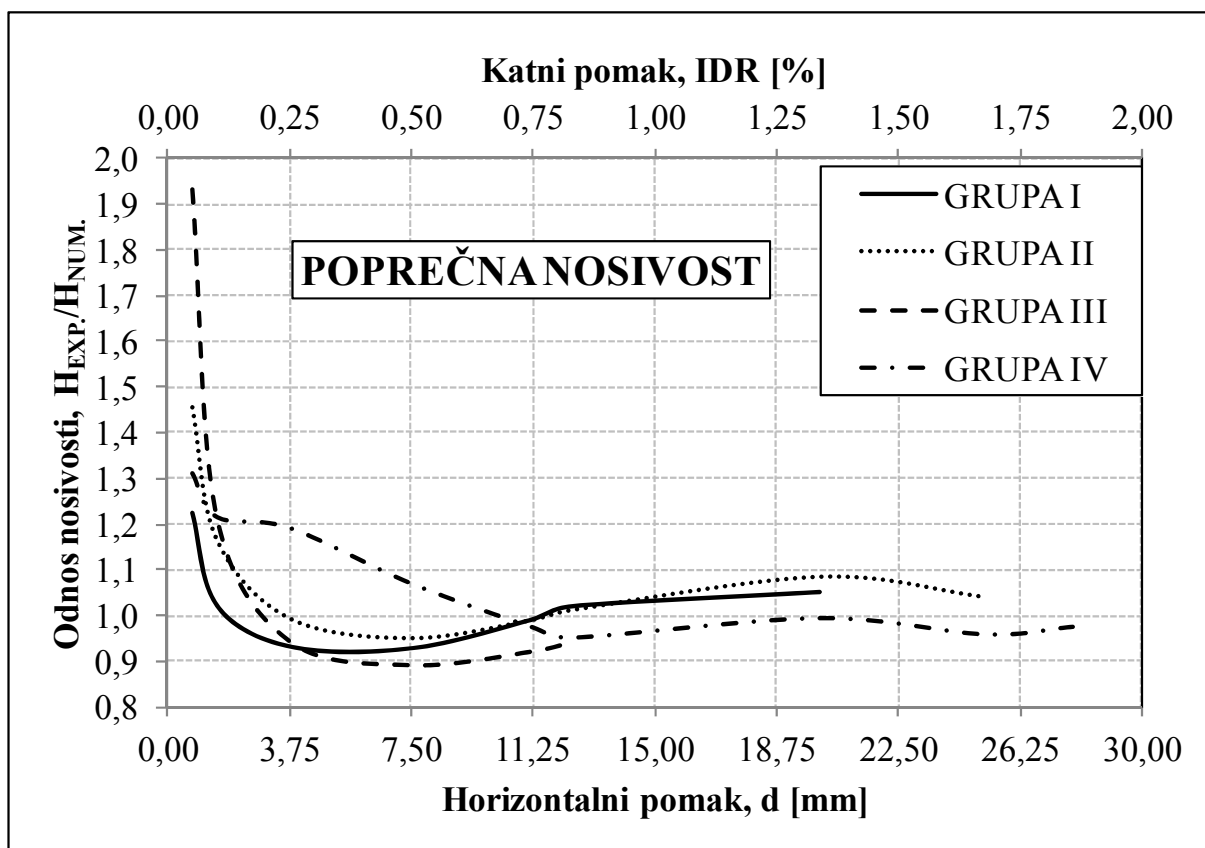


Slika 7.3 Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne nosivosti za modele GRUPE III



Slika 7.4 Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne nosivosti za modele GRUPE IV

Promatrajući primarne krivulje (GRUPA I-IV\_eksperiment i GRUPA I-IV\_numerički) na *slikama 7.1* do *7.4* i stavljajući ih u međusobni odnos dobivamo *sliku 7.5*. Na *slici 7.5* prikazan je odnos, odnosno razlike između poprečne nosivosti, dobivene na osnovu eksperimentalnih i numeričkih rezultata za pojedine GRUPE modela.



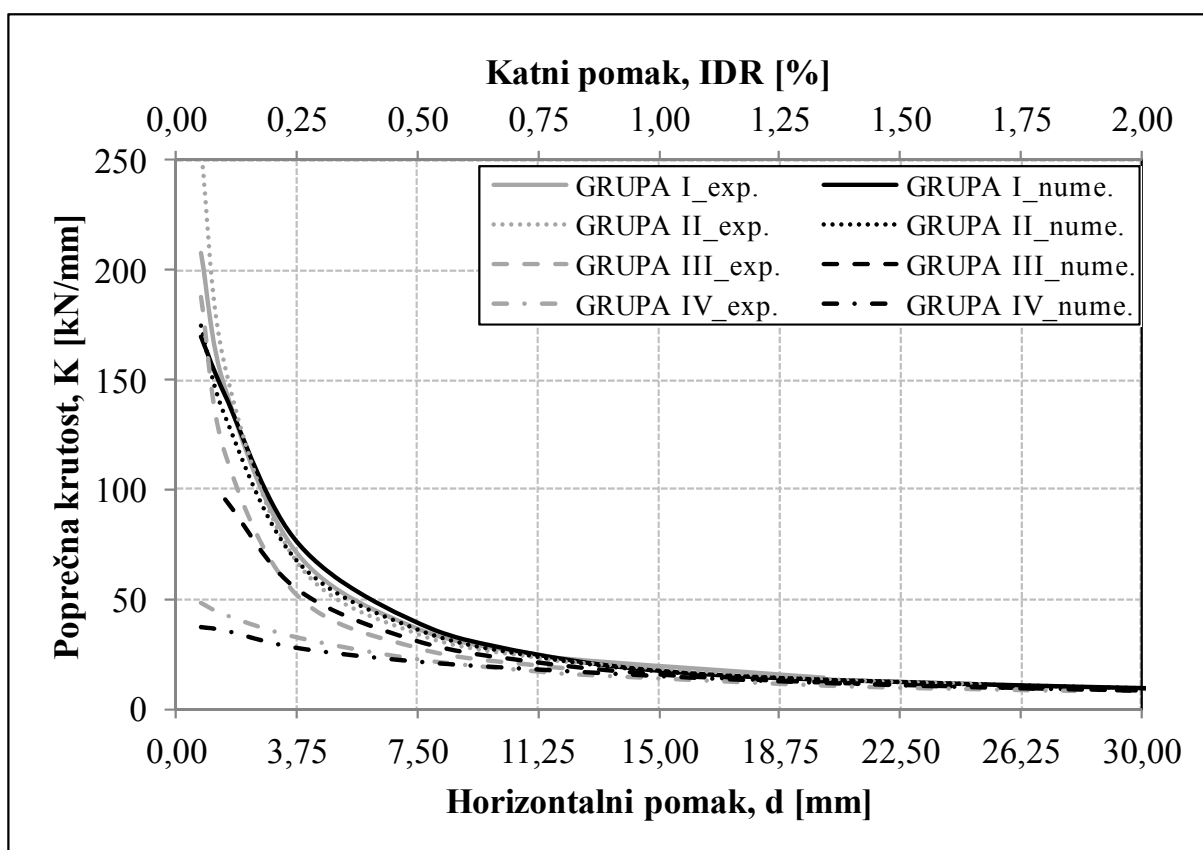
**Slika 7.5** Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata poprečne nosivosti za modele GRUPE I, II, III i IV

Sada, na *slici 7.5* jasno možemo vidjeti razliku, odnosno odnos dobivenih eksperimentalnih i numeričkih rezultata za sve GRUPE modela. Pa tako, s navedene slike vidimo kako su najveće razlike poprečne nosivosti pri malim nivoima katnih pomaka (do 0,05% katnog pomaka), te se razlike kreću od 23% do 93%.

Najveća razlika pojavljuje se kod modela GRUPE III, dok je najmanja kod modela GRUPE I. Povećanjem katnih pomaka (od 0,05%) ta se razlika znatno smanjuje. Pa tako, recimo za katni pomak od 0,75% razlike između poprečne nosivosti dobivene eksperimentalnim i numeričkim rezultatima manje su od 10% za sve GRUPE modela, što je sasvim prihvatljivo i u granicama je dobivenih sličnih odnosa raznih autora dostupnih u literaturi. Daljnjim povećanjem nivoa katnih pomaka taj se odnos, tj. razlika još više smanjuje.

### 7.3 USPOREDBA REZULTATA POPREČNE KRUTOSTI

Poprečna krutost (sekantna krutost) pojedinih GRUPA modela prikazana je pomoću krivulja dobivenih iz odnosa poprečne (horizontalne) sile i pripadajućeg horizontalnog pomaka. Eksperimentalni rezultati poprečne krutosti dobiveni su na osnovu primarne krivulje, a koja je dobivena optimalizacijom eksperimentalnih rezultata, kako je to objašnjeno u prethodnoj točki poglavlja. Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne krutosti za pojedine GRUPE modela prikazani su na *slici 7.6*. Na istoj slici možemo vidjeti i vrijednosti poprečne krutosti dobivene na osnovu eksperimentalnih i numeričkih rezultata u ovisnosti o horizontalnom pomaku na primarnoj osi i katnom pomaku na sekundarnoj osi.

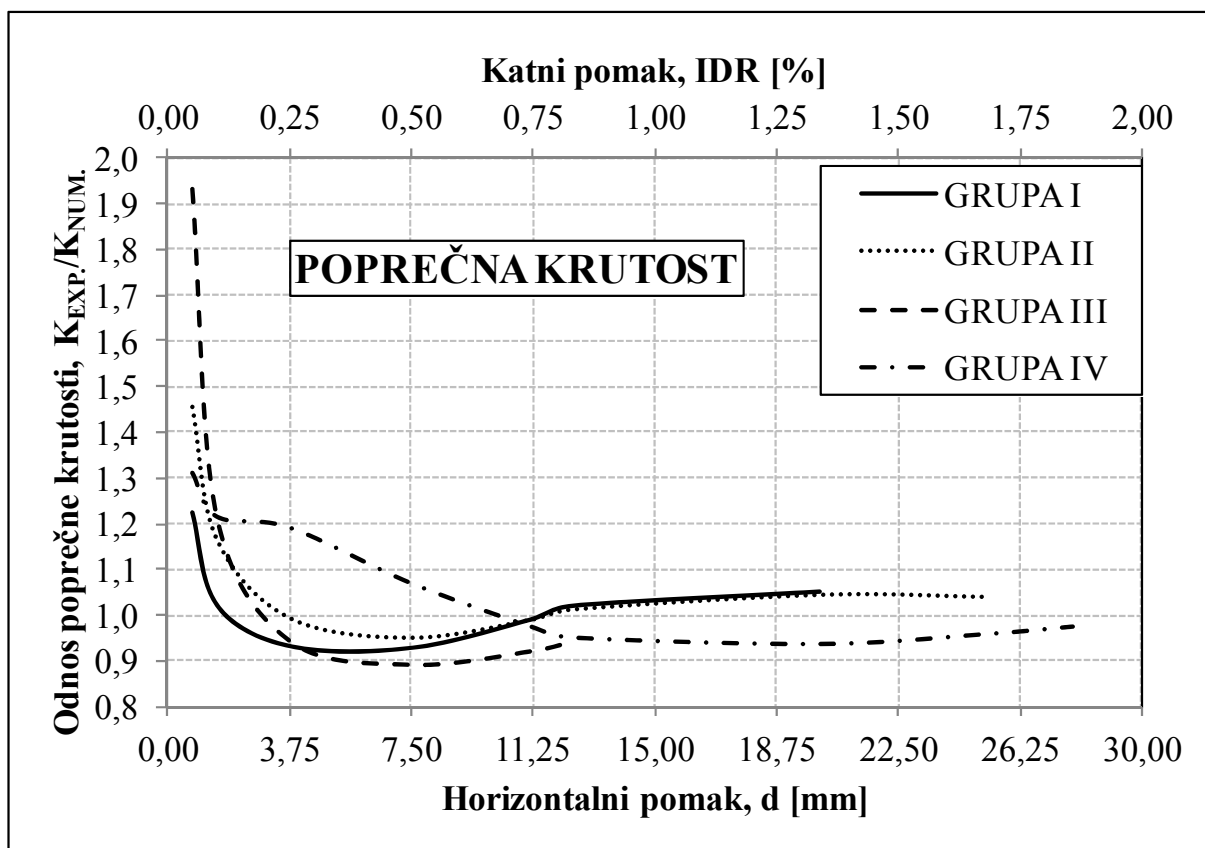


Slika 7.6 Eksperimentalni i numerički rezultati poprečne krutosti za modele GRUPE I, II, III i IV

Rezultati prikazani na *slici 7.6* neće se detaljno objašnjavati, budući da su već detaljno objašnjeni u poglavljima navedenima u uvodu. Možemo samo spomenuti kako je vidljivo opadanje rezultata poprečne krutosti s povećanjem nivoa katnih pomaka kod svih GRUPA modela dobivenih eksperimentalno ili numerički. Najizraženije opadanje poprečne krutosti vidljivo je u području katnih pomaka od 0,05%-0,75% kod svih GRUPA modela, daljnjim povećanjem katnih pomaka poprečna krutost armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom približava se poprečnoj krutosti praznoga armirano-betonskoga okvira.

Iznosi poprečne krutosti pojedinih GRUPA modela dobivenih eksperimentalno i numerički, također, mogu se iščitati sa *slike 7.6*.

Nama, puno zanimljivija, međusobna je usporedba poprečne krutosti dobivene na osnovu eksperimentalnih i numeričkih rezultata, a koja je prikazana na *slici 7.7*.



Slika 7.7 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata poprečne krutosti za modele GRUPE I, II, III i IV

Prvo što možemo primijetiti jest, da je *slika 7.7* gotovo identična *slici 7.5*. Ovo nije nikakvo iznenađenje ako znamo da smo poprečnu krutost dobili iz primarnih krivulja poprečne nosivosti, a što je na početku i kazano.

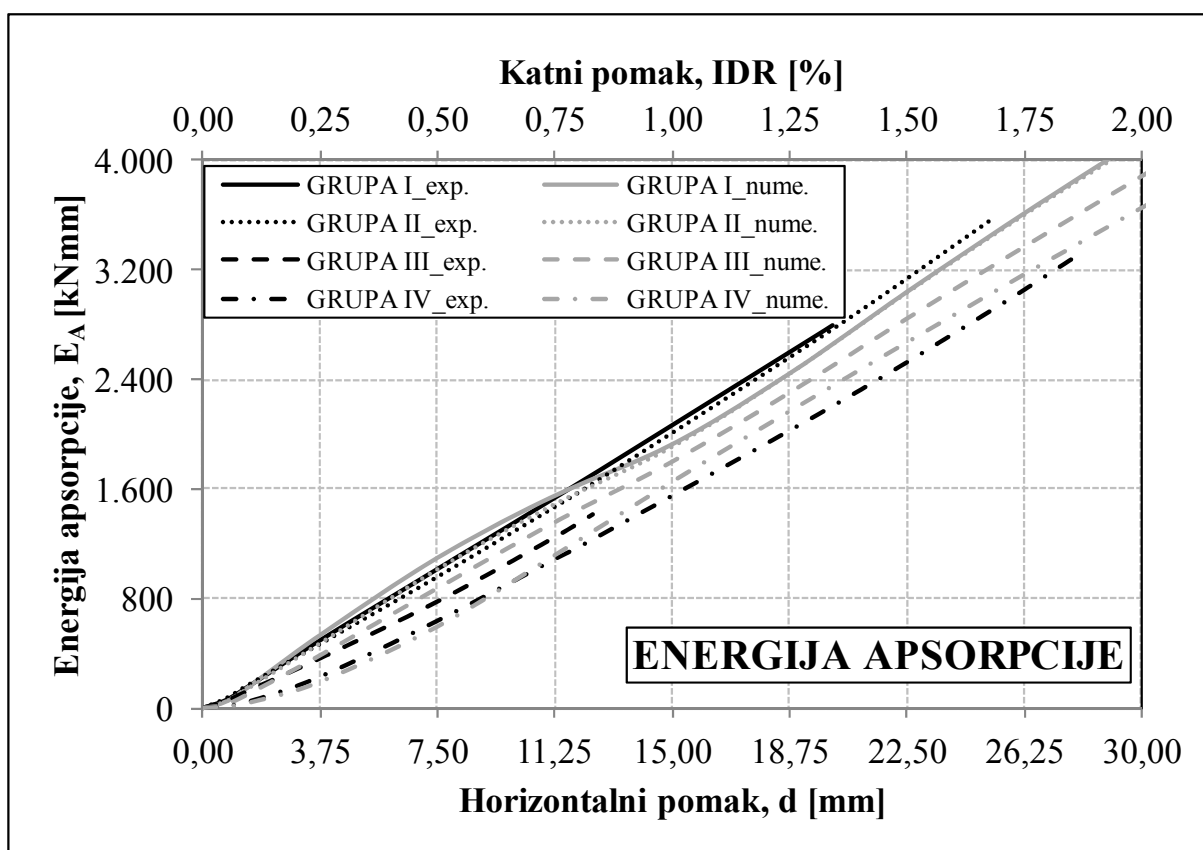
Zaključci vezani za *sliku 7.7* su onima koje smo dali za *sliku 7.5*. No, spomenut ćemo kako se najveća razlika pojavljuje kod modela GRUPE III, dok je najmanja kod modela GRUPE I. Povećanjem katnih pomaka (od 0,05%) ta se razlika znatno smanjuje. Pa tako, recimo za katni pomak od 0,75%, razlike između poprečne krutosti, dobivene eksperimentalnim i numeričkim rezultatima, manje su od 10% za sve GRUPE modela. Daljnjim povećanjem nivoa katnih pomaka taj se odnos, tj. razlika još više smanjuje.

Usporedbe eksp. i numerički dobivene poprečne krutosti u odnosu na početnu krutost ( $K/K_0$ ), kao i usporedbe poprečnih krutosti u odnosu na poprečnu krutost modela GRUPE IV ( $K/K_{IV}$ ), neće nam dati ništa novo pa se neće ni razmatrati, odnosno vršiti usporedba.

## 7.4 USPOREDBA REZULTATA ENERGIJE APSORPCIJE

Zadnja usporedba u ovome poglavlju napravljena je za energiju apsorpcije koja je dobivena na osnovu eksperimentalnih (*točka 4.5.6*) i numeričkih rezultata (*točka 6.5.3*). Također, postupak dobivanja vrijednosti energije apsorpcije detaljno je opisan u malo prije navedenim točkama pa se ovdje neće ponavljati.

Količine energije apsorpcije za pojedine GRUPE modela dobivene eksperimentalno i numerički mogu se iščitati sa *slike 7.8* u ovisnosti o horizontalnome pomaku, odnosno katnome pomaku prikazanom na istoj slici na sekundarnoj osi. Kao i kod poprečne krutosti, ni ovdje nećemo detaljno objašnjavati *sliku 7.8*, budući je detaljno objašnjena u navedenim poglavljima u uvodu, odnosno točkama kako je ovdje napisano.

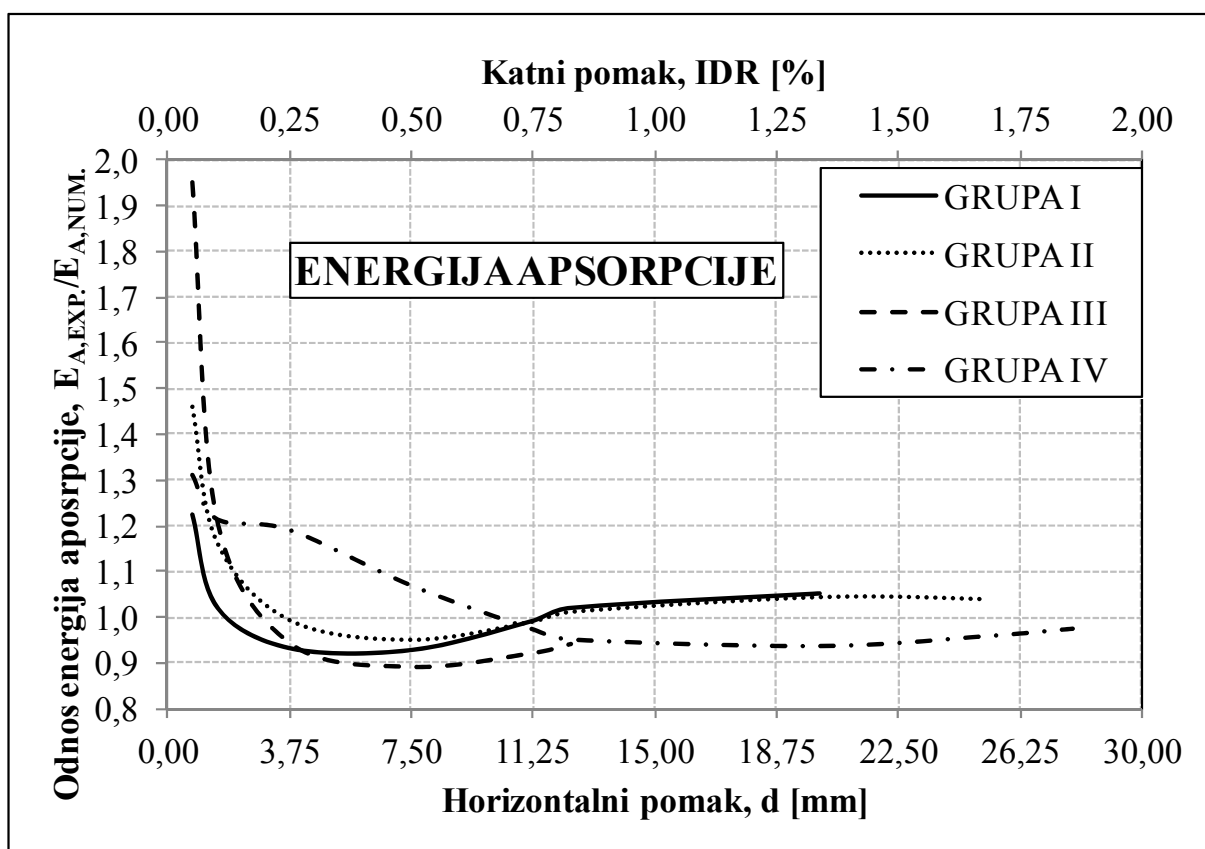


**Slika 7.8** Eksperimentalni i numerički rezultati energije apsorpcije za modele GRUPE I, II, III i IV

Ipak, možemo reći promatrajući *sliku 7.8* kako je apsorbirana energija kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od opečnih blokova (GRUPA I i II) veća od one kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom od porobetonskih blokova (GRUPA III), kako kod eksperimentalnih, tako i kod numeričkih rezultata.

Isto tako, apsorbirana energija kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom veća je nego kod praznoga armirano-betonskoga okvira. Iz ovoga proizlazi kako jači zidni ispun ima veći kapacitet apsorpcije (primanja) energije.

Kao i kod prethodne dvije usporedbe, i ovdje je napravljena međusobna usporedba energije apsorpcije dobivene na osnovu eksperimentalnih rezultata i one dobivene na osnovu numeričkih rezultata, *slika 7.9*.



Slika 7.9 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata energije apsorpcije za modele GRUPE I, II, III i IV

Kod usporedbe eksperimentalnih i numeričkih rezultata energije apsorpcije za sve GRUPE modela dolazimo do iste slike, tj. do odnosa kao i kod poprečne nosivosti, odnosno poprečne krutosti. Opet, ni ovo nije iznenađujuće ako malo bolje pogledamo kako smo dobili količine pojedinih GRUPA modela, bilo na osnovu eksperimentalnih (*točka 4.5.6*) ili numeričkih (*točka 6.5.3*) rezultata.

Zaključci vezani za *sliku 7.9* identični su onima navedenima kod poprečne nosivosti, odnosno poprečne krutosti pa se ovdje više neće spominjati.



## 7.5 ZAKLJUČAK POGLAVLJA

Za provedenu usporedbu eksperimentalnih i numeričkih rezultata u pogledu poprečne nosivosti i poprečne krutosti kao najvažnijih parametara ponašanja armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom, i energije apsorpcije možemo u kratkim crtama reći sljedeće u pogledu sve tri usporedbe:

- Najizraženije opadanje poprečne krutosti, poprečne nosivosti i energije apsorpcije vidljivo je u području katnih pomaka od 0,05%-0,75% kod svih GRUPA modela. Daljnjim povećanjem nivoa katnih pomaka poprečna nosivost, poprečna krutost i energija apsorpcije armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom približava se poprečnoj nosivosti, poprečnoj krutosti i energiji apsorpcije praznoga armirano-betonskoga okvira.
- Najveća razlika u poprečnoj nosivosti, poprečnoj krutosti i energiji apsorpcije pojavljuje se kod modela GRUPE III, dok je najmanja kod modela GRUPE I. Povećanjem katnih pomaka (od 0,05%) ta se razlika znatno smanjuje. Pa tako, recimo za katni pomak od 0,75% razlike između poprečne nosivosti, poprečne krutosti i energije apsorpcije, dobivene eksperimentalnim i numeričkim rezultatima, manje su od 10% za sve GRUPE modela, što je sasvim prihvatljivo i u granicama je dobivenih sličnih odnosa raznih autora dostupnih u literaturi. Daljnjim povećanjem nivoa katnih pomaka taj se odnos, tj. razlika još više smanjuje kod sve tri usporedbe.

Nakon provedene usporedbe eksperimentalnih i numeričkih rezultata možemo reći da numerički modeli dobro opisuju ponašanje armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom od opečnih blokova, dok malo lošije oni sa zidnim ispunom od porobetonskih blokova, te se mogu koristiti za daljnje analize. Najveće razlike pojavljuju se kod modela GRUPE III, tj. kod armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom od porobetonskih blokova (slabi zidni ispun). Ovo možemo donekle objasniti i time da je kod ove vrste zidnoga ispuna situacija složenija nego kod ostalih, prije svega misli se na odnos tlačne čvrstoće ljepila (morta) i samoga elementa zidnoga ispuna. Iz ovoga, nesrazmjerno visokog odnosa ( $14,20/1,19=11,93$ ), proizlaze i uočene razlike. Kod zidnoga ispuna od opečnih blokova odnos tlačne čvrstoće morta i tlačne čvrstoće elementa zidnog ispuna iznosi 1,12 za MO10 i 1,29 za MO5. Ovo je jedan od elemenata za daljnje istraživanje zidnoga ispuna od porobetonskih blokova, a koji nije obuhvaćen u ovome radu.



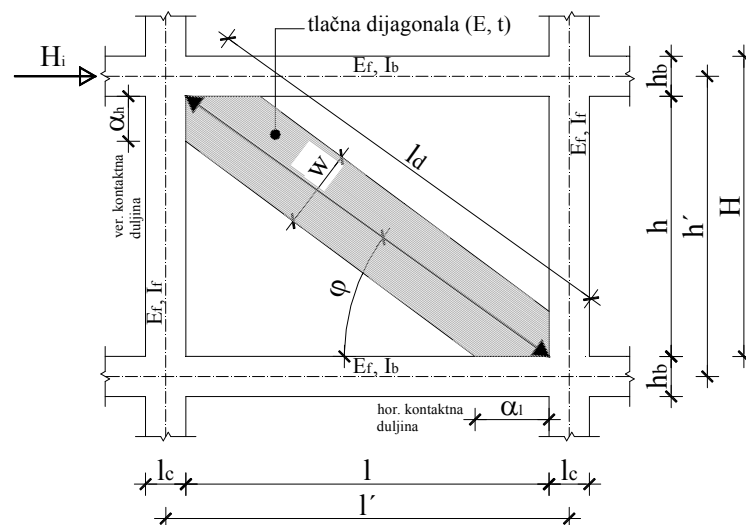
## POGLAVLJE 8: PARAMETARSKA ANALIZA

### 8.1 UVOD

Parametarska analiza provedena je na osnovu numeričkih modela, odnosno numeričkih rezultata. Usvojeni numerički MODEL je model GRUPE I. Ulazni podatci su identični onima kako je opisano u *Poglavljju 6*, odnosno *točki 6.4* za model GRUPE I. Promjene ulaznih podataka koje izaziva određeni utjecaj, također, napravljene su u svemu prema maloprije navedenom poglavljju, odnosno točki. Na takvom kalibriranom numeričkom modelu analizirani su utjecaji:

- geometrije armirano-betonskog okvira,
- geometrije tlačne dijagonale u pogledu njezine širine,
- čvrstoće dijagonale,
- vrijednosti vertikalnog opterećenja u stupovima armirano-betonskog okvira,
- količine armature u stupovima armirano-betonskog okvira,
- oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira,
- broja polja armirano-betonskog okvira i
- metode analize (proračuna), tj. nanošenja horizontalnog opterećenja.

U nastavku će biti navedenim redosljedom detaljno opisani navedeni utjecaji kao i njihovi numerički rezultati u pogledu: poprečne nosivosti, sila u dijagonalama i unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira. Podsjetimo, zidni ispun modeliran je pomoću numeričkog makro-modela, odnosno pomoću ekvivalentne tlačne dijagonale, *slika 8.1*.



**Slika 8.1** Model ekvivalentne tlačne dijagonale

Numerički rezultati za navedene utjecaje dobiveni su statičkom pushover analizom. Razlika u numeričkim rezultatima između statičke pushover i time history analize prikazat će se u posljednjem utjecaju (metode analize). Značenje oznaka na *slici 8.1* pogledati u *Poglavljju 6*, odnosno *točki 6.2.1*.

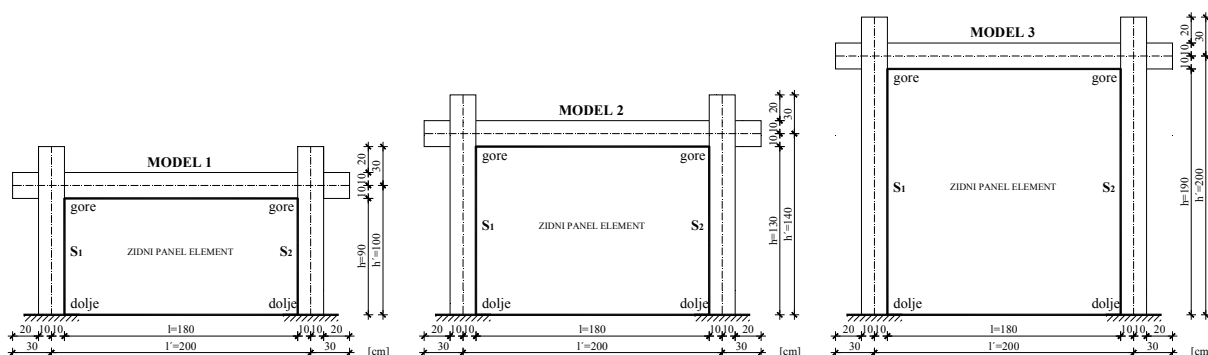
## 8.2 UTJECAJ GEOMETRIJE ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA

Geometrija armirano-betonskoga okvira (a samim tim i zidnog ispuna) analizirana je kroz odnos visine i duljine armirano-betonskog okvira. U tom pogledu napravljena su tri numerička MODELA prema *slici 8.2* s odnosima visine i duljine armirano-betonskog okvira prema *tablici 8.1*.

**Tablica 8.1** Vrijednosti odnosa visine i duljine armirano-betonskog okvira

OZNAKA	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3
$h'/l'$	1000/2000=0,50	1400/2000=0,70	2000/2000=1,00
$h'$ osna visina stupa armirano-betonskog okvira, $l'$ osna duljina grede armirano-betonskog okvira.			

Ulazni podatci numeričkih modela jednaki su u svemu ulaznim podacima modela GRUPE I, kako je to detaljno opisano u *Poglavljju 6*, odnosno *točki 6.4*.



**Slika 8.2** Prikaz numeričkih MODELA u ovisnosti o geometriji

Jedine razlike ulaznih podataka odnose se na širinu tlačne dijagonale i parametre koje ona povlači, budući da njezina širina ovisi o njezinoj duljini. Vrijednosti njezine širine za pojedini MODEL prikazane su u *tablici 8.2*, a određuje se kao i kod modela GRUPE I, prema izrazu Smitha (1962).

**Tablica 8.2** Vrijednosti širine tlačne dijagonale

OZNAKA	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3
$w = 0,175 \cdot l_d$ [mm]	352,18	388,56	458,02
$l_d = \sqrt{h^2 + l^2}$ gdje je: h visina zidnog ispuna; l duljina zidnog ispuna. $l_{d,1} = \sqrt{900^2 + 1800^2} = 2012,46mm$ , $l_{d,2} = \sqrt{1300^2 + 1800^2} = 2220,36mm$ , $l_{d,2} = \sqrt{1900^2 + 1800^2} = 2617,25mm$ .			

### 8.2.1 Numerički rezultati utjecaja geometrije

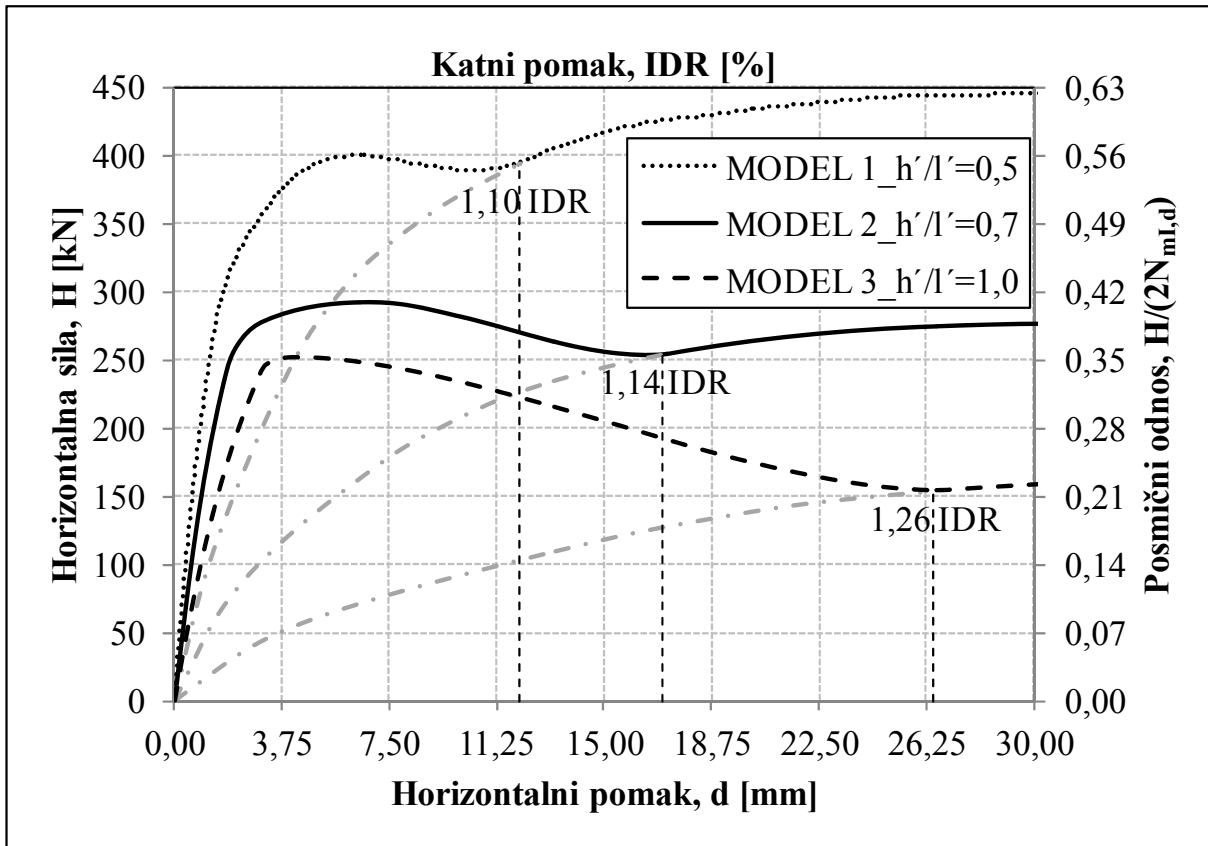
Utjecaj geometrije armirano-betonskoga okvira kod armirano-betonskog okvira ispunjenoga zidnim ispunom prikazan je pomoću primarnih krivulja pojedinih MODELA u ovisnosti o visini i duljini armirano-betonskoga okvira. Na *slici 8.3* prikazani su statičkom pushover analizom dobiveni numerički rezultati utjecaja geometrije na poprečnu nosivost. Kako je rečeno, poprečna nosivost iskazana je pomoću primarnih krivulja koje su definirane odnosom poprečne (horizontalne) sile i horizontalnoga pomaka. Na sekundarnim osima primarnih krivulja nalazi se posmični odnos, odnosno katni pomak pri kojem poprečno opterećenje u potpunosti preuzima sam (prazan) armirano-betonski okvir.

S navedene slike, prvo možemo primijetiti kako se s povećanjem odnosa visine i duljine armirano-betonskoga okvira smanjuje poprečna nosivost. S druge strane, smanjenjem toga odnosa povećava se poprečna nosivost. Isti zaključak vrijedi i za poprečnu krutost. Isto tako, na *slici 8.3* možemo vidjeti kako je najveći doprinos zidnoga ispuna (tlačne dijagonale) na poprečnu nosivost uočljiv kod najvećeg odnosa visine i duljine armirano-betonskoga okvira. Sa smanjenjem toga odnosa smanjuje se i doprinos zidnoga ispuna na poprečnu nosivost. Ovaj zaključak bit će dodatno potkrijepljen sa silama u dijagonalama zidnog ispuna.

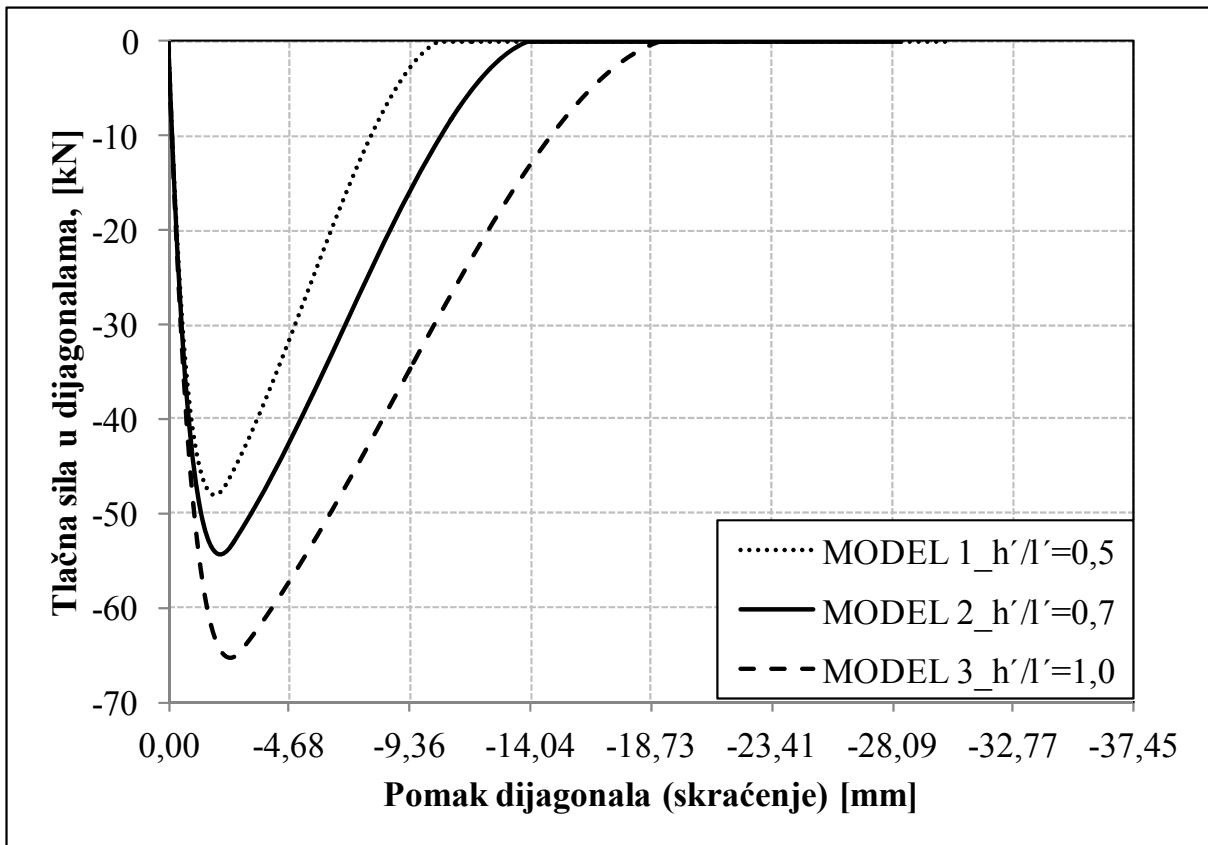
Na *slici 8.3*, osim primarnih krivulja pojedinih modela, prikazane su i primarne krivulje istih modela u slučaju bez zidnoga ispuna (svjetlija linija crta-točka), također, u nastavku za sve ostale utjecaje bit će na isti način prikazana.

Utjecaj geometrije armirano-betonskoga okvira na sile u dijagonalama zidnoga ispuna prikazane su na *slikama 8.4* i *8.5*.

Sa *slike 8.4* možemo vidjeti da je najveća tlačna sila u dijagonali zidnoga ispuna kod najvećeg odnosa visine i duljine armirano-betonskoga okvira. Samim time, i doprinos zidnoga ispuna najveći je kod najvećeg odnosa visine i duljine armirano-betonskoga okvira. Ovaj zaključak podudara se sa zaključkom izvedenim u slučaju poprečne nosivosti. Smanjenjem toga odnosa smanjuje se i tlačna sila u dijagonali zidnoga ispuna, ali se povećava poprečna nosivost.



Slika 8.3 Utjecaj geometrije armirano-betonskog okvira na poprečnu nosivost

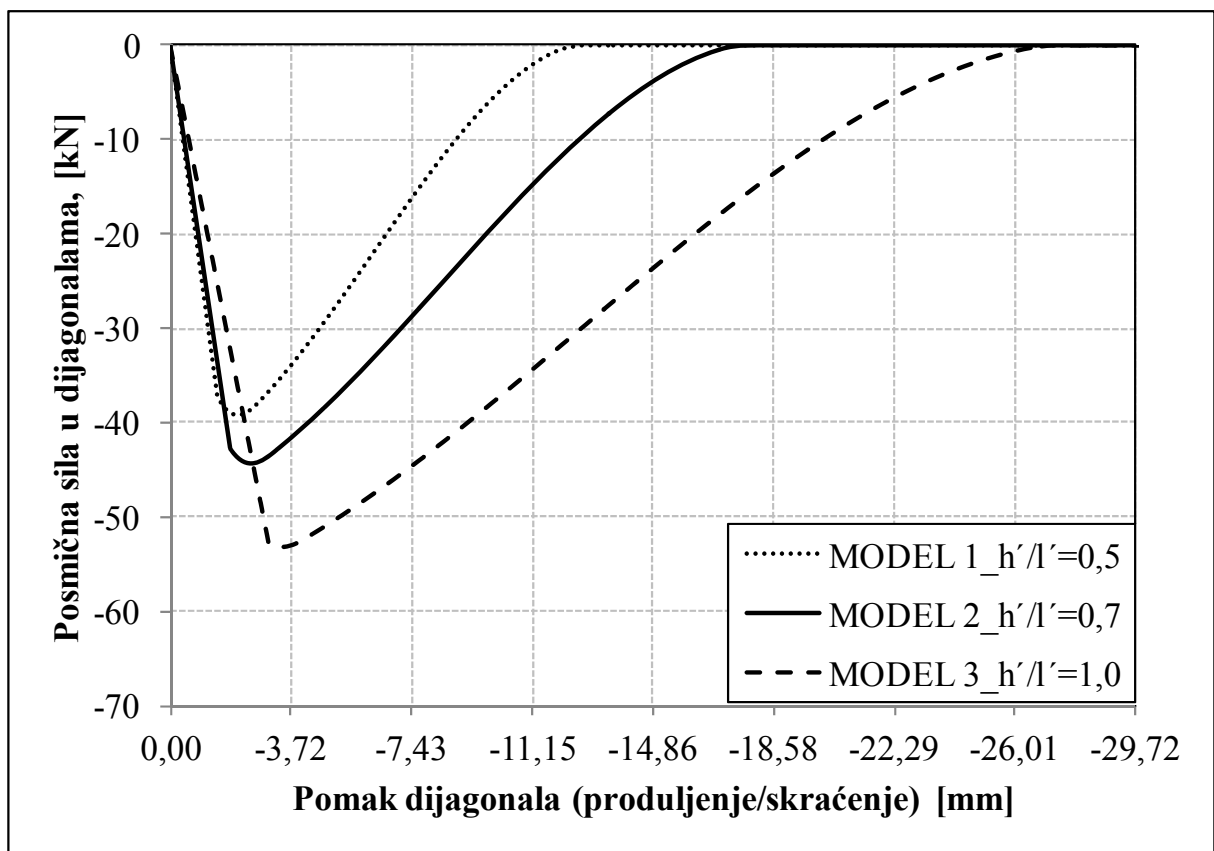


Slika 8.4 Utjecaj geometrije armirano-betonskog okvira na silu u tlačnoj dijagonali

Promatrajući utjecaj geometrije armirano-betonskoga okvira na sile u posmičnim dijagonalama, možemo doći do istih zaključaka kao i kod sila u tlačnim dijagonalama. Prikaz posmične sile u dijagonalama dan je na *slici 8.5*.

Osim razlika u iznosima sila u dijagonalama- tlačne sile veće su od posmičnih sila u dijagonalama zidnoga ispuna, važno je za primijetiti kako je pomak posmičnih dijagonala veći od pomaka tlačnih dijagonala.

Pomak tlačne dijagonale zapravo je njezin uzdužni pomak (skraćenje), dok je pomak posmične dijagonale ustvari horizontalni pomak (produljenje/skraćenje) cijeloga sustava.



**Slika 8.5** Utjecaj geometrije armirano-betonskog okvira na silu u posmičnoj dijagonali

Tablični prikaz vrijednosti maksimalnih sila za pojedini model dan je u *tablici 8.3*. U tablici su prikazane vrijednosti koje potvrđuju naprijed sve navedeno.

**Tablica 8.3** Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju geometrije

MODEL	M1	M2	M3	M1/M2	M3/M2
Max. poprečna nosivost [kN]	400	293	252	1,37	0,86
Sila u tlačnim dijagonalama [kN]	-48	-54	-64	0,88	1,20
Sila u posmičnim dijagonalama [kN]	-39	-44	-53	0,88	1,20

Treba spomenuti, kako su ovdje (na *sluci 8.4* i *8.5*, odnosno *tablici 8.3*) prikazane sile samo u jednoj tlačnoj i jednoj posmičnoj dijagonali zidnoga ispuna. U druge dvije dijagonale (tlačnoj i posmičnoj) zidnoga ispuna sile su iste pa se zbog jednostavnosti prikaza nisu prikazivale niti će se u nastavku kod ostalih analiza utjecaja prikazivati.

Unutarnje sile u stupovima armirano-betonskoga okvira prikazane su u *tablici 8.4*. Prikazani rezultati unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskoga okvira za navedene modele dobivene su pri horizontalnome pomaku od 5mm (0,33% IDR). Također, za iste modele prikazani su rezultati unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskoga okvira kada bi bili bez zidnoga ispuna (prazan armirano-betonski okvir).

**Tablica 8.4** Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR)

MODEL / STUP	S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> M [kNm]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> V [kN]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> N [kN]	
	dolje	gore	dolje	gore	dolje	gore
MODEL 1	69,00; 69,24	61,49; 54,02	144,08; 135,97	144,08; 135,97	-310,41; -390,58	-309,60; -389,77
MODEL 1_prazan	69,08; 69,89	58,74; 54,13	141,16; 136,79	141,16; 136,79	-329,99; -388,82	-329,18; -388,03
MODEL 2	47,75; 48,00	45,03; 42,73	70,50; 68,83	70,50; 68,83	-309,15; -375,58	-307,94; -374,37
MODEL 2_prazan	48,40; 48,43	43,61; 42,51	69,84; 68,97	69,84; 68,97	-346,68; -372,15	-345,16; -370,94
MODEL 3	29,28; 31,08	28,31; 28,62	29,69; 30,64	29,69; 30,64	-280,57; -372,21	-278,75; -370,39
MODEL 3_prazan	31,12; 31,26	28,51; 28,21	30,61; 30,51	30,61; 30,51	-353,27; -368,78	-351,45; -364,96
Položaj prikazanih unutarnjih sila i oznake stupova prikazane su na <i>sluci 8.2</i> .						

Iz *tablice 8.4*, možemo vidjeti da su nam i unutarnje sile u stupovima najveće kod najmanjeg odnosa visine i duljine armirano-betonskoga okvira. Povećanjem toga odnosa smanjuju se unutarnje sile. Najveće razlike u unutarnjim silama javljaju se kod uzdužnih sila. Raspodjela unutarnjih sila po visini stupa, manje-više, je konstantna kod uzdužne i poprečne sile, dok je kod momenta savijanja uočljiva trokutasta raspodjela.



### 8.3 UTJECAJ ŠIRINE TLAČNE DIJAGONALE

Utjecaj širine tlačne dijagonale proveden je na numeričkom kalibriranom modelu GRUPE I. Za neke od prijedloga raznih autora, a tiču se širine tlačne dijagonale te koji su detaljno opisani u *Poglavlju 6*, odnosno *točki 6.2.1.1*, izvršena je statička pushover analiza i dobiveni su numerički rezultati koji su prikazani i opisani u sljedećoj točki. Širine tlačne dijagonale po nekim autorima, a koje su uzete u razmatranje, prikazane su u **tablici 8.5**.

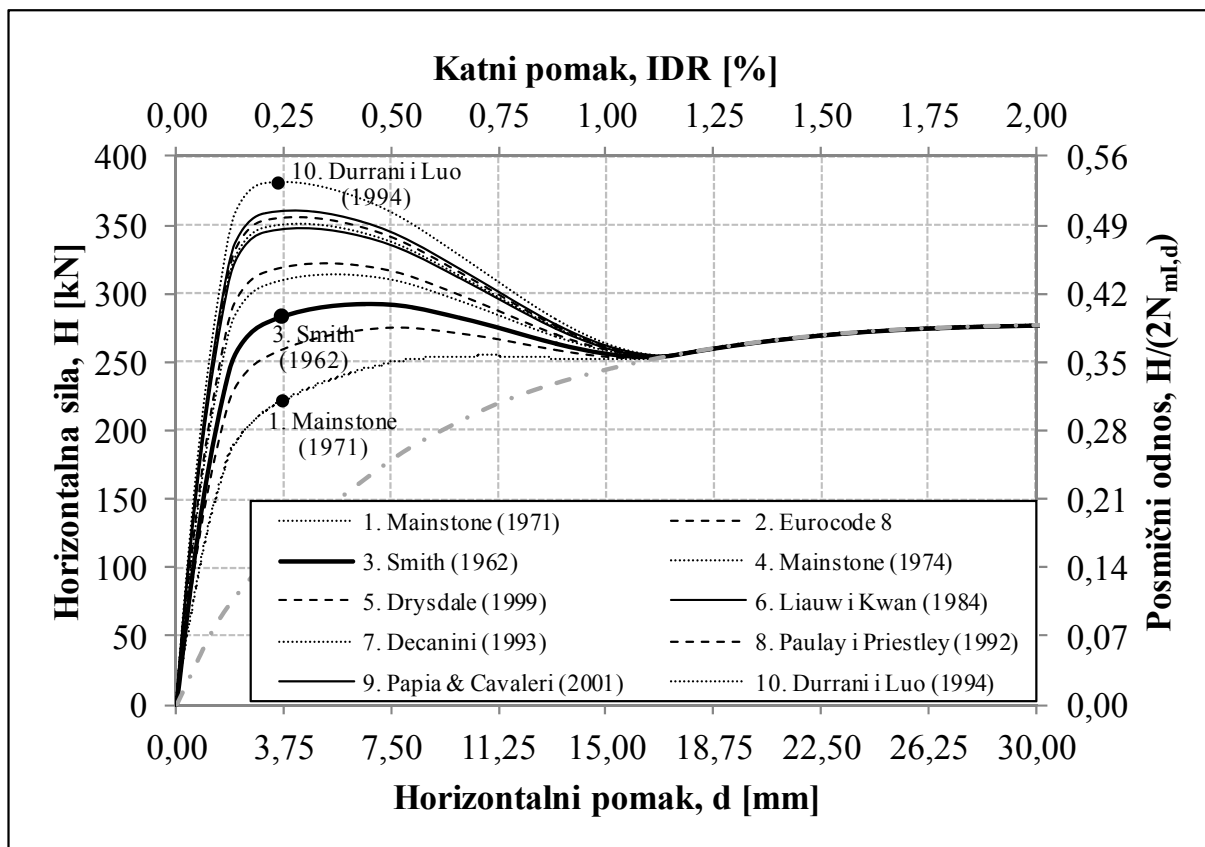
**Tablica 8.5** Vrijednosti širine tlačne dijagonale prema raznim autorima

w [mm]	IZRAZ <sup>1)</sup>	AUTOR <sup>1)</sup>
388,56	(6.4)	Smith (1962)
236,24	(6.7)	Mainstone (1971)
448,15	(6.10)	Mainstone (1974)
537,50	(6.15)	Liau w i Kwan (1984)
555,09	(6.21)	Paulay i Priestley (1992)
544,25	(6.22)	Decanini (1993)
614,17	(6.23)	Durrani i Luo (1994)
469,44	(6.25)	Drysdale (1999)
565,13	(6.26)	Papia & Cavaleri (2001)
333,05	(6.27)	Eurocode 8

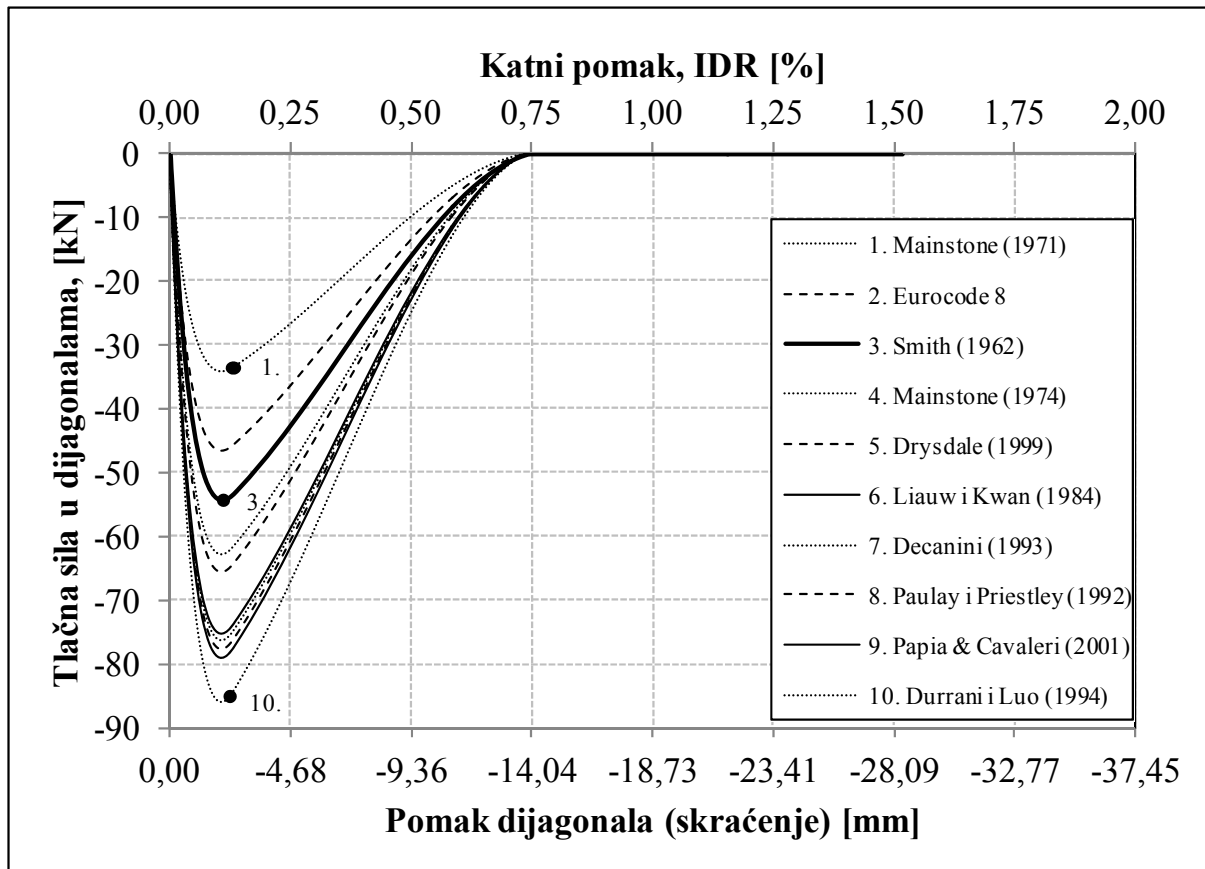
<sup>1)</sup> Širine tlačne dijagonale prema navedenim autorima i izrazima izračunate su za sve ulazne podatke modela GRUPE I prema *Poglavlju 6*, odnosno *točki 6.4*. Sami izrazi, o čemu ovisi i širina tlačne dijagonale, prema pojedinim autorima nalaze se u *Poglavlju 6*, odnosno *točki 6.2.1.1*.

#### 8.3.1 Numerički rezultati utjecaja širine tlačne dijagonale

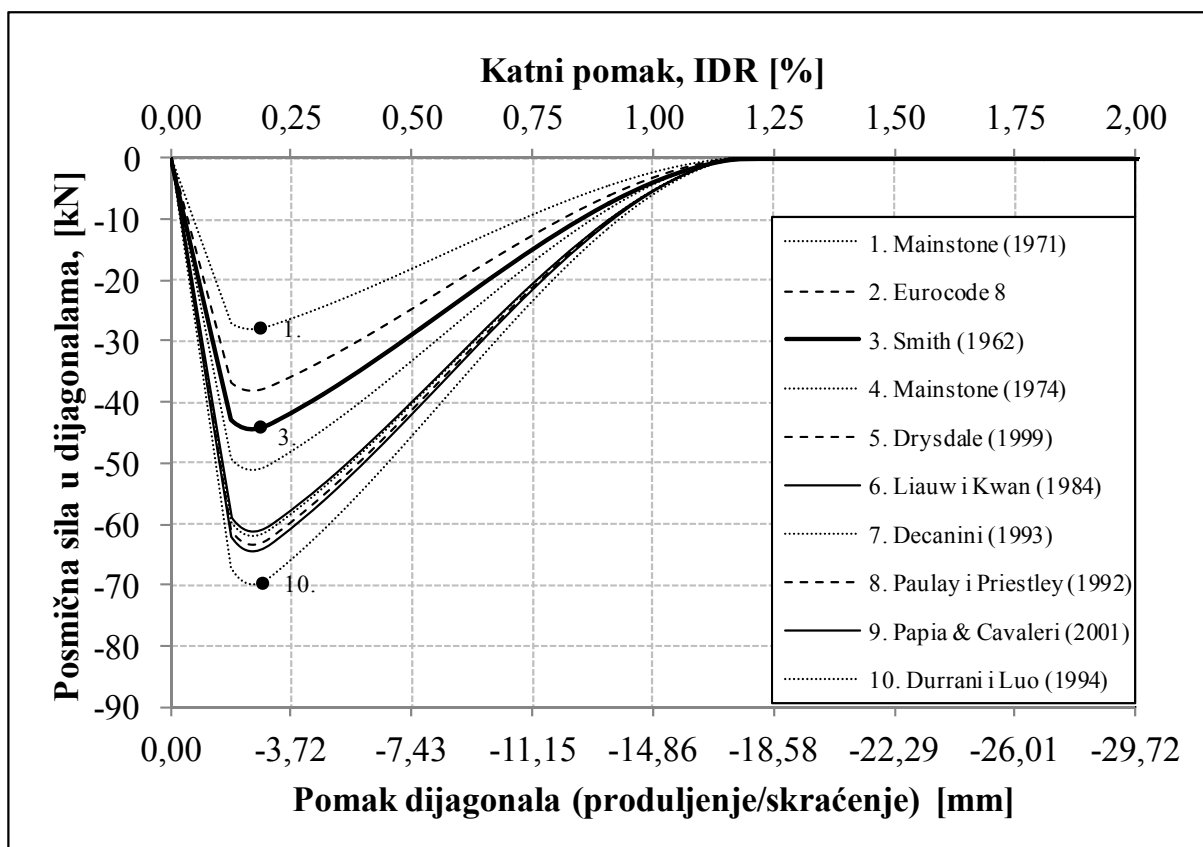
Ako pak, gledamo kako promjena širine tlačne dijagonale prema raznim autorima utječe na poprečnu nosivost iskazanu oblikom primarnih krivulja prikazanih na **slici 8.6**, možemo reći da se s povećanjem širine dijagonale automatski povećava njezina ploština, a samim time i poprečna nosivost, odnosno poprečna krutost armirano-betonskog okvira ispunjenoga zidnim ispunom. Drugim riječima, veća širina tlačne dijagonale znači i veću poprečnu nosivost, odnosno krutost, naravno do određenih nivoa katnih pomaka. Isto je i sa silama u dijagonalama prikazanim na **slikama 8.7** i **8.8**, veća širina- veći iznosi sila.



Slika 8.6 Utjecaj širine tlačne dijagonale na poprečnu nosivost



Slika 8.7 Utjecaj širine tlačne dijagonale na silu u tlačnoj dijagonali



Slika 8.8 Utjecaj širine tlačne dijagonale na silu u posmičnoj dijagonali

Utjecaj promjene širine tlačne dijagonale na iznos poprečne nosivosti nije linearan, dvostruko veća širina tlačne dijagonale ne znači i dvostruko veću poprečnu nosivost. Kod sila u dijagonalama zidnoga ispuna, dvostruko veća širina tlačne dijagonale znači i približno dvostruko veću silu u tlačnoj ili posmičnoj dijagonali. Sve naprijed navedeno prikazano je s brojčanim vrijednostima u *tablici 8.6*.

Tablica 8.6 Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila u ovisnosti o utjecaju širine dijagonale

ŠIRINA DIJAGONALE, $w$ [mm]	236,24 (1. Mainstone)	388,56 (3. Smith)	614,17 (10. Durrani i Luo)
Max. poprečna nosivost [kN]	255	293	381
Sila u tlačnim dijagonalama [kN]	-34	-54	-86
Sila u posmičnim dijagonalama [kN]	-28	-44	-70

Unutarnje sile u stupovima armirano-betonskoga okvira prikazane su u *tablici 8.7*. Prikazani rezultati unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskoga okvira za navedene modele, ovisno o širini tlačne dijagonale, dobivene su pri horizontalnom pomaku od 5mm (0,33% IDR).

Iz **tablice 8.7**, možemo vidjeti kako nam utjecaj širine dijagonale jedino mijenja unutarnje uzdužne sile u stupu armirano-betonskoga okvira. Moment savijanja i poprečna sila ne ovise o utjecaju širine dijagonale (razlike koje se pojavljuju su neznatne). Povećanjem širine dijagonale smanjuje se uzdužna sila u prvome stupu, dok u drugome stupu ne ovisi o širini dijagonale (također, razlike koje se pojavljuju neznatne su). Raspodjela unutarnjih sila po visini stupa, manje-više je konstantna kod uzdužne i poprečne sile, dok je kod momenta savijanja raspodjela trokutasta.

**Tablica 8.7** Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR)

MODEL / STUP	S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> M [kNm]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> V [kN]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> N [kN]	
	dolje	gore	dolje	gore	dolje	gore
1.Mainstone	48,13;	44,78;	70,58;	70,58;	-323,65;	-322,44;
	48,12	42,62	68,83	68,83	-374,82	-373,60
3.Smith	47,75;	45,03;	70,50;	70,50;	-309,15;	-307,94;
	48,00	42,73	68,83	68,83	-375,58	-374,37
10.Durrani i Luo	46,96;	44,93;	69,88;	69,88;	-286,40;	-285,19;
	47,87	42,93	68,89	68,89	-376,65	-375,44

Položaj prikazanih unutarnjih sila i oznake stupova prikazane su na **slici 8.2**.

## 8.4 UTJECAJ ČVRSTOĆE DIJAGONALE

Za različite vrijednosti čvrstoća dijagonale prema **tablici 8.8**, koje su uzete u obzir kod numeričkog kalibriranog modela GRUPE I, statičkom pushover analizom dobiveni su numerički rezultati koji su u nastavku prikazani. Vrijednost čvrstoće dijagonale modela GRUPE I (MODEL 2) smanjena je 30% (MODEL 1), odnosno povećana 30% (MODEL 3).

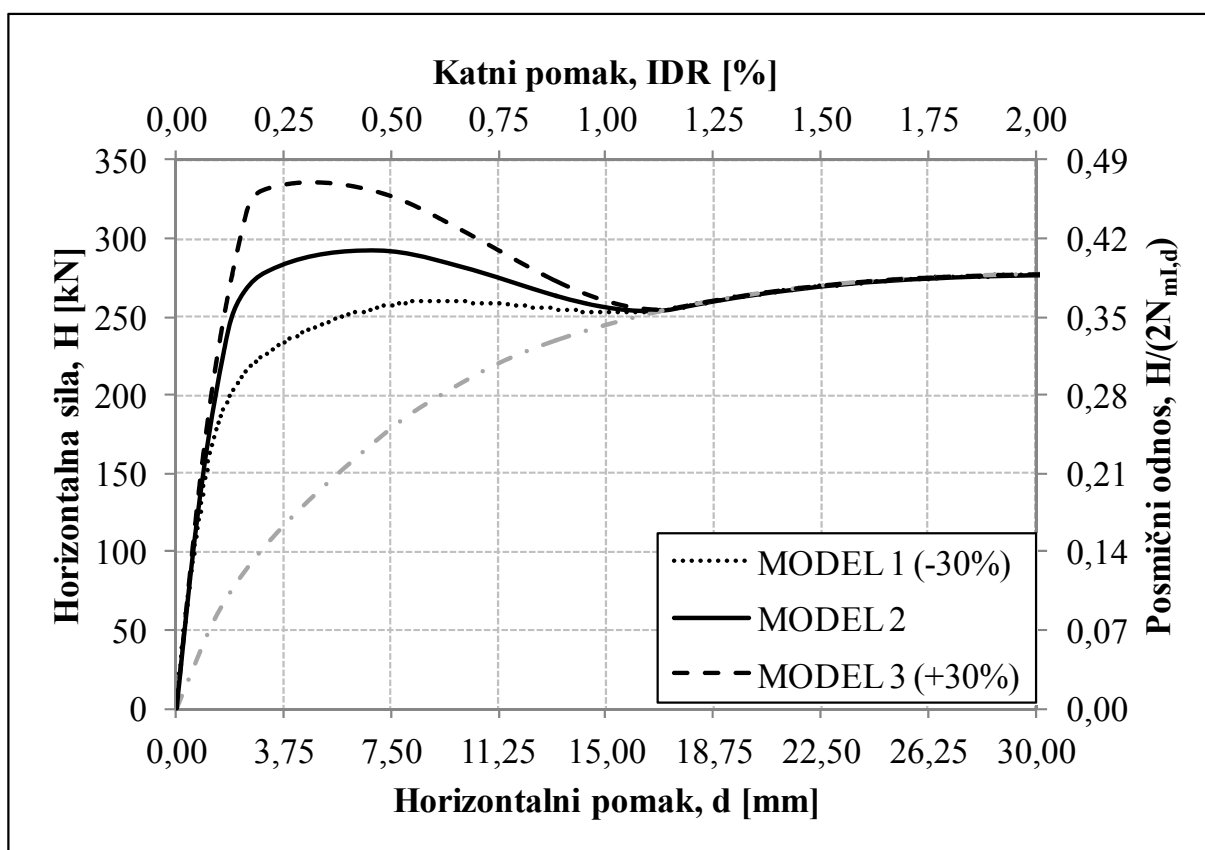
**Tablica 8.8** Prikaz vrijednosti čvrstoće dijagonale

MODEL	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3
Tlačna čvrstoća dijagonale, $f_{m\phi}$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	1,83	2,62	3,41

<sup>1)</sup> Za tlačnu čvrstoću dijagonale uzeta je, ispitivanjem dobivena, srednja vrijednost tlačne čvrstoće zidnog ispuna prema **tablici 3.36**, odnosno **tablici 6.4**.

### 8.4.1 Numerički rezultati utjecaja čvrstoće dijagonale

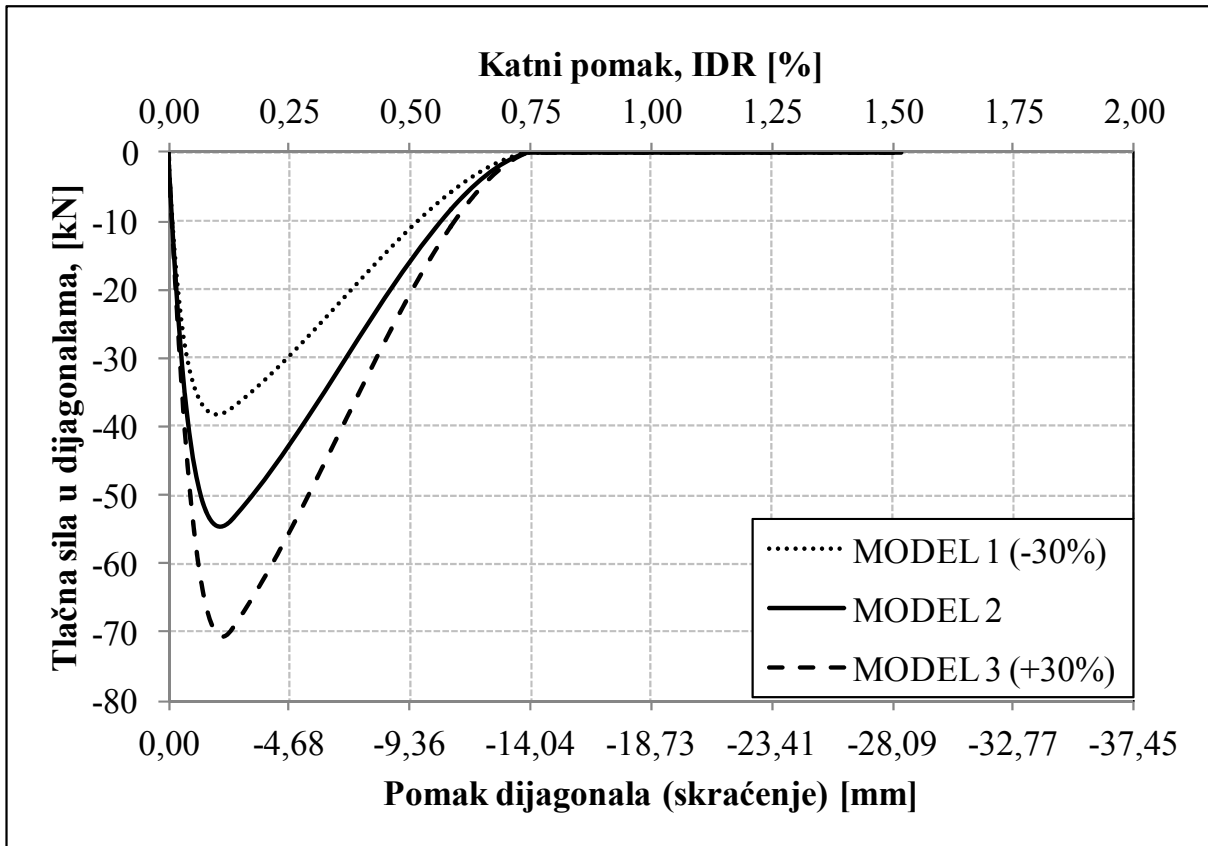
Kao i kod prethodnih analiza utjecaja, i utjecaj tlačne čvrstoće dijagonale prikazan je pomoću primarnih krivulja glede poprečne nosivosti. Na *slici 8.9*. prikazane su primarne krivulje za tri vrijednosti tlačne čvrstoće. Na navedenoj slici možemo vidjeti kako pri malim nivoima katnih pomaka (do 0,05%) čvrstoća dijagonale nema utjecaja na poprečnu nosivost niti na poprečnu krutost, imamo linearno ponašanje. Povećanjem katnih pomaka (od 0,05%) čvrstoća dijagonale dolazi do izražaja tako što se povećava poprečna nosivost i mijenja poprečna krutost. Povećanje ili smanjenje čvrstoće dijagonale od 30% ne znači i povećanje ili smanjenje poprečne nosivosti od 30%, sile u dijagonalama povećaju se za onoliko koliko se i čvrstoća dijagonale poveća (*tablica 8.9*). Zaključke koje smo prethodno naveli možemo potvrditi i promatranjem sila u dijagonalama na *slikama 8.10* i *8.11*.



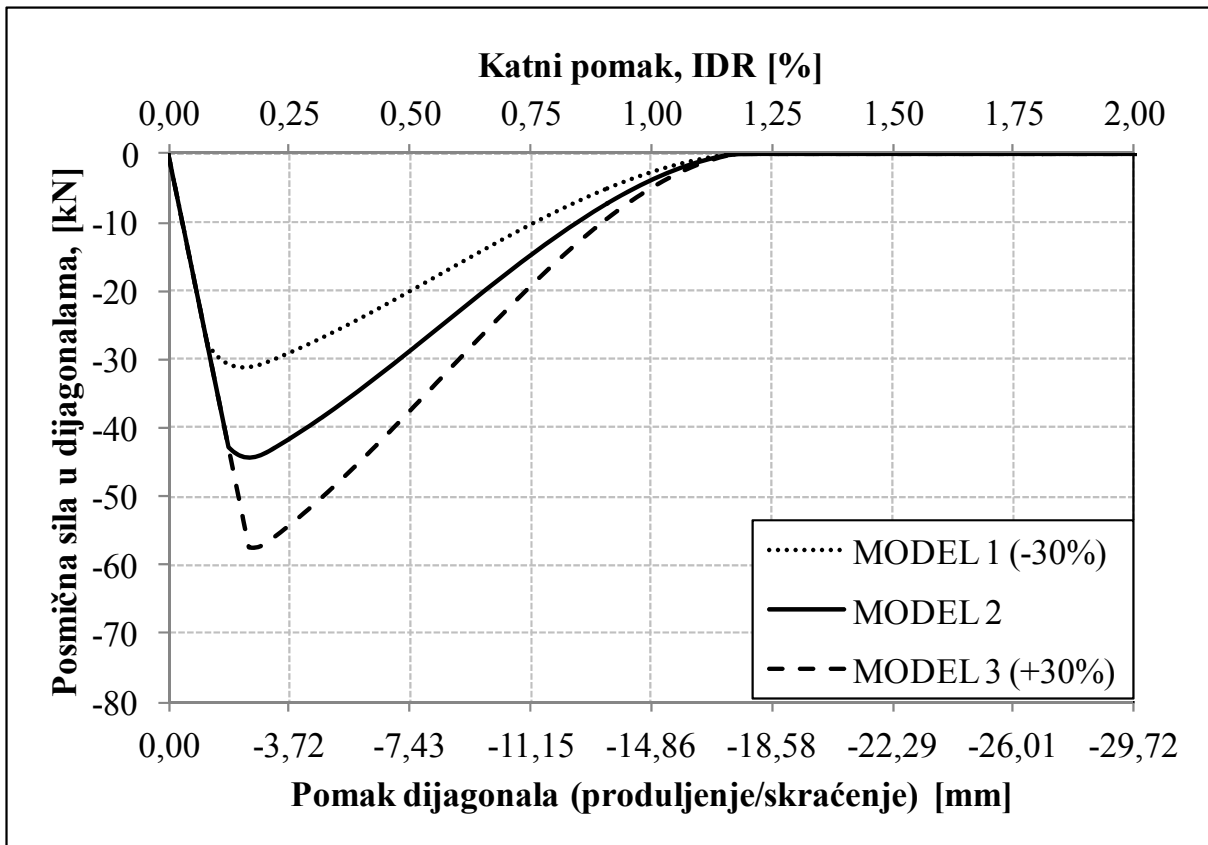
Slika 8.9 Utjecaj čvrstoće dijagonale na poprečnu nosivost

Tablica 8.9 Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju čvrstoće dijagonale

MODEL	M1	M2	M3	M1/M2	M3/M2
Max. poprečna nosivost [kN]	260	293	336	0,89	1,15
Sila u tlačnim dijagonalama [kN]	-38	-54	-71	0,70	1,30
Sila u posmičnim dijagonalama [kN]	-31	-44	-57	0,70	1,30



Slika 8.10 Utjecaj čvrstoće dijagonale na silu u tlačnoj dijagonali



Slika 8.11 Utjecaj čvrstoće dijagonale silu u posmičnoj dijagonali

Unutarnje sile u stupovima armirano-betonskog okvira prikazane su u **tablici 8.10**. Prikazani rezultati unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskoga okvira za navedene modele, ovisno o čvrstoći tlačne dijagonale, dobiveni su pri horizontalnome pomaku od 5mm (0,33% IDR).

Iz **tablice 8.10**, možemo vidjeti da nam utjecaj čvrstoće dijagonale jedino mijenja unutarnje uzdužne sile u stupu armirano-betonskoga okvira. Moment savijanja i poprečna sila ne ovise o utjecaju čvrstoće dijagonale (razlike koje se pojavljuju su neznatne). Povećanjem čvrstoće dijagonale smanjuje se uzdužna sila u stupovima armirano-betonskoga okvira, dok se smanjenjem čvrstoće dijagonale povećava uzdužna sila u stupovima armirano-betonskoga okvira. To smanjenje ili povećanje uzdužne sile nije ni približno jednako povećanju ili smanjenju čvrstoće dijagonale. Raspodjela unutarnjih sila po visini stupa, manje-više je konstantna kod uzdužne i poprečne sile, dok je kod momenta savijanja raspodjela trokutasta.

**Tablica 8.10** Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR)

MODEL / STUP	S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> M [kNm]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> V [kN]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> N [kN]	
	dolje	gore	dolje	gore	dolje	gore
MODEL 1	48,07; 48,09	44,85; 42,66	70,59; 68,82	70,59; 68,82	-320,98; -374,98	-319,75; -373,75
MODEL 2	47,75; 48,00	45,03; 42,73	70,50; 68,83	70,50; 68,83	-309,15; -375,58	-307,94; -374,37
MODEL 3	47,35; 47,93	45,01; 42,85	70,21; 68,87	70,21; 68,87	-297,32; -378,18	-296,11; -374,97

Položaj prikazanih unutarnjih sila i oznake stupova prikazane su na **slici 8.2**.

## 8.5 UTJECAJ VERTIKALNOG OPTEREĆENJA

Utjecaj vertikalnog opterećenja u stupovima armirano-betonskoga okvira proveden je na numeričkom kalibriranom modelu GRUPE I, kao i prethodni utjecaji. Za različite vrijednosti vertikalnog opterećenja prema **tablici 8.11**, koje su uzete u obzir kod numeričkog kalibriranog modela GRUPE I, statičkom pushover analizom dobiveni su numerički rezultati koji su u nastavku prikazani. Iznos vertikalnog opterećenja modela GRUPE I (MODEL 2) smanjen je 30% (MODEL 1), odnosno povećan 30% (MODEL 3).

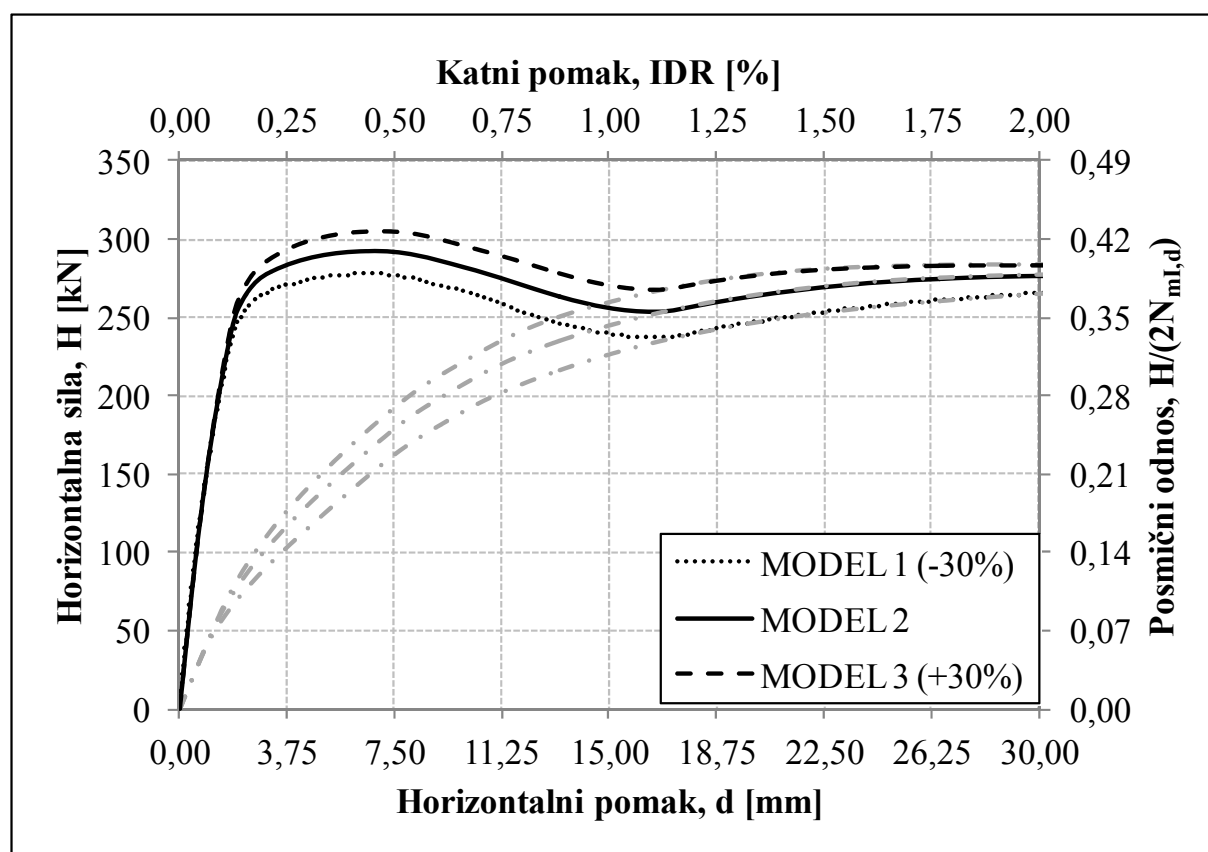
**Tablica 8.11** Iznosi vertikalnog opterećenja u stupovima armirano-betonskog okvira

MODEL	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3
Vertikalno opterećenje, $N_{mi,d}$ [kN] <sup>1)</sup>	250	357	464

<sup>1)</sup> Vrijednost vertikalnog stalnog opterećenja za model GRUPE I uzeta je prema **tablici 6.5** koja se nalazi u *Poglavljju 6, točka 6.4.4*. Prikaz djelovanja na numeričkom modelu prikazan je na **slici 6.21**, također u *Poglavljju 6, točka 6.4.4*.

### 8.5.1 Numerički rezultati utjecaja vertikalnog opterećenja

Rezultati prikazani u obliku primarnih krivulja na **slici 8.12** pokazuju kako je utjecaj vertikalnog opterećenja u stupovima armirano-betonskoga okvira na poprečnu nosivost armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom vrlo mal. Na istoj slici vidimo da toga utjecaja uopće nema do katnih pomaka od približno 0,10%, imamo linearno ponašanje.

**Slika 8.12** Utjecaj vertikalnog opterećenja na poprečnu nosivost

Nakon toga katnog pomaka dolazi do neznatnog povećanja poprečne nosivosti, a samim time i promjene poprečne krutosti. Promjena vertikalnog opterećenja od 30% ni približno ne odgovara promjeni poprečne nosivosti za navedeni postotak.



Ipak, možemo reći kako povećanje vertikalnoga opterećenja nešto malo povećava poprečnu nosivost, a smanjenje vertikalnoga opterećenja smanjuje poprečnu nosivost.

Najvažniji zaključak kojeg možemo izvući promatrajući sliku **8.12**, jest kako vertikalno opterećenje ima utjecaj na ponašanje samoga (praznog) armirano-betonskog okvira, odnosno na njegovu poprečnu nosivost i poprečnu krutost. Ovo i nije iznenađujuće, budući da vertikalno opterećenje djeluje centrično u stupovima armirano-betonskoga okvira.

Prikaz maksimalnih vrijednosti pojedinih sila za pojedini model prikazan je **tablici 8.12**. Iz navedene tablice jasno je vidljivo kako povećanje vertikalnog opterećenja od 30% utječe na poprečnu nosivost svega 4%. Smanjenje vertikalnog opterećenja od 30%, smanjuje poprečnu nosivost za 15%. Ako promatramo sile u dijagonalama zidnoga ispuna onda možemo uočiti da u njima nema promjena uslijed vertikalnog opterećenja u stupovima armirano-betonskog okvira.

**Tablica 8.12** Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju vertikalnog opterećenja u stupovima armirano-betonskog okvira

MODEL	M1	M2	M3	M1/M2	M3/M2
Max. poprečna nosivost [kN]	278	293	306	0,95	1,04
Sila u tlačnim dijagonalama [kN]	-54			1,00	
Sila u posmičnim dijagonalama [kN]	-44			1,00	

Drugim riječima, vertikalno opterećenje u stupovima armirano-betonskog okvira nema utjecaja na sile u dijagonalama zidnoga ispuna. Prikaz sila u dijagonalama zidnoga ispuna za pojedini model dan je na slikama **slikama 8.13** i **8.14**, one ne ovise o vertikalnome opterećenju, jednake su u sva tri slučaja.

Unutarnje sile u stupovima armirano-betonskog okvira prikazane su u **tablici 8.13**. Prikazani rezultati unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira za navedene modele, ovisno o vertikalnom opterećenju, dobiveni su pri horizontalnom pomaku od 5mm (0,33% IDR).

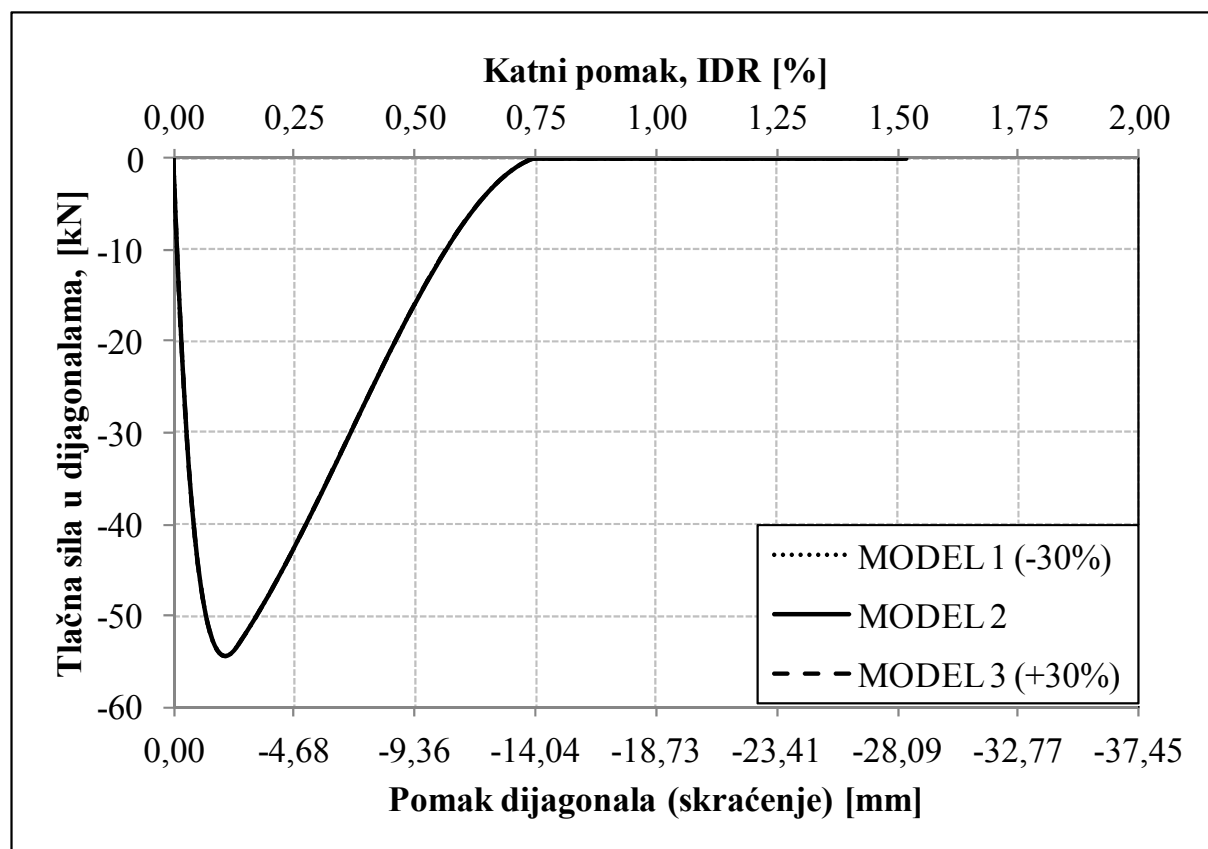
Iz **tablice 8.13**, možemo vidjeti kako utjecaj vertikalnoga opterećenja u stupovima armirano-betonskoga okvira mijenja unutarnje sile u stupovima armirano-betonskoga okvira. Povećanjem vertikalnog opterećenja - povećavaju se unutarnje sile u stupovima armirano-betonskog okvira, dok se smanjenjem istog - smanjuju unutarnje sile u stupovima armirano-betonskog okvira.

To smanjenje ili povećanje vertikalnog opterećenja nije jednako smanjenju ili povećanju unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskoga okvira. Raspodjela unutarnjih sila po visini stupa, manje-više konstantna je kod uzdužne i poprečne sile, dok je kod momenta savijanja raspodjela trokutasta.

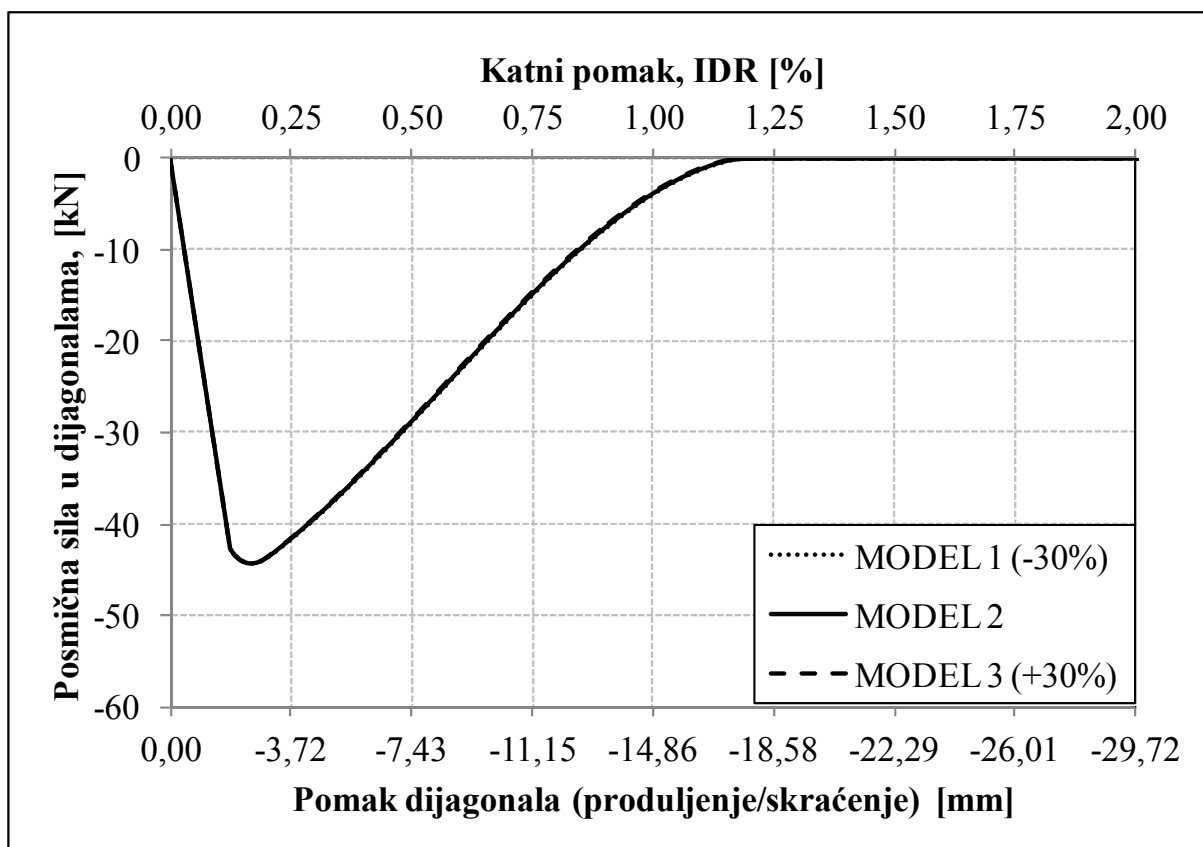
**Tablica 8.13** Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR)

MODEL / STUP	S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> M [kNm]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> V [kN]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> N [kN]	
	dolje	gore	dolje	gore	dolje	gore
MODEL 1	42,13; 42,83	40,02; 38,27	62,62; 61,69	62,62; 61,69	-202,97; -267,61	-201,75; -266,10
MODEL 2	47,75; 48,00	45,03; 42,73	70,50; 68,83	70,50; 68,83	-309,15; -375,58	-307,94; -374,37
MODEL 3	52,64; 52,18	49,38; 46,26	77,30; 74,50	77,30; 74,50	-415,47; -483,41	-414,26; -482,19

Položaj prikazanih unutarnjih sila i oznake stupova prikazane su na *slici 8.2*.



**Slika 8.13** Utjecaj vertikalnog opterećenja na silu u tlačnoj dijagonali



Slika 8.14 Utjecaj vertikalnog opterećenja na silu u posmičnoj dijagonali

## 8.6 UTJECAJ KOLIČINE ARMATURE U STUPOVIMA ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA

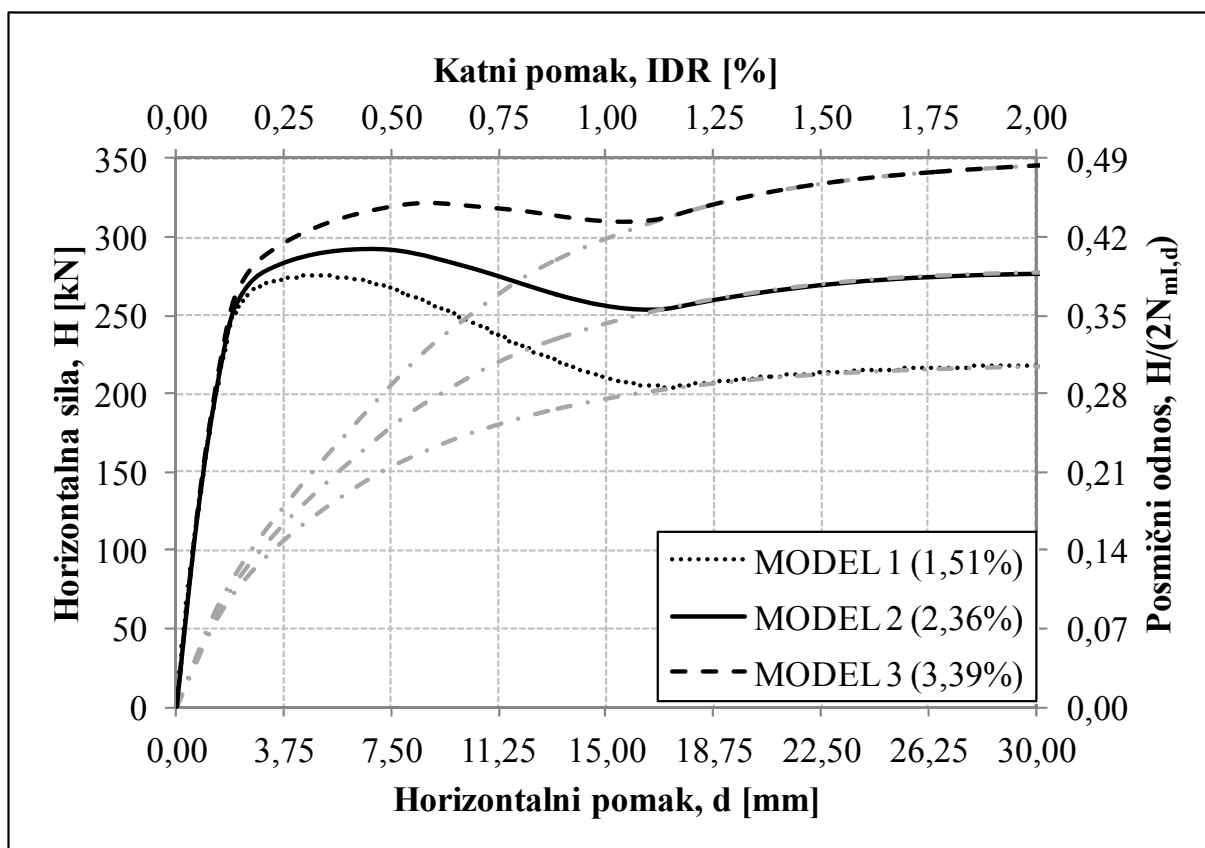
Utjecaj količine armature u stupovima armirano-betonskog okvira proveden je na modelu GRUPE I. Ulazni podaci identični su onima opisanima u *Poglavlju 6*, odnosno *točki 6.4* za model GRUPE I. Promjene ulaznih podataka koje izaziva utjecaj količine armature za pojedini MODEL prikazane su u *tablici 8.14*, a odnose se samo na promjenu promjera uzdužne armature u stupovima. Numerički rezultati dobiveni su statičkom pushover analizom i prikazani su u sljedećoj točki.

Tablica 8.14 Količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira

OZNAKA	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3
$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	12 $\phi$ 8mm (603,19 mm <sup>2</sup> )	12 $\phi$ 10mm (942,48 mm <sup>2</sup> )	12 $\phi$ 12mm (1357,17 mm <sup>2</sup> )
$A_s/A_c$ [%]	1,51	2,36	3,39
$A_c = 200 \cdot 200 = 40000 \text{ mm}^2$ - ploština poprečnog presjeka stupa armirano-betonskog okvira.			
Raspored uzdužne armature može se vidjeti na <i>slici 6.16</i> u <i>Poglavlju 6</i> .			

### 8.6.1 Numerički rezultati utjecaja količine armature u stupovima armirano-betonskoga okvira

Numerički rezultati prikazani u obliku primarnih krivulja na *slici 8.15* pokazuju da je utjecaj količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskoga okvira značajan na poprečnu nosivost armirano-betonskog okvira ispunjenoga zidnim ispunom. Veći postotak armiranja znači i veću poprečnu nosivost, vrijedi i obrnuto. Zanimljivo je primijetiti kako na istoj slici količina armature nema utjecaja na poprečnu krutost kod armirano-betonskog okvira ispunjenoga zidnim ispunom. Ako se radi od praznim armirano-betonskim okvirima (svjetlije linije crta-točka na *slici 8.15*), tada imamo i značajan utjecaj, kako na poprečnu nosivost tako i na poprečnu krutost. Iz ovoga se lako može zaključiti kako količina uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira neće imati utjecaja na sile u dijagonalama zidnoga ispuna. Ovaj zaključak potkrijepljen je sa vrijednostima u *tablici 8.15*.



Slika 8.15 Utjecaj količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira na poprečnu nosivost

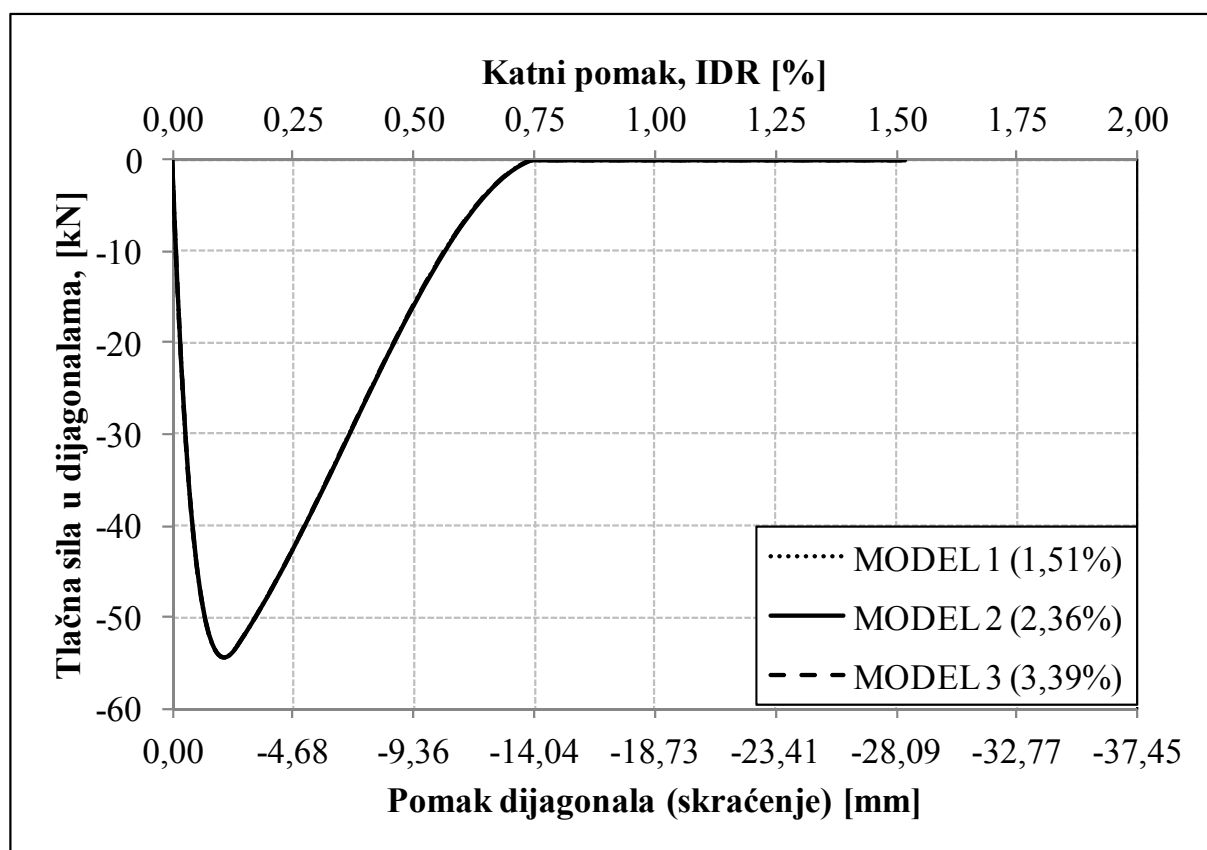
Prikaz maksimalnih vrijednosti pojedinih sila za pojedini model prikazane su *tablici 8.15*. Iz navedene tablice jasno je vidljivo kako povećanje količine uzdužne armature nema utjecaja na sile u dijagonalama zidnoga ispuna.

**Tablica 8.15** Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira

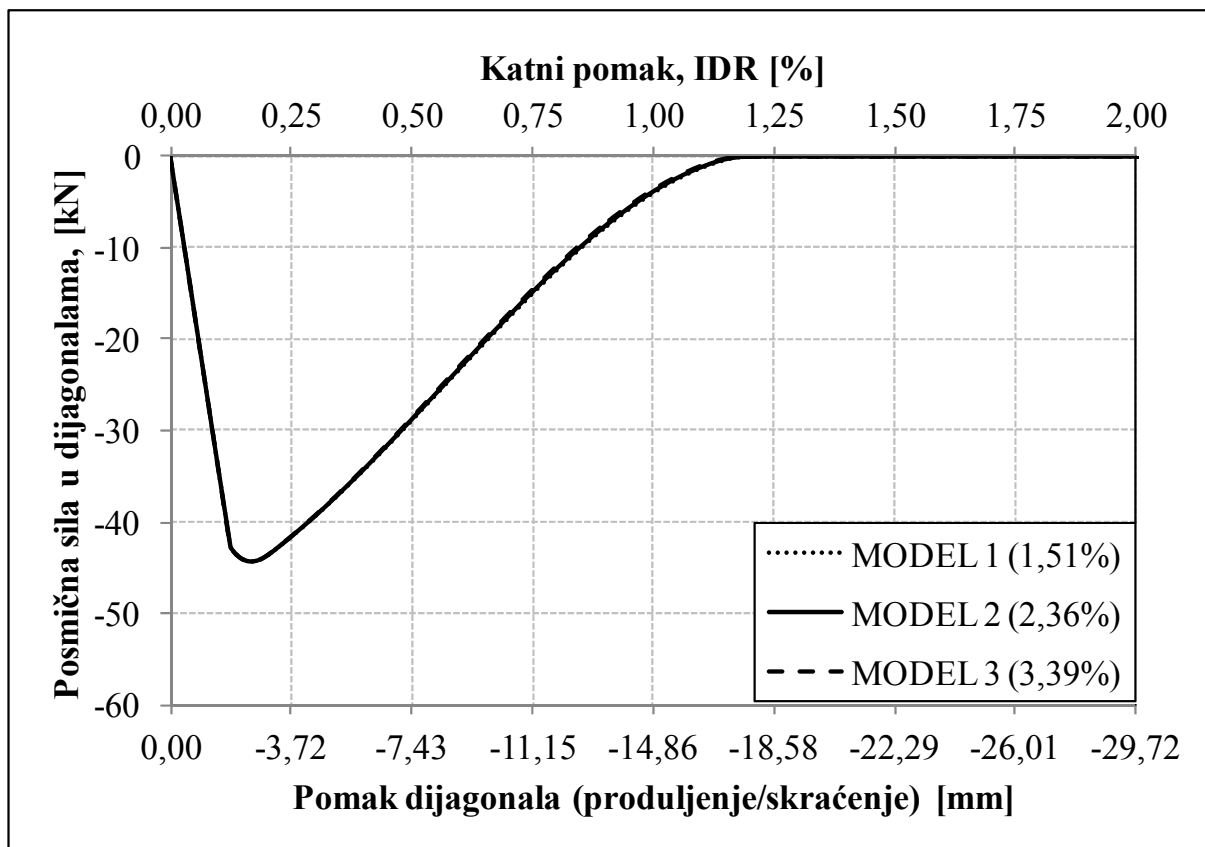
MODEL	M1	M2	M3	M1/M2	M3/M2
Max. poprečna nosivost [kN]	275	293	322	0,94	1,10
Sila u tlačnim dijagonalama [kN]	-54			1,00	
Sila u posmičnim dijagonalama [kN]	-44			1,00	

Isto tako, iz navedene tablice može se vidjeti kako postotak povećanja količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskoga okvira ne odgovara istome postotku povećanja poprečne nosivosti (količina armature smanjena za  $1,51/2,36=0,58$  ne znači i smanjenje poprečne nosivosti za istu vrijednost,  $275/293=0,94$ ).

Ranije smo spomenuli i prikazali u **tablici 8.15**, kako količina uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira nema utjecaja na sile u dijagonalama zidnoga ispuna, prikaz na **slikama 8.16** i **8.17**.

**Slika 8.16** Utjecaj količine uzdužne armature na silu u tlačnoj dijagonali

Unutarnje sile u stupovima armirano-betonskog okvira prikazane su u **tablici 8.16**. Prikazani rezultati unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira za navedene modele, ovisno o količini uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira, dobiveni su pri horizontalnom pomaku od 5mm (0,33% IDR).



Slika 8.17 Utjecaj količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira na silu u posmičnoj dijagonali

Iz *tablice 8.16*, možemo vidjeti kako nam utjecaj količine uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira neznatno mijenja unutarnje sile u stupovima armirano-betonskog okvira. Povećanjem/smanjenjem količine uzdužne armature, povećavaju/smanjuju se unutarnje sile. Raspodjela unutarnjih sila ista je kao i u analizi prethodnih utjecaja.

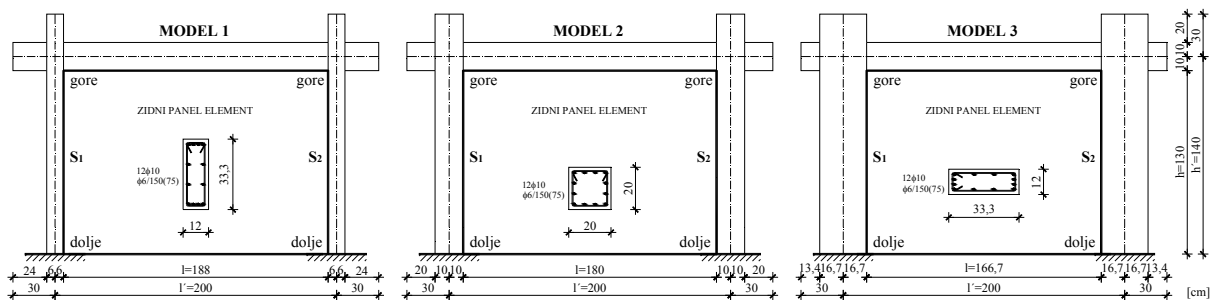
Tablica 8.16 Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR)

MODEL / STUP	S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> M [kNm]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> V [kN]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> N [kN]	
	dolje	gore	dolje	gore	dolje	gore
MODEL 1	41,98;	40,04;	62,22;	62,22;	-310,15;	-308,96;
	43,14	39,14	62,32	62,32	-374,45	-373,26
MODEL 2	47,75;	45,03;	70,50;	70,50;	-309,15;	-307,94;
	48,00	42,73	68,83	68,83	-375,58	-374,37
MODEL 3	54,40;	50,61;	79,93;	79,93;	-308,08;	-306,84;
	53,65	46,95	76,43	76,43	-376,81	-375,57

Položaj prikazanih unutarnjih sila i oznake stupova prikazane su na *slici 8.2*.

## 8.7 UTJECAJ OBLIKA POPREČNOG PRESJEKA STUPOVA ARMIRANO-BETONSKOG OKVIRA

Utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskoga okvira, uz zadržavanje iste površine, proveden je na numeričkom kalibriranom modelu GRUPE I. Ulazni podatci identični su onima opisanima u *Poglavlju 6*, odnosno *točki 6.4* za model GRUPE I. Promjene ulaznih podataka koje izaziva utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira za pojedini MODEL, prikazane su na  *slici 8.18*. Numerički rezultati dobiveni su statičkom pushover analizom i prikazani su u sljedećoj točki.



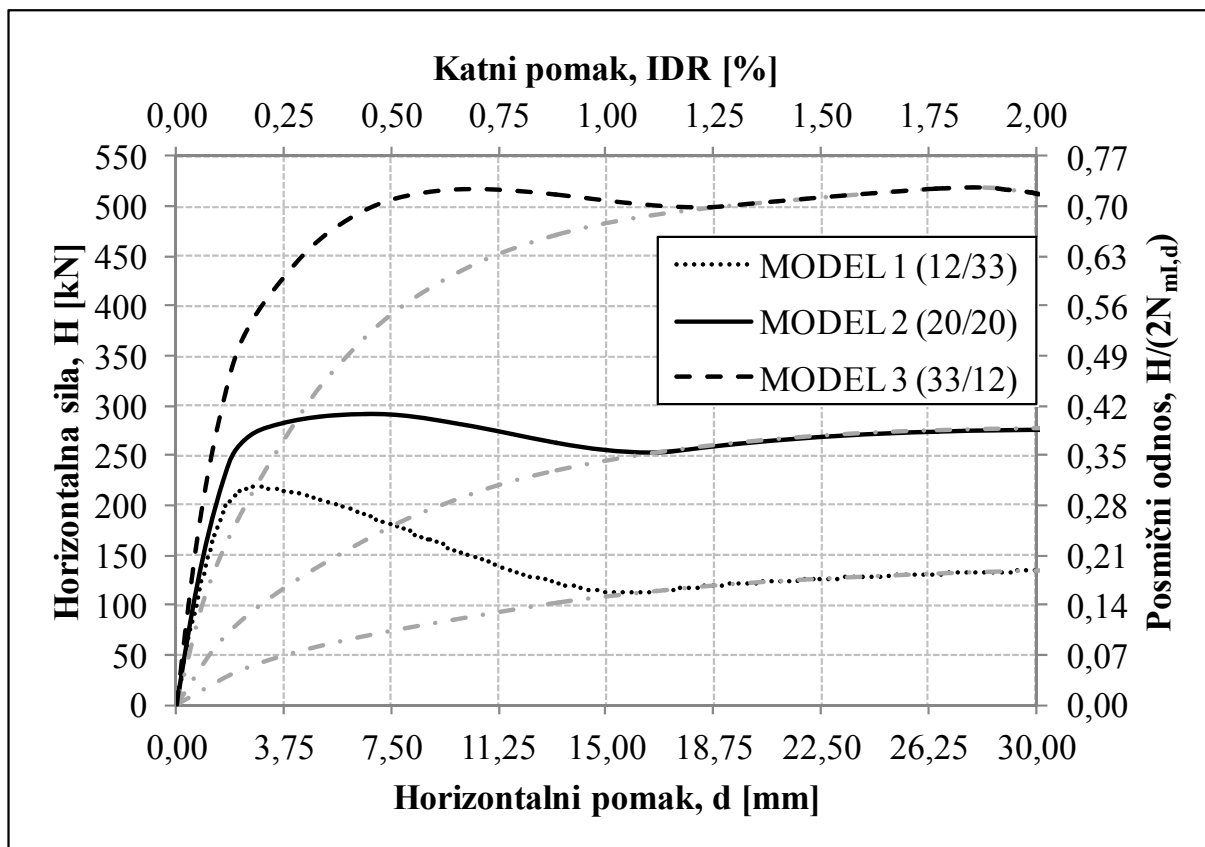
Slika 8.18 Prikaz numeričkih MODELA u ovisnosti o obliku poprečnog presjeka stupova

### 8.7.1 Numerički rezultati utjecaja oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira

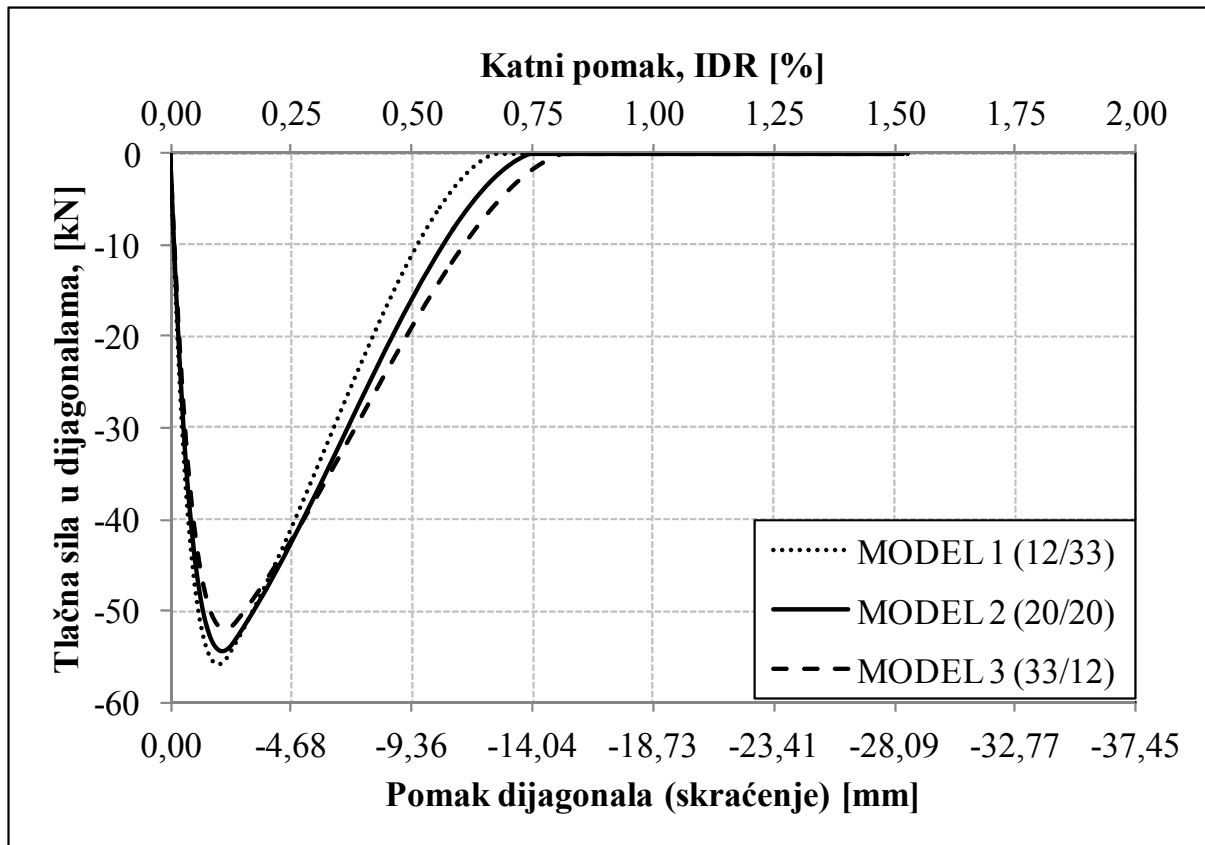
Numerički rezultati dobiveni za utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira uz zadržavanje iste površine i uzdužne armature, prikazani su na  *slici 8.19*. Iz navedene slike možemo vidjeti kako oblik poprečnog presjeka ima značajan utjecaj na poprečnu nosivost, kao i na poprečnu krutost. Ovakve rezultate dobivamo jer se radi o povećanju/smanjenju statičke visine, a samim time i otpornosti, tj. poprečne nosivosti. Brojčane vrijednosti promatranih modela, kao i njihovi međusobni odnosi, prikazani su u  *tablici 8.17*. Utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova na sile u dijagonalama beznačajan je, njihove vrijednosti prikazane su u  *tablici 8.17*, kao i na  *slikama 8.20* i  *8.21*.

Tablica 8.17 Vrijednosti maksimalnih pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira

MODEL	M1	M2	M3	M1/M2	M3/M2
Max. poprečna nosivost [kN]	218	293	517	0,75	1,77
Sila u tlačnim dijagonalama [kN]	-56	-54	-52	1,03	0,96
Sila u posmičnim dijagonalama [kN]	-45	-44	-42	1,03	0,96

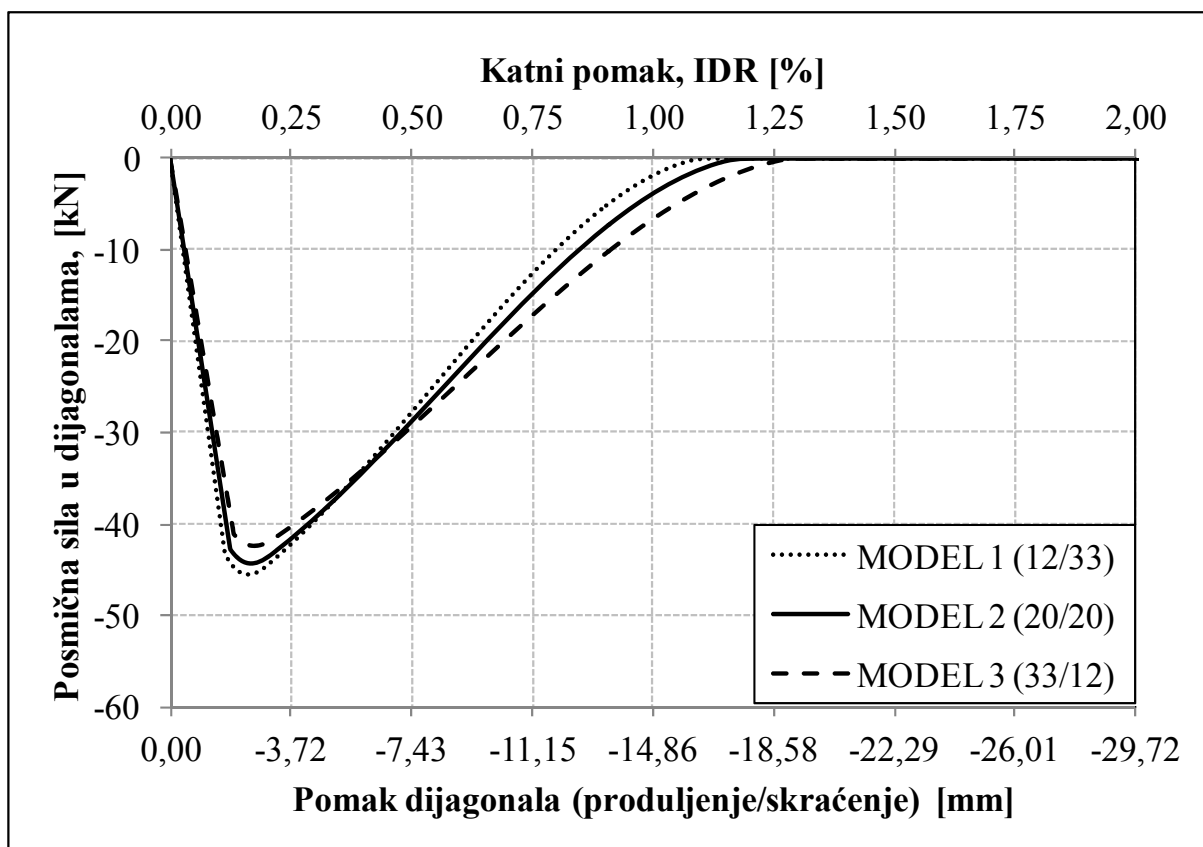


Slika 8.19 Utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova okvira na poprečnu nosivost



Slika 8.20 Utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira na silu u tlačnoj dijagonali





**Slika 8.21** Utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira na silu u posmičnoj dijagonali

Unutarnje sile u stupovima armirano-betonskog okvira prikazane su u **tablici 8.18**. Iz navedene tablice, možemo vidjeti kako nam utjecaj oblika poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira mijenja unutarnje sile u stupovima armirano-betonskog okvira. Smanjenjem/povećanjem statičke visine - smanjuju/povećavaju se unutarnje sile. Raspodjela unutarnjih sila ista je kao i kod analize prethodnih utjecaja.

**Tablica 8.18** Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR)

MODEL / STUP	S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> M [kNm]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> V [kN]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> N [kN]	
	dolje	gore	dolje	gore	dolje	gore
MODEL 1	20,16;	19,51;	29,61;	29,61;	-315,61;	-314,40;
	20,50	19,07	29,43	29,43	-370,95	-369,73
MODEL 2	47,75;	45,03;	70,50;	70,50;	-309,15;	-307,94;
	48,00	42,73	68,83	68,83	-375,58	-374,37
MODEL 3	109,75;	99,96;	160,49;	160,49;	-299,47;	-298,26;
	110,42	93,55	155,97	155,97	-384,27	-383,06

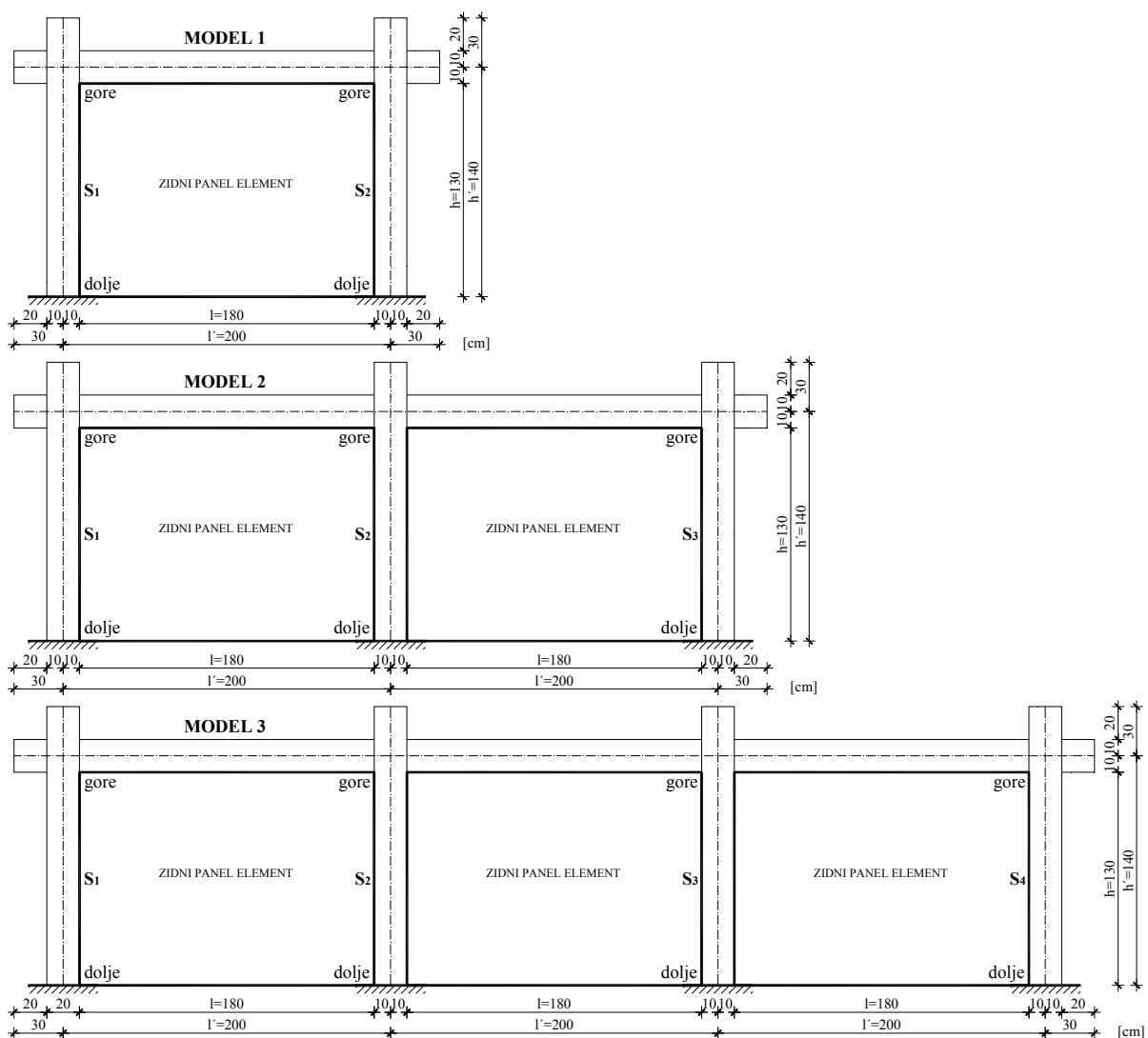
Položaj prikazanih unutarnjih sila i oznake stupova prikazane su na **slici 8.18**.

## 8.8 UTJECAJ BROJA POLJA ARMIRANO-BETONSKOGA OKVIRA

Kao predzadnji utjecaj u ovoj parametarskoj analizi, analiziran je utjecaj broja polja armirano-betonskoga okvira na poprečnu nosivost i na sile u dijagonalama zidnoga ispuna.

Utjecaj broja polja armirano-betonskog okvira, kao i u svim prethodnim analizama, proveden je na modelu GRUPE I. Ulazni podatci identični su onima opisanima u *Poglavljju 6*, odnosno *točki 6.4* za model GRUPE I.

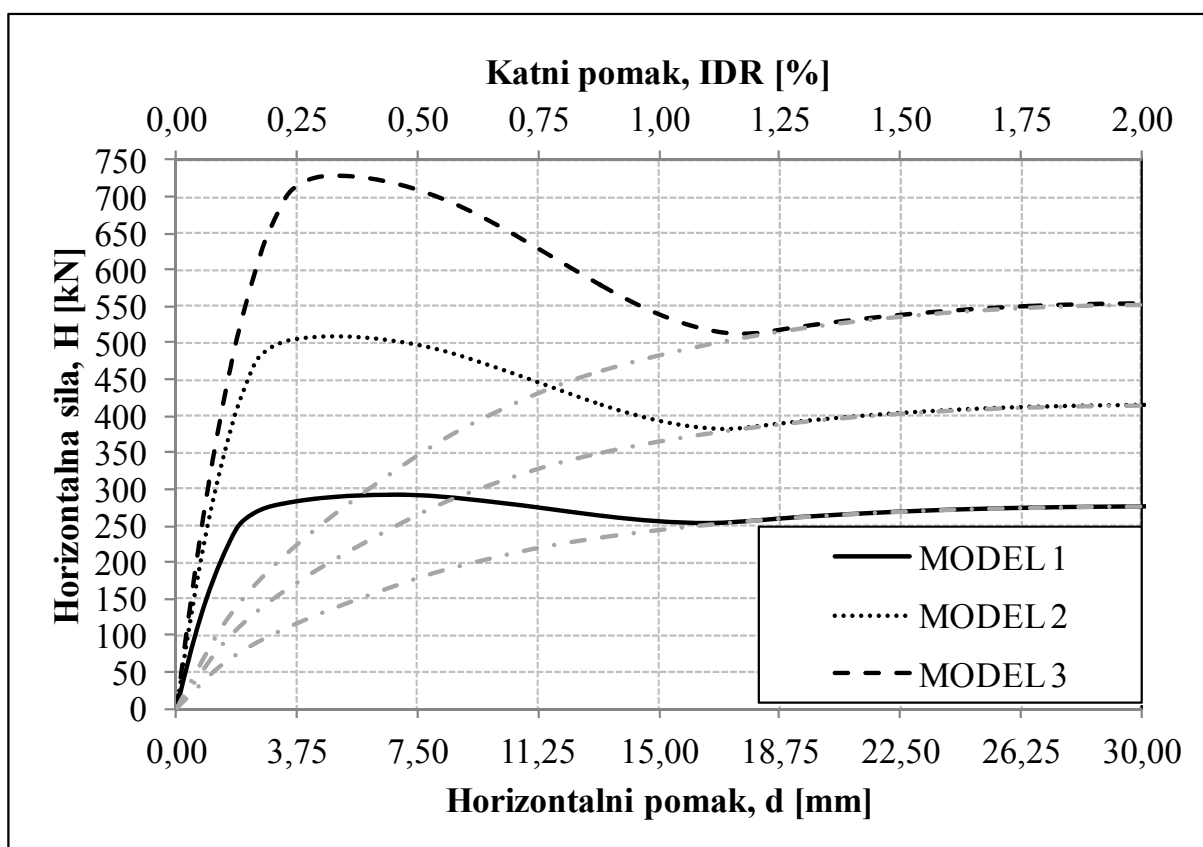
Promjene ulaznih podataka koje izaziva utjecaj broja polja odnose se na geometriju, odnosno dodavanje još jednog, tj. dvaju polja koja su identična prvome polju, odnosno modelu GRUPE I. Samim dodavanjem broja polja dodavali smo i vertikalno opterećenje u stupu armirano-betonskog okvira, a koje je jednako u svim stupovima. Prikaz analiziranih modela u ovisnosti o broju polja armirano-betonskog okvira dan je na *slici 8.22*.



Slika 8.22 Prikaz numeričkih MODELA u ovisnosti o broju polja

### 8.8.1 Numerički rezultati utjecaja broja polja armirano-betonskoga okvira

Rezultati prikazani u obliku primarnih krivulja na *slici 8.23* pokazuju značajan utjecaj broja polja armirano-betonskog okvira na poprečnu nosivost armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom, kao i na poprečnu krutost.

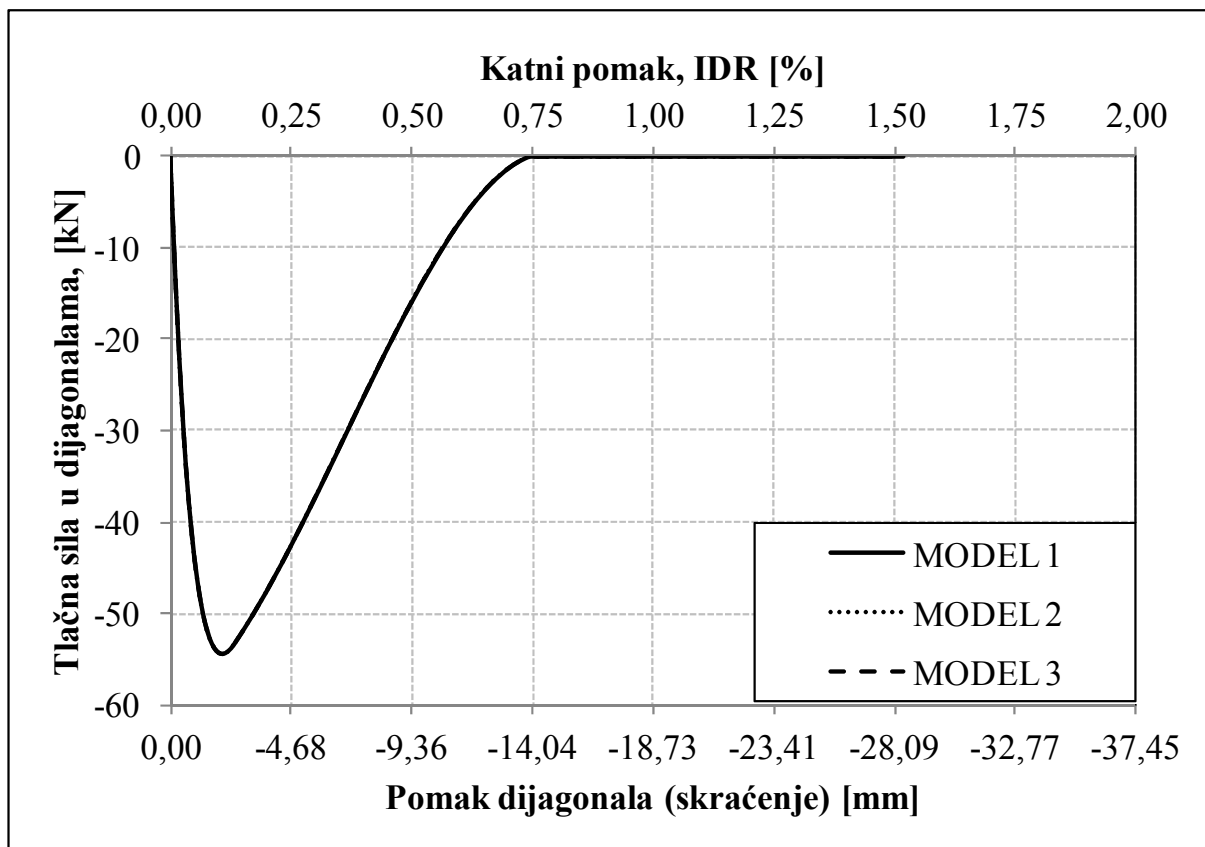


Slika 8.23 Utjecaj broja polja armirano-betonskog okvira na poprečnu nosivost

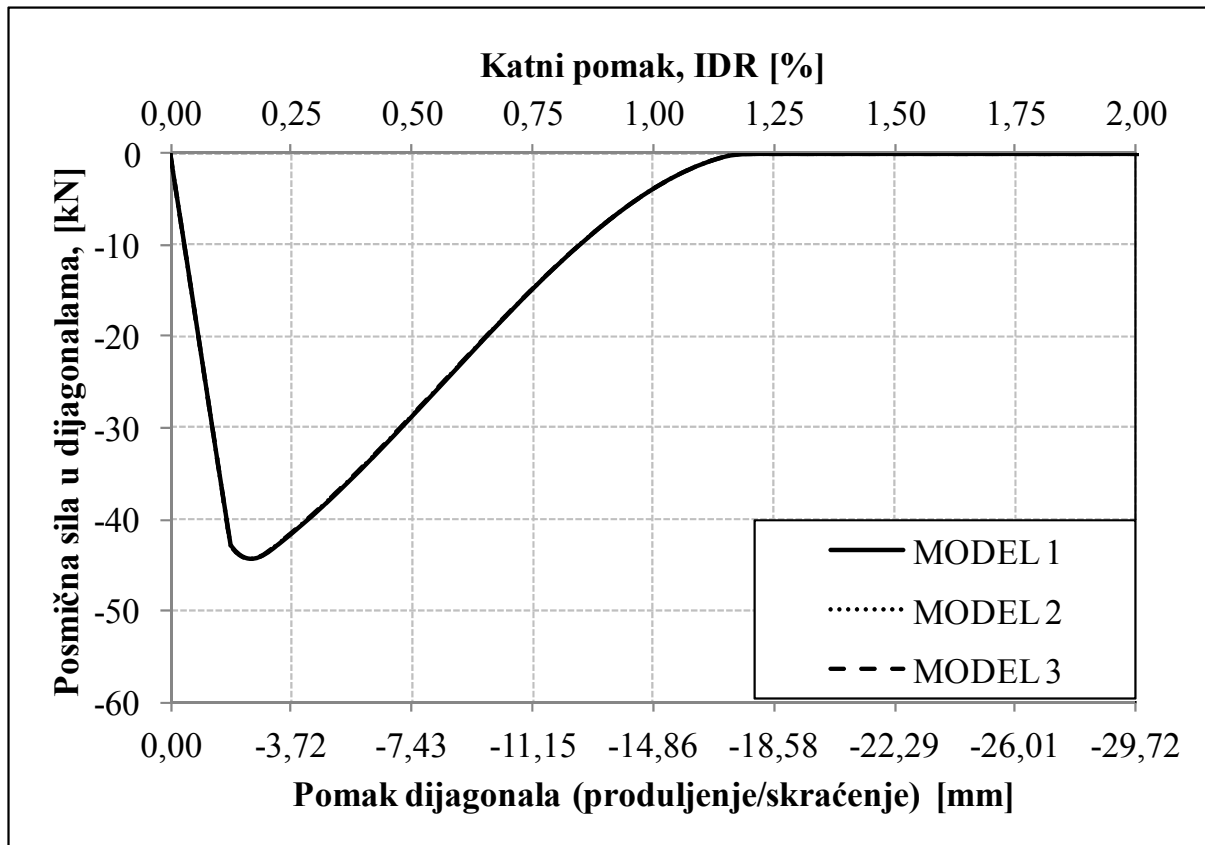
Utjecaj promjene broja polja najjednostavnije je izraziti pomoću iznosa prikazanih u *tablici 8.19*. Iz tablice vidimo kako dvostruko veći broj polja ne znači i dvostruko veću poprečnu nosivost. Sile u dijagonalama zidnog ispuna ne ovise o broju polja i prikazane su na *slikama 8.24* i *8.25*, te su jednake za sve promatrane modele.

Tablica 8.19 Vrijednosti pojedinih sila i njihovi međusobni odnosi u ovisnosti o utjecaju broja polja armirano-betonskog okvira

MODEL	M1	M2	M3	M2/M1	M3/M1
Max. poprečna nosivost [kN]	293	509	728	1,74	2,49
Sila u tlačnim dijagonalama [kN]	-54			1,00	
Sila u posmičnim dijagonalama [kN]	-44			1,00	



Slika 8.24 Utjecaj broja polja armirano-betonskog okvira na silu u tlačnoj dijagonali



Slika 8.25 Utjecaj broja polja armirano-betonskog okvira na silu u posmičnoj dijagonali

Unutarnje sile u stupovima armirano-betonskoga okvira prikazane su u **tablici 8.20**. Prikazani rezultati unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira za navedene modele, ovisno o broju polja armirano-betonskoga okvira, dobiveni su pri horizontalnom pomaku od 5mm (0,33% IDR).

Iz navedene tablice možemo vidjeti kako nam utjecaj broja polja armirano-betonskoga okvira neznatno mijenja unutarnje sile u stupovima armirano-betonskoga okvira. Povećanjem broja polja armirano-betonskoga okvira - smanjuju se unutarnje sile u stupovima. Raspodjela unutarnjih sila ista je kao i kod analize prethodnih utjecaja.

**Tablica 8.20** Vrijednosti unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira pri horizontalnom pomaku od 5 mm (0,33% IDR)

MODEL / STUP	S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> ; S <sub>3</sub> ; S <sub>4</sub> M [kNm]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> ; S <sub>3</sub> ; S <sub>4</sub> V [kN]		S <sub>1</sub> ; S <sub>2</sub> ; S <sub>3</sub> ; S <sub>4</sub> N [kN]	
	dolje	gore	dolje	gore	dolje	gore
MODEL 1	47,75;	45,03;	70,50;	70,50;	-309,15;	-307,94;
	48,00;	42,73;	68,83;	68,83;	-375,58;	-374,37;
	-;	-;	-;	-;	-;	-;
	-	-	-	-	-	-
MODEL 2	47,48;	44,58;	69,96;	69,96;	-311,72;	-310,50;
	44,76;	42,45;	66,25;	66,25;	-322,27;	-321,06;
	43,91;	39,14;	63,08;	63,08;	374,29;	373,08;
	-	-	-	-	-	-
MODEL 3	47,13;	44,15;	69,37;	69,37;	-312,10;	-310,89;
	41,68;	39,56;	61,80;	61,80;	-324,16;	-322,95;
	37,61;	36,04;	56,08;	56,08;	-318,72;	-317,50;
	36,62	32,65	52,67	52,67	-372,25	-371,04

Položaj prikazanih unutarnjih sila i oznake stupova prikazane su na **slici 8.22**.

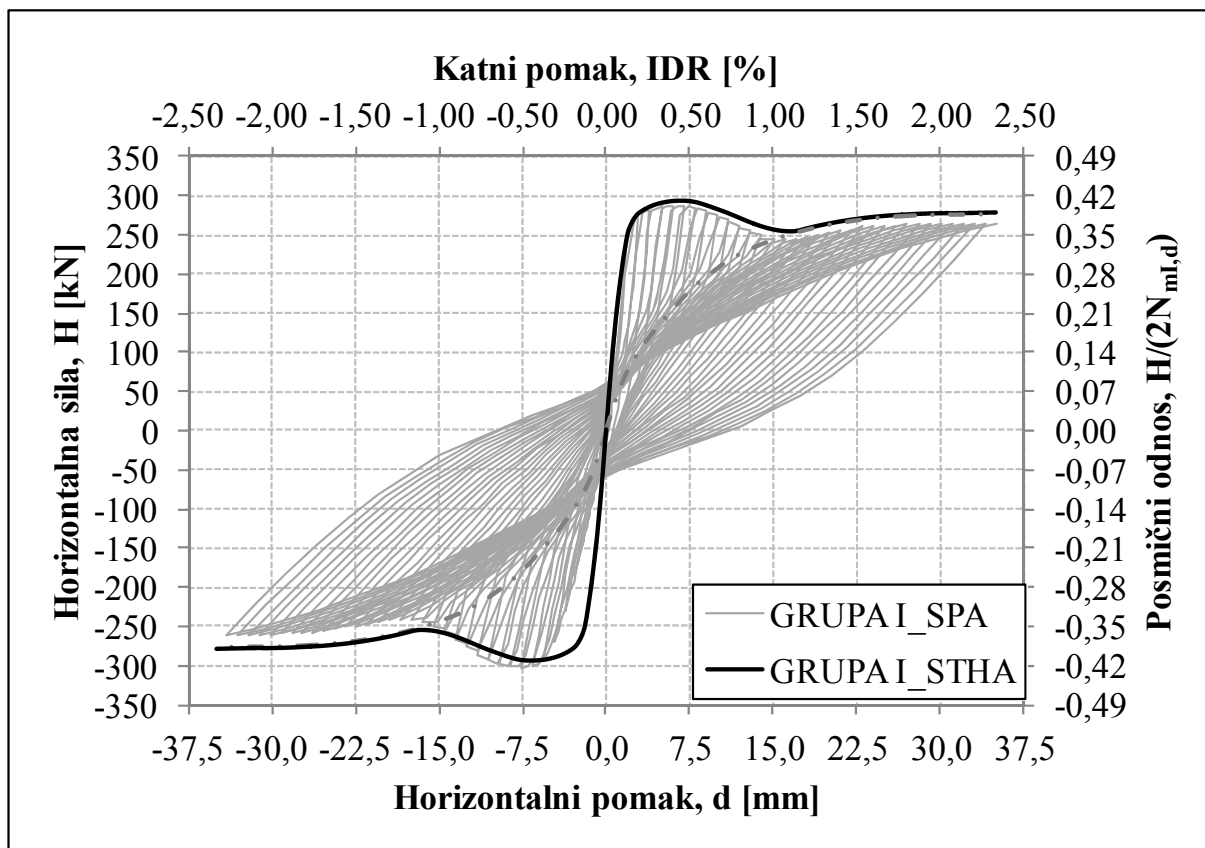
## 8.9 UTJECAJ METODE ANALIZE (PRORAČUNA)

Kao zadnji utjecaj u ovoj parametarskoj analizi analiziran je utjecaj metode analize, odnosno metode proračuna, tj. način nanošenja horizontalnoga opterećenja. Analizirani su numerički rezultati dobiveni statičkom pushover i time-history analizom. U *Poglavlju 6*, odnosno *točki 6.4.4* prikazano je detaljno zadavanje (nanošenje) horizontalnoga opterećenja (*slike 6.22 i 6.23*) pri određenoj analizi.

Utjecaj metode analize, kao i u svim prethodnim analizama, proveden je na modelu GRUPE I. Ulazni podaci identični su onima opisanima u *Poglavlju 6*, odnosno *točki 6.4* za model GRUPE I. Promjene ulaznih podataka koje izaziva utjecaj metode analize odnose se na već spomenuto zadavanje (nanošenje) horizontalnoga opterećenja.

### 8.9.1 Numerički rezultati utjecaja metode analize (proračuna)

Numerički rezultati dobiveni navedenim dvjema metodama analize (metodama proračuna) prikazani su na *slici 8.26*. Numerički rezultati statičke pushover analize (SPA) prikazani su pomoću primarne krivulje, dok su rezultati statičke time-history analize (STHA) prikazani u obliku krivulje histereze na osnovu koje se može dobiti i primarna krivulja (krivulja anvelope).

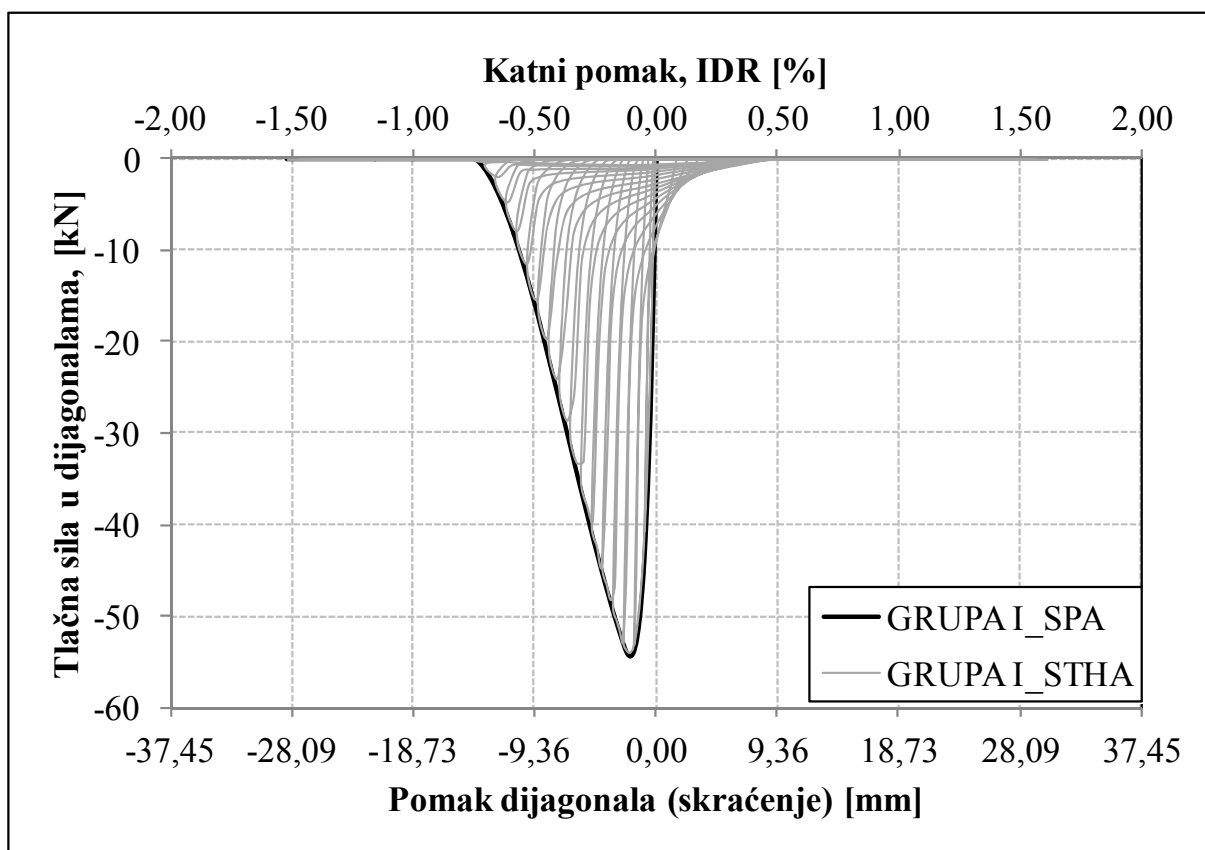


Slika 8.26 Utjecaj metode analize (proračuna) na poprečnu nosivost

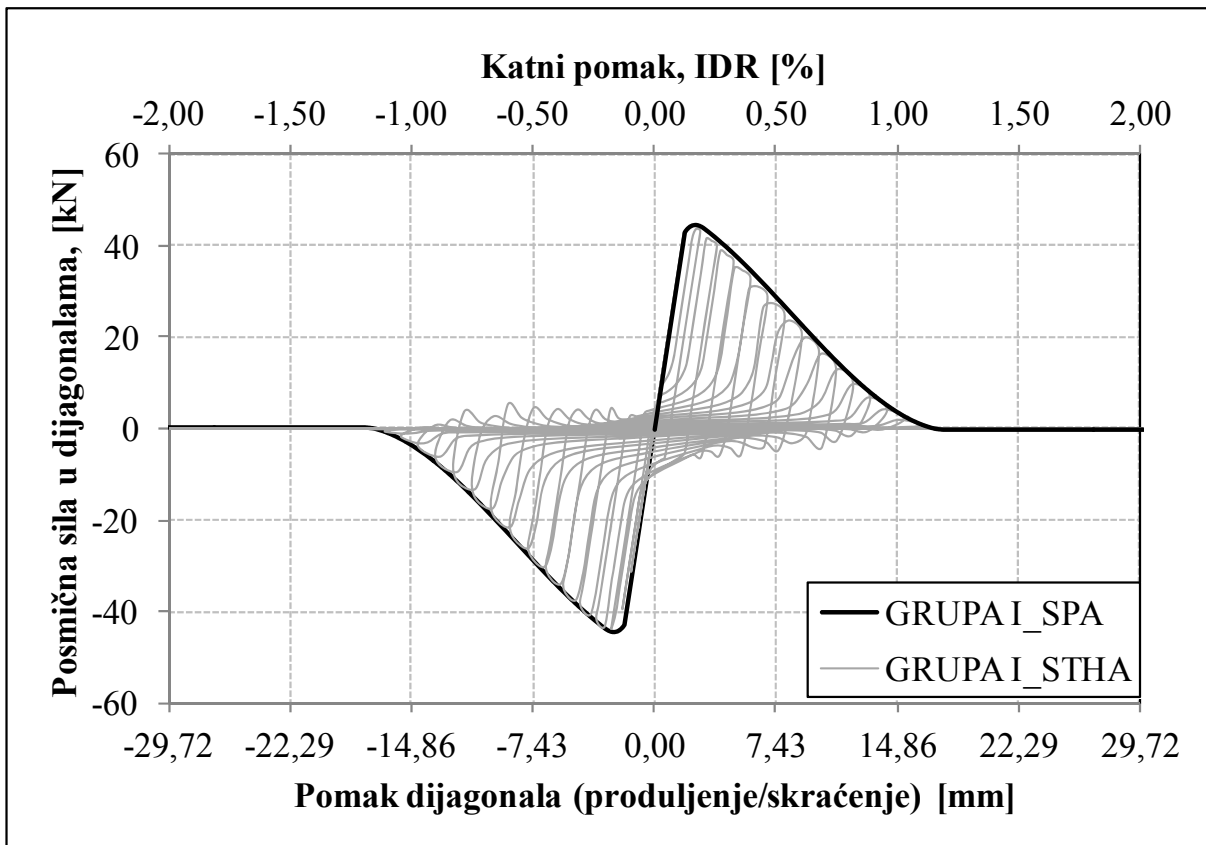
Primarna krivulja (SPA) s gornje desne strane samo je zrcalno preslikana na donju lijevu stranu. Krivulja crta-točka označava primarnu krivulju dobivenu statičkom pushover analizom za prazan armirano-betonski okvir radi lakšega praćenja numeričkih rezultata.

Sa *slike 8.26* možemo vidjeti utjecaj metode analize na poprečnu nosivost, poprečnu krutost i razlike koje nastaju promatranjem istih. Vidimo kako pri malim nivoima katnih pomaka razlike u ponašanju (nosivosti) gotovo i nema, što znači da su nam poprečna nosivost i poprečna krutost jednake. Pri većim nivoima katnih pomaka nastaju male razlike koje se mogu vidjeti na prethodno navedenoj slici, a koje su manje od 1,0%, što je u ovakvim analizama zanemarivo ako promatrano gornju desnu stranu krivulja. Razlike nastaju u poprečnoj krutosti ako gledamo donju lijevu stranu krivulja, to je zbog cikličkoga opterećenja. Ovo je jedan od bitnih razloga što su svi dosadašnji numerički rezultati dobiveni pomoću statičke pushover analize kao i razlike prilikom promatranja gornje desne strane krivulja. Drugi razlog leži u znatno kraćem vremenu trajanja proračuna kod statičke pushover analize.

Slične zaključke možemo izvesti i promatranjem sila u dijagonalama zidnoga ispuna prikazanima na *slikama 8.27* i *8.28*. Pri statičkoj pushover analizi, u odnosu na statičku time-history analizu, značajnijih razlika u vrijednostima sila gotovo da i nema, razlika je vidljiva samo glede ponašanja tlačne dijagonale.



Slika 8.27 Utjecaj metode analize (proračuna) na silu u tlačnoj dijagonali



**Slika 8.28** Utjecaj metode analize (proračuna) na silu u posmičnoj dijagonali

Tablične prikaze maksimalne poprečne nosivosti i sila u dijagonalama zidnoga ispuna, kao i unutarnje sile u stupovima armirano-betonskog okvira nećemo prikazivati. To je već učinjeno ranije kod ostalih analiza utjecaja, a razlike koje bi se mogle pojaviti vidjeli smo kod prethodnog promatranja poprečne nosivosti (*slika 8.26*) i sila u dijagonalama zidnog ispuna (*slike 8.27* i *8.28*), a one su manje od 1%.



## 8.10 REKAPITULACIJA REZULTATA

Svi dosadašnji promatrani utjecaji, odnosno njihovi numerički rezultati, u provedenoj parametarskoj analizi prikazani su u **tablici 8.20**. U navedenoj tablici jasno se može vidjeti utječe li pojedini utjecaj na poprečnu nosivost, poprečnu krutost, sile u dijagonalama zidnoga ispuna, kao i na unutarnje sile u stupovima armirano-betonskoga okvira.

**Tablica 8.20** Utjecaji pojedinih utjecaja na poprečnu nosivost, poprečnu krutost, sile u dijagonalama zidnog ispuna i unutarnje sile u stupovima

UTJECAJ	POPREČNA NOSIVOST	POPREČNA KRUTOST	SILE U DIJAGONALAMA	SILE U STUPOVIMA
<b>I</b>	Ima	Ima	Ima	Ima
<b>II</b>	Ima	Ima	Ima	Mali
<b>III</b>	Ima	Mali	Ima	Mali
<b>IV</b>	Mali	Nema	Nema	Ima
<b>V</b>	Ima	Nema	Nema	Mali
<b>VI</b>	Ima	Ima	Nema	Ima
<b>VII</b>	Ima	Ima	Nema	Mali
<b>VIII</b>	Nema	Nema	Nema	Nema

I Geometrija armirano-betonskog okvira;  
 II Geometrija tlačne dijagonale u pogledu njezine širine;  
 III Čvrstoća dijagonale;  
 IV Vrijednosti vertikalnoga opterećenja u stupovima armirano-betonskog okvira;  
 V Količina armature u stupovima armirano-betonskog okvira;  
 VI Oblik poprečnog presjeka stupova armirano-betonskog okvira;  
 VII Broj polja armirano-betonskog okvira;  
 VIII Metode analize (proračuna).  
 Pod „malim utjecajem (mali)“ podrazumijevamo razlike u rezultatima manjim od 10%.

Ovako složena tablica uvelike će nam pomoći u budućim analizama armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom i doprinosom pojedinih utjecaja (parametara) u pogledu njihove: poprečne nosivosti, poprečne krutosti, sila u dijagonalama zidnoga ispuna, kao i unutarnjih sila u stupovima armirano-betonskog okvira.

Unutarnje sile u gredi (gredama) armirano-betonskog okvira nisu analizirane niti kod jednog utjecaja, njihov je doprinos na: poprečnu nosivost, poprečnu krutost, te sile u dijagonalama zidnog ispuna puno manji od doprinosa stupova.

## 8.11 ZAKLJUČAK POGLAVLJA

Provedena parametarska analiza ukazuje nam na promjene ponašanja armirano-betonskoga okvira ispunjenoga zidnim ispunom pri određenim utjecajima, prije svega kad se radi o poprečnoj nosivosti i poprečnoj krutosti. Dobiveni numerički rezultati u parametarskoj analizi već su ranije potvrđeni u opisivanju i zaključcima kod eksperimentalnih rezultata, dok neki utjecaji dovode do novih saznanja. Uglavnom, za provedenu parametarsku analizu na osnovu dobivenih numeričkih rezultata možemo reći sljedeće:

- Referentni numerički model bio je kalibrirani model GRUPE I preuzet iz *Poglavlja 6*. Sve bitno vezano za model GRUPE I detaljno je opisano u *Poglavlju 6*.
- Kod analize utjecaja geometrije armirano-betonskog okvira na ponašanje armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom, vidjeli smo kako s povećanjem odnosa visine i duljine armirano-betonskog okvira smanjujemo poprečnu nosivost. Obrnuto, smanjenjem toga odnosa povećava se poprečna nosivost. Sve navedeno vrijedi i za poprečnu krutost. Analizirajući sile u dijagonalama zidnoga ispuna došli smo do zaključka kako najveći doprinos zidnoga ispuna imamo kod najvećeg odnosa visine i duljine armirano-betonskog okvira. To nikako ne znači da imamo i najveću poprečnu nosivost, čak naprotiv. Sile u tlačnoj i posmičnoj dijagonali veće su kod većeg odnosa visine i duljine armirano-betonskog okvira, a tlačne sile veće su od posmičnih.
- Iz analize utjecaja širine tlačne dijagonale možemo sa sigurnošću reći da se s njezinim povećanjem - povećava poprečna nosivost i poprečna krutost armirano-betonskog okvira ispunjenog zidnim ispunom, kao i doprinos samoga zidnoga ispuna. Dvostruko veća širina ne znači i dvostruko veću poprečnu nosivost, odnosno krutost. Slično možemo reći i za sile u dijagonalama zidnoga ispuna, veća širina dijagonale znači i veću tlačnu i posmičnu silu u dijagonali.
- Analizirajući numeričke rezultate, dobivene iz utjecaja čvrstoće dijagonale na poprečnu nosivost i poprečnu krutost, došli smo da zanimljivih zaključaka. Povećanje ili smanjenje čvrstoće dijagonale pri malim katnim pomacima (do 0,05%) nema utjecaja na poprečnu nosivost, odnosno krutost. Povećanjem katnih pomaka (od 0,05%) čvrstoća dijagonale dolazi do izražaja tako što se s njezinim povećanjem povećava poprečna nosivost i mijenja poprečna krutost. Dvostruko veća čvrstoća dijagonale ne znači i dvostruko veću poprečnu nosivost i poprečnu krutost. Zaključci koje smo prethodno naveli potvrđeni su i promatranjem sila u

dijagonalama, s iznimkom kako dvostruko povećanje čvrstoće znači i dvostruko veće sile u dijagonalama. Povećanjem katnih pomaka dolazi do promjene sila u dijagonalama, samim time utjecaj čvrstoće dijagonale dolazi do izražaja.

- Poprečna nosivost i poprečna krutost ne ovise uvelike o vertikalnome opterećenju u stupovima armirano-betonskoga okvira. Povećanjem ili smanjenjem vertikalnog opterećenja neznatno se mijenja poprečna nosivost, a samim time i poprečna krutost. Najznačajniji zaključak koji proizlazi iz analize ovoga utjecaja jest utjecaj vertikalnog opterećenja na ponašanje samoga (praznog) armirano-betonskog okvira, odnosno na njegovu poprečnu nosivost i poprečnu krutost. Promjena vertikalnog opterećenja nema utjecaja na sile u dijagonalama zidnoga ispuna.
- Količina armature, odnosno postotak armiranja stupova armirano-betonskog okvira pri malim nivoima katnih pomaka (do 0,10%), nema velikoga utjecaja na ponašanje armirano-betonskoga okvira ispunjenog zidnim ispunom. Povećanjem nivoa katnih pomaka značajno se povećava poprečna nosivost, a samim time i sekantna krutost. Veći postotak armiranja znači i veću poprečnu nosivost i poprečnu krutost. Postotak armiranja stupova nema utjecaja na sile u dijagonalama zidnoga ispuna. Stoga možemo reći kako postotak armiranja stupova ima utjecaja na sam (prazan) armirano-betonski okvir.
- Za oblik poprečnog presjeka stupova možemo izvesti sličan zaključak kao i kod postotka armiranja stupova armirano-betonskog okvira, promjena oblika poprečnog presjeka, uz zadržavanje iste površine i uzdužne armature, značajno mijenja poprečnu nosivost i poprečnu krutost. Oblik poprečnog presjeka stupova ima zanemariv utjecaj na sile u dijagonalama zidnoga ispuna.
- Broj polja armirano-betonskog okvira značajno utječe na poprečnu nosivost i poprečnu krutost. Povećanjem broja polja povećava se poprečna nosivost i poprečna krutost. S druge strane, broj polja armirano-betonskog okvira nema utjecaja na sile u dijagonalama zidnoga ispuna, jednake su bez obzira na broj polja.
- Utjecaj metode analize kod promatranih numeričkih modela nema većeg značaja. Razlike koje se tiču poprečne nosivosti, poprečne krutosti i sila u dijagonalama zidnoga ispuna su zanemarive.

Na kraju, možemo reći kako parametarska analiza otkriva ponašanje armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom pri promjenama različitih utjecaja, poput geometrije, itd.



## POGLAVLJE 9: PRIJEDLOG METODE PRORAČUNA

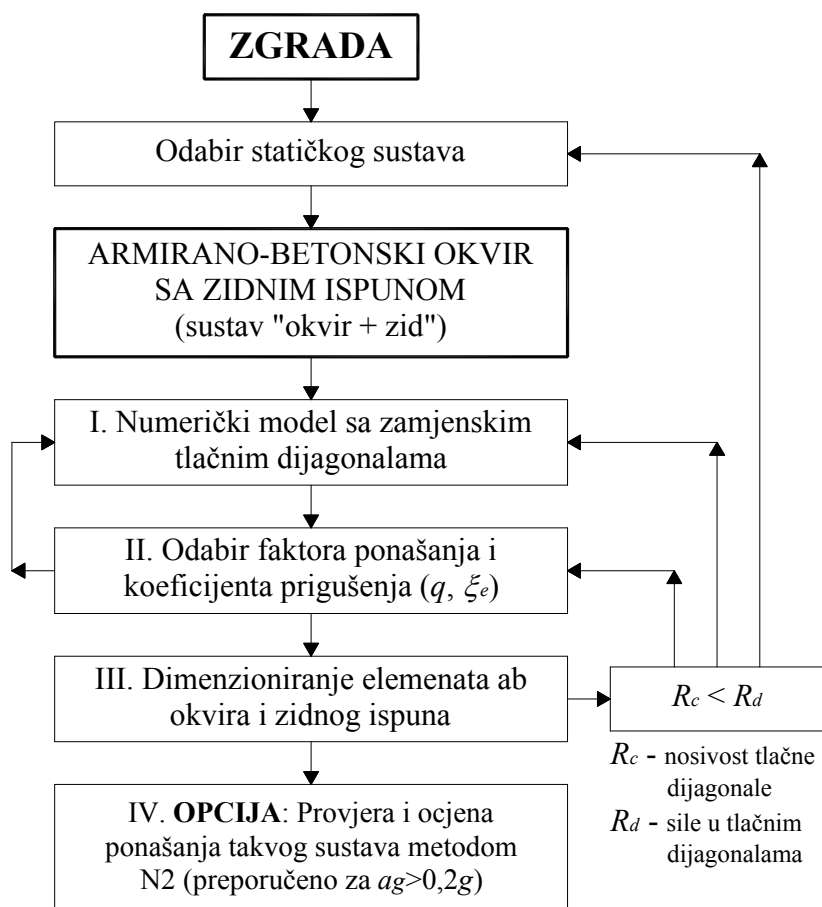
### 9.1 UVOD

U ovome poglavlju prikazan je prijedlog Metode proračuna armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom primjenom linearnoga proračuna uobičajenoga u inženjerskoj praksi. Predložena metoda proizlazi iz prethodnih eksperimentalnih i numeričkih analiza.

Metoda proračuna provjerena je i opravdanost njezine primjene dokazana je na modelima višekatnih armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom pri različitom potresnom opterećenju. Ocjena ponašanja urađena je primjenom nelinearne metode N2 [9, 15, 16, 17, 18, 19, 26, 28, 29, 30].

### 9.2 PRIJEDLOG METODE PRORAČUNA

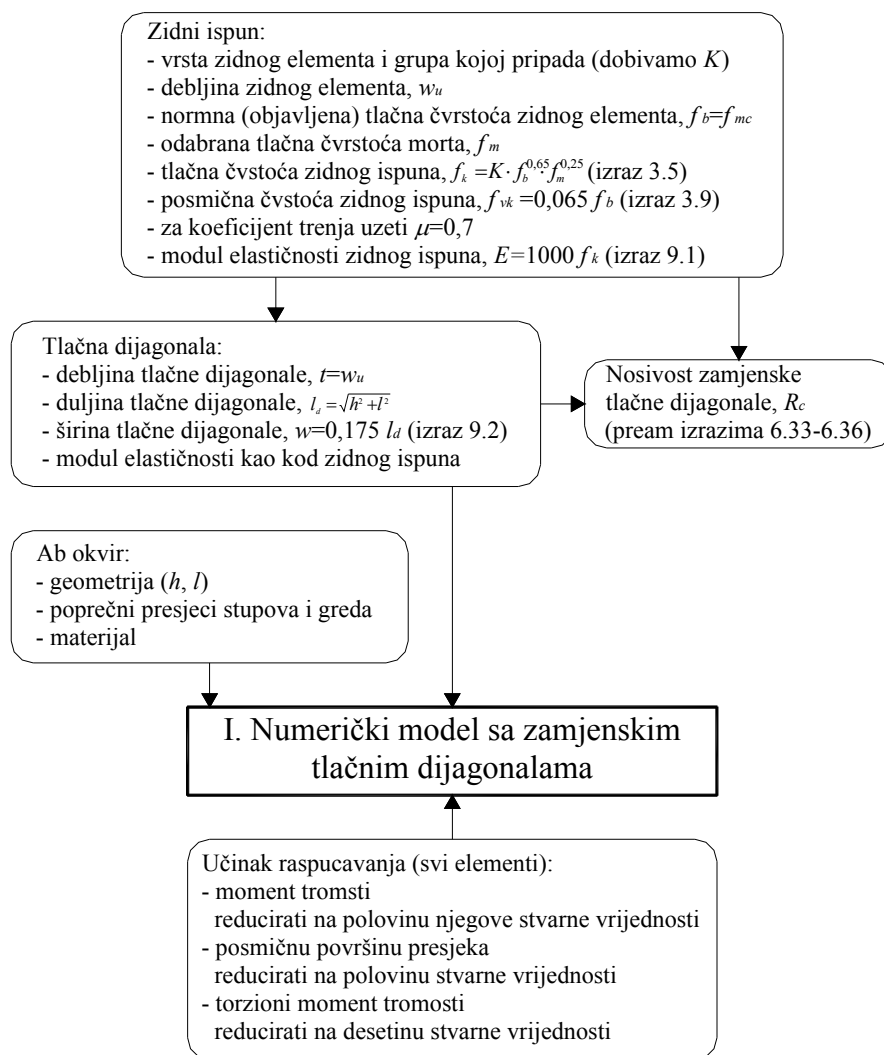
Prijedlog metode proračuna armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom linearnom analizom sastoji se u sljedećim koracima prikazanim na *slici 9.1 a*).



Slika 9.1 a) Dijagram tijeka prijedloga Metode proračuna ab okvira sa zidnim ispunom

## I. Numerički model sa zamjenskim tlačnim dijagonalama

Za dobivanje numeričkoga modela, osim definiranja geometrije, materijala i poprečnih presjeka elemenata armirano-betonskog okvira, potrebno je definirati svojstva tlačne dijagonale kojom se zamjenjuje zidni ispun, *slika 9.1 b*).



Slika 9.1 b) Dijagram tijeka numeričkoga modela sa zamjenskim tlačnim dijagonalama

Potrebno je odabrati vrstu zidnoga ispuna, odnosno zidnoga elementa i grupu kojoj pripada. Za tako odabran zidni element dobivamo njegovu debljinu,  $w_u$ , i objavljenu tlačnu čvrstoću,  $f_{mc}$ . Normna tlačna čvrstoća zidnog elementa,  $f_b$ , uzima se kao jednaka objavljenoj tlačnoj čvrstoći ako se ne provode eksperimentalna ispitivanja zidnih elemenata. Za tako odabran zidni element i odabranu nazivnu tlačnu čvrstoću morta,  $f_m$ , prema izrazima (3.5) i (3.9), može se odrediti karakteristična tlačna,  $f_k$ , i posmična,  $f_{vk}$ , čvrstoća zidnoga ispuna. Koeficijent trenja može se uzeti s vrijednošću  $\mu=0,7$ .

Nakon određivanja tlačne čvrstoće zidnoga ispuna može se odrediti modul elastičnosti zidnoga ispuna prema izrazu:

$$E = 1000 \cdot f_k. \quad (9.1)$$

U ovome koraku, za tlačnu dijagonalu potrebno je definirati geometriju pravokutnog poprečnog presjeka štapa ( $t$ ,  $w$ ) i materijalna svojstva (modul elastičnosti zidnog ispuna,  $E$ ). Debljina dijagonale (širina poprečnog presjeka štapa),  $t$ , uzima se kao jednaka debljini zidnoga ispuna,  $w_u$ . Širina dijagonale (visina poprečnog presjeka štapa),  $w$ , određuje se prema sljedećem izrazu koji je kalibriran na eksperimentalnim rezultatima:

$$w = 0,175 \cdot l_d, \quad (9.2)$$

gdje je:  $l_d = \sqrt{h^2 + l^2}$  duljina tlačne dijagonale prema **slici 6.2** ( $h$ -visina zidnog ispuna;  $l$ -duljina zidnog ispuna).

Tlačna dijagonala (štap) modelira se tako da preuzima samo uzdužne tlačne sile u numeričkome modelu.

Prema Eurocode 8 [26], kod modeliranja elemenata armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom (stupovi, grede, tlačne dijagonale), što se tiče krutosti nosivih elemenata treba općenito uzeti u obzir učinak raspucavanja. Takva krutost treba odgovarati početku popuštanja armature. Ako se ne provodi točniji proračun raspucanih elemenata, smije se uzeti da je elastična krutost pri savijanju i posmiku betonskih i zidanih elemenata jednaka polovini odgovarajuće krutosti neraspucanih elemenata. U ovome radu, kod svih numeričkih modela, reduciran je moment inercije i posmična površina presjeka svih elemenata armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom na polovinu svoje vrijednosti, kao i torzioni moment inercije koji je reduciran na desetinu svoje vrijednosti. Ovakvo modeliranje dodatno se može potkrijepiti i promatranjem opadanja krutosti pojedinih grupa modela dobivenih obradom rezultata eksperimentalnih ispitivanja, *Poglavlje 4.5.5*.

Vertikalno opterećenje na numeričkim modelima uzeto je sukladno propisima, dok je horizontalno opterećenje (horizontalne sile) dobiveno na osnovu definiranja horizontalnoga elastičnog spektra odziva, odnosno proračunskog spektra za elastični proračun prema Eurocodeu 8 [26]. Za dobivanje proračunskog spektra za elastični proračun potrebno je odabrati faktor ponašanja u sljedećem koraku.

## II. Odabir faktora ponašanja i koeficijenta prigušenja

U ovome koraku potrebno je definirati faktor ponašanja,  $q$ , i koeficijent prigušenja,  $\xi_e$ . Za omeđeno ziđe vrijednost faktora ponašanja kreće se u intervalu od 2,0-2,5. Za armirano-betonske okvire njegova se vrijednost kreće u intervalu od cca. 3,5 na više [26]. Na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja dobiveni su faktori ponašanja armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom prikazani u **tablici 4.23** i na **slici 4.74**, ovisno o nivou katnoga pomaka. Iz navedene tablice, odnosno slike, možemo očitati vrijednost faktora ponašanja za katni pomak od 0,50%, čija je vrijednost 3,25. Međukatni (katni) pomak od 0,50%, odabran je kao međukatni pomak preko kojeg se ne preporuča oštećenje zidnoga ispuna.

Prema istim rezultatima eksperimentalnih ispitivanja i nivou katnoga pomaka od 0,50%, očitani su i koeficijenti prigušenja od približno 14% za armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom. Vrijednosti koeficijenata prigušenja prikazane su u **tablici 4.24** i na **slici 4.84**.

Prije dimenzioniranja elemenata armirano-betonskog okvira i zidnoga ispuna, za nastavak istraživanja ostavljena je mogućnost ocjene očekivanih nelinearnih pomaka na osnovu rezultata linearnog numeričkog modela. Time bi se mogao procijeniti očekivani stupanj oštećenja zidnoga ispuna. Na osnovu tako procijenjenih neelastičnih pomaka mogao bi se izbjeći zadnji korak u predloženoj metodi proračuna, tj. nelinearni proračun prilikom većih intenziteta potresa.

## III. Dimenzioniranje elemenata armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna

Linearnom analizom numeričkoga modela iz 2. koraka, za definirano horizontalno i vertikalno opterećenje, kao i mjerodavnu kombinaciju djelovanja, dobivaju se maksimalne vrijednosti unutarnjih uzdužnih tlačnih sila u dijagonalama,  $R_d$  (štapovima).

Dimenzioniranje zidnoga ispuna vrši se usporedbom nosivosti tlačne dijagonale,  $R_c$ , s dobivenom silom u tlačnoj dijagonali iz numeričkog modela,  $R_d$ . Za odabrani zidni ispun, prema izrazima (6.33) do (6.36), odrede se čvrstoće dijagonale,  $f_{mi}$ , ovisno o mogućem mehanizmu sloma zidnoga ispuna. Za tako određene čvrstoće dijagonale odabire se najmanja dobivena vrijednost čvrstoće dijagonale,  $f_{m,min}$ .

Nosivost dijagonale, odnosno sila koju dijagonala može izdržati,  $R_c$ , dobiva se množenjem odabrane najmanje čvrstoće s površinom tlačne dijagonale,  $A_d$  ( $R_c = f_{m,min} A_d$ ;  $A_d = w t$ ).

Ako je sila u dijagonali, dobivena numeričkim modelom, manja od nosivosti dijagonale ( $R_c > R_d$ ), pristupa se dimenzioniranju elemenata armirano-betonskoga okvira.



Ako je nosivost dijagonale manja od maksimalne sile u dijagonali dobivene numeričkim modelom ( $R_c < R_d$ ), može se izvršiti korekcija zidnoga ispuna (zidnog elementa) kako bi se povećala nosivost dijagonale. Osim korekcije zidnoga ispuna, može se korigirati i faktor ponašanja, odnosno koeficijent prigušenja, kao i dimenzije poprečnih presjeka stupova i greda armirano-betonskog okvira. Ako su te korekcije nemoguće ili neopravdane, onda je potrebno izvršiti korekciju statičkoga sustava.

Dimenzioniranje elemenata armirano-betonskog okvira treba provesti poštujući sva pravila propisana u EC2 [24] i EC8 [26]. Ovdje se dodatno treba voditi računa kako bi poprečna armatura u stupovima bila progušćena cijelom visinom stupa, a ne samo u blizini čvorova, odnosno spoja s gredama. U stupovima, tj. u poljima armirano-betonskoga okvira (gledano po visini) gdje je sila u dijagonali manja od 70% nosivosti dijagonale, nije potrebno progušćivanje poprečne armature cijelom visinom stupa. Ovo je preporuka koju treba primjenjivati dok se ne istraži utjecaj zidnoga ispuna na poprečnu armaturu u stupovima armirano-betonskoga okvira.

#### **IV. OPCIJA: Provjera i ocjena ponašanja takvog sustava metodom N2**

U ovome koraku vrši se kontrola ovako predložene metode proračuna armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom. U nastavku će biti detaljno objašnjena metoda N2 po svojim koracima. Na osnovu nelinearnog proračuna, primjenom navedene metode, moguće je ocijeniti ponašanje sustava „okvir+zid“, kao i procijeniti stupanj oštećenja zidnoga ispuna na osnovu vrijednosti međukatnih pomaka. Također, može se vidjeti i redoslijed, odnosno položaj nastanka plastičnih zglobova. Ovaj korak preporuča se za proračunska ubrzanja na temeljnom tlu veća od 0,2g.

### **9.3 PRIMJENA PREDLOŽENE METODE PRORAČUNA**

Primjena Metode proračuna armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom prikazana je na numeričkim modelima. Modeli imaju različitu katnost, a izloženi su različitim potresnim djelovanjima. Provjera predložene metode urađena je primjenom metode određivanja ciljanog pomaka nelinearnim statičkim proračunom (N2-metoda). Analizirano je ukupno 18 modela (4, 7 i 10 katova) praznih i okvira s ispunom za potresna djelovanja od 0,1g, 0,2g i 0,3g.

### 9.3.1 Odabir zidnog ispuna

Za primjenu predložene metode proračuna odabran je glineni šuplji zidni element MO10 koji spada u grupu zidnih elemenata 2. Zidni elementi zidat će se mortom opće namjene M5. Za ovako odabran zidni element i mort mogu se dobiti osnovni podatci o zidnom ispunu. Svi potrebni podatci o zidnome elementu, mortu i zidnome ispunu sažeto su prikazani u **tablici 9.1**.

**Tablica 9.1** Svojstva zidnog elementa, morta i zidnog ispuna

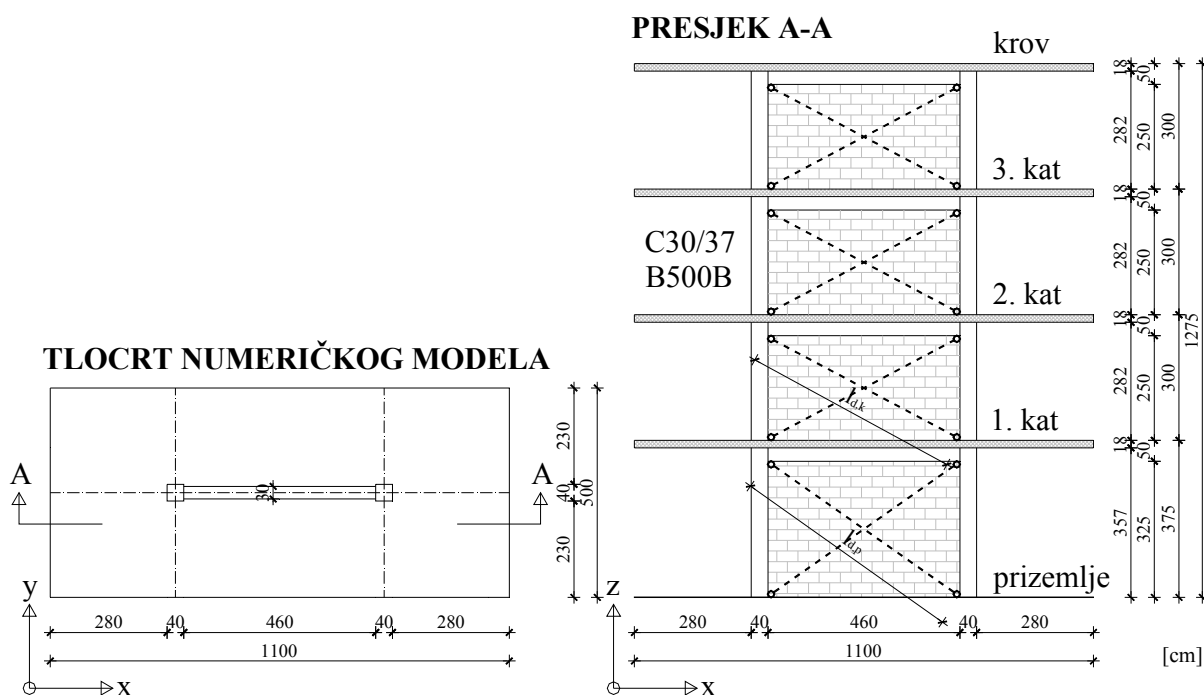
Zidni element	Blok opeka
Vrsta zidnog elementa	Glineni šuplji
Grupa zidnog elementa	2
Širina (debljina) zidnog elementa, $w_u$ [mm]	300
Normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa MO10, $f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10
Tlačna čvrstoća morta opće namjene M5, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5
Tlačna čvrstoća zidnog ispuna, $f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25}$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	3,01
Modul elastičnosti zidnog ispuna, $E = 1000 \cdot f_k$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>2)</sup>	3005,76
Posmična čvrstoća zidnog ispuna, $f_{vk} = 0,065 \cdot f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>3)</sup>	0,65
Koeficijent trenja, $\mu$ <sup>4)</sup>	0,70
<sup>1)</sup> Karakteristična tlačna čvrstoća zidnog ispuna prema izrazu (3.5). Koeficijent, $K$ , ovisi o vrsti morta i grupi zidnog elementa. Prema <b>tablici 3.18</b> slijedi da je $K=0,45$ . <sup>2)</sup> Modul elastičnosti prema izrazu (9.1). <sup>3)</sup> Karakteristična posmična čvrstoća zidnog ispuna prema izrazu (3.9). <sup>4)</sup> Za pretpostavljeni kut unutarnjeg trenja, $\alpha=35^\circ$ , dobiva se koeficijent trenja prema izrazu: $\mu=tg\alpha$ . Pretpostavka kuta unutarnjeg trenja izvršena je na osnovu eksperimentalnih ispitivanja posmične čvrstoće.	

### 9.3.2 Numerički modeli

#### 9.3.2.1 Ulazni podaci

Promatrani numerički modeli prikazani su na **slikama 9.2 - 9.4**. Treba napomenuti kako je posebno promatran prazan armirano-betonski okvir, a posebno okvir sa zidnim ispunom za različite katnosti. Zidni ispun modeliran je pomoću tlačnog štapa (tlačne dijagonale) čije će karakteristike biti prikazane u nastavku.

Tlocrtna ploština svih promatranih modela uvijek je ista. Ovisno o broju katova mijenjane su samo dimenzije poprečnih presjeka stupova i greda armirano-betonskog okvira.



Slika 9.2 Numerički model - 4. kata

Svi numerički modeli projektirani su za izvođenje od betona klase C30/37 i armiranje rebrastom armaturom B500B. Poprečni presjeci stupova i greda armirano-betonskog okvira (sa i bez zidnog ispuna) mogu se iščitati sa *slika 9.2 – 9.4*.

Poprečni presjek tlačnih štapova (tlačnih dijagonala), kojima se zamjenjuje zidni ispun, prikazan je u *tablici 9.2* ovisno o numeričkom modelu, odnosno njegovoj katnosti. Modeliranje svih elemenata izvršeno je sa smanjenom krutošću, tj. reducirani su moment tromosti i posmična površina na polovinu svoje vrijednosti, dok je moment torzije reduciran na desetinu svoje vrijednosti.

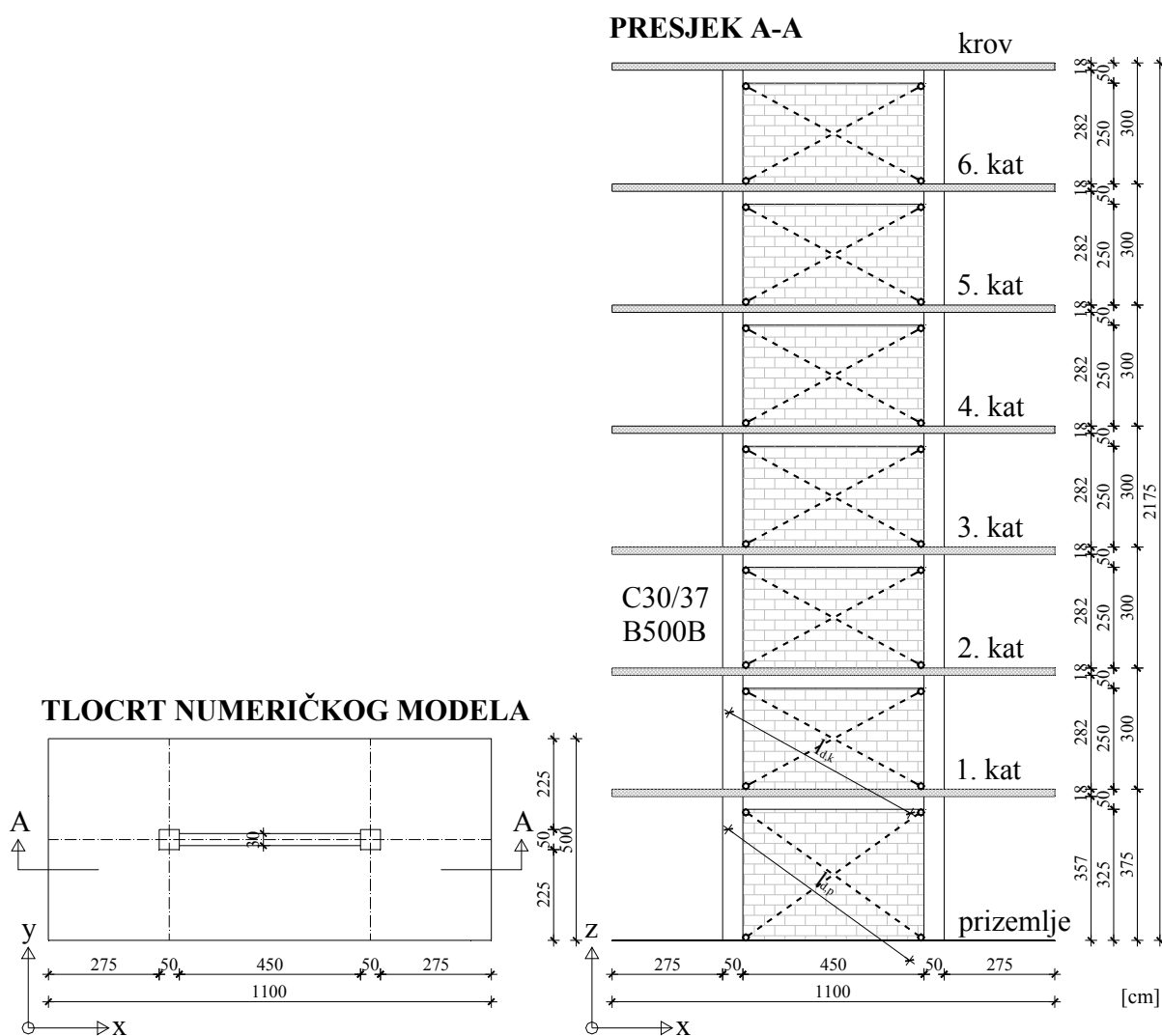
Vertikalno opterećenje, također, na svim je modelima zadržano isto. Stalno vertikalno površinsko opterećenje, uključujući i vlastitu težinu stropne ploče po katovima, iznosi  $6,25 \text{ kN/m}^2$ , dok na zadnjem katu, odnosno krovu, iznosi  $6,50 \text{ kN/m}^2$ . Vlastita težina zidnoga ispuna debljine 30cm, uzeta je kao stalno vertikalno jednoliko linijsko opterećenje s intenzitetom od  $12 \text{ kN/m}$ .

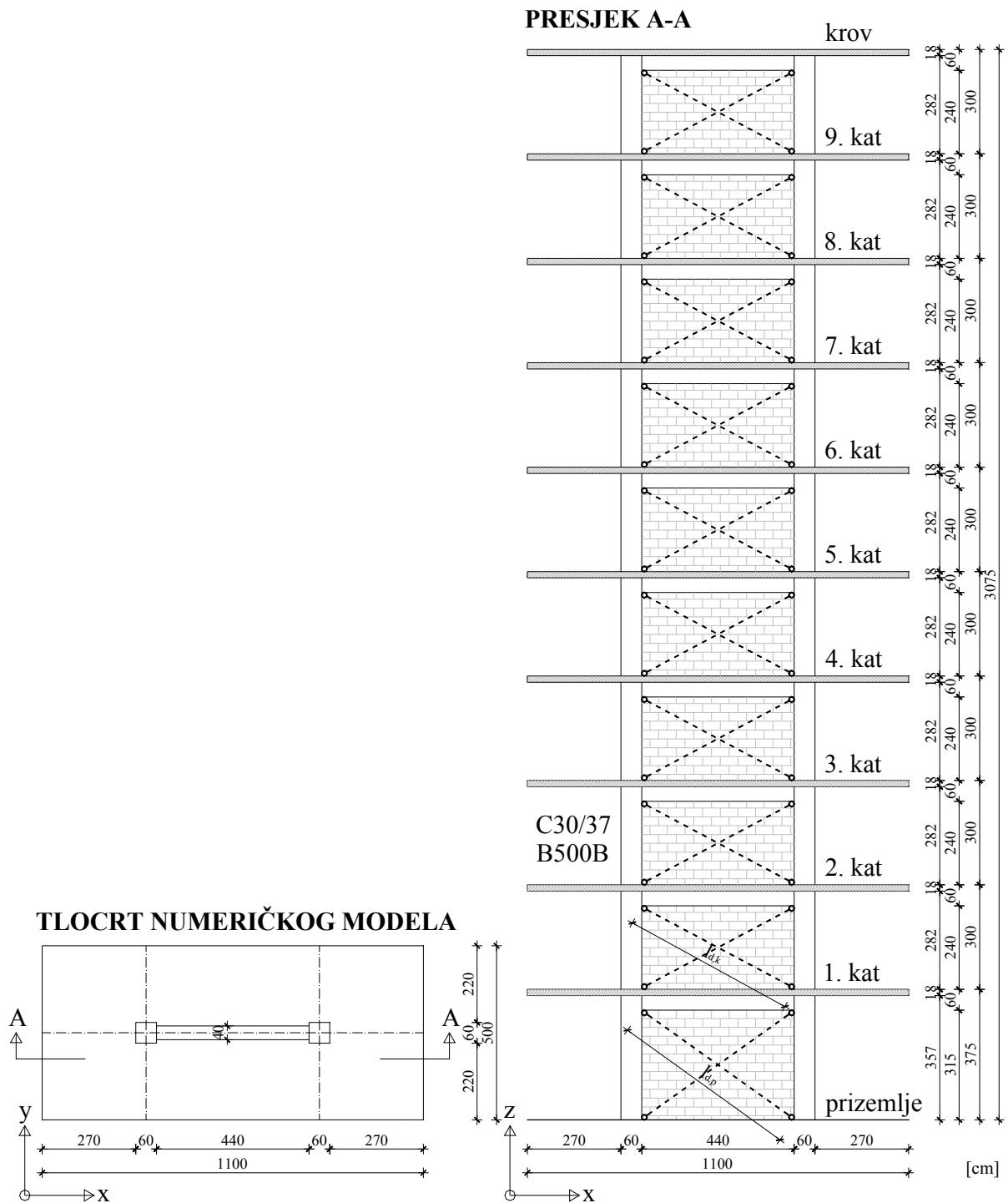
Vlastita težina stupova i greda okvira uzeta je automatski pomoću programa u kojem je rađen proračun vlastitih vrijednosti, Tower5. Korisno vertikalno površinsko opterećenje po katovima iznosi  $3,00 \text{ kN/m}^2$ , dok na zadnjem katu, odnosno krovu iznosi  $1,25 \text{ kN/m}^2$ .

**Tablica 9.2** Poprečni presjeci tlačnih štapova (tlačnih dijagonala)

NUMERIČKI MODEL	Širina presjeka, $t=w_u$ [mm]	Visina presjeka u prizemlju, $w=0,175 l_{d,p}$ [mm]	Visina presjeka na katovima, $w=0,175 l_{d,k}$ [mm]	Modul elastičnosti, $E$ <sup>1)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]
4. kata	300	985,65	916,20	3005,76
7. katova	300	971,41	900,87	3005,76
10. katova	300	946,98	877,10	3005,76

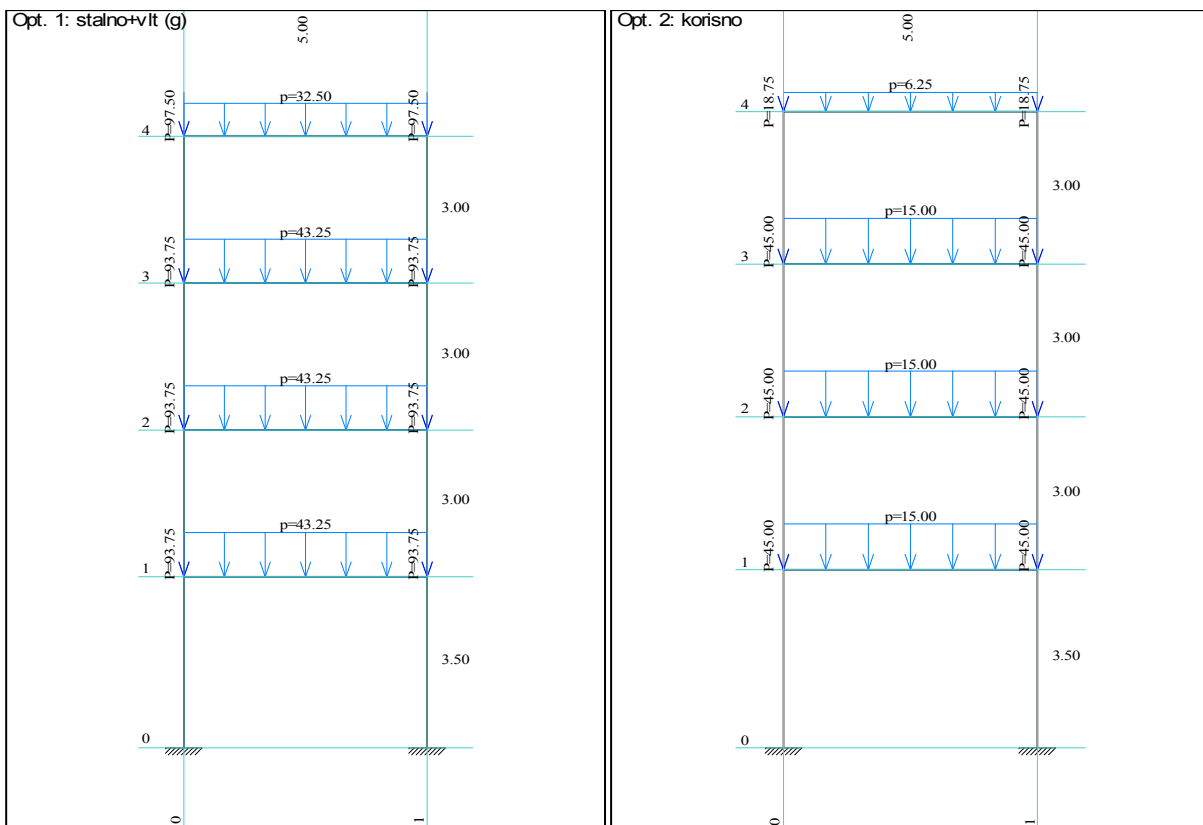
<sup>1)</sup> Za modul elastičnosti tlačnih štapova,  $E$ , uzeta je vrijednost za zidni ispun iz **tablice 9.1**.


**Slika 9.3** Numerički model - 7. katova

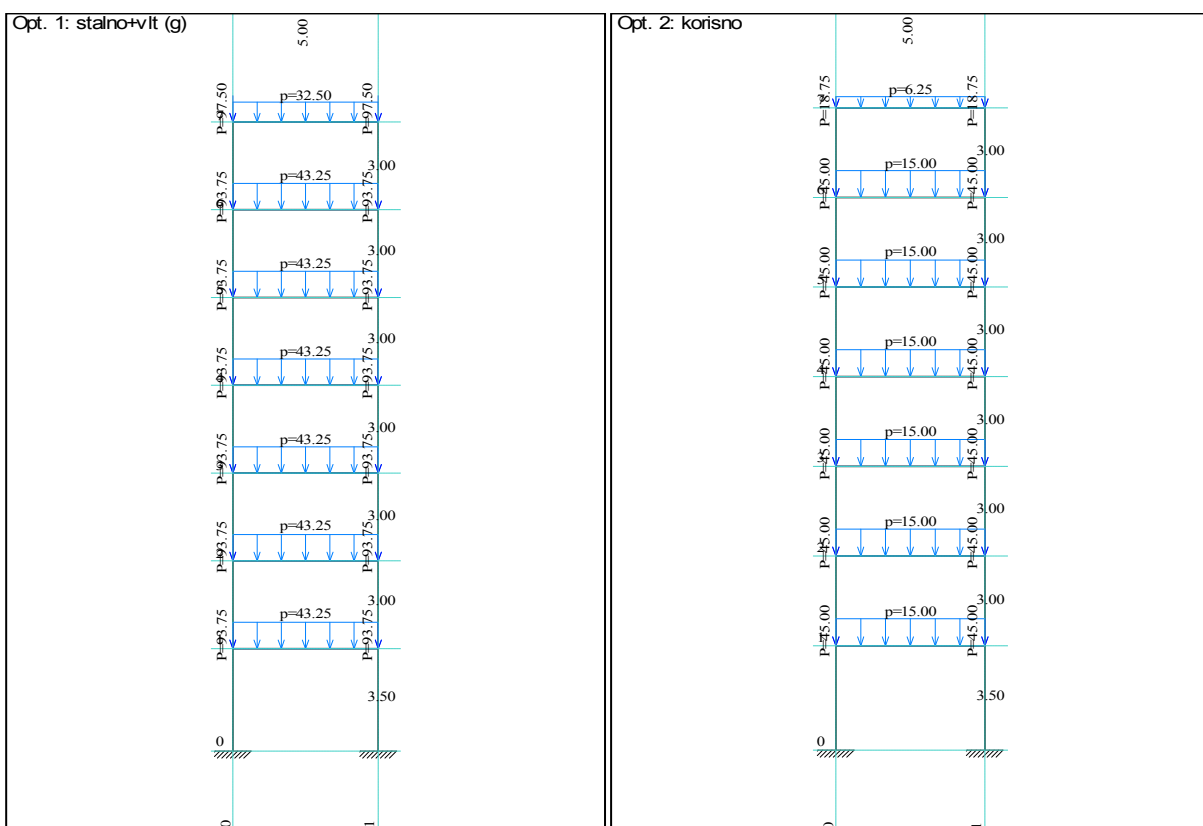


**Slika 9.4** Numerički model - 10. katova

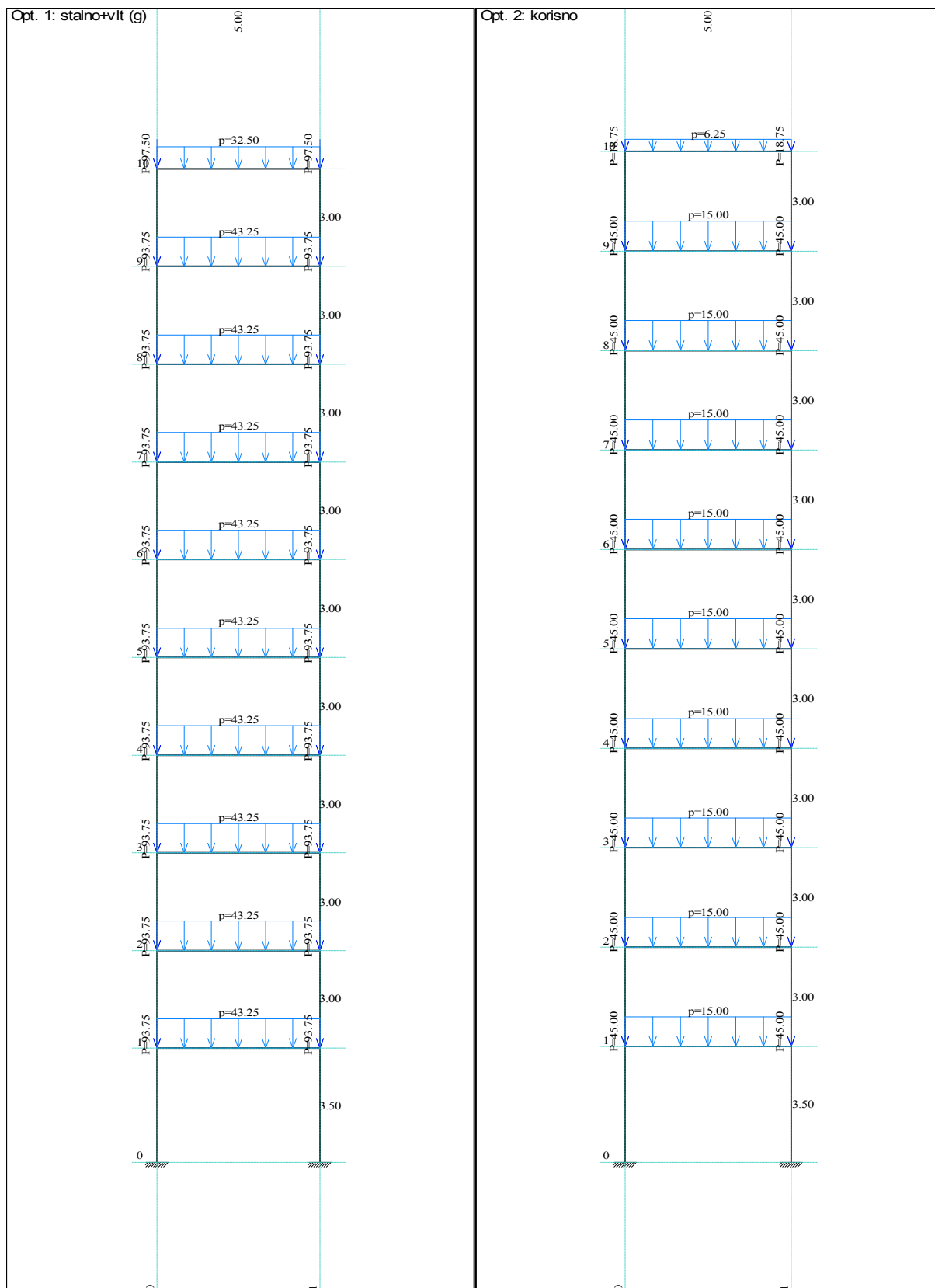
Raspodjela vertikalnog stalnog i korisnog opterećenja na modelima prikazana je na *slikama 9.5 - 9.7*. Na osnovu tako raspoređenog vertikalnog opterećenja izračunate su mase na svakoj etaži na način kako je to prikazano u proračunu vlastitih vrijednosti.



Slika 9.5 Raspodjela vertikalnog stalnog i korisnog opterećenja na modelu - 4. kata



Slika 9.6 Raspodjela vertikalnog stalnog i korisnog opterećenja na modelu - 7. katova



Slika 9.7 Raspodjela vertikalnog stalnog i korisnog opterećenja na modelu - 10. katova

### 9.3.2.2 Proračun vlastitih vrijednosti

Proračun vlastitih vrijednosti svih numeričkih modela napravljen je u programskom paketu Tower5 korištenjem mreže konačnih elemenata. Za dobivanje potrebnih masa korištena je sljedeća kombinacija djelovanja [26]:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i} \quad (9.3)$$

gdje je:  $G_{k,j}$  stalno djelovanje,  
 $\psi_{E,i}$  faktor kombinacije za promjenjivo djelovanje  $i$   
 $Q_{k,i}$  korisno djelovanje

Faktor kombinacije za promjenjivo djelovanje dobiva se iz sljedećega izraza:

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i} \quad (9.4)$$

gdje je:  $\varphi = 1,0$  za krov i  $\varphi = 0,8$  za katove s povezanom zauzetošću,  
 $\psi_{2,i} = 0,30$  faktor kombinacije.

Raspored masa po visini modela prikazan je u **tablicama 9.3-9.5**.

**Tablica 9.3** Raspored masa po visini modela – 4. kata

Visine masa [m]	Kat	$G_{k,j}$ [kN]	$\psi_{E,i}$	$Q_{k,i}$ [kN]	$m_i$ [kN]
12,50	krov	388,48	0,30	68,87	409,14
9,50	3. kat	446,75	0,24	165,00	486,35
6,50	2. kat	446,75	0,24	165,00	486,35
3,50	1. kat	448,71	0,24	165,00	488,31
0	pod	13,93	0,24	0,00	13,93
Ukupna masa, $m = \sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} Q_{k,i}$ [kN]					<b>1884,07</b>

**Tablica 9.4** Raspored masa po visini modela – 7. katova

Visine masa [m]	Kat	$G_{k,j}$ [kN]	$\psi_{E,i}$	$Q_{k,i}$ [kN]	$m_i$ [kN]
21,50	krov	395,15	0,30	68,87	415,81
18,50	6. kat	460,09	0,24	165,00	499,69
15,50	5. kat	460,09	0,24	165,00	499,69
12,50	4. kat	460,09	0,24	165,00	499,69
9,50	3. kat	460,09	0,24	165,00	499,69
6,50	2. kat	460,09	0,24	165,00	499,69
3,50	1. kat	463,23	0,24	165,00	502,83
0	pod	21,97	0,24	0,00	21,97
Ukupna masa, $m = \sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} Q_{k,i}$ [kN]					<b>3439,06</b>



**Tablica 9.5** Raspored masa po visini modela – 10. katova

Visine masa [m]	Kat	$G_{k,j}$ [kN]	$\psi_{E,i}$	$Q_{k,i}$ [kN]	$m_i$ [kN]
30,50	krov	414,57	0,30	68,87	435,23
27,50	9. kat	487,95	0,24	165,00	527,55
24,50	8. kat	487,95	0,24	165,00	527,55
21,50	7. kat	487,95	0,24	165,00	527,55
18,50	6. kat	487,95	0,24	165,00	527,55
15,50	5. kat	487,95	0,24	165,00	527,55
12,50	4. kat	487,95	0,24	165,00	527,55
9,50	3. kat	487,95	0,24	165,00	527,55
6,50	2. kat	487,95	0,24	165,00	527,55
3,50	1. kat	492,46	0,24	165,00	532,06
0	pod	31,59	0,24	0,00	31,59
Ukupna masa, $m = \sum G_{k,j} \psi_{E,i} + \sum Q_{k,i}$ [kN]					<b>5219,28</b>

Za prikazane vrijednosti masa i njihov raspored po visinama prema **tablicama 9.3 – 9.5**, proračunom vlastitih vrijednosti, dobiveni su prvi osnovni periodi za prvi oblik osciliranja sustava u x-smjeru koji su prikazani u **tablici 9.6**.

**Tablica 9.6** Osnovni periodi numeričkih modela za prvi oblik osciliranja konstrukcije

NUMERIČKI MODEL	Osnovni period, $T_I$ [s]
Prazan armirano-betonski okvir – 4. kata	0,980
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 4. kata	0,412
Prazan armirano-betonski okvir – 7. katova	1,509
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova	0,759 (0,717)
Prazan armirano-betonski okvir – 10. katova	1,617
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova	1,117 (1,072)

### 9.3.2.3 Seizmička analiza

Proračun horizontalnih seizmičkih sila za sve numeričke modele napravljen je u svemu prema EC8 [26]. Postupak dobivanja seizmičkih sila provodi se u nekoliko točaka:

#### 1. Definiranje zahtjeva,

U ovoj točki mogu se postaviti osnovni zahtjevi za konstrukciju. Zahtjevi se prije svega odnose na potresnu zonu (poredbeno vršno ubrzanje temeljnog tla), kategoriju tla, kategoriju značaja, zahtijevanu duktilnost i zahtijevano prigušenje.

Proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu određuje se prema sljedećem izrazu:

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}, \quad (9.5)$$

gdje je:  $\gamma_I=1,00$  faktor važnosti i

$a_{gR}$  poredbeno vršno ubrzanje temeljnog tla. Za sve analitičke modele promatrana su tri poredbena vršna ubrzanja temeljnog tla ( $a_{gR}=0,1g$ ;  $a_{gR}=0,2g$ ;  $a_{gR}=0,3g$ , gdje je  $g=9,81$  [m/s<sup>2</sup>] ubrzanje).

Za sve numeričke modele usvaja se kategorija tla B, kategorija značaja (razred važnosti) II, srednja duktilnost DCM, 5%-tno viskozno prigušenje za prazne armirano-betonske okvire i 14%-tno viskozno prigušenje za armirano-betonske okvire sa zidnim ispunom, koje je dobiveno na temelju eksperimentalnih ispitivanja pri nivou katnog pomaka od 0,50% (pogledati **sliku 4.84**).

#### 2. Definiranje horizontalnog elastičnog spektra odziva,

Elastični spektar odziva,  $S_e(T)$ , definiran je za horizontalnu komponentu potresnog djelovanja sljedećim izrazima:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 2,5 - 1) \right], \quad (9.6)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5, \quad (9.7)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right], \quad (9.8)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right], \quad (9.9)$$

gdje je:  $S_e(T)$  elastični spektar odziva,

T period vibracija linearnog sustava s jednim stupnjem slobode,

$a_g$  proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu (izraz 9.5),

$T_B$	donja granica perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja,
$T_C$	gornja granica perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja,
$T_D$	vrijednost koja definira početak konstantnog raspona odziva u spektru pomaka,
$S$	faktor tla $i$
$\eta$	faktor korekcije prigušenja uz poredbenu vrijednost $\eta=1,00$ za 5%-tno viskozno prigušenje

Vrijednosti perioda,  $T_B$ ,  $T_C$  i  $T_D$  i faktora tla,  $S$ , koje opisuju oblik elastičnog spektra odziva ovise o tipu temeljnog tla. Vrijednosti parametara koje opisuju preporučeni elastični spektar odziva tipa 1, prikazane su u **tablici 9.7**.

**Tablica 9.7** Vrijednosti parametara koje opisuju preporučeni elastični spektar odziva tipa 1

Tip temeljnog tla	$S$	$T_B$ [s]	$T_C$ [s]	$T_D$ [s]
A	1,00	0,15	0,4	2,0
B <sup>1)</sup>	1,20	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,40	0,15	0,5	2,0
<sup>1)</sup> Odabrani tip temeljnog tla.				

Vrijednost faktora korekcije prigušenja,  $\eta$ , može se odrediti iz izraza:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55, \quad (9.10)$$

gdje je:  $\xi$  omjer viskoznog prigušenja konstrukcije izražen postotkom.

### 3. Definiranje proračunskog spektra za elastični proračun,

Za horizontalnu komponentu potresnog djelovanja proračunski spektar,  $S_d(T)$ , definiran je sljedećim izrazima:

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right], \quad (9.11)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}, \quad (9.12)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right], \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (9.13)$$

$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right], \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (9.14)$$

gdje je:  $a_g$ ,  $S$ ,  $T_C$  i  $T_D$  definirano u prethodnoj točki,

$S_d(T)$  proračunski spektar,

$q$  faktor ponašanja i

$\beta$  donja vrijednost faktora horizontalnog spektra odziva. Preporučena je vrijednost 0,2.

Faktor ponašanja za horizontalna djelovanja za prazan armirano-betonski okvir ( $q=3,90$ ) dobiven je prema izrazu:

$$q = q_0 \cdot k_w \geq 1,50, \quad (9.15)$$

gdje je:  $q_0 = 3 \cdot \alpha_u / \alpha_1$  osnovni faktor ponašanja za sustave pravilne po visini za

DCM,  $\alpha_u / \alpha_1 = 1,30$ ,

$k_w = 1,00$  faktor kojim se uzima prevladavajući oblik sloma.

Faktor ponašanja za horizontalna djelovanja za armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom iznosi  $q=3,25$  za nivo katnoga pomaka od 0,5% (pogledati **tablicu 4.23** i **sliku 4.74**).

#### 4. Definiranje kombinacija potresnog djelovanja s drugim djelovanjima,

Definiranje kombinacija potresnog djelovanja s drugim djelovanjima izvršeno je u svemu kako je opisano kod proračuna vlastitih vrijednosti (*točka 9.3.2.2*).

#### 5. Određivanje poprečne sile u podnožju,

Potresna poprečna sila u podnožju proračunava se prema sljedećem izrazu:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda, \quad (9.16)$$

gdje je:  $S_d(T_1)$  ordinata proračunskoga spektra za elastični proračun za period  $T_1$

$m$  ukupna masa zgrade iznad temelja i

$\lambda$  popravni faktor čija je vrijednost  $\lambda=0,85$  ako je  $T_1 > 2T_c$  i ako zgrada ima više od dva kata ili  $\lambda=1,00$  u drugim slučajevima.

### 6. Raspodjela horizontalnih potresnih sila,

Raspodjela horizontalnih potresnih sila izvršena je prema sljedećem izrazu:

$$F_i = F_b \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j}, \quad (9.17)$$

gdje je:

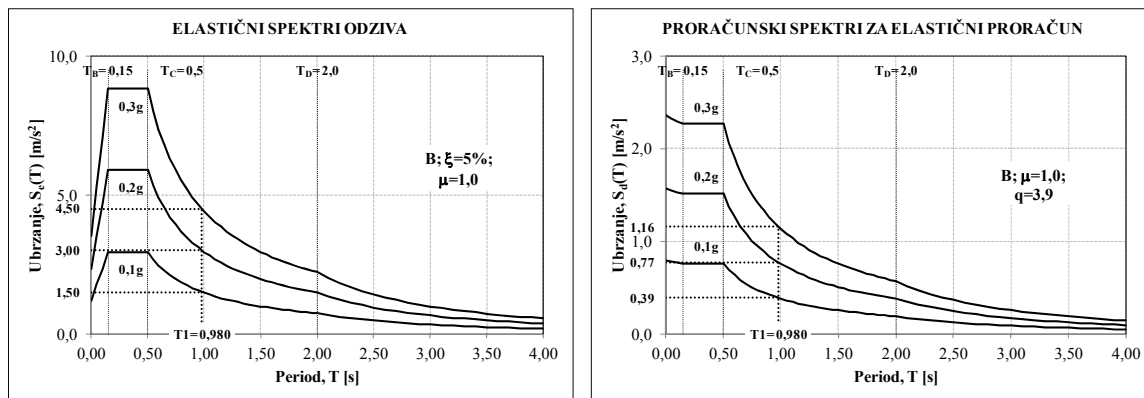
- $F_i$  horizontalna sila na  $i$ -tom katu,
- $F_b$  potresna poprečna sila u podnožju prema (9.16),
- $z_i, z_j$  visina masa  $m_i, m_j$  i
- $m_i, m_j$  mase katova.

### 7. Prikaz horizontalnih potresnih sila.

Pod ovom se točkom misli na grafički prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na pojedinim numeričkim modelima.

**Prazan armirano-betonski okvir – 4. kata**

Prema izrazima za elastični spektar odziva i proračunski spektar za elastični proračun, dobiveni su spektri prikazani na **slici 9.8**.



**Slika 9.8** Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun

Potresna poprečna sila u podnožju prema izrazu (9.16) za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu prikazana je u **tablici 9.8**.

**Tablica 9.8** Potresna poprečna sila u podnožju

$F_b$ [kN]	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$S_d(T_1)$ [m/s <sup>2</sup> ]	$m$ [kN] <sup>1)</sup>	$\lambda$
73,94	0,98	0,39	1884,07	1,0
147,89	1,96	0,77	1884,07	1,0
221,83	2,94	1,16	1884,07	1,0

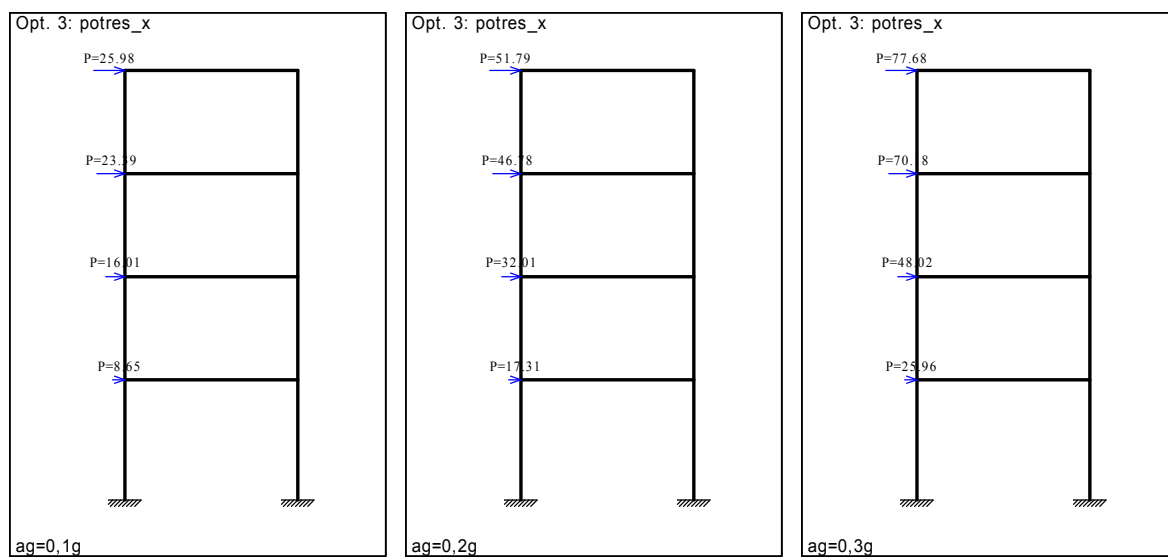
<sup>1)</sup> Ukupna masa zgrade iznad temelja prema **tablici 9.3**.

Raspodjela horizontalnih potresnih sila za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu izvršena je prema izrazu (9.17) i prikazana u **tablici 9.9**.

**Tablica 9.9** Raspodjela horizontalnih potresnih sila

$z_i$ [m]	Kat	$m_i$ [kN]	$z_i m_i$ [kNm]	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )
12,50	krov	409,14	5114,20	25,89	51,79	77,68
9,50	3. kat	486,35	4620,31	23,39	46,78	70,18
6,50	2. kat	486,35	3161,26	16,01	32,01	48,02
3,50	1. kat	488,31	1709,09	8,65	17,31	25,96
0	pod	13,93	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma$		<b>1884,07</b>	<b>14604,86</b>	<b>73,94</b>	<b>147,89</b>	<b>221,83</b>

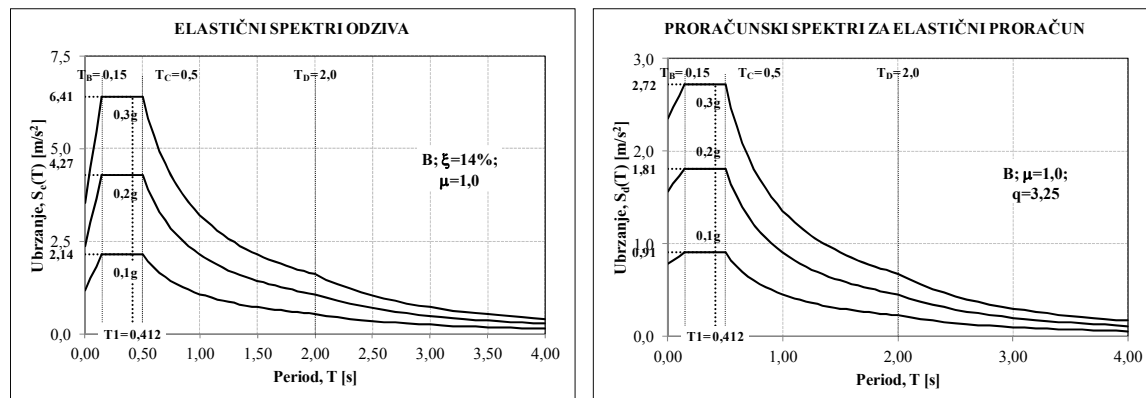
Grafički prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na numeričkim modelima prikazan je na *slici 9.9*.



**Slika 9.9** Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na praznim armirano-betonskim okvirima – 4. kata

**Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 4. kata**

Prema izrazima za elastični spektar odziva i proračunski spektar za elastični proračun, dobiveni su spektri prikazani na *slici 9.10*.



**Slika 9.10** Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun

Potresna poprečna sila u podnožju prema izrazu (9.16) za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu prikazana je u *tablici 9.10*.

**Tablica 9.10** Potresna poprečna sila u podnožju

$F_b$ [kN]	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$S_d(T_1)$ [m/s <sup>2</sup> ]	$m$ [kN] <sup>1)</sup>	$\lambda$
173,91	0,98	0,91	1884,07	1,0
347,83	1,96	1,81	1884,07	1,0
521,74	2,94	2,72	1884,07	1,0

<sup>1)</sup> Ukupna masa zgrade iznad temelja prema *tablici 9.3*.

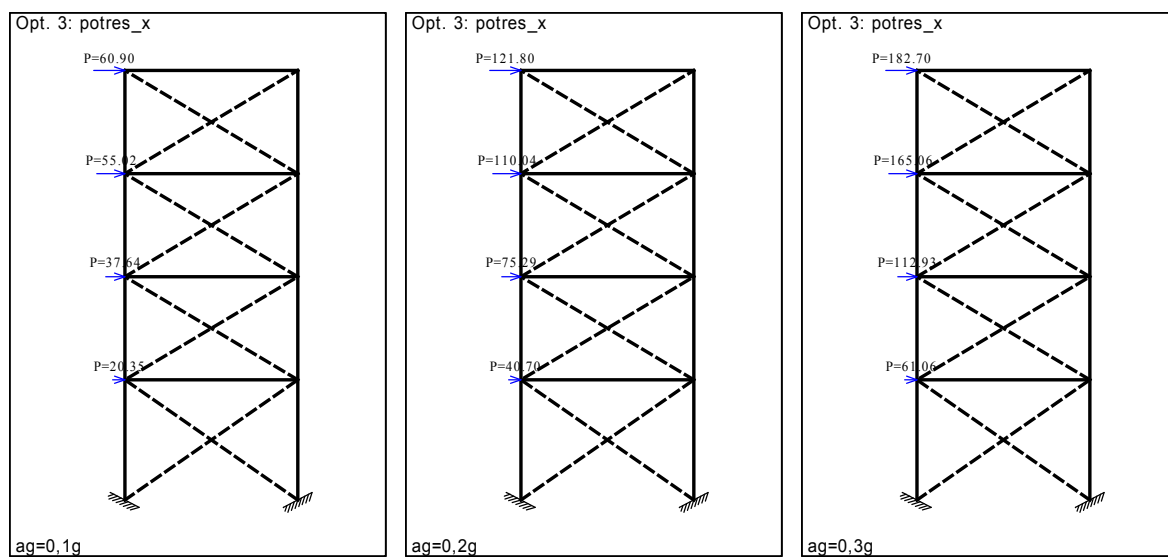
Raspodjela horizontalnih potresnih sila za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu izvršena je prema izrazu (9.17) i prikazana u *tablici 9.11*.

**Tablica 9.11** Raspodjela horizontalnih potresnih sila

$z_i$ [m]	Kat	$m_i$ [kN]	$z_i m_i$ [kNm]	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )
12,50	krov	409,14	5114,20	60,90	121,80	182,70
9,50	3. kat	486,35	4620,31	55,02	110,04	165,06
6,50	2. kat	486,35	3161,26	37,64	75,29	112,93
3,50	1. kat	488,31	1709,09	20,35	40,70	61,06
0	pod	13,93	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma$		<b>1884,07</b>	<b>14604,86</b>	<b>173,91</b>	<b>347,83</b>	<b>521,74</b>



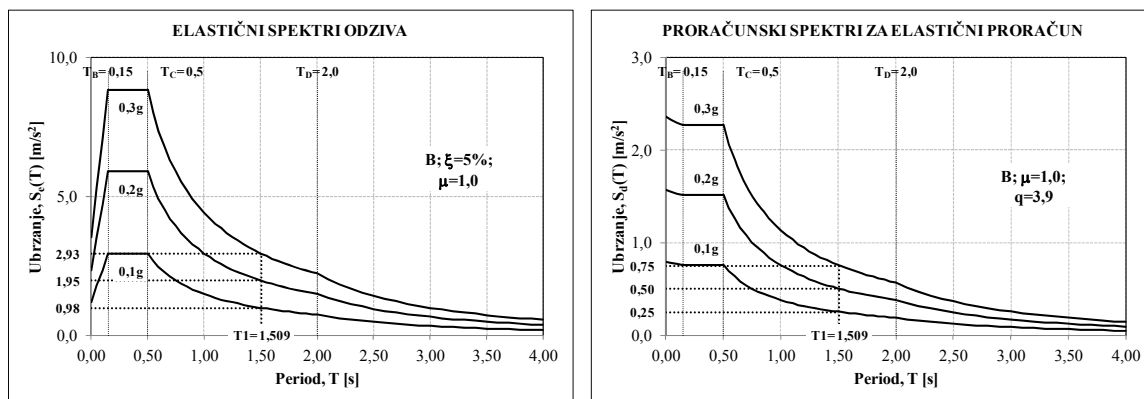
Grafički prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na numeričkim modelima prikazan je na *slici 9.11*.



**Slika 9.11** Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na armirano-betonskim okvirima sa zidnim ispunom – 4. kata

**Prazan armirano-betonski okvir – 7. katova**

Prema izrazima za elastični spektar odziva i proračunski spektar za elastični proračun, dobiveni su spektri prikazani na *slici 9.12*.



**Slika 9.12** Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun

Potresna poprečna sila u podnožju prema izrazu (9.16) za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu prikazana je u *tablici 9.12*.

**Tablica 9.12** Potresna poprečna sila u podnožju

$F_b$ [kN]	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$S_d(T_1)$ [m/s <sup>2</sup> ]	$m$ [kN] <sup>1)</sup>	$\lambda$
87,66	0,98	0,25	3439,06	1,0
175,31	1,96	0,50	3439,06	1,0
262,97	2,94	0,75	3439,06	1,0

<sup>1)</sup> Ukupna masa zgrade iznad temelja prema *tablici 9.4*.

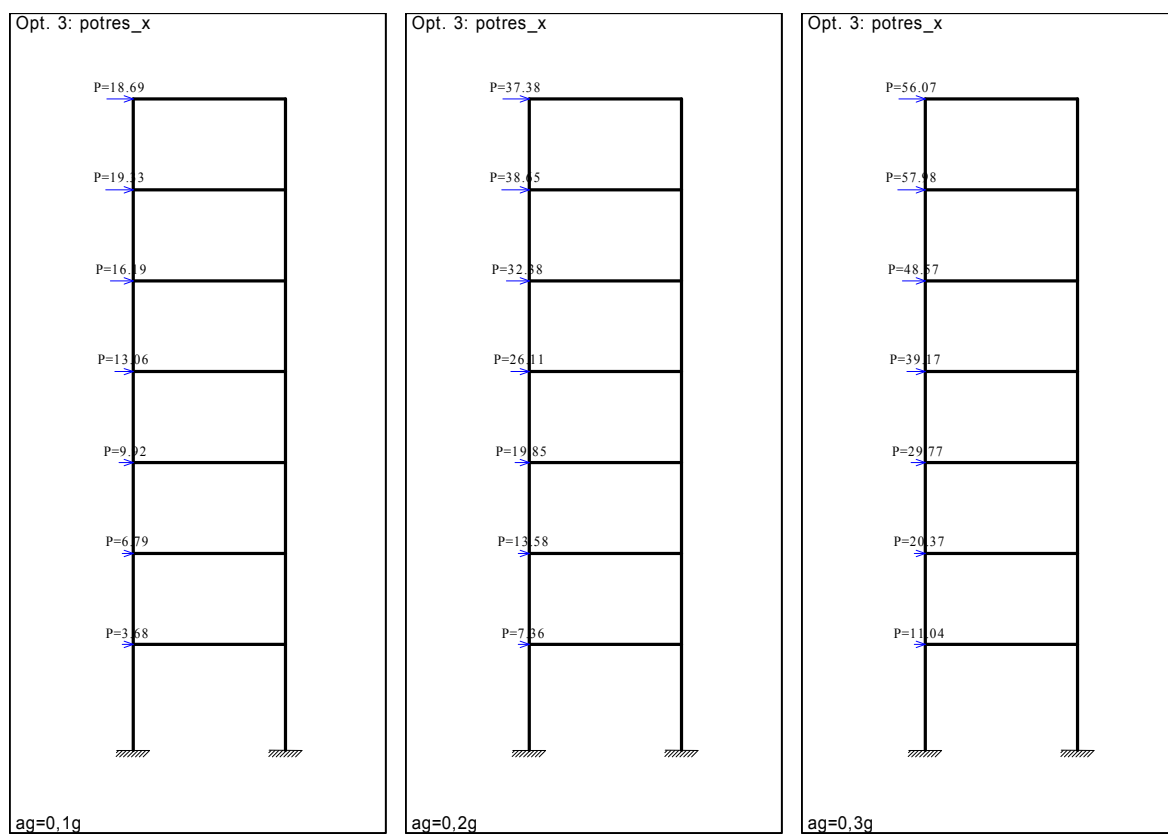
Raspodjela horizontalnih potresnih sila za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu izvršena je prema izrazu (9.17) i prikazana u *tablici 9.13*.

**Tablica 9.13** Raspodjela horizontalnih potresnih sila

$z_i$ [m]	Kat	$m_i$ [kN]	$z_i m_i$ [kNm]	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )
21,50	krov	415,81	8939,84	18,69	37,38	56,07
18,50	6. kat	499,69	9244,27	19,33	38,65	57,98
15,50	5. kat	499,69	7745,20	16,19	32,38	48,57
12,50	4. kat	499,69	6246,13	13,06	26,11	39,17
9,50	3. kat	499,69	4747,06	9,92	19,85	29,77

6,50	2. kat	499,69	3247,99	6,79	13,58	20,37
3,50	1. kat	502,83	1759,90	3,68	7,36	11,04
0	pod	21,97	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Σ</b>		<b>3439,06</b>	<b>41930,37</b>	<b>87,66</b>	<b>175,31</b>	<b>262,97</b>

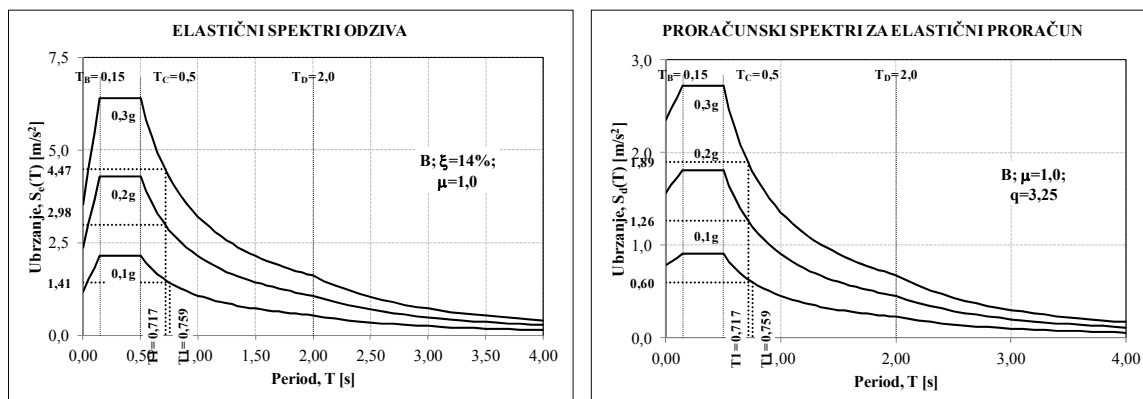
Grafički prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na numeričkim modelima prikazan je na *slici 9.13*.



**Slika 9.13** Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na praznim armirano-betonskim okvirima – 7. katova

**Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova**

Prema izrazima za elastični spektar odziva i proračunski spektar za elastični proračun, dobiveni su spektri prikazani na *slici 9.14*.



**Slika 9.14** Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun

Potresna poprečna sila u podnožju prema izrazu (9.16) za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu prikazana je u *tablici 9.14*.

**Tablica 9.14** Potresna poprečna sila u podnožju

$F_b$ [kN]	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$S_d(T_1)$ [m/s <sup>2</sup> ]	$m$ [kN] <sup>1)</sup>	$\lambda$
209,12	0,98	0,60	3439,06	1,0
442,75	1,96	1,26	3439,06	1,0
664,12	2,94	1,89	3439,06	1,0

<sup>1)</sup> Ukupna masa zgrade iznad temelja prema *tablici 9.4*.

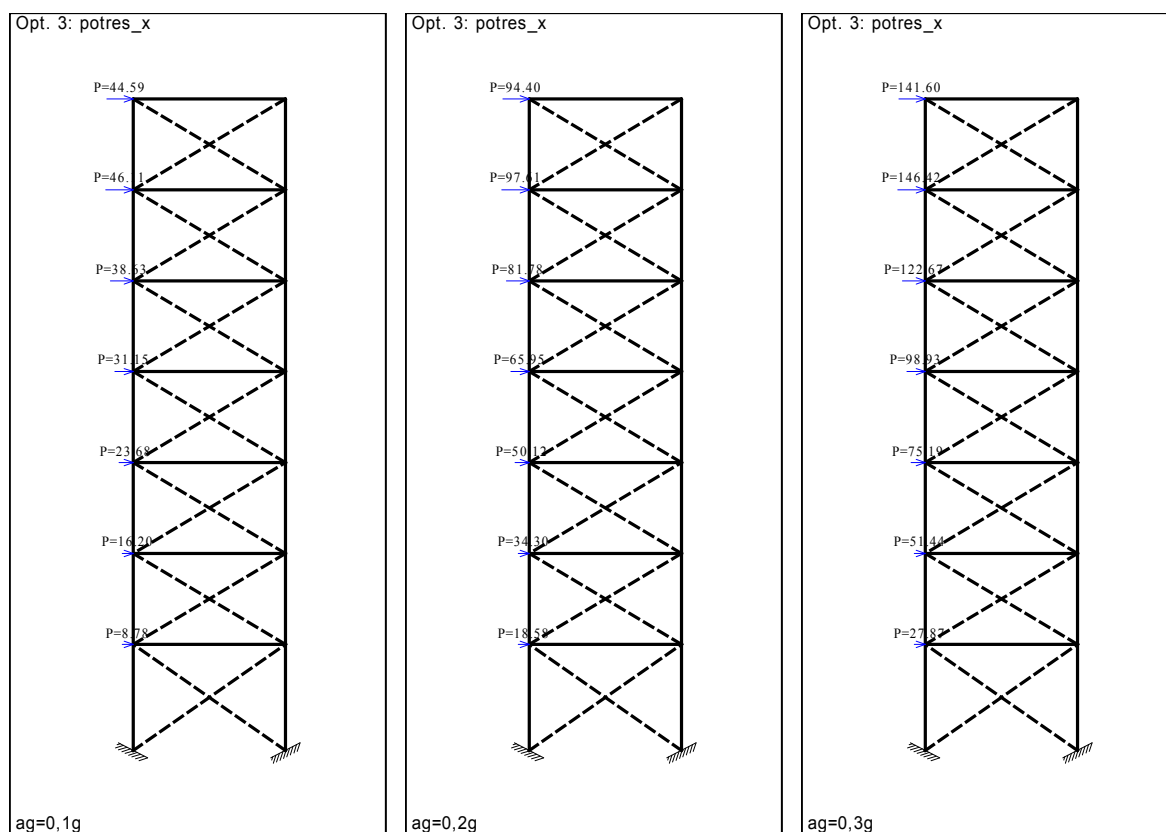
Raspodjela horizontalnih potresnih sila za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu izvršena je prema izrazu (9.17) i prikazana u *tablici 9.15*.

**Tablica 9.15** Raspodjela horizontalnih potresnih sila

$z_i$ [m]	Kat	$m_i$ [kN]	$z_i m_i$ [kNm]	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )
21,50	krov	415,81	8939,84	44,59	94,40	141,60
18,50	6. kat	499,69	9244,27	46,11	97,61	146,42
15,50	5. kat	499,69	7745,20	38,63	81,78	122,67
12,50	4. kat	499,69	6246,13	31,15	65,95	98,93
9,50	3. kat	499,69	4747,06	23,68	50,12	75,19

6,50	2. kat	499,69	3247,99	16,20	34,30	51,44
3,50	1. kat	502,83	1759,90	8,78	18,58	27,87
0	pod	21,97	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Σ</b>		<b>3439,06</b>	<b>41930,37</b>	<b>209,12</b>	<b>442,75</b>	<b>664,12</b>

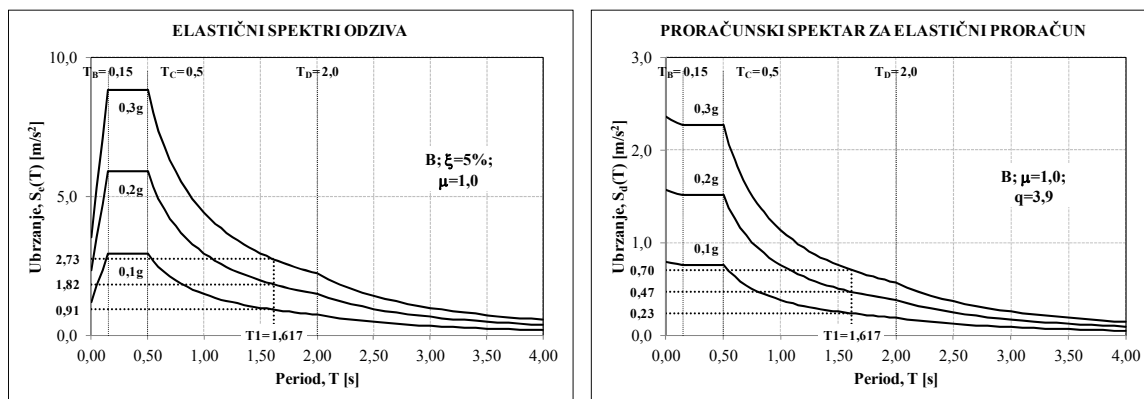
Grafički prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na numeričkim modelima prikazan je na *slici 9.15*.



**Slika 9.15** Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na armirano-betonskim okvirima sa zidnim ispunom – 7. katova

**Prazan armirano-betonski okvir – 10. katova**

Prema izrazima za elastični spektar odziva i proračunski spektar za elastični proračun, dobiveni su spektri prikazani na *slici 9.16*.



**Slika 9.16** Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun

Potresna poprečna sila u podnožju prema izrazu (9.16) za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu prikazana je u *tablici 9.16*.

**Tablica 9.16** Potresna poprečna sila u podnožju

$F_b$ [kN]	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$S_d(T_1)$ [m/s <sup>2</sup> ]	$m$ [kN] <sup>1)</sup>	$\lambda$
124,14	0,98	0,23	5219,28	1,0
248,29	1,96	0,47	5219,28	1,0
372,43	2,94	0,70	5219,28	1,0

<sup>1)</sup> Ukupna masa zgrade iznad temelja prema *tablici 9.5*.

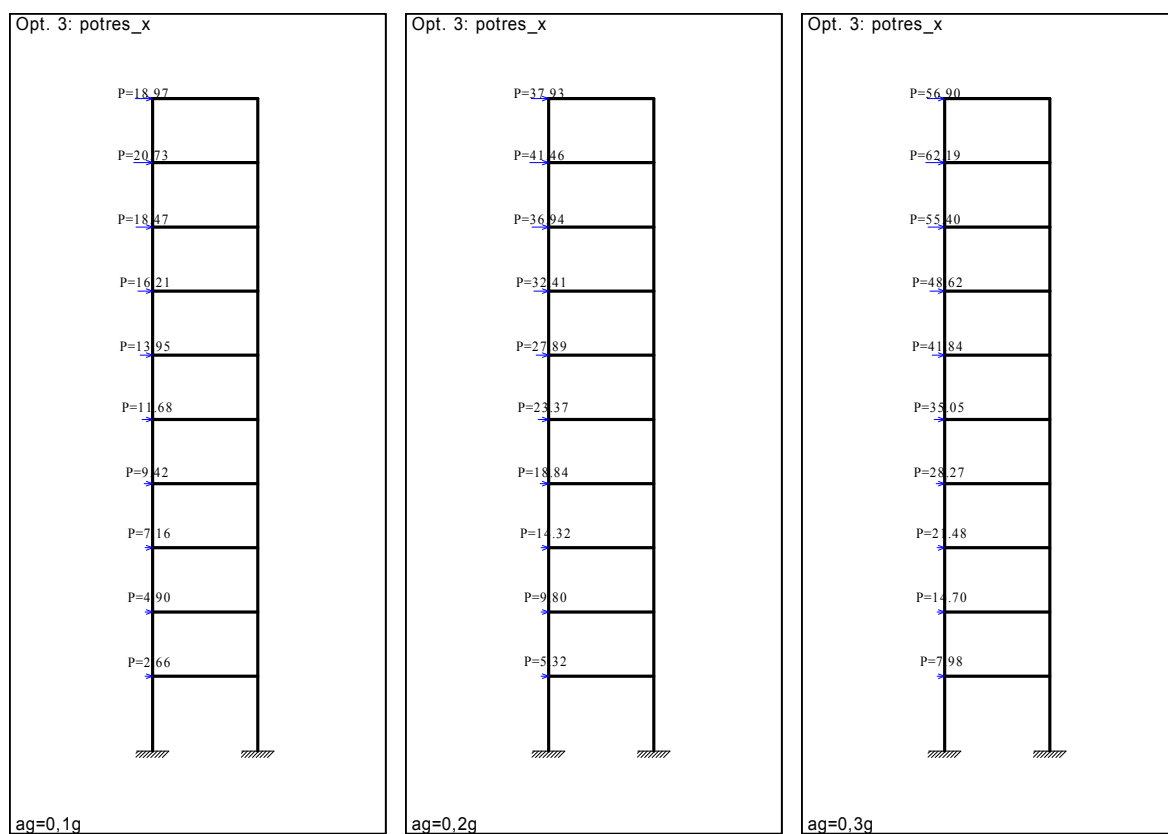
Raspodjela horizontalnih potresnih sila za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu izvršena je prema izrazu (9.17) i prikazana u *tablici 9.17*.

**Tablica 9.17** Raspodjela horizontalnih potresnih sila

$z_i$ [m]	Kat	$m_i$ [kN]	$z_i m_i$ [kNm]	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )
30,50	krov	435,23	13274,53	18,97	37,93	56,90
27,50	9. kat	527,55	14507,64	20,73	41,46	62,19
24,50	8. kat	527,55	12924,98	18,47	36,94	55,40
21,50	7. kat	527,55	11342,33	16,21	32,41	48,62
18,50	6. kat	527,55	9759,68	13,95	27,89	41,84

15,50	5. kat	527,55	8177,03	11,68	23,37	35,05
12,50	4. kat	527,55	6594,38	9,42	18,84	28,27
9,50	3. kat	527,55	5011,73	7,16	14,32	21,48
6,50	2. kat	527,55	3429,08	4,90	9,80	14,70
3,50	1. kat	532,06	1862,22	2,66	5,32	7,98
0	pod	31,59	0,00	0,00	0,00	0,00
<b><math>\Sigma</math></b>		<b>5219,28</b>	<b>86883,31</b>	<b>124,14</b>	<b>248,29</b>	<b>372,43</b>

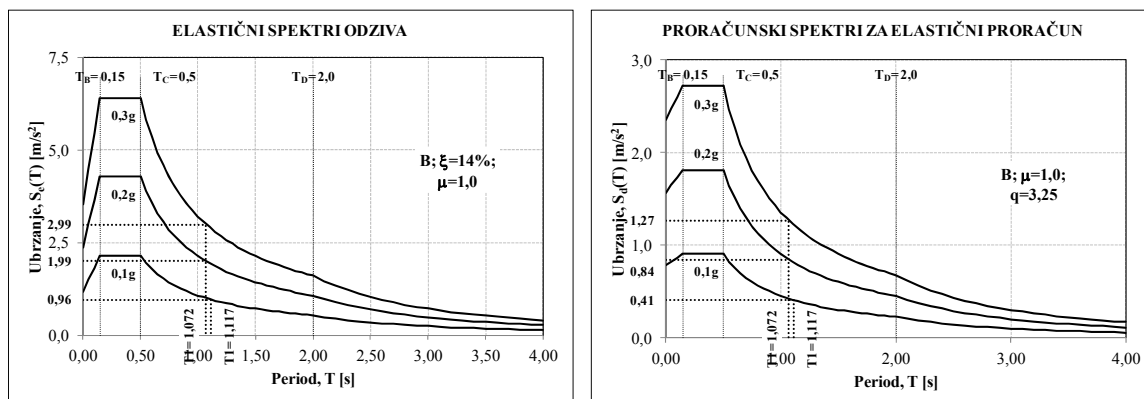
Grafički prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na numeričkim modelima prikazan je na *slici 9.17*.



**Slika 9.17** Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na praznim armirano-betonskim okvirima – 10. katova

**Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova**

Prema izrazima za elastični spektar odziva i proračunski spektar za elastični proračun, dobiveni su spektri prikazani na *slici 9.18*.



**Slika 9.18** Elastični spektri odziva i proračunski spektri za elastični proračun

Potresna poprečna sila u podnožju prema izrazu (9.16) za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu prikazana je u *tablici 9.18*.

**Tablica 9.18** Potresna poprečna sila u podnožju

$F_b$ [kN]	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$S_d(T_l)$ [m/s <sup>2</sup> ]	$m$ [kN] <sup>1)</sup>	$\lambda$
215,66	0,98	0,41	5219,28	1,0
449,42	1,96	0,84	5219,28	1,0
674,13	2,94	1,27	5219,28	1,0

<sup>1)</sup> Ukupna masa zgrade iznad temelja prema *tablici 9.5*.

Raspodjela horizontalnih potresnih sila za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu izvršena je prema izrazu (9.17) i prikazana u *tablici 9.19*.

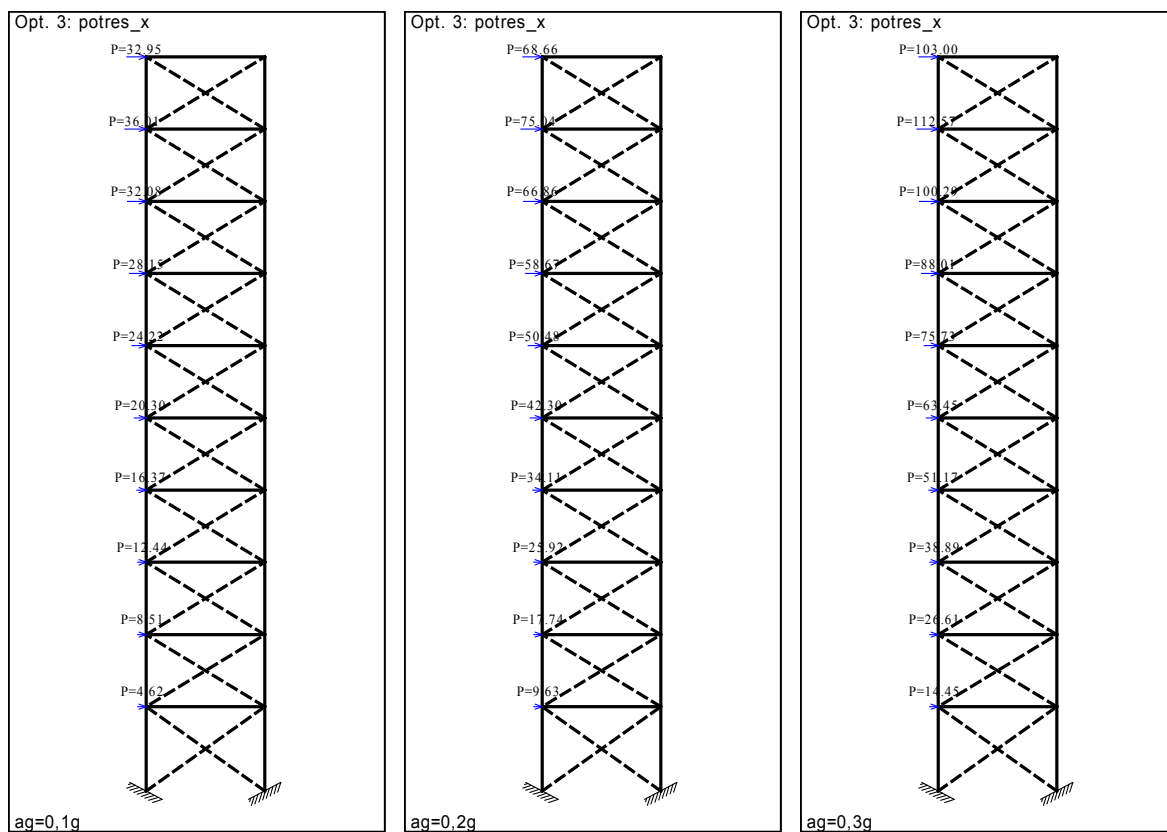
**Tablica 9.19** Raspodjela horizontalnih potresnih sila

$z_i$ [m]	Kat	$m_i$ [kN]	$z_i m_i$ [kNm]	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$F_b$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )
30,50	krov	435,23	13274,53	32,95	68,66	103,00
27,50	9. kat	527,55	14507,64	36,01	75,04	112,57
24,50	8. kat	527,55	12924,98	32,08	66,86	100,29
21,50	7. kat	527,55	11342,33	28,15	58,67	88,01
18,50	6. kat	527,55	9759,68	24,22	50,48	75,73



15,50	5. kat	527,55	8177,03	20,30	42,30	63,45
12,50	4. kat	527,55	6594,38	16,37	34,11	51,17
9,50	3. kat	527,55	5011,73	12,44	25,92	38,89
6,50	2. kat	527,55	3429,08	8,51	17,74	26,61
3,50	1. kat	532,06	1862,22	4,62	9,63	14,45
0	pod	31,59	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Σ</b>		<b>5219,28</b>	<b>86883,31</b>	<b>215,66</b>	<b>449,42</b>	<b>674,13</b>

Grafički prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na numeričkim modelima prikazan je na *slici 9.19*.



**Slika 9.19** Prikaz raspodjele horizontalnih potresnih sila na armirano-betonskim okvirima sa zidnim ispunom – 10. katova

### 9.3.2.4 Rekapitulacija horizontalnih potresnih sila

Usporedba horizontalnih potresnih sila praznih i armirano-betonskih okvira za zidnim ispunom, kao i posmičnog odnosa, prikazana je u **tablici 9.20**.

**Tablica 9.20** Usporedba horizontalnih potresnih sila u podnožju

NUMERIČKI MODEL	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$m$ [kN]	$F_b$ [kN]	$F_b/m$ [%]
Prazan armirano-betonski okvir – 4. kata	0,98	1884,07	73,94	3,92
	1,96	1884,07	147,89	7,85
	2,94	1884,07	221,83	11,77
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 4. kata	0,98	1884,07	173,91	9,23
	1,96	1884,07	347,83	18,46
	2,94	1884,07	521,74	27,69
Prazan armirano-betonski okvir – 7. katova	0,98	3439,06	87,66	2,55
	1,96	3439,06	175,31	5,10
	2,94	3439,06	262,97	7,65
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova	0,98	3439,06	209,12	6,08
	1,96	3439,06	442,75	12,87
	2,94	3439,06	664,12	19,31
Prazan armirano-betonski okvir – 10. katova	0,98	5219,28	124,14	2,38
	1,96	5219,28	248,29	4,76
	2,94	5219,28	372,43	7,14
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova	0,98	5219,28	215,66	4,13
	1,96	5219,28	449,42	8,61
	2,94	5219,28	674,13	12,92

Iz navedene tablice, također možemo vidjeti kako su horizontalne potresne sile armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnom ispunom veće od onih kod praznih armirano-betonskih okvira. Taj odnos kod numeričkih modela od 4. kata iznosi 2,35, kod numeričkih modela od 7. katova iznosi 2,39 i kod numeričkih modela od 10. katova iznosi 1,74 (1,81).

### 9.3.2.5 Kombinacije opterećenja

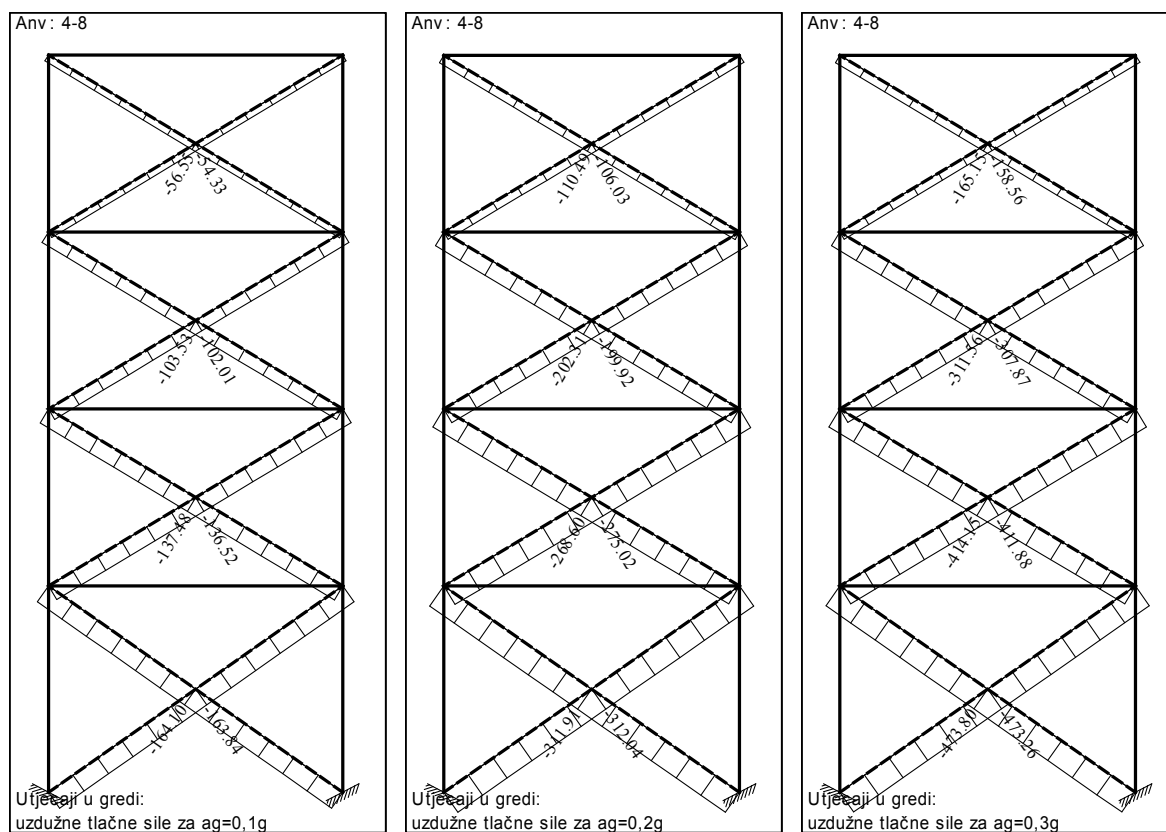
Za dobivanje proračunskih vrijednosti napravljene su kombinacije opterećenja koje su prikazane u **tablici 9.21**.

**Tablica 9.21** Lista slučajeva opterećenja

No	Naziv
1	stalno+vlt (g) (I)
2	Korisno (II)
3	potres x (III)
4	Kombinacija: 1.35xI+1.5xII
5	Kombinacija: I+III
6	Kombinacija: I+1x(-III)
7	Kombinacija: I+0.3xII+III
8	Kombinacija: I+0.3xII+1x (-III)

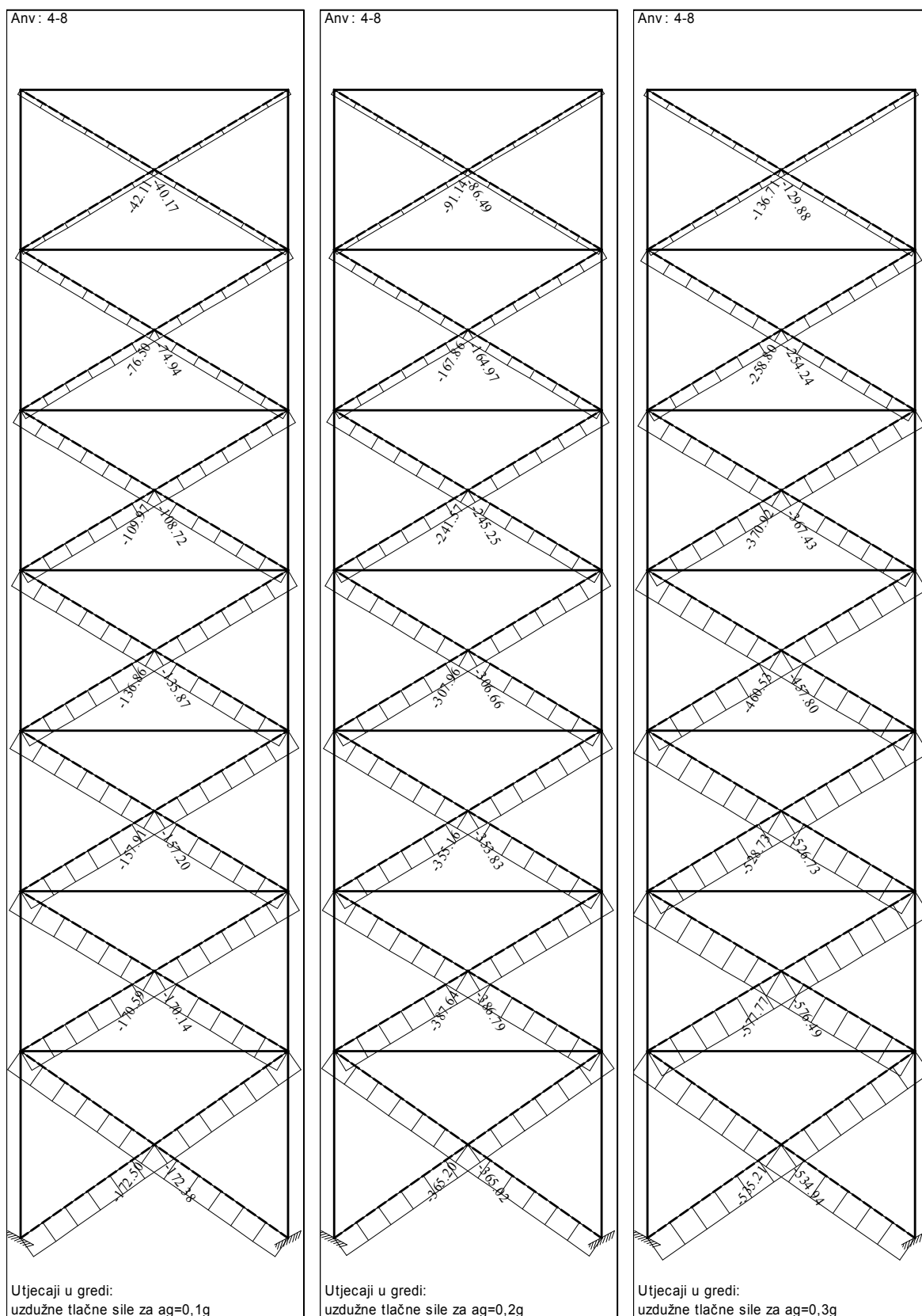
### 9.3.3 Sile u zamjenskim dijagonalama

Za anvelopu od kombinacija (4-8), dobivene su statičkom linearnom analizom u programskom paketu Tower5 maksimalne unutarnje uzdužne sile u zamjenskim dijagonalama zidnoga ispuna za sve numeričke modele sa zamjenskim dijagonalama. Unutarnje uzdužne tlačne sile u zamjenskim dijagonalama zidnoga ispuna prikazane su na **slikama 9.20-9.22**.



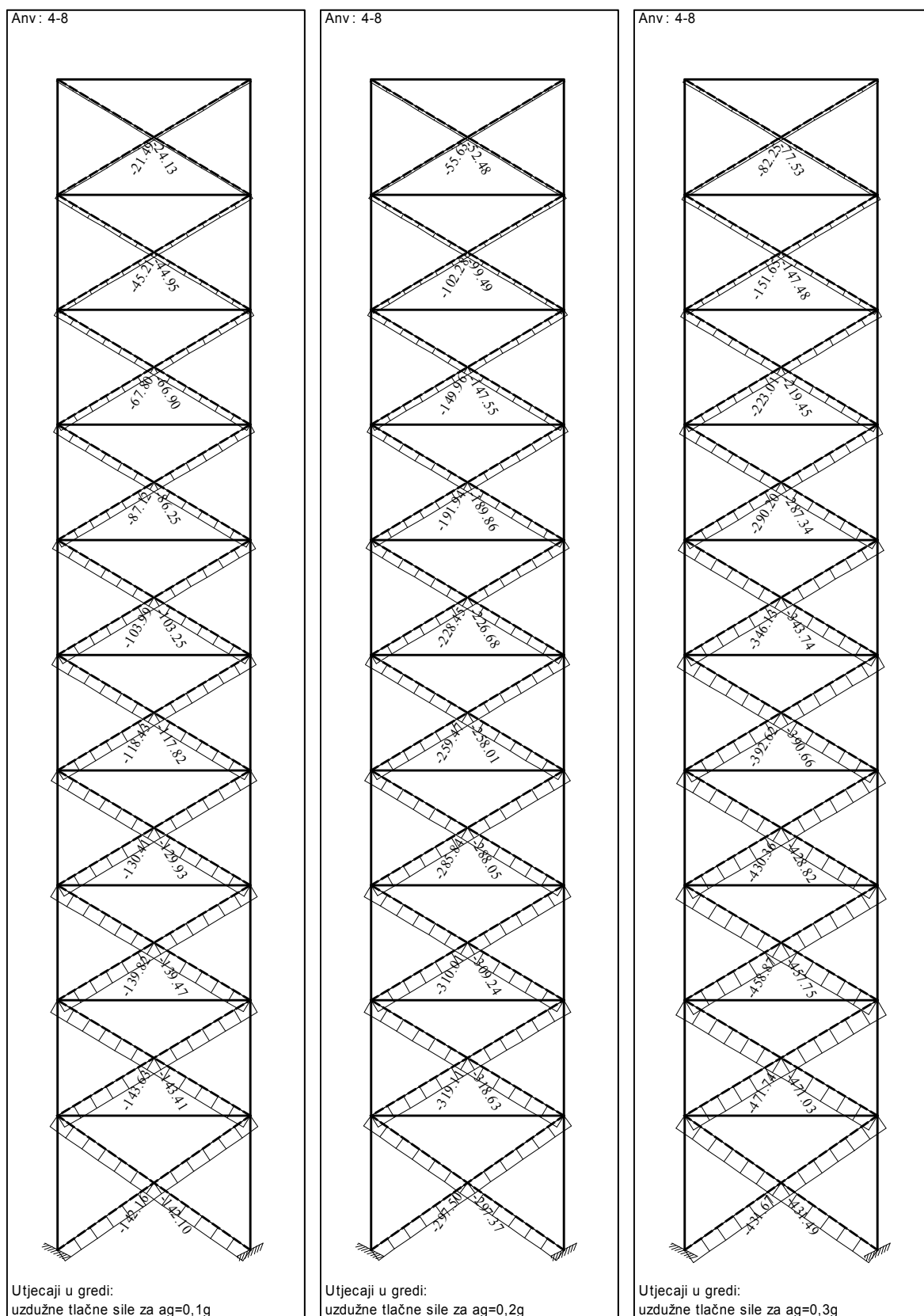
**Slika 9.20** Prikaz uzdužnih tlačnih sila u zamjenskim dijagonalama – 4. kata

Unutarnje uzdužne tlačne sile u zamjenskim dijagonalama zidnoga ispuna za armirano-betonske okvire ispunjene zidnim ispunom od 7. katova, prikazane su na slici 9.21, a za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu.



Slika 9.21 Prikaz uzdužnih tlačnih sila u zamjenskim dijagonalama – 7. katova

Unutarnje uzdužne tlačne sile u zamjenskim dijagonalama zidnog ispunja za armirano-betonske okvire ispunjene zidnim ispunom od 10. katova, prikazane su na slici 9.22, a za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu.



Slika 9.22 Prikaz uzdužnih tlačnih sila u zamjenskim dijagonalama – 10. katova

### 9.3.4 Nosivost dijagonala za odabrani zidni ispun

Za odabrani zidni ispun (*tablica 9.1*) prema izrazima (6.33) do (6.36) određene su čvrstoće dijagonale,  $f_{mi}$ , ovisno o mogućem mehanizmu sloma zidnoga ispuna. Za tako određene čvrstoće dijagonale odabire se najmanja dobivena vrijednost čvrstoće dijagonale,  $f_{m,min}$ . Čvrstoće dijagonale, ovisno o mehanizmu sloma i katnosti, prikazane su u *tablici 9.22*.

**Tablica 9.22** Čvrstoće dijagonale za odabrani zidni ispun,  $f_{mi}$

NUMERIČKI MODEL	Kat	$f_{m1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m4}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 4. kata	prizemlje	3,995	3,007	4,097	2,319
	1. - 3. kat	2,499	2,129	2,526	1,565
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova	prizemlje	3,242	2,341	2,625	1,476
	1. - 6. kat	2,238	1,838	1,790	1,100
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova	prizemlje	2,899	2,063	1,982	1,117
	1. - 9. kat	2,034	1,650	1,382	0,855

Nosivost dijagonale, odnosno sila koju dijagonala može izdržati,  $R_c$ , dobiva se množenjem odabrane najmanje čvrstoće s površinom tlačne dijagonale. Nosivosti dijagonala za odabrani zidni ispun, ovisno o katnosti, prikazane su u *tablici 9.23*.

**Tablica 9.23** Nosivosti dijagonala za odabrani zidni ispun,  $R_c$

NUMERIČKI MODEL	Kat	$f_{m,min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$Ad=t w$ [mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	$R_c=f_{m,min} A_d$ [kN]
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 4. kata	prizemlje	2,319	295694,34	686
	1. - 3. kat	1,565	274861,44	430
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova	prizemlje	1,476	291422,29	430
	1. - 6. kat	1,100	270260,29	297
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova	prizemlje	1,117	284094,86	317
	1. - 9. kat	0,855	263129,25	225

<sup>1)</sup> Debljina zidnoga ispuna,  $t$ , i širina dijagonale zidnoga ispuna,  $w$ , prikazane su u *tablici 9.2*.

### 9.3.5 Usporedba sila u dijagonalama s nosivošću dijagonala

#### *Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 4. kata*

Usporedbe sila u dijagonalama sa *sluke 9.20* s nosivošću dijagonala iz *tablice 9.23*, prikazane su u *tablici 9.24*, ovisno o proračunskom ubrzanju na temeljnom tlu.

**Tablica 9.24** Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 4. kata

Kat	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )	$R_c$ [kN]	Ocjena, $R_c > R_d$
3. kat	56,55	110,49	165,15	430	Zadovoljava
2. kat	103,53	202,31	311,56	430	Zadovoljava
1. kat	137,48	268,60	414,15	430	Zadovoljava
prizemlje	164,10	311,91	473,80	686	Zadovoljava

Iz *tablice 9.24* vidimo da nam odabrani zidni ispun, za kojeg su izračunate nosivosti dijagonala, zadovoljava po svim etažama za sva proračunska ubrzanja na temeljnom tlu. Može se pristupiti sljedećem koraku, tj. dimenzioniranju elemenata armirano-betonskoga okvira.

#### *Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova*

Usporedba sila u dijagonalama sa *sluke 9.21* s nosivošću dijagonala iz *tablice 9.23*, prikazane su u *tablici 9.25*, ovisno o proračunskom ubrzanju na temeljnom tlu.

**Tablica 9.25** Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 7. katova

Kat	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )	$R_c$ [kN]	Ocjena, $R_c > R_d$
6. kat	42,11	91,14	136,71	297	Zadovoljava
5. kat	76,50	167,86	258,80	297	Zadovoljava
4. kat	109,97	241,57	370,92	297	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
3. kat	136,86	307,96	460,53	297	Ne zadovoljava za $a_g=0,2g$ i $a_g=0,3g$
2. kat	157,91	355,16	528,73	297	Ne zadovoljava za $a_g=0,2g$ i $a_g=0,3g$
1. kat	170,59	387,64	577,77	297	Ne zadovoljava za $a_g=0,2g$ i $a_g=0,3g$
prizemlje	172,50	365,20	535,21	430	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$

Iz *tablice 9.25* vidimo da odabrani zidni ispun, za kojeg su izračunate nosivosti dijagonala, ne zadovoljava po svim etažama za sva proračunska ubrzanja na temeljnom tlu.

Potrebno je izmijeniti svojstva zidnog ispuna (izmijenjen je  $f_b$ ) za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu od 0,2g i 0,3g. Promjena svojstava zidnog ispuna prikazana je u **tablici 9.26**.

**Tablica 9.26** Svojstva zidnog elementa (izmijenjena), morta i zidnog ispuna

Zidni element	Blok opeka
Vrsta zidnog elementa	Glineni šuplji
Grupa zidnog elementa	2
Širina (debljina) zidnog elementa, $w_u$ [mm]	300
Normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa MO15, $f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>15</b>
Tlačna čvrstoća morta opće namjene M5, $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5
Tlačna čvrstoća zidnog ispuna, $f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25}$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	4,16
Modul elastičnosti zidnog ispuna, $E = 1000 \cdot f_k$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>2)</sup>	4162,17
Posmična čvrstoća zidnog ispuna, $f_{vk} = 0,065 \cdot f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>3)</sup>	1,07
Koeficijent trenja, $\mu$ <sup>4)</sup>	0,70
<sup>1) 2) 3) 4)</sup> U svemu kao i u <b>tablici 9.1</b> .	

Promjenom svojstava zidnoga elementa, mijenja se i čvrstoća dijagonale za izmijenjeni zidni ispun. Čvrstoće dijagonale, ovisno o mehanizmu sloma i katnosti za izmijenjeni zidni ispun, prikazane su u **tablici 9.27**.

**Tablica 9.27** Čvrstoće dijagonale za izmijenjeni zidni ispun,  $f_{mi}$

NUMERIČKI MODEL	Kat	$f_{m1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m4}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova	prizemlje	4,422	3,219	4,408	2,478
	1. - 6. kat	3,017	2,497	2,970	1,825

Promjena čvrstoće dijagonale utječe na nosivost dijagonala. Nosivosti dijagonala za izmijenjeni zidni ispun, ovisno o katnosti, prikazane su u **tablici 9.28**.

**Tablica 9.28** Nosivosti dijagonala za izmijenjeni zidni ispun,  $R_c$

NUMERIČKI MODEL	Kat	$f_{m,min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$Ad = t \cdot w$ [mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	$R_c = f_{m,min} \cdot A_d$ [kN]
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova	prizemlje	2,478	291422,29	722
	1. - 6. kat	1,825	270260,29	493

<sup>1)</sup> U svemu kao i u **tablici 9.2**.



Ponovna usporedba sila u dijagonalama sa **slike 9.21** i nosivošću dijagonala iz **tablice 9.28**, prikazane su u **tablici 9.29**, ovisno o proračunskome ubrzanju na temeljnom tlu.

**Tablica 9.29** Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 7. katova

Kat	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$R_c$ [kN] (MO10)	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )	$R_c$ [kN] (MO15)	Ocjena, $R_c > R_d$
6. kat	42,11	297	91,14	136,71	493	Zadovoljava
5. kat	76,50	297	167,86	258,80	493	Zadovoljava
4. kat	109,97	297	241,57	370,92	493	Zadovoljava
3. kat	136,86	297	307,96	460,53	493	Zadovoljava
2. kat	157,91	297	355,16	528,73	493	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
1. kat	170,59	297	387,64	577,77	493	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
prizemlje	172,50	430	365,20	535,21	722	Zadovoljava

Iz **tablice 9.29**, sada vidimo kako odabrani zidni ispuni, za koje su izračunate nosivosti dijagonala, zadovoljavaju po svim etažama za proračunska ubrzanja na temeljnom tlu od 0,1g i 0,2g. Za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu od 0,3g, vidimo kako dijagonala na 1. i 2. katu ne zadovoljava. Razlika u silama kreće se od 10-15%, razliku ćemo ovdje zanemariti zbog toga što će biti napravljena provjera pomoću metode N2, te ćemo dobiti konačnu ocjenu. Može se pristupiti sljedećem koraku, tj. dimenzioniranju elemenata armirano-betonskoga okvira.

Ovdje, također treba napomenuti, kako su rezultati prikazani na **slici 9.21** za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu od 0,2g i 0,3g, dobiveni za karakteristike tlačnog štapa s izmijenjenim zidnim ispunom, tj. izmijenjenim materijalnim karakteristikama štapa. Karakteristike poprečnog presjeka tlačnih štapova za numerički model za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu 0,2g i 0,3g, prikazane su u **tablici 9.30**.

**Tablica 9.30** Poprečni presjeci tlačnih štapova (tlačnih dijagonala) za izmijenjeni zidni ispun

NUMERIČKI MODEL	Širina presjeka, $t=w_u$ [mm]	Visina presjeka u prizemlju, $w=0,175 l_{d,p}$ [mm]	Visina presjeka na katovima, $w=0,175 l_{d,k}$ [mm]	Modul elastičnosti, $E^{1)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
7. katova	300	971,41	900,87	4162,17

<sup>1)</sup> Za modul elastičnosti tlačnih štapova,  $E$ , uzeta je vrijednost za zidni ispun iz **tablice 9.26**.

**Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova**

Usporedba sila u dijagonalama sa *sluke 9.22* s nosivošću dijagonala iz *tablice 9.23*, prikazane su u *tablici 9.31*, ovisno o proračunskome ubrzanju na temeljnom tlu.

**Tablica 9.31** Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 10. katova

Kat	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )	$R_c$ [kN]	Ocjena, $R_c > R_d$
9. kat	21,49	55,63	82,25	225	Zadovoljava
8. kat	45,21	102,28	151,65	225	Zadovoljava
7. kat	67,80	149,96	223,01	225	Zadovoljava
6. kat	87,12	191,94	290,20	225	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
5. kat	103,99	228,45	346,13	225	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
4. kat	118,43	259,47	392,62	225	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
3. kat	130,41	285,84	430,36	225	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
2. kat	139,82	310,01	458,87	225	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
1. kat	143,63	319,11	471,74	225	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
prizemlje	142,16	297,50	431,67	317	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$

Iz *tablice 9.31* vidimo kako nam odabrani zidni ispun, za kojeg su izračunate nosivosti dijagonala, ne zadovoljava po svim etažama za sva proračunska ubrzanja na temeljnom tlu. Potrebno je izmijeniti svojstva zidnoga ispuna (izmijenjen je  $f_b$ ) za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu od 0,2g i 0,3g. Promjena svojstava zidnoga ispuna prikazana je u *tablici 9.26*.

Promjenom svojstava zidnoga elementa, mijenja se i čvrstoća dijagonale za izmijenjeni zidni ispun. Čvrstoće dijagonale, ovisno o mehanizmu sloma i katnosti za izmijenjeni zidni ispun, prikazane su u *tablici 9.32*.

**Tablica 9.32** Čvrstoće dijagonale za izmijenjeni zidni ispun,  $f_{mi}$ 

NUMERIČKI MODEL	Kat	$f_{m1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{m4}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova	prizemlje	3,910	2,803	3,291	1,855
	1. - 9. kat	2,720	2,223	2,275	1,408

Promjena čvrstoće dijagonale utječe na nosivost dijagonala. Nosivosti dijagonala za izmijenjeni zidni ispun, ovisno o katnosti, prikazane su u **tablici 9.33**.

**Tablica 9.33** Nosivosti dijagonala za izmijenjeni zidni ispun,  $R_c$

NUMERIČKI MODEL	Kat	$f_{m,min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_d=t w$ [mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	$R_c=f_{m,min} A_d$ [kN]
Armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova	prizemlje	1,855	284094,86	527
	1. - 9. kat	1,408	263129,25	370
<sup>1)</sup> U svemu kao i u <b>tablici 9.2</b> .				

Ponovna usporedba sila u dijagonalama sa **sluke 9.21** s nosivošću dijagonala iz **tablice 9.33**, prikazane su u **tablici 9.34**, ovisno o proračunskome ubrzanju na temeljnom tlu.

**Tablica 9.34** Usporedba sila u dijagonalama s nosivosti dijagonala – 10. katova

Kat	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,1g$ )	$R_c$ [kN] (MO10)	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,2g$ )	$R_d$ [kN] ( $a_g=0,3g$ )	$R_c$ [kN] (MO15)	Ocjena, $R_c > R_d$
9. kat	21,49	225	55,63	82,25	370	Zadovoljava
8. kat	45,21	225	102,28	151,65	370	Zadovoljava
7. kat	67,80	225	149,96	223,01	370	Zadovoljava
6. kat	87,12	225	191,94	290,20	370	Zadovoljava
5. kat	103,99	225	228,45	346,13	370	Zadovoljava
4. kat	118,43	225	259,47	392,62	370	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
3. kat	130,41	225	285,84	430,36	370	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
2. kat	139,82	225	310,01	458,87	370	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
1. kat	143,63	225	319,11	471,74	370	Ne zadovoljava za $a_g=0,3g$
prizemlje	142,16	317	297,50	431,67	527	Zadovoljava

Iz **tablice 9.34**, vidimo kako nam odabrani zidni ispuni, za koje su izračunate nosivosti dijagonala, zadovoljavaju po svim etažama za proračunska ubrzanja na temeljnom tlu od 0,1g i 0,2g. Za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu od 0,3g, vidimo da nam ne zadovoljava dijagonala na 1., 2., 3. i 4. katu.

Razlika u silama kreće od 6-22%, razliku ćemo i ovdje zanemariti zbog toga što će biti napravljena provjera pomoću metode N2, te ćemo dobiti konačnu ocjenu. Za ovako prekoračenje nosivosti dijagonale, kao i kod modela sa 7. katova, za očekivati je kako će nivo međukatnoga pomaka biti veći od 0,50% na tim etažama. Pristupamo sljedećem koraku, tj. dimenzioniranju elemenata armirano-betonskoga okvira.

Ovdje, također treba napomenuti, kako su rezultati prikazani na *sllici 9.22* za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu od 0,2g i 0,3g dobiveni za karakteristike tlačnog štapa s izmijenjenim zidnim ispunom, tj. izmijenjenim materijalnim karakteristikama štapa. Karakteristike poprečnog presjeka tlačnih štapova numeričkog modela za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu 0,2g i 0,3g, prikazane su u *tablici 9.35*.

**Tablica 9.35** Poprečni presjeci tlačnih štapova (tlačnih dijagonala) za izmijenjeni zidni ispun

NUMERIČKI MODEL	Širina presjeka, $t=w_u$ [mm]	Visina presjeka u prizemlju, $w=0,175 l_{d,p}$ [mm]	Visina presjeka na katovima, $w=0,175 l_{d,k}$ [mm]	Modul elastičnosti, $E$ <sup>1)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]
10. katova	300	946,98	877,10	4162,17

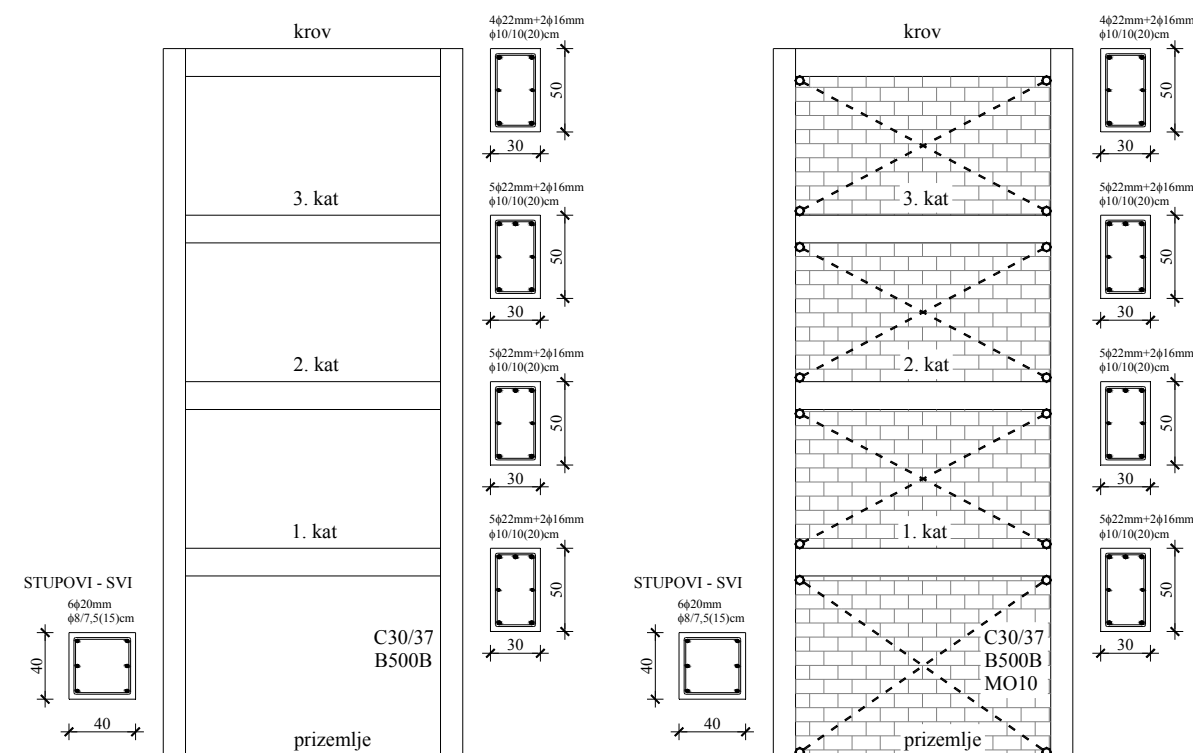
<sup>1)</sup> Za modul elastičnosti tlačnih štapova,  $E$ , uzeta je vrijednost za zidni ispun iz *tablice 9.26*.

### 9.3.6 Dimenzioniranje elemenata armirano-betonskih okvira

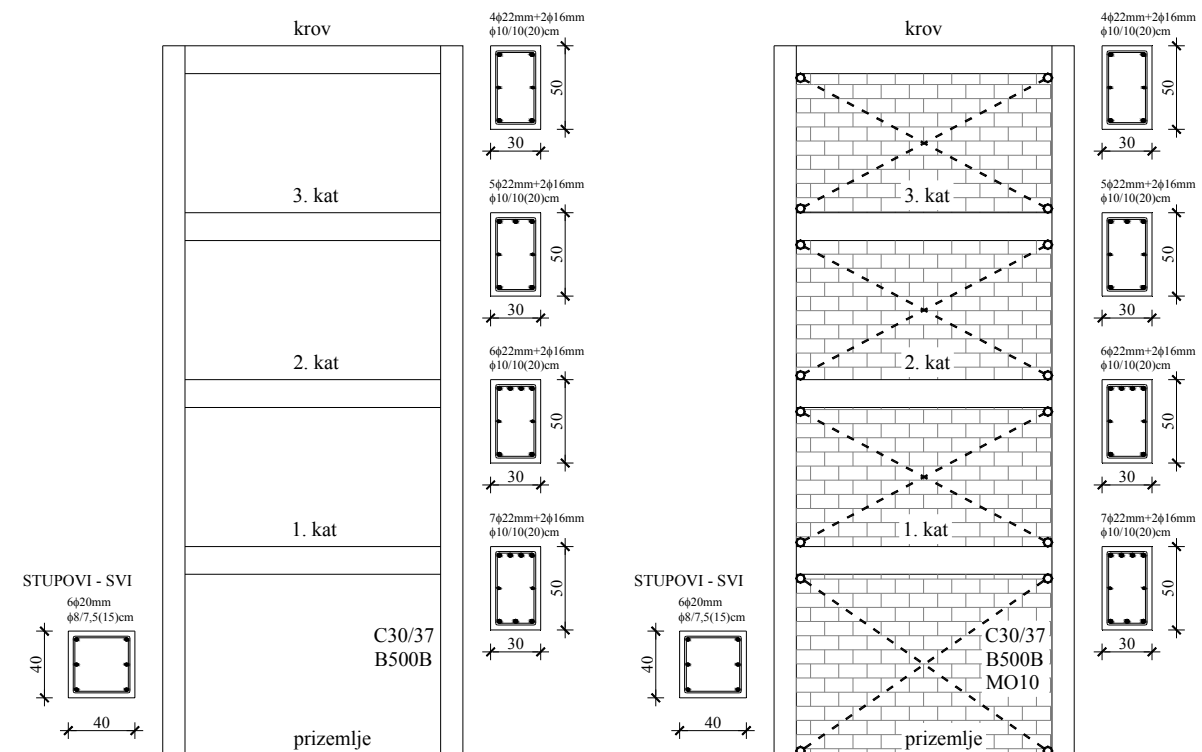
Dimenzioniranje elemenata svih armirano-betonskih okvira rađeno je za anvelopu od kombinacija 4-8. Dimenzioniranje je u svemu napravljeno prema Eurocode 2 [24] i Eurocode 8 [26], te se prikazuje odabrana uzdužna armatura u svim armirano-betonskim elementima okvira za sve promatrane analitičke modele. Posebno je odabrana armatura u praznim armirano-betonskim okvirima, a posebno u armirano-betonskim okvirima koji su ispunjeni zidnim ispunom.

Također, vodilo se računa i o minimalnoj potrebnoj uzdužnoj armaturi u stupovima (za seizmička područja ona iznosi 1% od površine poprečnog presjeka stupa). Na osnovu tako odabrane uzdužne armature mogu se uočiti razlike u odabranoj uzdužnoj armaturi između jednih i drugih ako ih promatramo za isto proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu i za istu katnost.

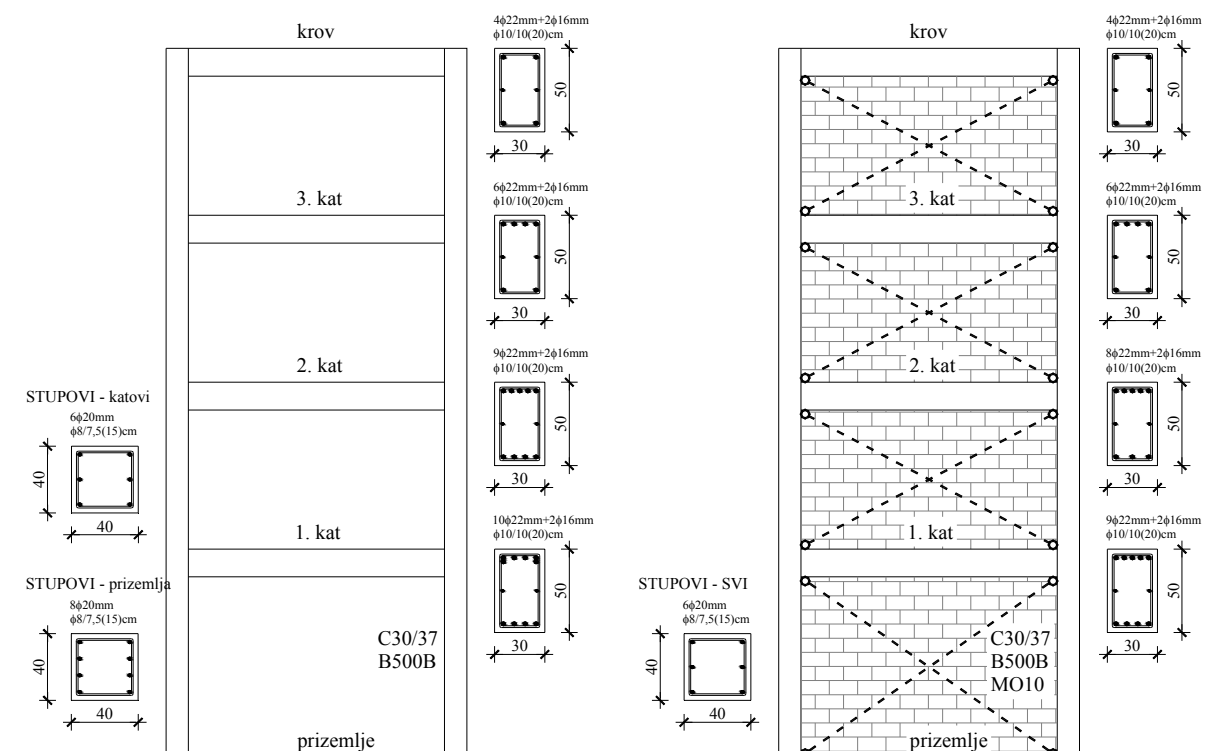
Na sljedećim *slikama 9.23 - 9.31*, prikazana je odabrana armatura u elementima armirano-betonskih okvira za sve prethodno promatrane numeričke modele.



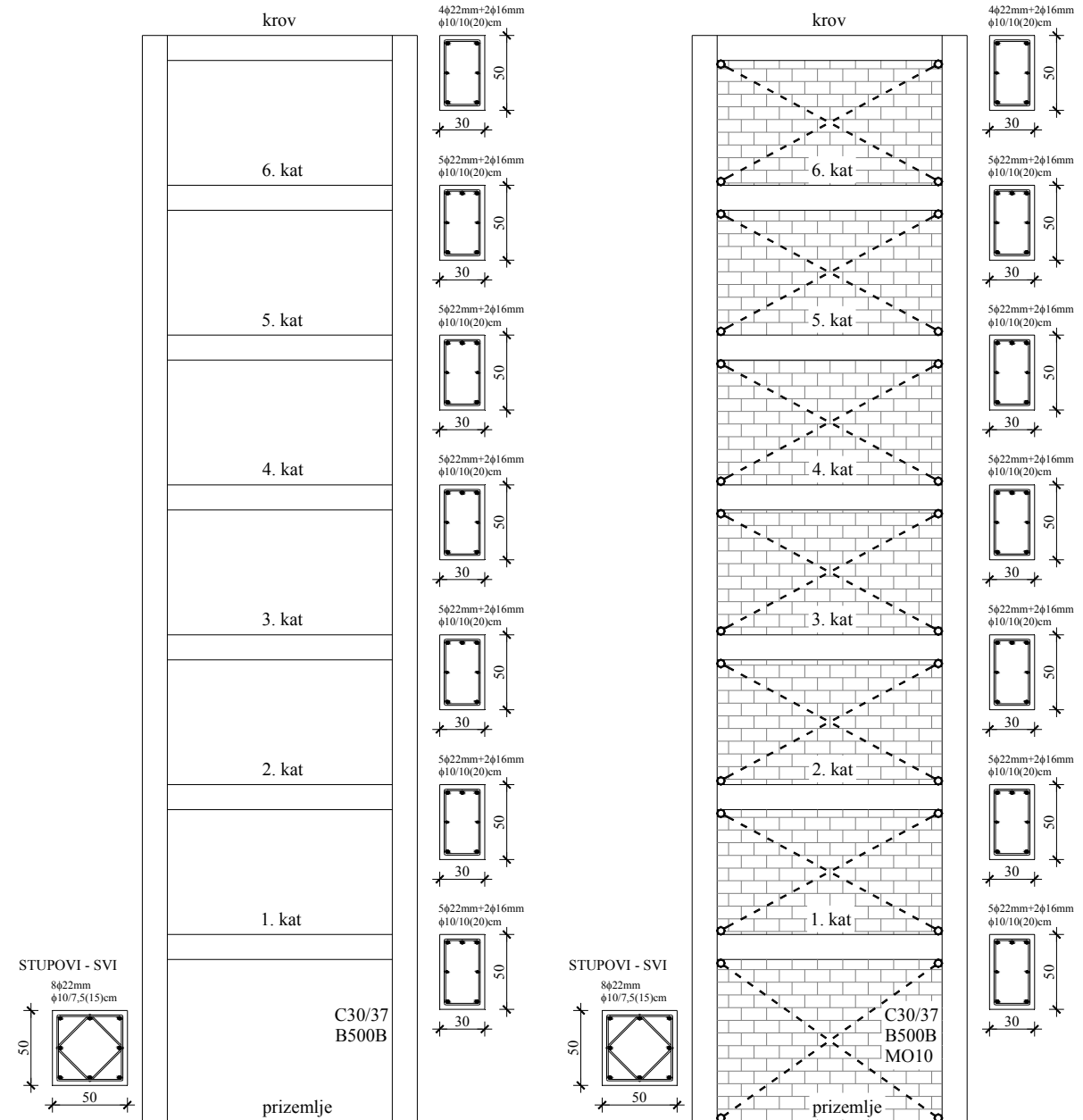
**Slika 9.23** Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 4. kata ( $a_g=0, I_g$ )



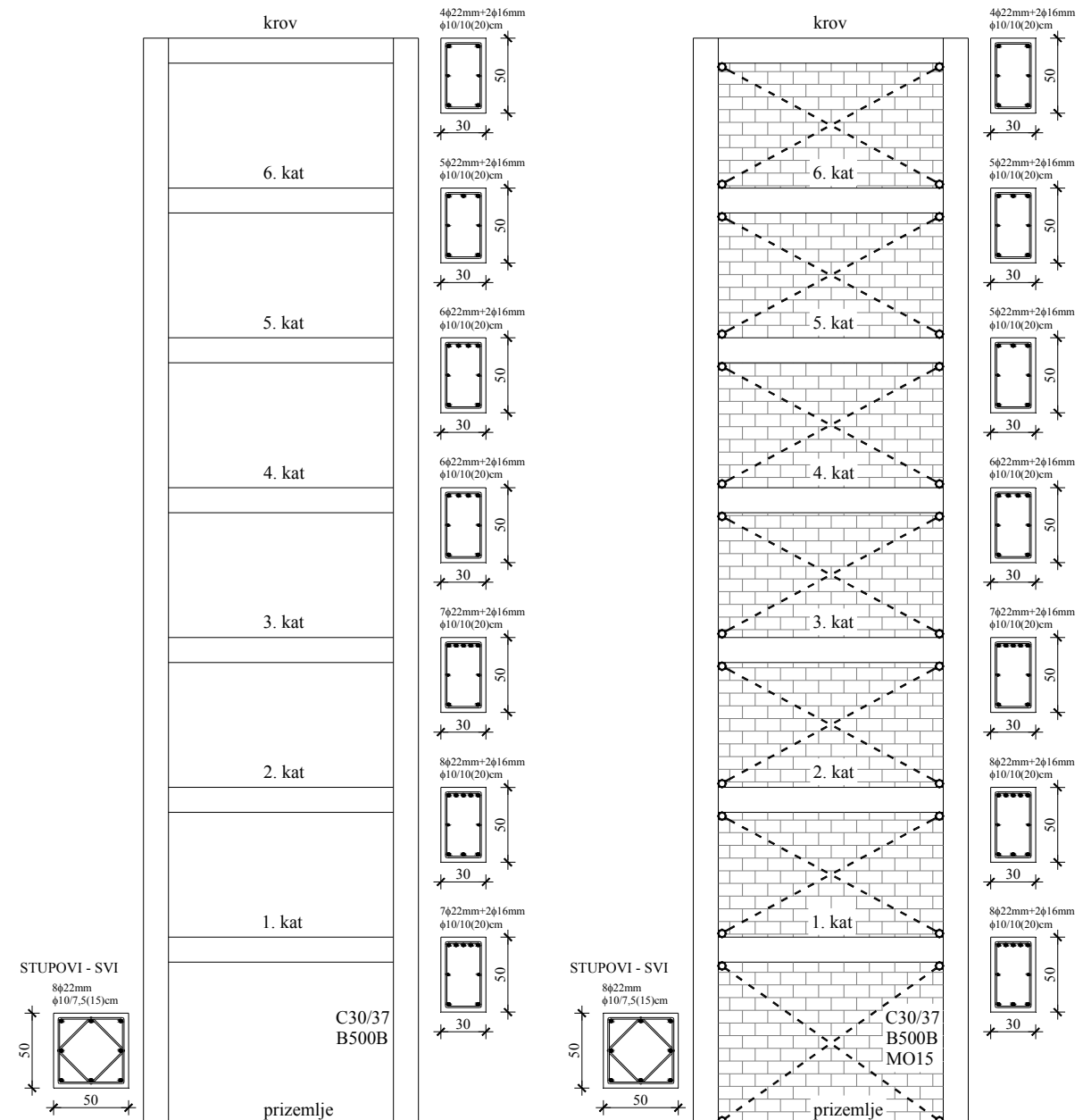
Slika 9.24 Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 4. kata ( $a_g=0,2g$ )



Slika 9.25 Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 4. kata ( $a_g=0,3g$ )

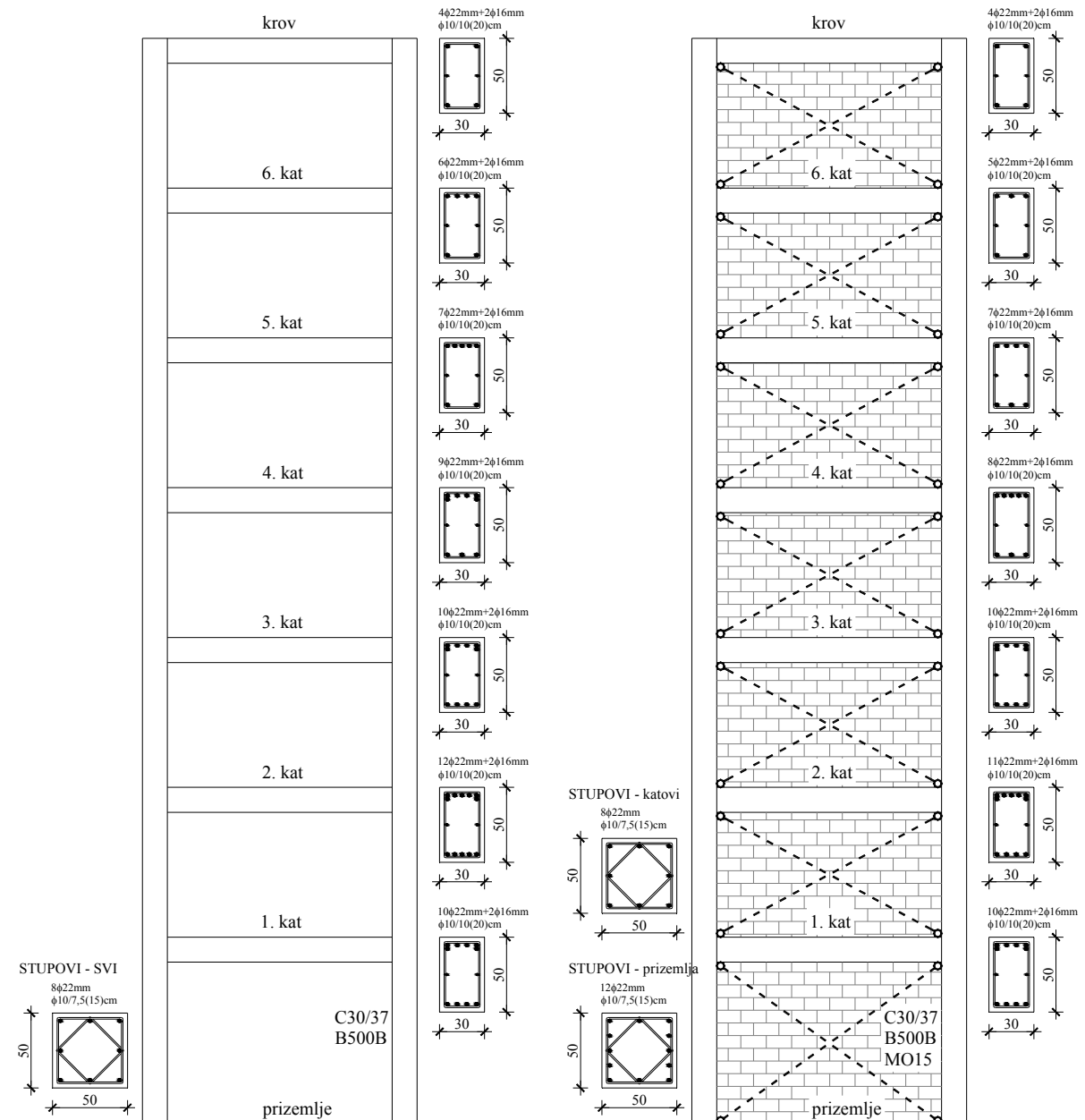


Slika 9.26 Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 7. katova ( $a_g=0,1g$ )

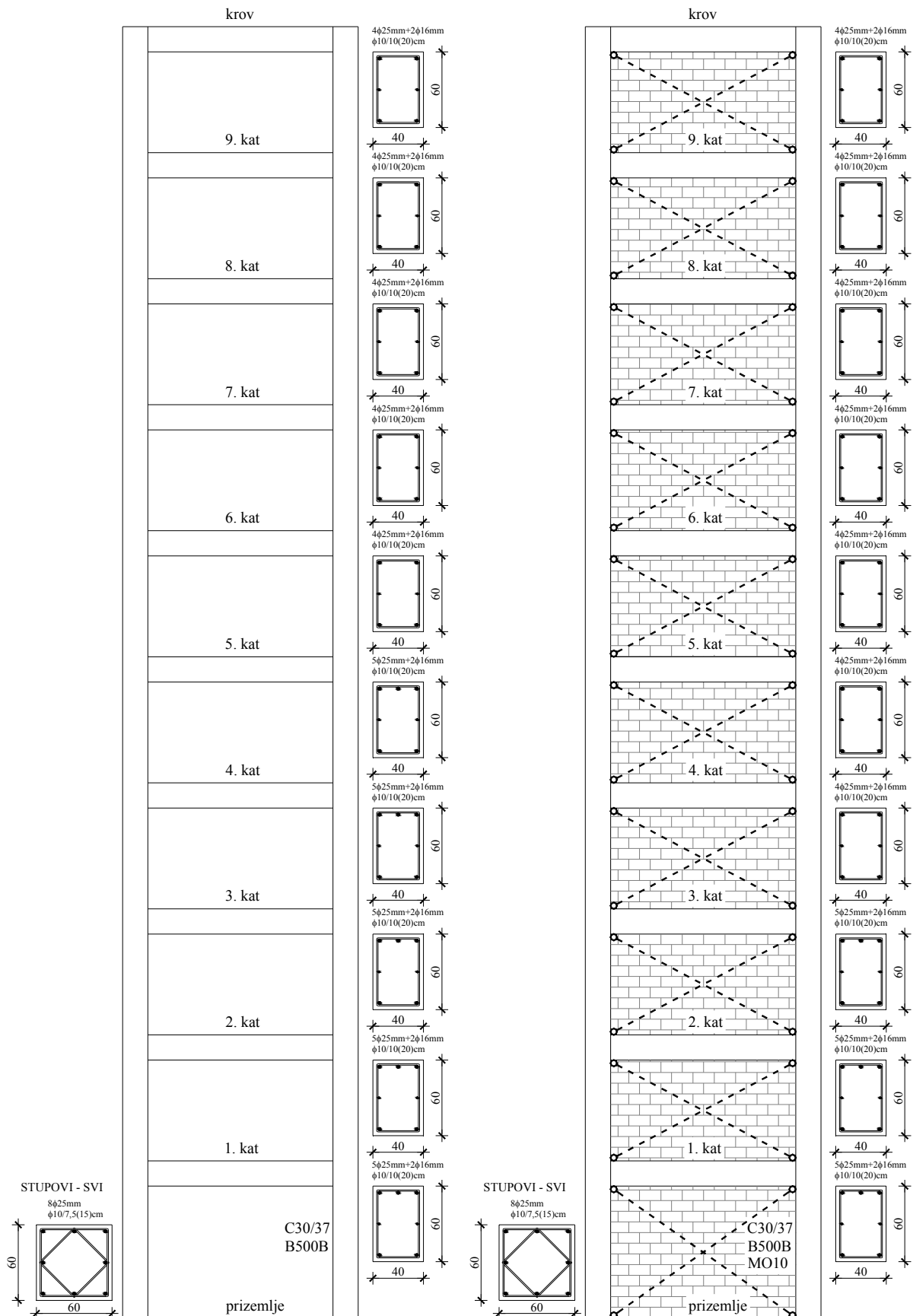


Slika 9.27 Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 7. katova ( $a_g=0,2g$ )

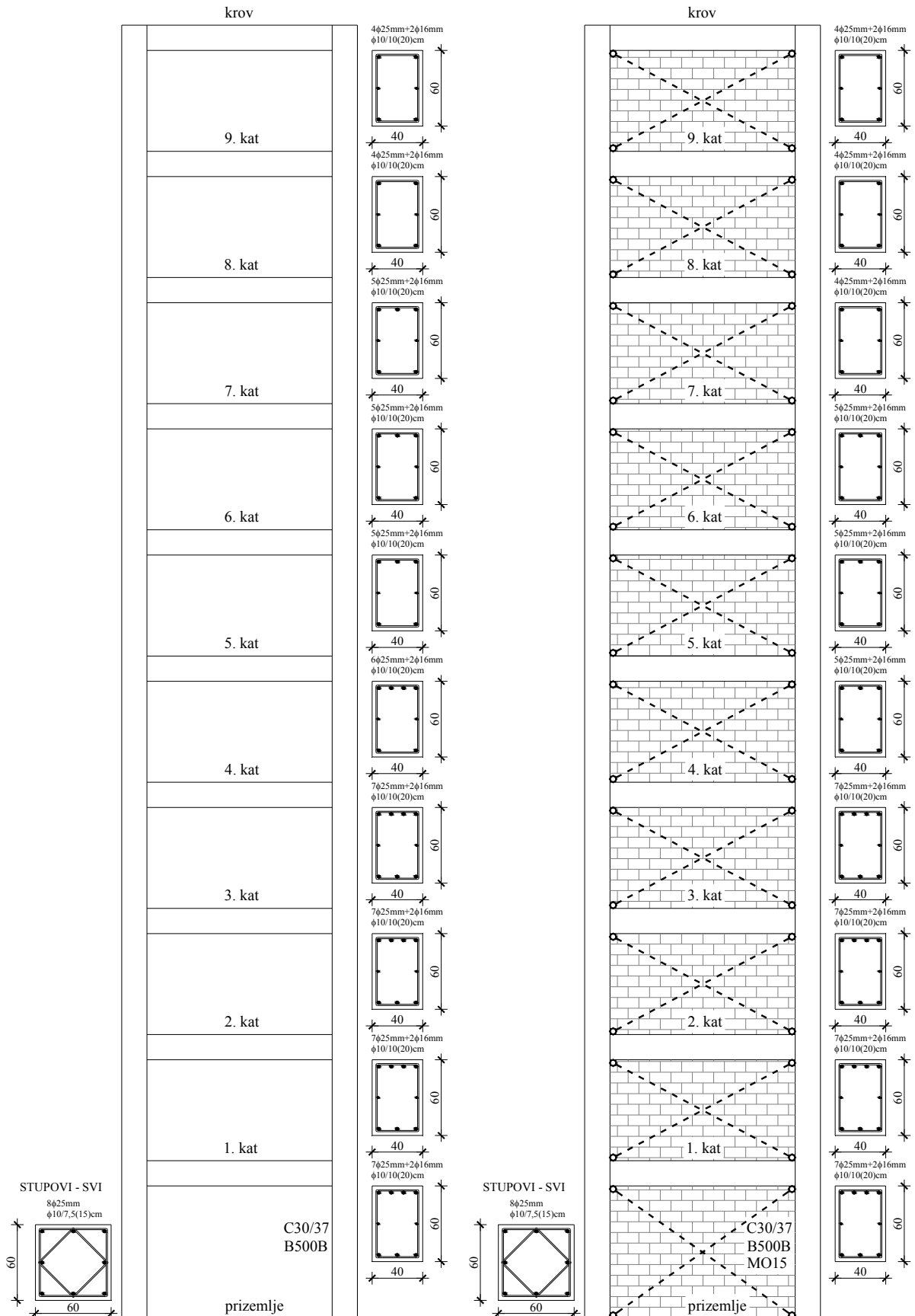




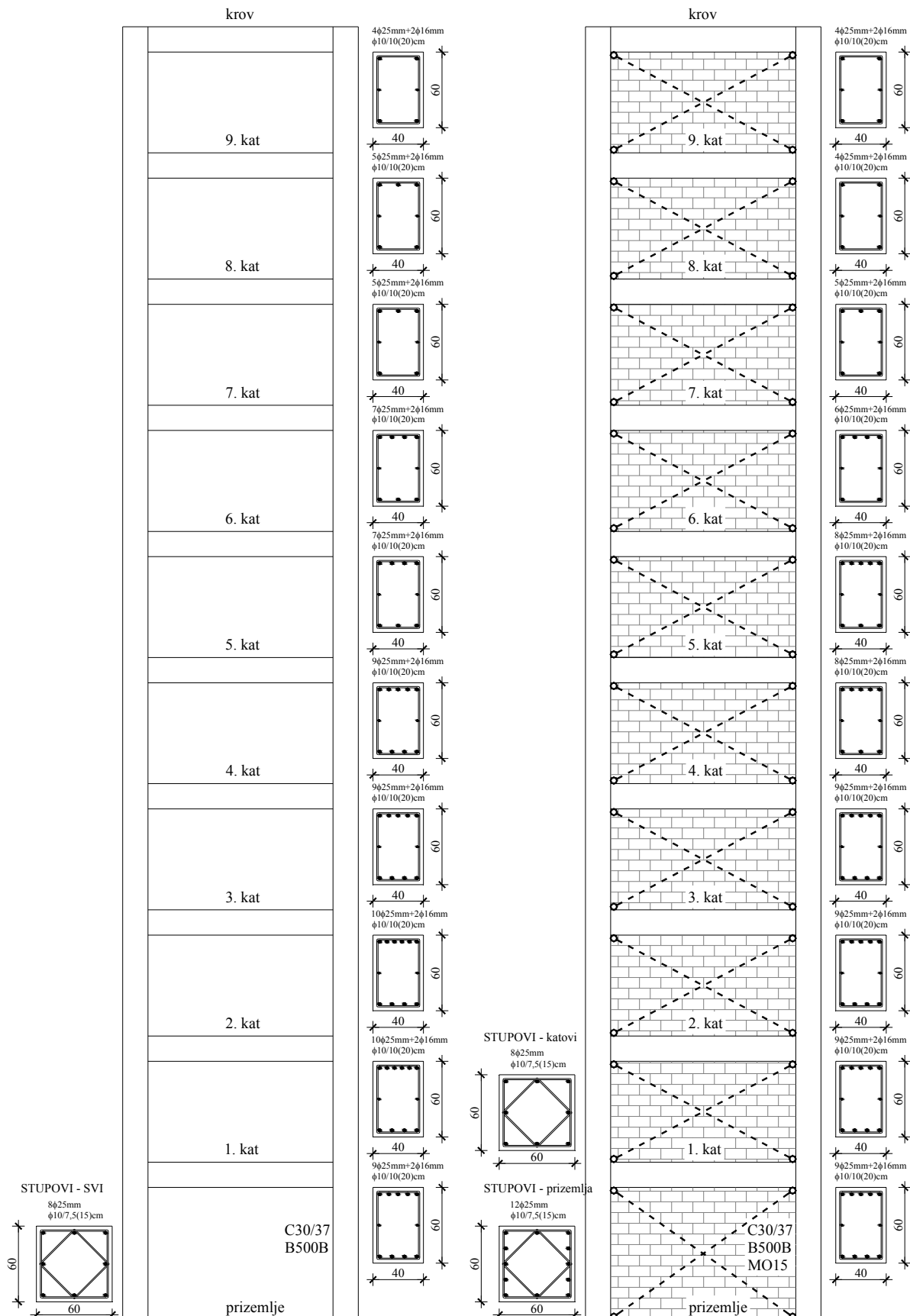
Slika 9.28 Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 7. katova ( $a_g=0,3g$ )



Slika 9.29 Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 10. katova ( $a_g=0,1g$ )



Slika 9.30 Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 10. katova ( $a_g=0,2g$ )



Slika 9.31 Odabrana armatura u elementima praznog armirano-betonskog okvira i armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom – 10. katova ( $a_g=0,3g$ )

## 9.4 PROVJERA METODE PRORAČUNA METODOM N2 – METODA PROCJENE SEIZMIČKOG PONAŠANJA ZGRADA

### 9.4.1 Uvod

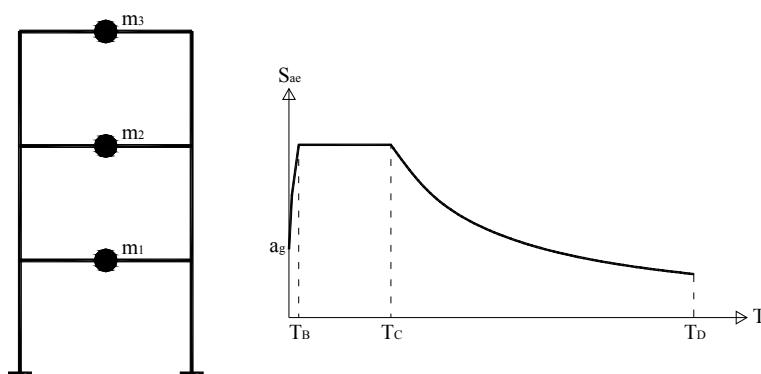
Prikazana je opsežna, ali ipak relativno jednostavna, nelinearna metoda za ocjenu ponašanja konstrukcija (metoda N2). U ovoj se metodi nelinearni proračun kombinira s pristupom temeljenom na spektralnom odzivu, a dobivaju se relativno točni rezultati ako konstrukcija oscilira u prvome tonu. Opisuje se verzija metode formulirana u obliku ubrzanje - pomak. Danas dostupna verzija metode N2 primjenjuje se samo za ocjenu seizmičkog ponašanja ravninskih, tj. simetričnih konstrukcija. Istraživanja su usmjerena prema proširivanju metode kako bi se obuhvatile trodimenzionalne (asimetrične) zgrade. Ovdje se ukratko opisuje najjednostavnija inačica najnovije verzije metode N2 [29]. Njezina primjena ilustrirana je odgovarajućim primjerima, odnosno numeričkim modelima promatranima u prethodim točkama.

### 9.4.2 Metoda N2

#### 9.4.2.1 Kratak prikaz metode N2 – jednostavna varijanta u obliku ubrzanje – pomak

I. Podatci

- a) Konstrukcija
- b) Elastični spektar ubrzanja,  $S_{ae}$ .



II. Spektri zahtjeva u obliku AD

- a) Odrediti elastični spektar prema izrazu:

$$S_{de} = \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_{ae} \quad (9.18)$$

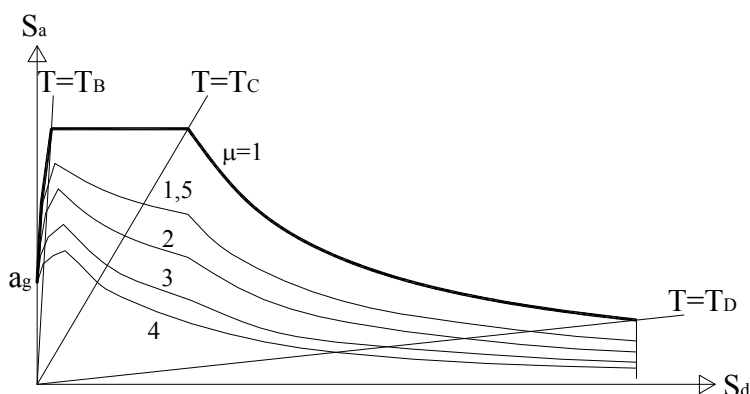
b) Odrediti neelastični spektrar za konstantne vrijednosti duktilnosti prema sljedećim izrazima:

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu}, \tag{9.19}$$

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_{ae} = \mu \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_a, \tag{9.20}$$

$$R_\mu = (\mu - 1) \cdot \frac{T}{T_C} + 1 \dots \dots \dots T < T_C, \tag{9.21}$$

$$R_\mu = \mu \dots \dots \dots T \geq T_C. \tag{9.22}$$



### III. Proračun postupnim guranjem (pushover)

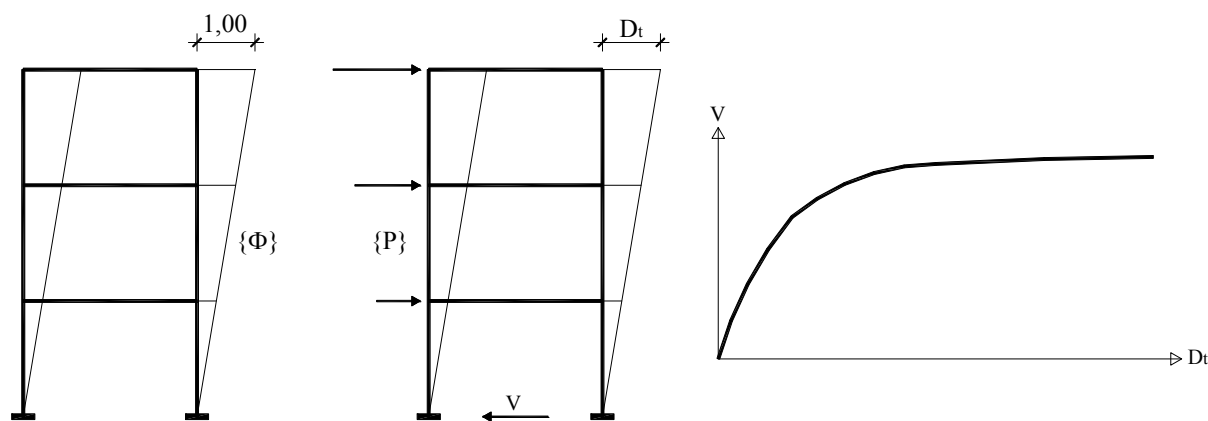
a) Pretpostaviti oblik pomaka,  $\{\Phi\}$

b) Odrediti raspodjelu horizontalnih sila po visini prema izrazu:

$$\{P\} = [M] \cdot \{\Phi_i\}, \tag{9.23}$$

$$P_i = m_i \cdot \Phi_i, \tag{9.24}$$

c) Odrediti odnose između poprečne sile,  $V$ , i pomaka na vrhu zgrade,  $D_t$ .



## IV. Ekvivalentni model SDOF

 a) Pretvoriti količine MDOF ( $Q$ ) u količine SDOF ( $Q^*$ ):

$$Q^* = \frac{Q}{T}, \quad (9.25)$$

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \cdot \Phi_i}{\sum m_i \cdot \Phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum m_i \cdot \Phi_i^2}. \quad (9.26)$$

b) Pretpostaviti približni odnos između elastoplastične sile i pomaka

 c) Odrediti masu,  $m^*$ , nosivost,  $F_y^*$ , granični pomak,  $D_y^*$ , i period,  $T^*$ , prema izrazima:

$$m^* = \sum m_i \cdot \Phi_i, \quad (9.27)$$

$$F_y^* = \frac{F_y}{\Gamma}, \quad (9.28)$$

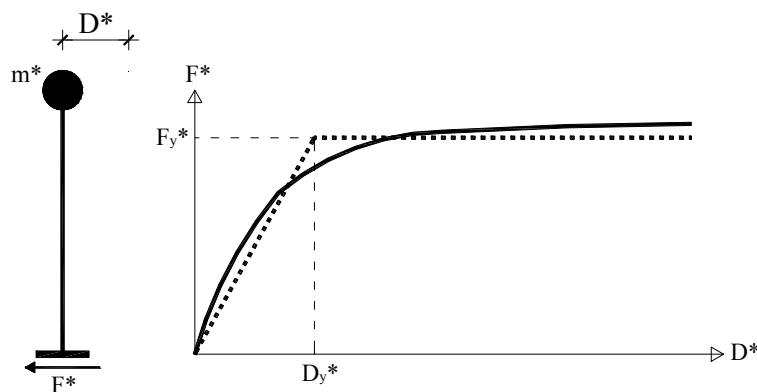
$$D_y^* = \frac{D_y}{\Gamma}, \quad (9.29)$$

$$K^* = \frac{F_y^*}{D_y^*}, \quad (9.30)$$

$$T^* = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m^* \cdot D_y^*}{F_y^*}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m^*}{K^*}}. \quad (9.31)$$

d) Odrediti krivulju kapaciteta (ubrzanje u odnosu na pomak):

$$S_a = \frac{F^*}{m^*} \Rightarrow S_{ay} = \frac{F_y^*}{m^*}. \quad (9.32)$$



## V. Seizmički zahtjev za model SDOF

 a) Odrediti faktor umanjenja,  $R_\mu$ , prema izrazu:

$$R_\mu = \frac{S_{ae}}{S_{ay}}. \quad (9.33)$$

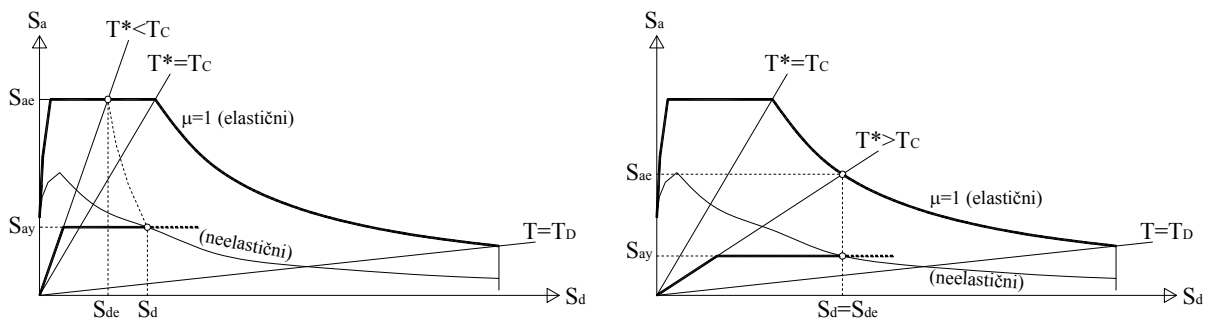
b) Odrediti zahtjev pomaka,  $S_d=D^*$ , prema izrazima:

$$S_d = D^* = S_{de} [1 + (R_\mu - 1) \cdot (T_C / T^*)] / R_\mu \dots\dots\dots T^* < T_C, \quad (9.34)$$

$$S_d = D^* = S_{de} \dots\dots\dots T^* \geq T_C, \quad (9.35)$$

$$\mu = (R_\mu - 1) \cdot \frac{T^*}{T_C} + 1 \dots\dots\dots T^* < T_C, \quad (9.36)$$

$$\mu = R_\mu \dots\dots\dots T^* \geq T_C, \quad (9.37)$$



c) Ako je potrebno izmijeniti zahtjev pomaka.

VI. Globalni seizmički zahtjev za model MDOF

a) Pretvoriti pomak SDOF u najveći pomak modela MDOF prema izrazu:

$$D_t = \Gamma \cdot D^* . \quad (9.38)$$

VII. Lokalni seizmički zahtjevi (mogu se primijeniti rezultati dobiveni u drugom koraku)

- a) Provesti proračun postepenim guranjem prema modelu MDOF do pomaka na vrhu,  $D_t$
- b) Odrediti lokalne veličine (npr. katne pomake, rotacije) koje odgovaraju vrijednosti,  $D_t$ .

VIII. Ocjena ponašanja (procjena oštećenja)

a) Usporediti lokalne i globalne seizmičke zahtjeve s kapacitetima za relevantnu razinu ponašanja.

Ovdje je dan kratak prikaz metode, gdje se nalaze i svi izrazi potrebni za proračune. U ovome su poglavlju i odgovarajući komentari. Kada ti komentari, ovise o vrsti konstrukcije, treba napomenuti kako se misli na konstrukcije zgrada.



### 9.4.2.2 *Primjena metode N2*

Ovdje se daju odgovarajući komentari po koracima.

#### **Prvi korak: Podatci**

Primjenjuje se konstrukcijski model MDOF. Uz podatke, potrebne za uobičajeni proračun prema teoriji elastičnosti, traže se i nelinearni odnosi sila - pomak konstrukcijskih elemenata podvrgnutih monotonom opterećenju. Seizmički se zahtjev određuje elastičnim spektrom ubrzanja,  $S_{ae}$ . U načelu, može se upotrijebiti bilo koji spektar, međutim, najprikladniji je spektar tipa Newmark-Hall, u kojem se čitav raspon perioda dijeli na nekoliko područja. Tri od njih karakterizira konstantno ubrzanje ( $T < T_C$ ), konstantna brzina ( $T_C < T < T_D$ ) i konstantni pomak ( $T > T_D$ ). Za vrlo kratke periode, spektralno ubrzanje jednako je najvećem ubrzanju tla, dok je za vrlo duge periode, spektralni pomak jednak najvećem pomaku tla. U ovome radu korišteni su spektri ubrzanja definirani Eurocodom 8.

#### **Drugi korak: Spektri zahtjeva u obliku AD**

U sustavu elastičnosti SDOF, spektar (pseudo) ubrzanja,  $S_{ae}$  (u daljnjem tekstu izostavlja se riječ „pseudo“) i spektar pomaka,  $S_{de}$ , povezuju se jednostavnim odnosom. U tzv. obliku ubrzanje-pomak (AD), spektralna ubrzanja unose se uz spektralne pomake, pri čemu radijalne linije predstavljaju periode,  $T$ . Kod neelastičnoga sustava SDOF s bilinearnom anvelopom sila-pomak, spektar ubrzanja,  $S_a$ , i spektar pomaka,  $S_d$ , mogu se odrediti s pomoću izraza koji su dani u opisu metode.

U formulama je vrijednost,  $\mu$ , faktor duktilnosti koji se definira kao odnos između najvećeg pomaka i pomaka pri popuštanju, dok je,  $R_\mu$ , faktor umanjenja zbog duktilnosti, tj. zbog histereznog raspršivanja energije duktilnih konstrukcija. Napominjemo da,  $R_\mu$ , nije jednak faktoru redukcije,  $R$  (faktoru promjene ponašanja, odziva), koji se primjenjuje u seizmičkim propisima. Faktor redukcije,  $R$ , koji se primjenjuje u propisima, uzima u obzir i raspršivanje energije i povećanu nosivost,  $R_s$ . On se može definirati kao,  $R = R_\mu R_s$ . Faktor,  $R_\mu$ , ovisi o nekoliko konstrukcijskih parametara kao što su: krutost nakon popuštanja, histerežno ponašanje, veličina i vrsta prigušenja, amplitude neelastičnih pomaka,  $i$  u najvećoj mjeri, period vlastitih vibracija. Dosad je formulirano nekoliko prijedloga u vezi s faktorom umanjenja,  $R_\mu$ . Bilinearni spektar,  $R_\mu$ , primjenjuje se u jednostavnoj inačici metode N2 koja se ovdje opisuje.

U rasponu srednjih i dugih perioda primjenjuje se pravilo jednakih pomaka, tj. pomak neelastičnoga sustava jednak je pomaku odgovarajućeg elastičnog sustava s istim periodom oscilacija. Dakle, vrijednost,  $R_{\mu}$ , jednaka je vrijednosti,  $\mu$ . U području kratkih perioda, vrijednost,  $R_{\mu}$ , linearno se povećava od  $1-\mu$ . Prijelazni period,  $T_C$ , koji dijeli linearni od konstantnog dijela spektra,  $R_{\mu}$ , karakterističan je period gibanja tla. On se obično definira kao prijelazni period kod kojega segment konstantnog ubrzanja prelazi u segment konstantne brzine spektra. On otprilike odgovara periodu kod kojega se u konstrukciju unosi najveća energija. Smatra se da u slučaju male duktilnosti bilinearni spektar,  $R_{\mu}$ , s fiksnim prijelaznim periodom,  $T_C$ , daje povećanu sigurnost, kada se radi o konstrukcijama s kratkim periodom. Međutim, on je ipak prikladan jer nije potrebno ponavljanje iz petoga koraka. Taj se spektar može smatrati prihvatljivim jer u rasponu kratkih perioda pomaci, obično, nisu znatni.

Spektri zahtjeva za faktore konstantne duktilnosti,  $\mu$ , u obliku AD, mogu se dobiti na temelju proračunskog spektra i to primjenom jednadžbi iz opisa metode. Ti spektri predstavljaju neelastične spektre. Treba napomenuti kako izvođenje tih spektara uopće nije potrebno u proračunskome postupku (peti korak). Oni samo služe kao sredstvo za vizualno prikazivanje postupka.

Potrebno je napomenuti kako su spektri iz slika u kratkom prikazu namjerno odrezani na periodu,  $T_D$ , koji predstavlja prijelazni period na kontaktu između srednje velikih i dugih perioda. Kod duljih je perioda spektar pomaka obično konstantan. Stoga se može reći da se spektar ubrzanja u području dugih perioda obično smanjuje usporedno sa smanjenjem kvadrata perioda,  $T$ . U području izuzetno dugih perioda, spektralni se pomaci smanjuju do vrijednosti najvećeg pomaka tla. Još uvijek se istražuju stvarna svojstva elastičnih spektara opće namjene u područjima dugih i vrlo dugih perioda.

### **Treći korak: *Proračun postupnim guranjem***

Karakterističan nelinearni odnos između ukupne poprečne sile i najvećega pomaka u sustavu MDOF može se odrediti proračunom postupnog guranja. Značajan korak u tome svakako je odabir odgovarajućeg rasporeda horizontalnoga opterećenja. Jedinствeno rješenje ne postoji. Srećom, područje razumnih pretpostavaka obično je relativno usko pa se u njemu različitim pretpostavkama dobivaju slični rezultati. Popularan pristup sastoji se u nanošenju horizontalnih sila u skladu s raspodjelama danima u propisima. Kao praktičnu mogućnost vrijedi spomenuti i primjenu dvaju različitih obrazaca opterećenja te određivanje rezultata ujedinjavanjem.

Kod složenijih pristupa, raspodjela se mijenja usporedno sa stupnjem popuštanja konstrukcije. U metodi N2, pretpostavlja se kako je horizontalna sila u  $i$ -tom katu proporcionalna komponenti pretpostavljenoga oblika pomaka,  $\Phi_i$ , koja je ponderirana s masom kata,  $m_i$ . Takav raspored ima fizikalnu osnovu (sile inercije), a rezultat je najjednostavnija transformacija iz sustava MDOF u sustav SDOF (četvrti korak). Treba spomenuti kako ova pretpostavka nije uvjetovana ozbiljnijim ograničenjima jer se dopušta primjena svakog razumnog oblika pomaka. Raspored horizontalnih sila ostaje konstantan u tijeku provođenja proračuna postepenim guranjem.

#### **Četvrti korak: Ekvivalentni model SDOF**

U metodi N2, seizmički se zahtjevi određuju spektrom odziva. Neelastično ponašanje eksplicitno se uzima u obzir. Stoga, u načelu konstrukciju treba modelirati kao sustav SDOF. Razni se postupci primjenjuju za određivanje karakteristika ekvivalentnog sustava SDOF. U opisu metode dani su izrazi koji se upotrebljavaju u metodi N2.  $Q^*$  predstavlja količine u ekvivalentnom sustavu SDOF (sila,  $F^*$ , i pomak,  $D^*$ ), a  $Q$ , odgovarajuće količine u sustavu MDOF (poprečna sila,  $V$ , i najveći pomak,  $D_t$ ). Konstanta,  $\Gamma$ , predstavlja faktor sudjelovanja pojedinog oblika vibracija. Treba napomenuti da je oblik pomaka usklađen s normama – vrijednost na vrhu iznosi 1,00. Kako se za sile i pomake primjenjuje ista transformacija, početna krutost ekvivalentnog sustava SDOF ostaje ista kao i kod sustava MDOF.

Inženjerska se prosudba upotrebljava za idealiziranje odnosa sila – pomak odgovarajućeg sustava SDOF u elastično – idealnoplastičnome obliku. Ponekad se u propisima daju odgovarajuće upute. Tako se, npr. ponekad traži da se za proračunsku horizontalnu krutost uzme sekantna krutost izračunata kao sila koja je jednaka 60%-tnoj nosivosti na granici popuštanja.

Za grafički je postupak potrebno da krutost nakon popuštanja bude jednaka nuli. To se traži zato što se faktor umanjenja,  $R_{\mu}$ , definira kao odnos između tražene elastične nosivosti i nosivosti na granici popuštanja. Utjecaj umjerenog očvršćivanja uključen je u spektre zahtjeva. Potrebno je naglasiti kako umjereni očvršćivanje ne utječe bitno na zahtjeve glede pomaka. Međutim, u slučaju (deformacijskog) omekšanja dolazi do povećanja najvećih pomaka (vidi izmjenu u petom koraku).

Odnos između ubrzanja i pomaka dobiva se tako da se sile sadržane u krivulji sila – pomak ekvivalentnog sustava SDOF podijele s ekvivalentnom masom,  $m^*$ .

**Peti korak: Seizmički zahtjev za model SDOF**

Nosivost potreba za elastično ponašanje i odgovarajući elastični pomak definiraju se kao sjecište između radijalne linije, koja odgovara elastičnoj krutosti u idealiziranome bilinearnom sustavu, i elastičnog spektra zahtjeva. Faktor umanjenja,  $R_{\mu}$ , jednak je odnosu između elastičnog ubrzanja,  $S_{ae}$ , i ubrzanja na granici popuštanja,  $S_{ay}$ , koja predstavlja zahtjev neelastičnog sustava,  $S_a$ . Ako je elastični period,  $T^*$ , jednak ili veći od  $T_C$ , tada je zahtjev neelastičnog pomaka jednak zahtjevu elastičnog pomaka, a zahtjev duktilnosti,  $\mu$ , jednak je faktoru umanjenja,  $R_{\mu}$ . Inače je zahtjev neelastičnog pomaka veći od zahtjeva elastičnog pomaka. Faktor pojačanja određuje se prema formuli iz prikaza metode. Ta je formula razvijena na temelju odnosa koji se spominju u drugome koraku.

U grafičkom smislu, seizmički zahtjev neelastičnosti definira se kao sjecište između dijagrama kapaciteta i spektra zahtjeva neelastičnosti za zahtjev duktilnosti koji odgovara faktoru umanjenja,  $R_{\mu}$ , (vidjeti izraze u drugom koraku).

U ovom se stadiju zahtjev pomaka može prema potrebi promijeniti ako npr. želimo u obzir uzeti veće pomake uočene kod sustava s padajućom nosivošću i kod sustava s uskim histereznim petljama.

**Šesti korak: Globalni seizmički zahtjev za model MDOF**

Najveći pomak modela SDOF mijenja se u najveći pomak na vrhu modela MDOF.

**Sedmi korak: Lokalni seizmički zahtjev za model MDOF**

Lokalni seizmički zahtjevi (npr. katni pomaci, rotiranje zglobova) određuju se prilagodbom modela MDOF na najveći pomak koji je određen u šestom koraku. U proračunu se postupnim guranjem primjenjuje fiksni postupak (kao i u drugom koraku) monotonog povećavanja horizontalnih sila. Kao alternativa, mogu se pohraniti rezultati proračuna postupnim guranjem, a koji su obavljani u drugome koraku.

**Osmi korak: Ocjenjivanje ponašanja**

U posljednjem se koraku može ocijeniti ponašanje. To se obavlja uspoređivanjem seizmičkih zahtjeva određenih u sedmom koraku s kapacitetom nosivosti za dotičnu razinu ponašanja. Ocjenjivanje se obično obavlja na globalnoj razini i na lokalnim razinama. Određivanje seizmičkoga kapaciteta nosivosti ne razmatra se u ovome radu.

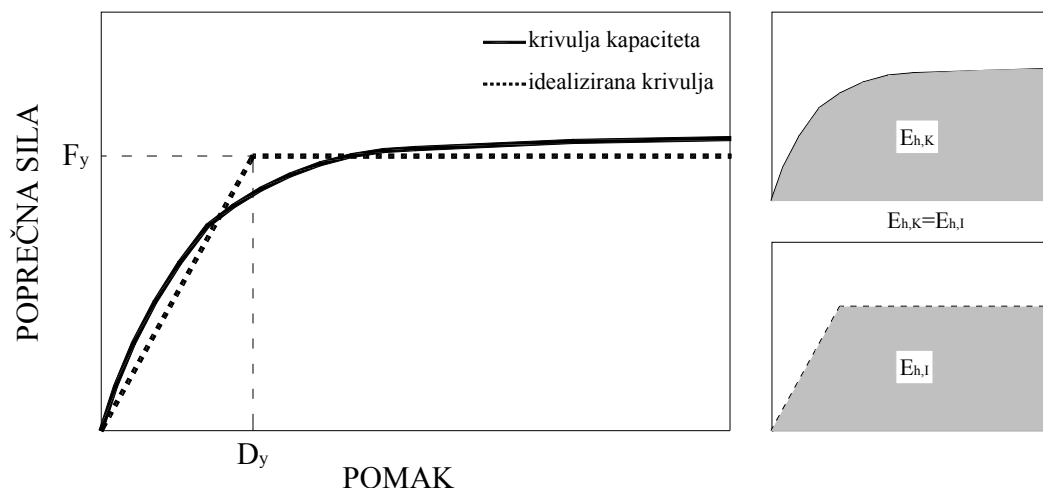
Taj se kapacitet uvelike temelji na empirijskim ili poluempirijskim vrijednostima. Globalna se ocjena može prikazati vizualno uspoređivanjem kapaciteta pomaka i odgovarajućeg zahtjeva.

U nekim slučajevima, naročito kod postojećih konstrukcija za koje ne postoje detaljni podatci o gradivu, a bile su izložene dugotrajnim pomacima tla, kumulativni štetni utjecaji zbog opetovanih neelastičnih ciklusa mogu biti vrlo značajni. Ti se utjecaji lako mogu uključiti u opisane postupke s pomoću takozvanih „faktora ekvivalentne duktilnosti“. Ideja na kojoj se temelji ta metoda sastoji se u smanjenju kapaciteta monotone deformacije elementa i/ili konstrukcije zbog kumulativnog oštećenja do kojeg dolazi zbog raspršivanja histerezne energije. Odnos između graničnog monotonog i cikličkoga deformacijskoga kapaciteta ovisi o modelu oštećenja koji se primjenjuje. Prema koncepciji ekvivalentnog svojstva deformabilnosti, utjecaj kumulativnog oštećenja može se jednostavno uzeti u obzir odgovarajućim smanjenjem kapaciteta nosivosti određenog proračunom postupnim guranjem kako na globalnoj razini (konstrukcija), tako i na lokalnoj razini (element).

### 9.4.3 Primjena metode N2 na numeričke modele

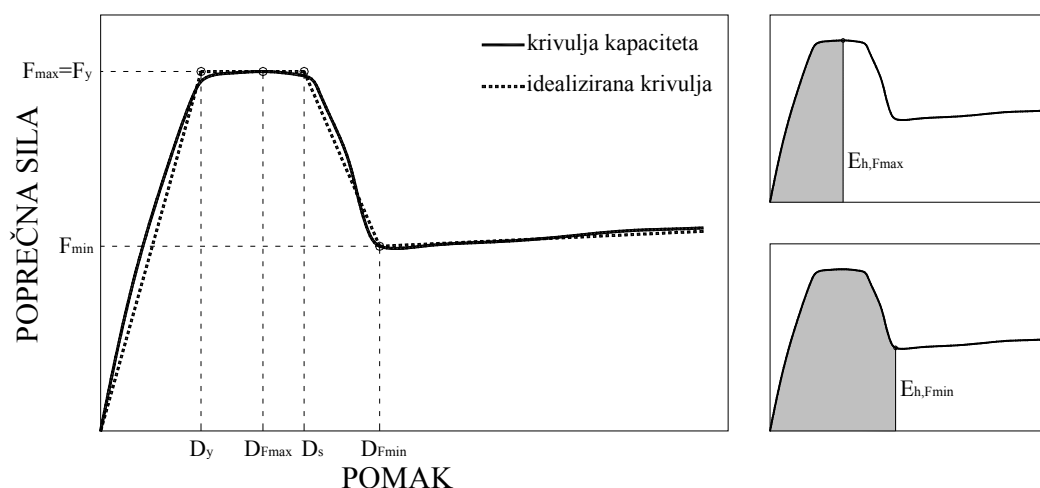
Prije prikaza rezultata provedene statičke nelinearne analize pomoću metode N2, treba spomenuti sljedeće:

- 1) Za dobivanje krivulje kapaciteta za sve numeričke modele korišten je softver SEISMOSTRUCT Version 6 (Seismosoft 2012) za neelastičnu statičku i dinamičku analizu konstrukcija. Svi ulazni podatci, koji su zadavani, sukladni su u svemu s *Poglavljem 6*, tj. *točkom 6.3 i 6.4* i ovdje opisanim ulaznim podacima numeričkih modela i odabranom uzdužnom i poprečnom armaturom u njima.
- 2) Kod svih numeričkih modela praznih armirano-betonskih okvira, krivulja kapaciteta koja je dobivena statičkom pushover analizom (metodom postupnog guranja), idealizirana je bilinearnom krivuljom (*slika 9.32*). Idealizacija je napravljena na osnovu izjednačavanja ploština (energija), tj. ploština ispod krivulje kapaciteta jednaka je površini ispod krivulje bilinearne idealizacije.
- 3) Kod svih numeričkih modela armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom, krivulja kapaciteta, koja je dobivena statičkom pushover analizom (metodom postupnog guranja), idealizirana je više - linearnom krivuljom prema *slici 9.33*. Idealizacija je napravljena na osnovu izjednačavanja ploština prema danim izrazima, tj. ploština ispod krivulje kapaciteta jednaka je površini ispod više - linearne krivulje idealizacije.



**Slika 9.32** Idealizacija krivulje kapaciteta praznog armirano-betonskog okvira

*Idealizacija krivulje kapaciteta dobivene pushover analizom.* Osnovna karakteristika ove krivulje kapaciteta armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom značajno je smanjenje nosivosti nakon oštećenja zidnoga ispuna. Ova značajka mora se uzeti u obzir. Dakle, potrebna je više – linearna idealizacija krivulje kapaciteta armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom (*slika 9.32*). Postupak idealizacije prikazan ovdje i primijenjen na analiziranim numeričkim modelima u nastavku, jedna je mogućnost koja je davala dobre rezultate. Međutim, moguća je bilo koja druga idealizacija pod uvjetom da su tri karakteristične točke (popuštanje, inicijalno oštećenje i potpuni slom) ispravno definirane.



**Slika 9.33** Idealizacija krivulje kapaciteta armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom

Idealizacija krivulje kapaciteta armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom može biti izvedena na sljedeći način [18].

- Prvo, potrebno je definirati dvije točke na krivulji kapaciteta (*slika 9.33*). One odgovaraju maksimalnoj ( $F_{max}; D_{Fmax}$ ) i minimalnoj ( $F_{min}; D_{Fmin}$ ) nosivosti armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom. Zadnja točka obično se odnosi na potpuno oštećenje zidnoga ispuna u jednom ili više katova. Nakon toga, samo se armirano-betonski okvir odupire horizontalnom opterećenju (vidi *sliku 9.33*).
- Drugo, karakteristične točke idealizirane krivulje kapaciteta određuje: sila popuštanja,  $F_y$ , od idealiziranog sustava koja je jednaka maksimalnoj nosivosti, i pomaci pri sili popuštanja,  $D_y$ , i početku opadanja krivulje kapaciteta,  $D_s$ . Ovi pomaci određuju se iz izjednačavanja ploština (energija) ispod krivulje kapaciteta i idealizirane krivulje kapaciteta u intervalima od  $0-D_{Fmax}$  i  $D_{Fmax}-D_{Fmin}$ . Navedene pomake moguće je odrediti iz sljedećih izraza:

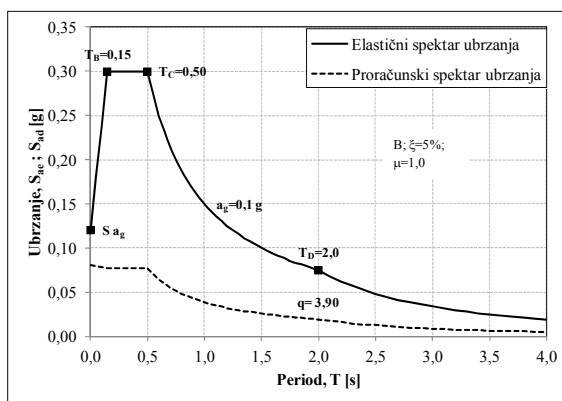
$$D_y = 2 \cdot \left( D_{Fmax} - \frac{E_{h,Fmax}}{F_{max}} \right), \quad (9.39)$$

$$D_s = \frac{2}{F_{max} - F_{min}} \left( E_{h,Fmin} - E_{h,Fmax} + F_{max} \cdot D_{Fmax} - 0,5 \cdot D_{Fmin} (F_{max} + F_{min}) \right). \quad (9.40)$$

#### 9.4.3.1 Prazan armirano-betonski okvir – 4. kata

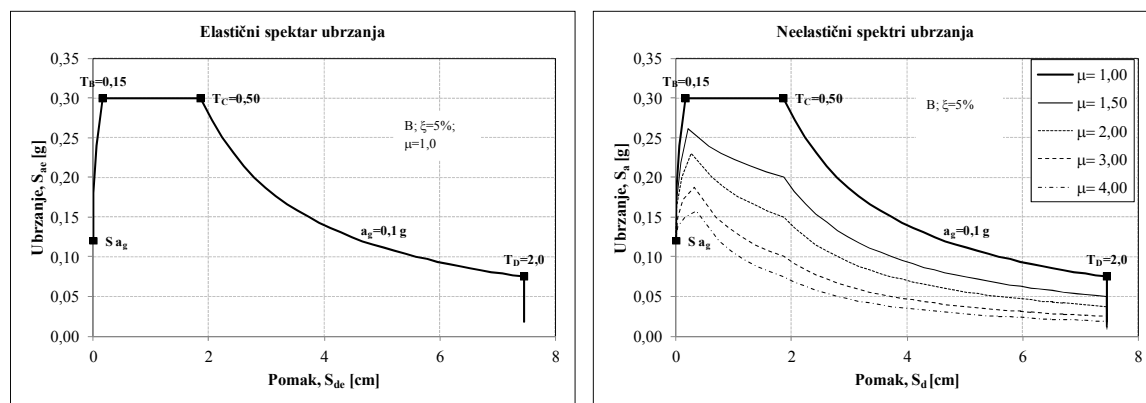
( $a_g=0,1g$ )

Na *slici 9.34* prikazan je elastični spektar odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar, čime je definiran seizmički zahtjev.



**Slika 9.34** Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar -  $a_g=0,1g$

Elastični spektar zahtjeva u obliku AD i neelastični spektri zahtjeva za konstantne vrijednosti duktilnosti prikazani su na *slici 9.35*.


 Slika 9.35 Spektri zahtjeva u obliku AD -  $a_g=0,1g$ 

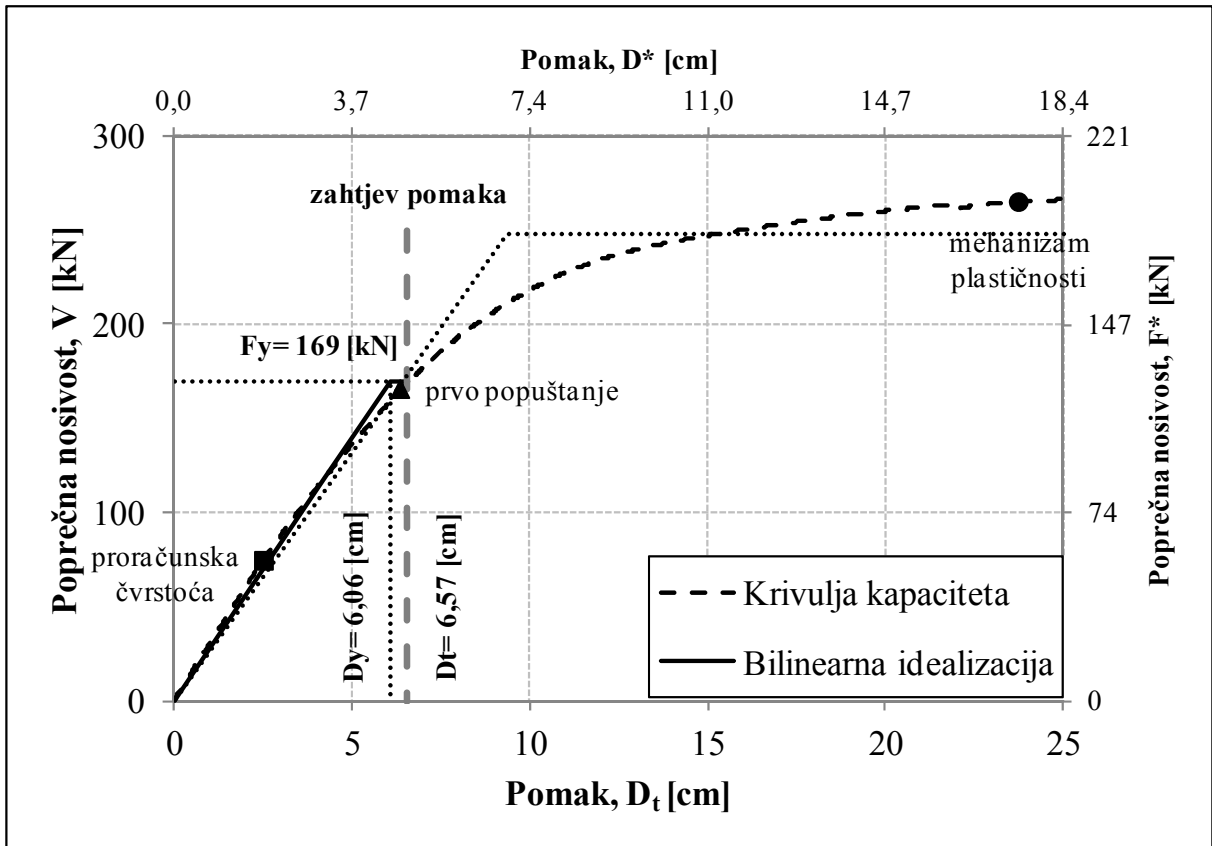
Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1* i *9.4.2.2*, a prikazani su u **tablici 9.36**.

**Tablica 9.36** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,1g$ 

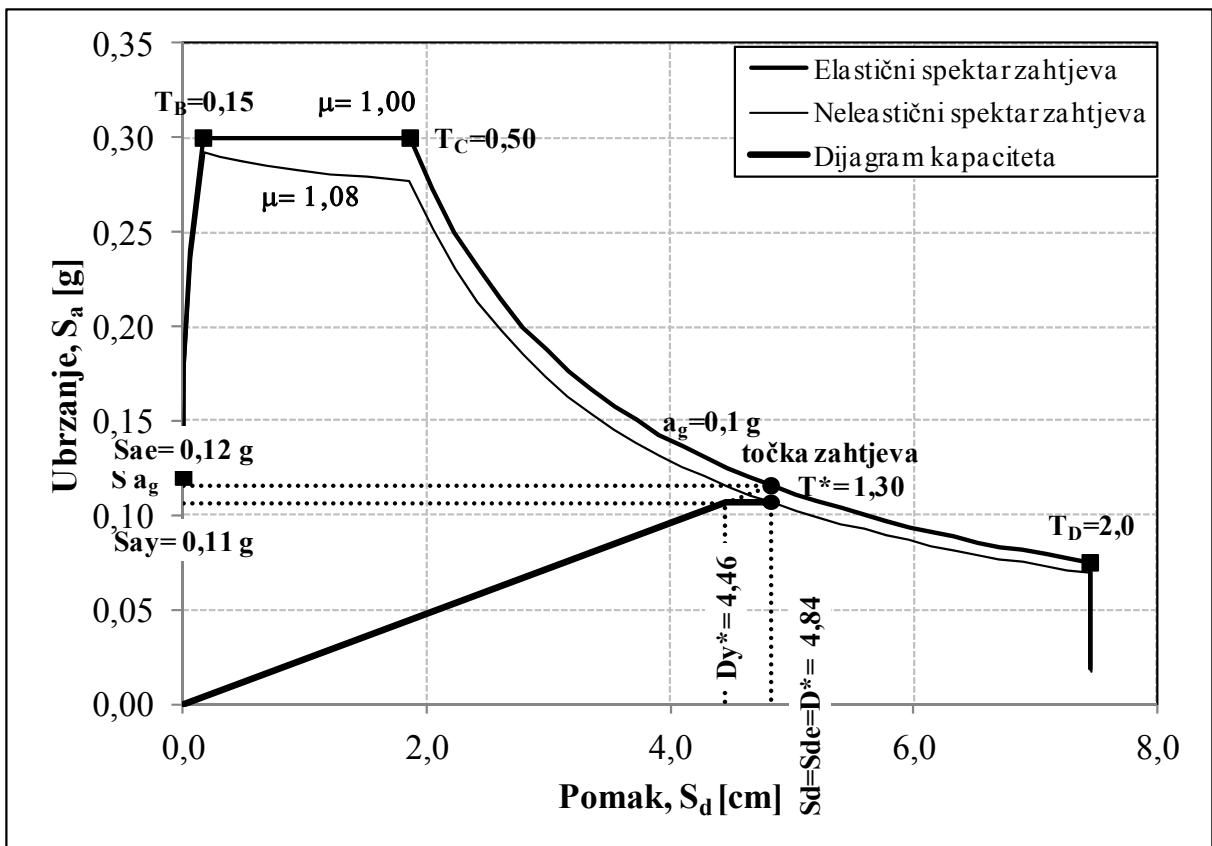
Pretpostavlja se linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela) (MDOF)	$\Phi^T=[0,280; 0,520; 0,760; 1,000]$
Raspodjela masa (MDOF)	Prema <b>tablici 9.3</b>
Raspodjela horizontalnih sila (MDOF)	$P^T=[0,334; 0,618; 0,903; 1,000]$
Ekvivalentna masa (SDOF)	$m^*=119,10$ [t]
Faktor sudjelovanja (konstanta)	$\Gamma=1,359$
Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=124,55$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_\mu=1,08$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana bilinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (točkasta linija), **slika 9.36**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF, prikazan na **slici 9.37**. Za dobiveni zahtjev pomaka ponovno je izvršena bilinearna idealizacija. Za tako idealiziranu krivulju dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, **slika 9.36**. Na **slici 9.36** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i tri karakteristične točke koje se odnose na: proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**), prvo popuštanje i mehanizam plastičnosti. Točke prvoga popuštanja i mehanizma plastičnosti dobivene su zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.





Slika 9.36 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,1g$

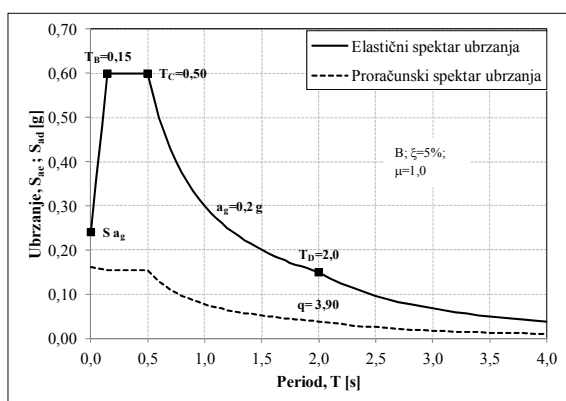


Slika 9.37 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,1g$

Na kraju, sa **slika 9.36** i **9.37**, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran, armirano-betonski okvir zadovoljava za zahtijevani pomak. Razvijanje plastičnih zglobova jedva će se i dogoditi (imamo jedan plastični zglob na lijevom kraju grede prvog kata), budući da s navedene slike (**slika 9.36**) možemo vidjeti kako nam se prvo popuštanje dogodilo neposredno prije zahtijevanoga pomaka.

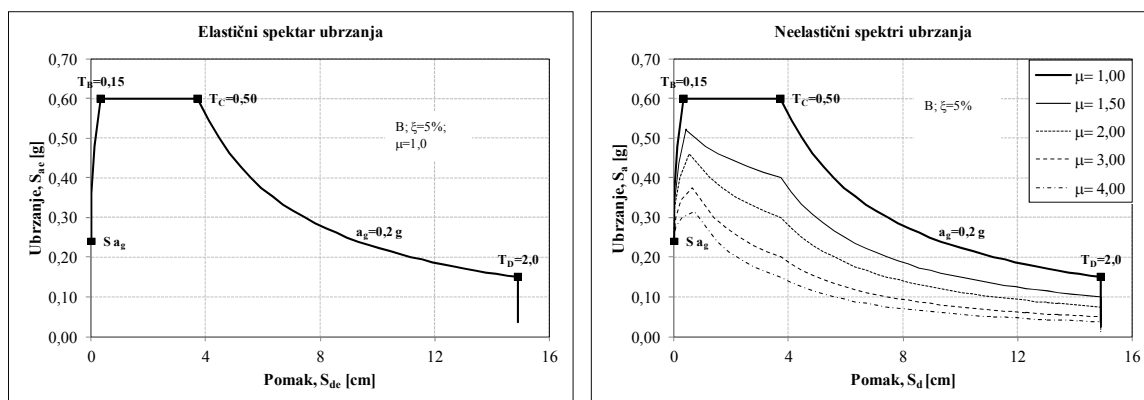
$(a_g=0,2g)$

Na **slici 9.38** prikazan je elastični spektar odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar, čime je definiran seizmički zahtjev.



**Slika 9.38** Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar -  $a_g=0,2g$

Elastični spektar zahtjeva u obliku AD i neelastični spektri zahtjeva za konstantne vrijednosti duktilnosti prikazani su na **slici 9.39**.



**Slika 9.39** Spektri zahtjeva u obliku AD -  $a_g=0,2g$

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u **točkama 9.4.2.1** i **9.4.2.2**, a prikazani su u **tablici 9.37**.

**Tablica 9.37** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,2g$ 

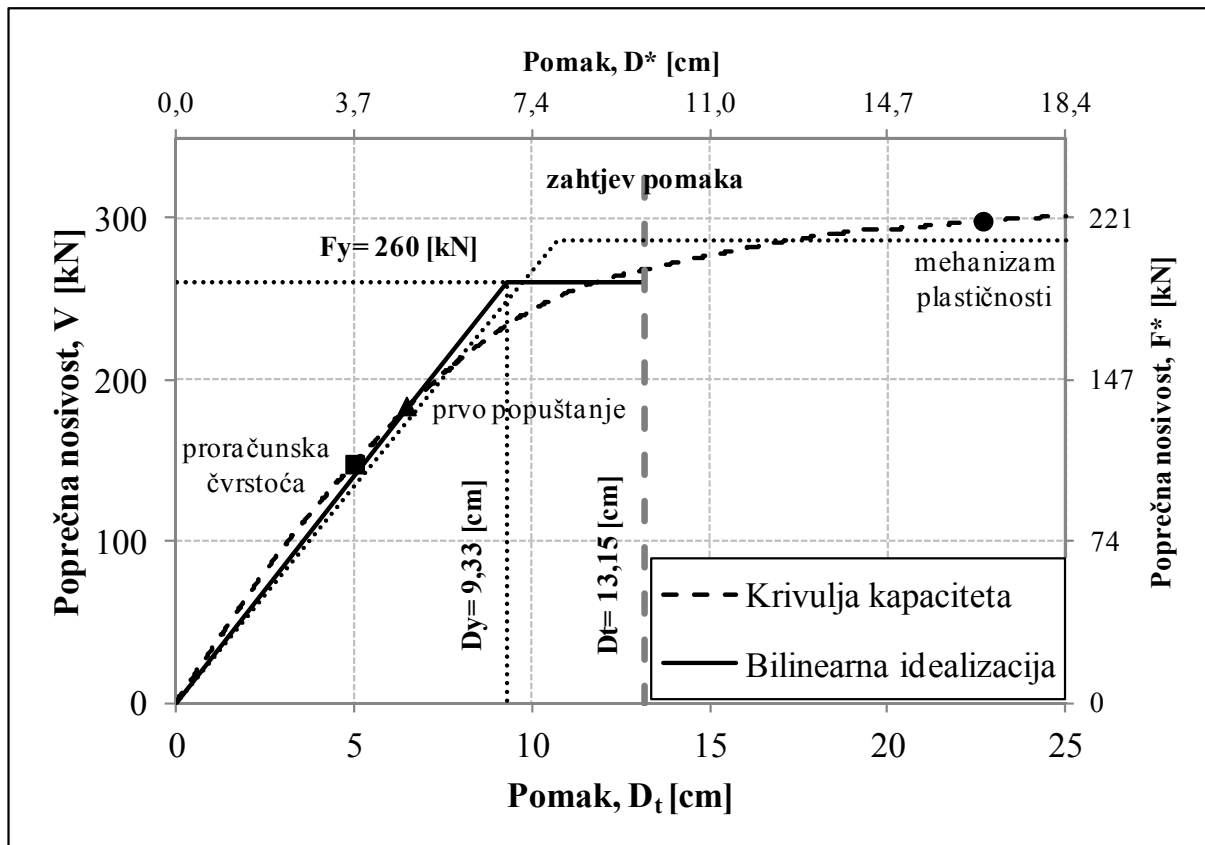
Pretpostavlja se linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela) (MDOF)	$\Phi^T=[0,280; 0,520; 0,760; 1,000]$
Raspodjela masa (MDOF)	Prema <b>tablici 9.3</b>
Raspodjela horizontalnih sila (MDOF)	$P^T=[0,334; 0,618; 0,903; 1,000]$
Ekvivalentna masa (SDOF)	$m^*=119,10$ [t]
Faktor sudjelovanja (konstanta)	$\Gamma=1,359$
Sila popuštanja (SDOF)	$F_{y,*}=191,44$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_\mu=1,41$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana bilinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (točkasta linija), **slika 9.40**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF prikazan na **slici 9.41**.

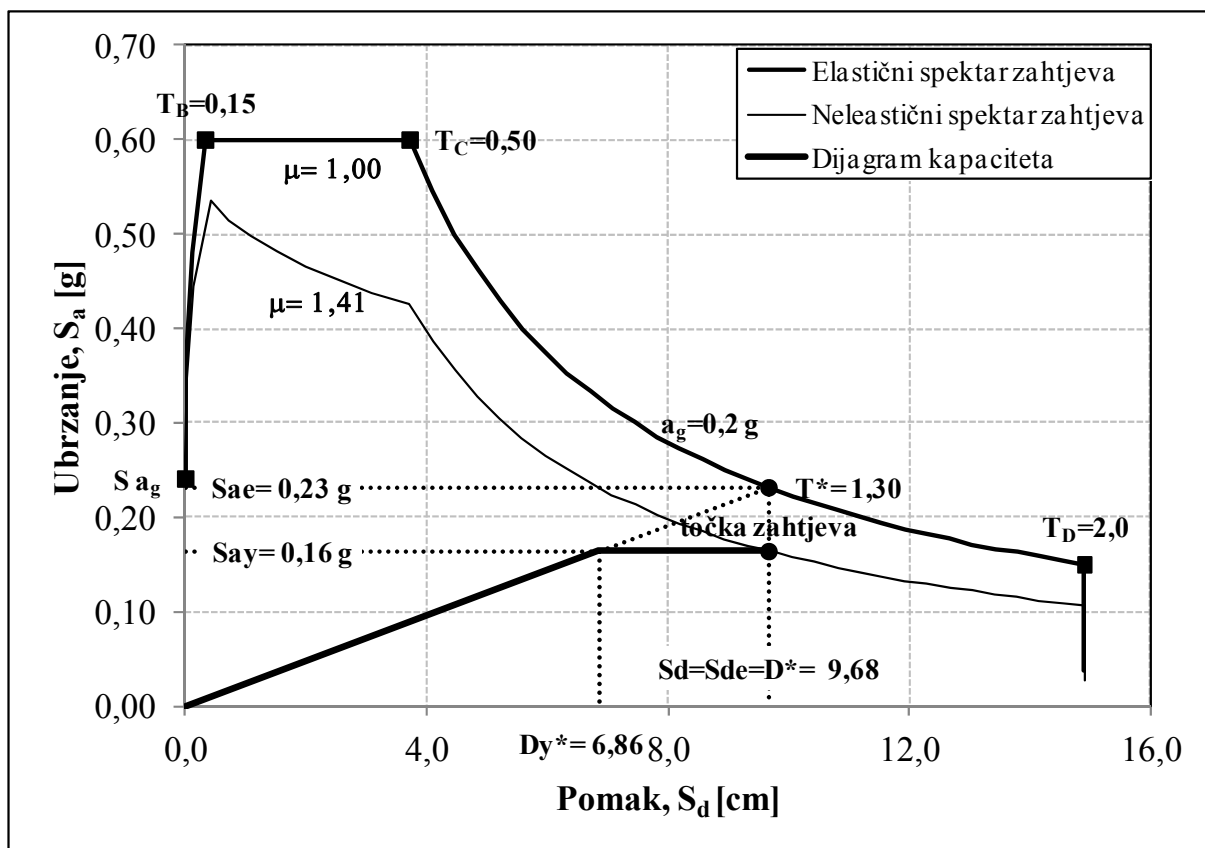
Za dobiveni zahtjev pomaka ponovno je izvršena bilinearna idealizacija. Za tako idealiziranu krivulju dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, **slika 9.40**.

Na **slici 9.40** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i tri karakteristične točke koje se odnose na: proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**), prvo popuštanje i mehanizam plastičnosti. Točke prvog popuštanja i mehanizma plastičnosti dobivene su zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

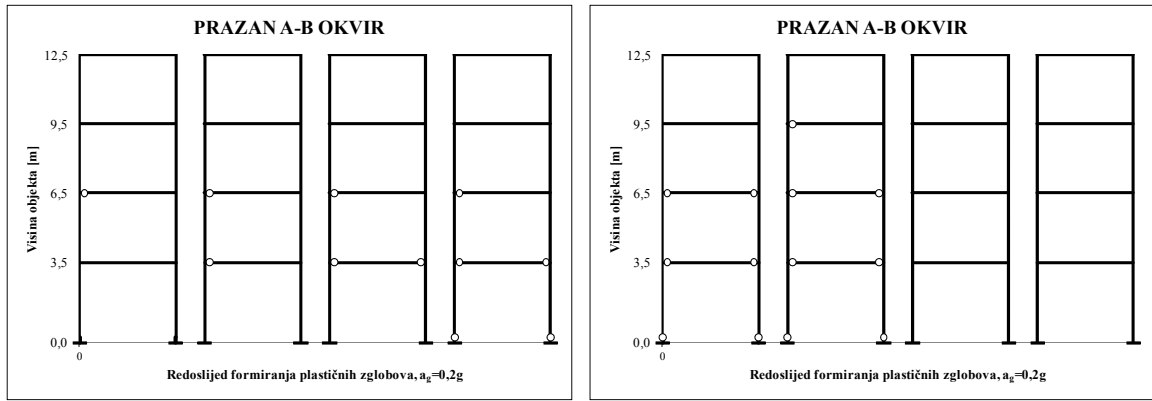
Na kraju, sa **slika 9.40** i **9.41**, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir zadovoljava za zahtijevani pomak. Razvijanje plastičnih zglobova, odnosno redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka prikazan je na **slici 9.4**.



Slika 9.40 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,2g$



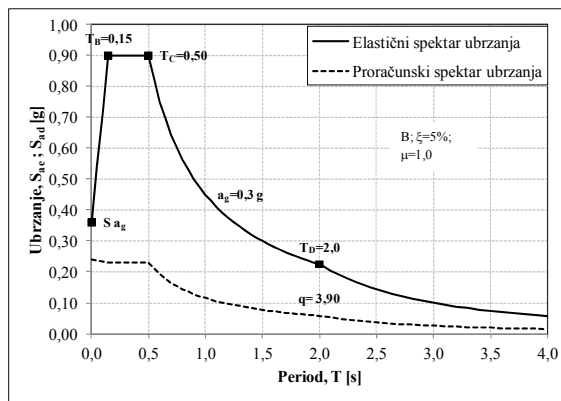
Slika 9.41 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,2g$



Slika 9.42 Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka -  $a_g=0,2g$

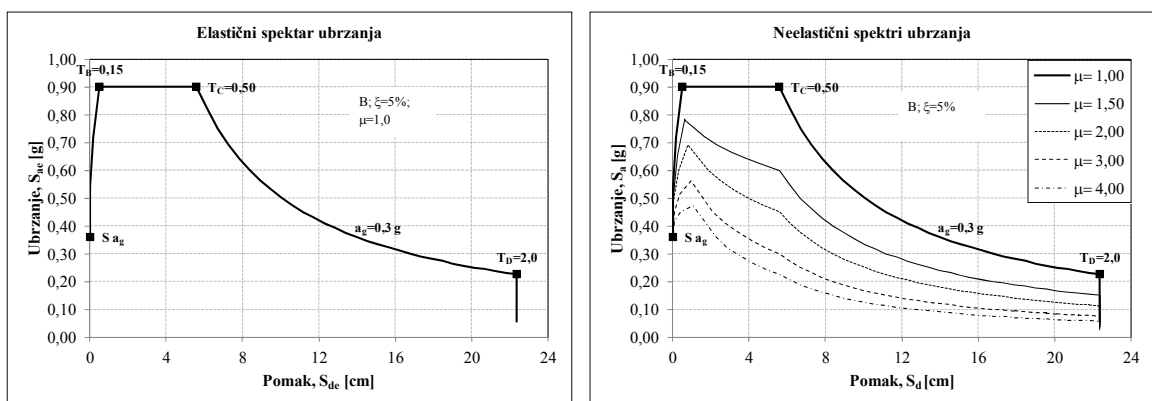
( $a_g=0,3g$ )

Na *slici 9.43* prikazan je elastični spektar odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar, čime je definiran seizmički zahtjev.



Slika 9.43 Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar -  $a_g=0,3g$

Elastični spektar zahtjeva u obliku AD i neelastični spektri zahtjeva za konstantne vrijednosti duktilnosti prikazani su na *slici 9.44*.



Slika 9.44 Spektri zahtjeva u obliku AD -  $a_g=0,3g$

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1 i 9.4.2.2*, a prikazani su u **tablici 9.38**.

**Tablica 9.38** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,3g$

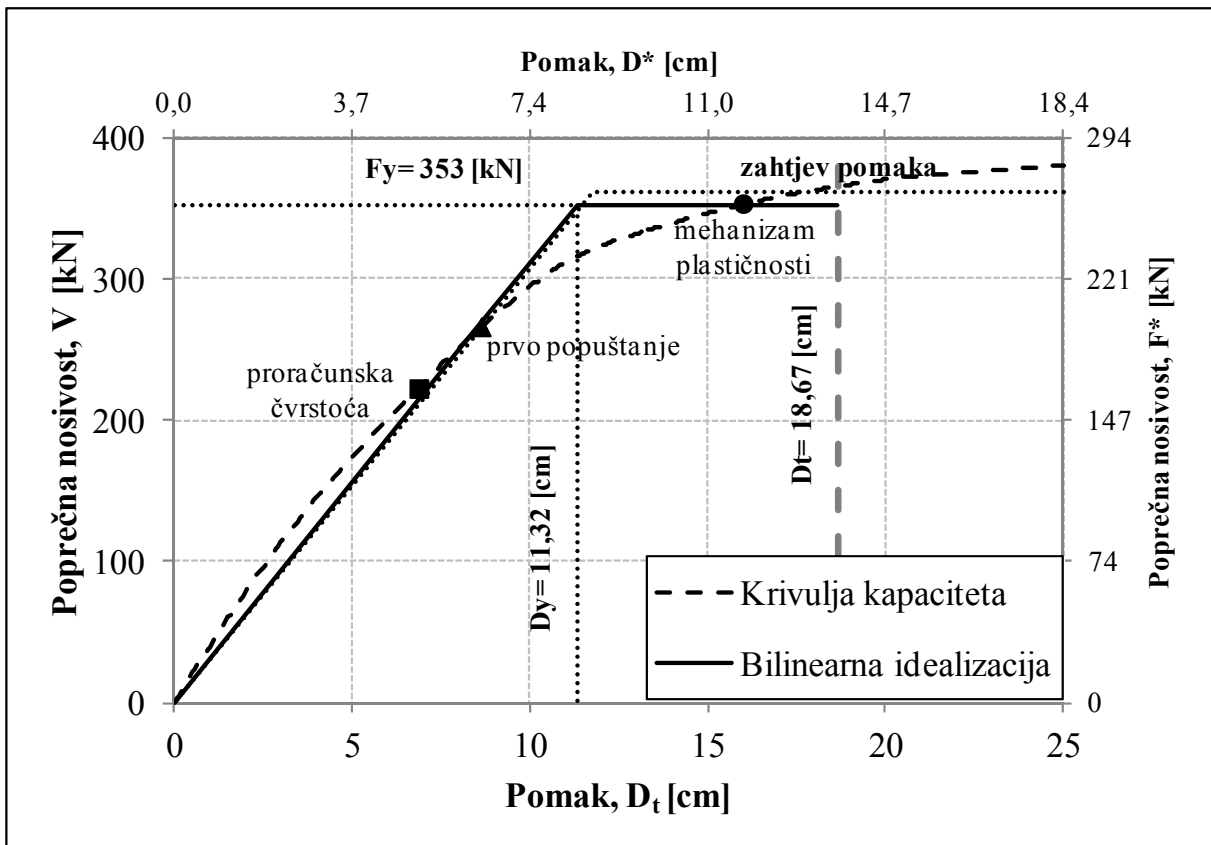
Pretpostavlja se linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela) (MDOF)	$\Phi^T=[0,280; 0,520; 0,760; 1,000]$
Raspodjela masa (MDOF)	Prema <b>tablici 9.3</b>
Raspodjela horizontalnih sila (MDOF)	$P^T=[0,334; 0,618; 0,903; 1,000]$
Ekvivalentna masa (SDOF)	$m^*=119,10$ [t]
Faktor sudjelovanja (konstanta)	$\Gamma=1,359$
Sila popuštanja (SDOF)	$F_{y,*}=259,43$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_{\mu}=1,65$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana bilinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (točkasta linija), **slika 9.45**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF, prikazan na **slici 9.46**.

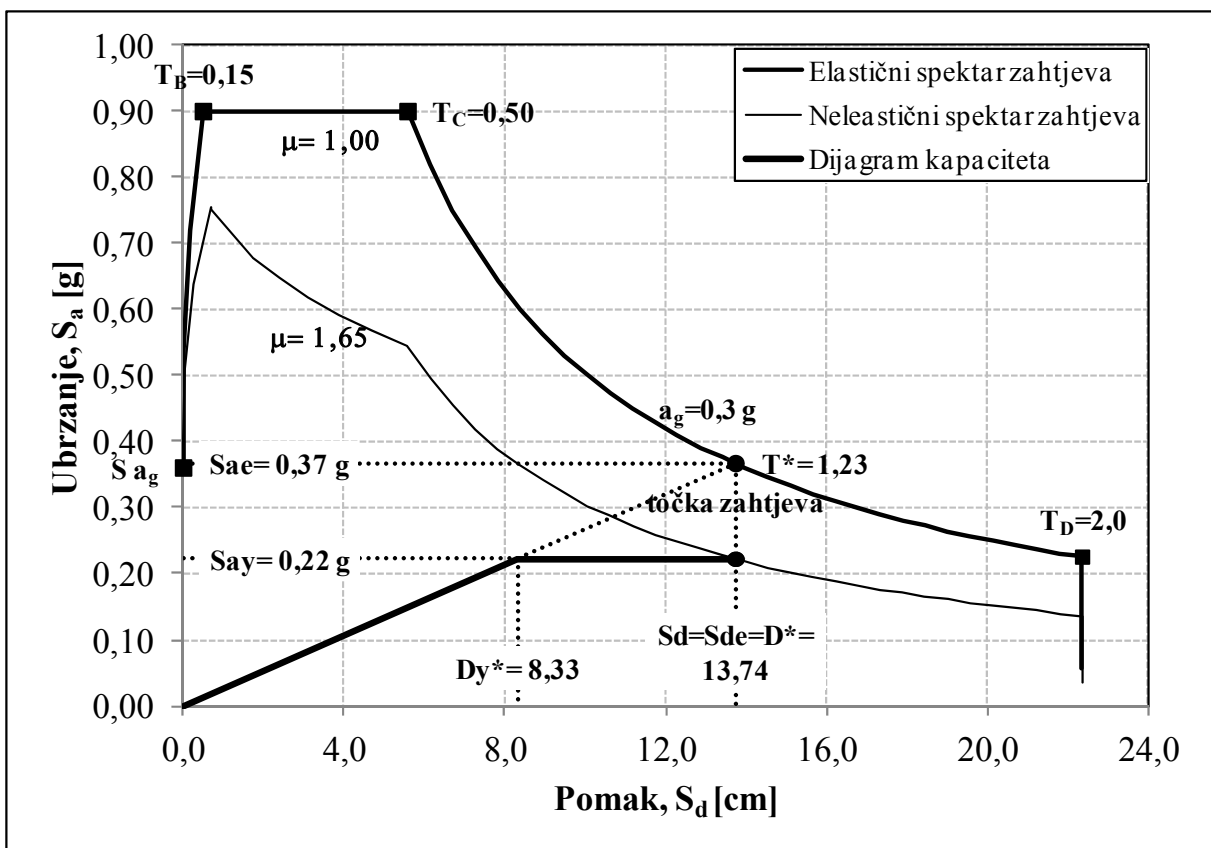
Za dobiveni zahtjev pomaka ponovno je izvršena bilinearna idealizacija. Za tako idealiziranu krivulju dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, **slika 9.45**.

Na **slici 9.45** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i tri karakteristične točke koje se odnose na: proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**), prvo popuštanje i mehanizam plastičnosti. Točke prvog popuštanja i mehanizma plastičnosti dobivene su zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

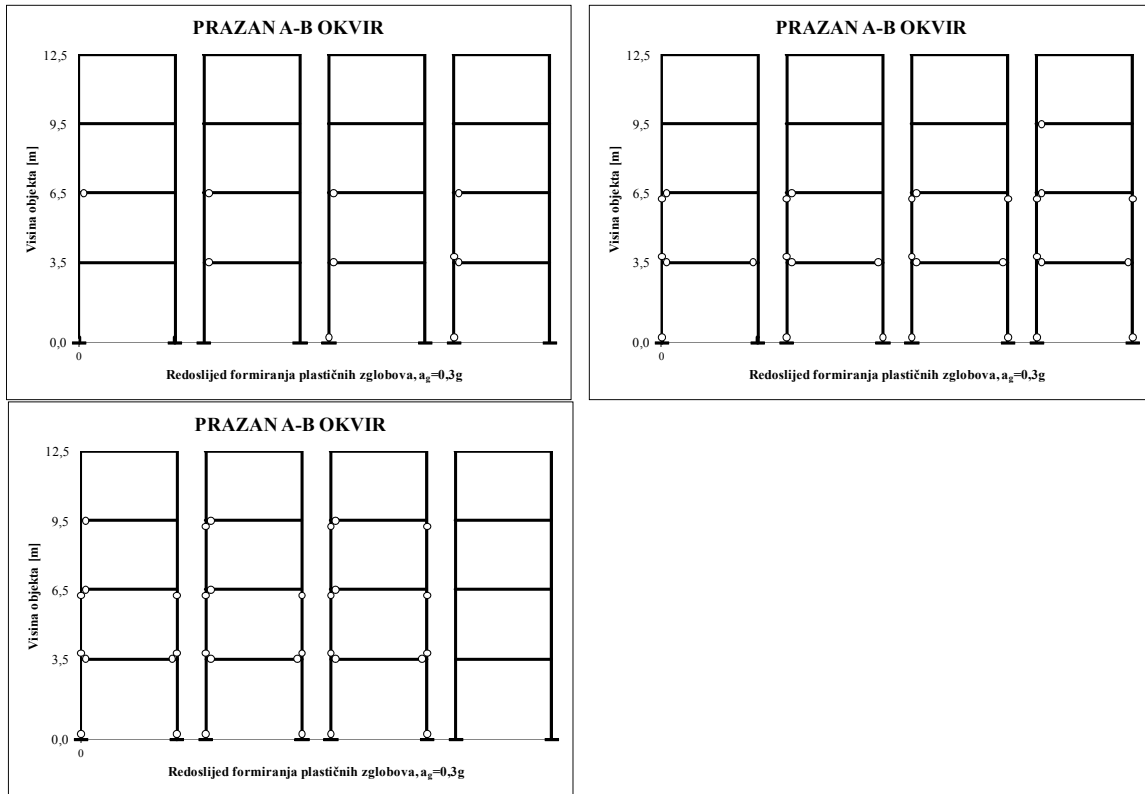
Na kraju, sa **slika 9.45 i 9.46**, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran, armirano-betonski okvir ne zadovoljava za zahtijevani pomak. Potvrda ovoga maloprije rečenoga, prikazana je razvijanjem plastičnih zglobova, odnosno redosljedom formiranja plastičnih zglobova pa i samo nastajanje mehanizma plastičnosti do zahtijevanog pomaka na **slici 9.47**. Potrebno je promijeniti, recimo, dimenzije stupova armirano-betonskoga okvira, što se ovdje neće učiniti. Također, ovdje se opravdava opcija primjene metode N2.



Slika 9.45 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,3g$



Slika 9.46 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,3g$

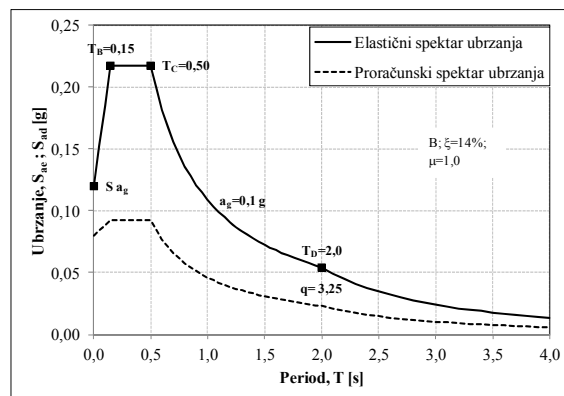


Slika 9.47 Redoslijed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka -  $a_g=0,3g$

9.4.3.2 Armirano betonski okvir sa zidnim ispunom – 4. kata

( $a_g=0,1g$ )

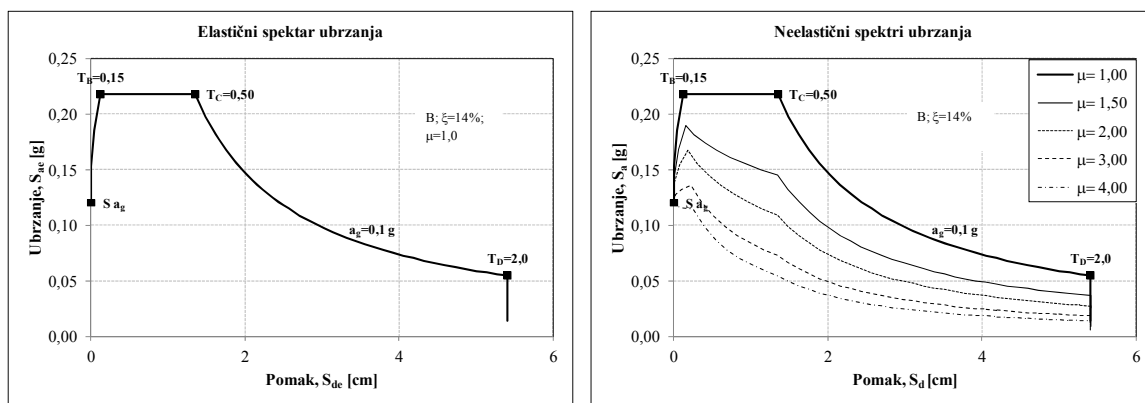
Na slici 9.48 prikazan je elastični spektar odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar, čime je definiran seizmički zahtjev.



Slika 9.48 Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar -  $a_g=0,1g$

Elastični spektar zahtjeva u obliku AD i neelastični spektri zahtjeva za konstantne vrijednosti duktilnosti prikazani su na slici 9.49.



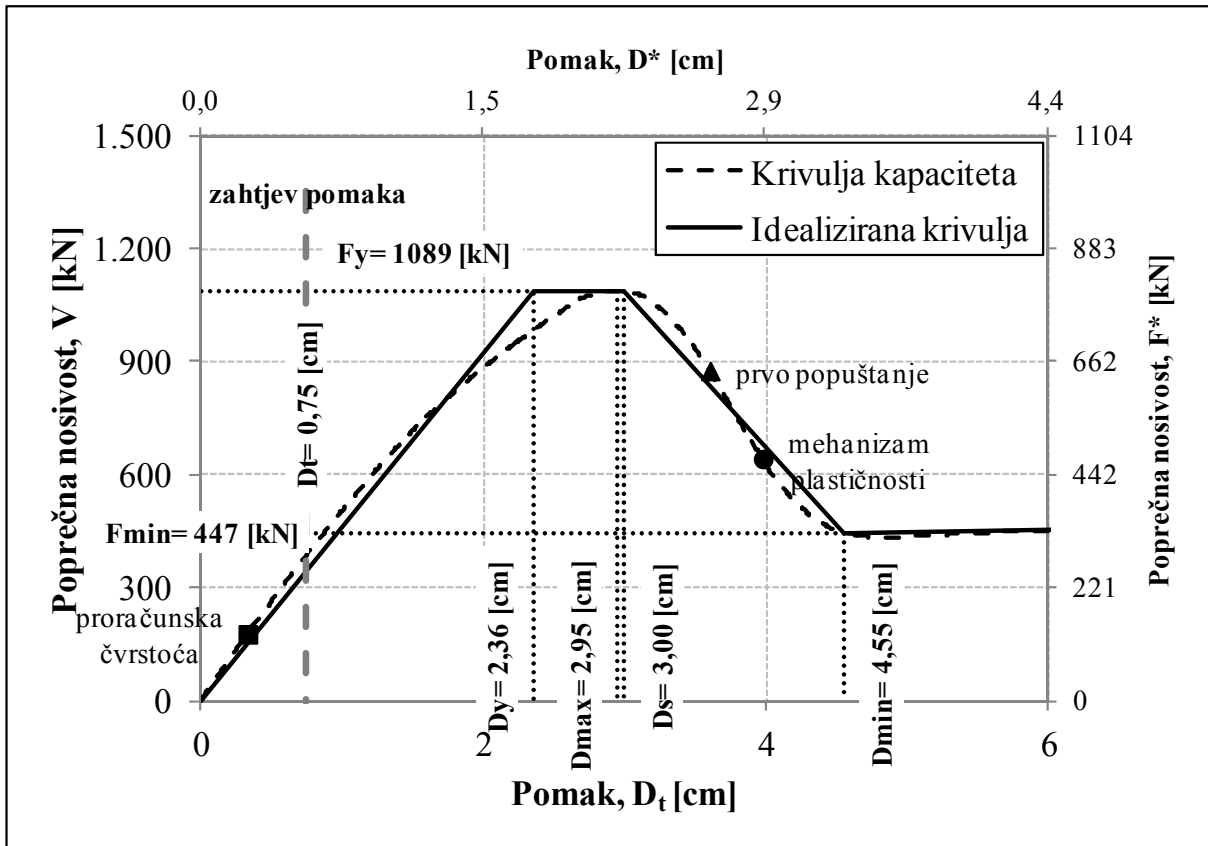
Slika 9.49 Spektri zahtjeva u obliku AD -  $a_g=0,1g$ 

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1 i 9.4.2.2*, a prikazani su u **tablici 9.39**. Pretpostavljeni linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela), raspodjela masa, raspodjela horizontalnih sila, ekvivalentna masa i faktor sudjelovanja, isti su kao i kod praznih armirano-betonskih okvira, te se ovdje neće navoditi.

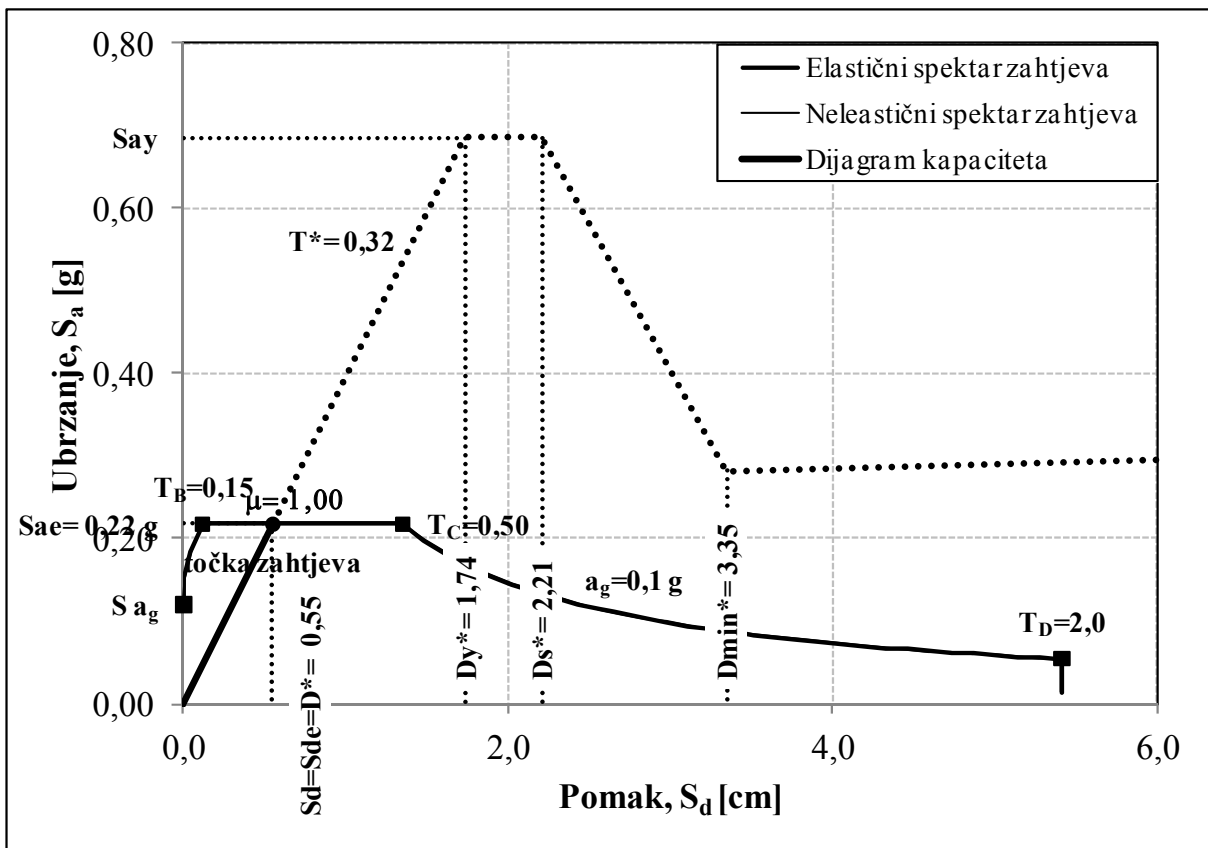
**Tablica 9.39** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,1g$ 

Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=801,46$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_\mu=0,32$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana više - linearnim odnosom sila – pomak, **slika 9.50**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF, prikazan na **slici 9.51**. Za dobiveni zahtjev pomaka vidimo kako imamo linearno ponašanje sustava, **slika 9.50**. Na **slici 9.50** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i tri karakteristične točke koje se odnose na: proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**), prvo popuštanje i mehanizam plastičnosti. Točke prvog popuštanja i mehanizma plastičnosti dobivene su zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja. Na kraju, sa **slika 9.50 i 9.51**, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran, armirano-betonski sa zidnim ispunom zadovoljava zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja poslije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova, a i nalazimo se u linearnom području.



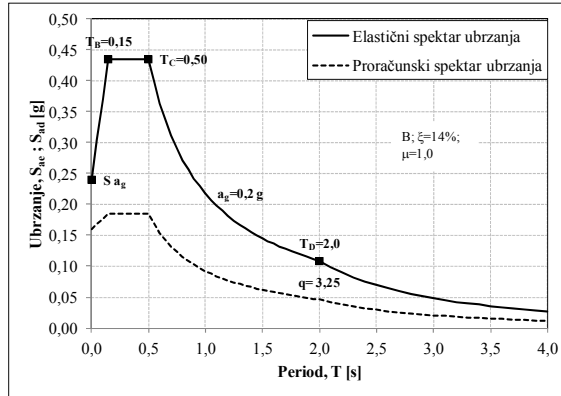
Slika 9.50 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,1g$



Slika 9.51 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,1g$

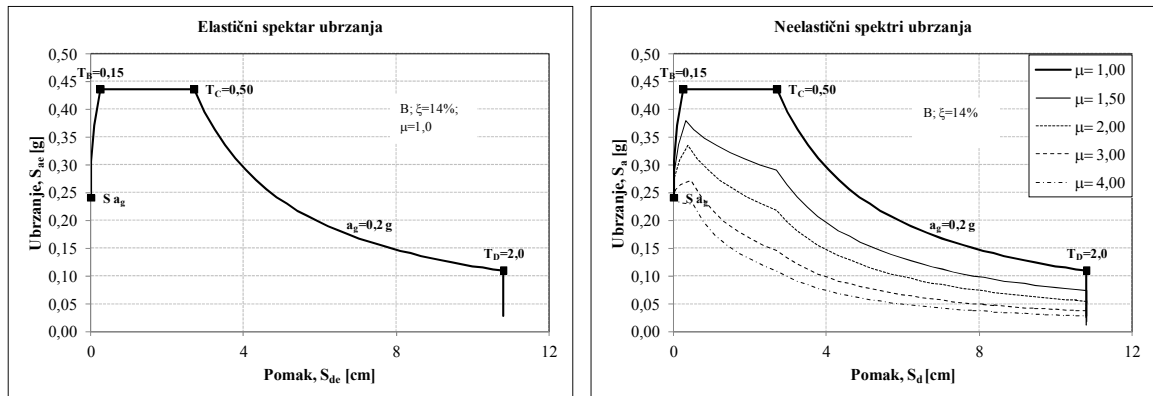
$(a_g=0,2g)$

Na *slici 9.52* prikazan je elastični spektar odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar, čime je definiran seizmički zahtjev.



Slika 9.52 Elastični spektar ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar -  $a_g=0,2g$

Elastični spektar zahtjeva u obliku AD i neelastični spektri zahtjeva za konstantne vrijednosti duktilnosti prikazani su na *slici 9.53*.



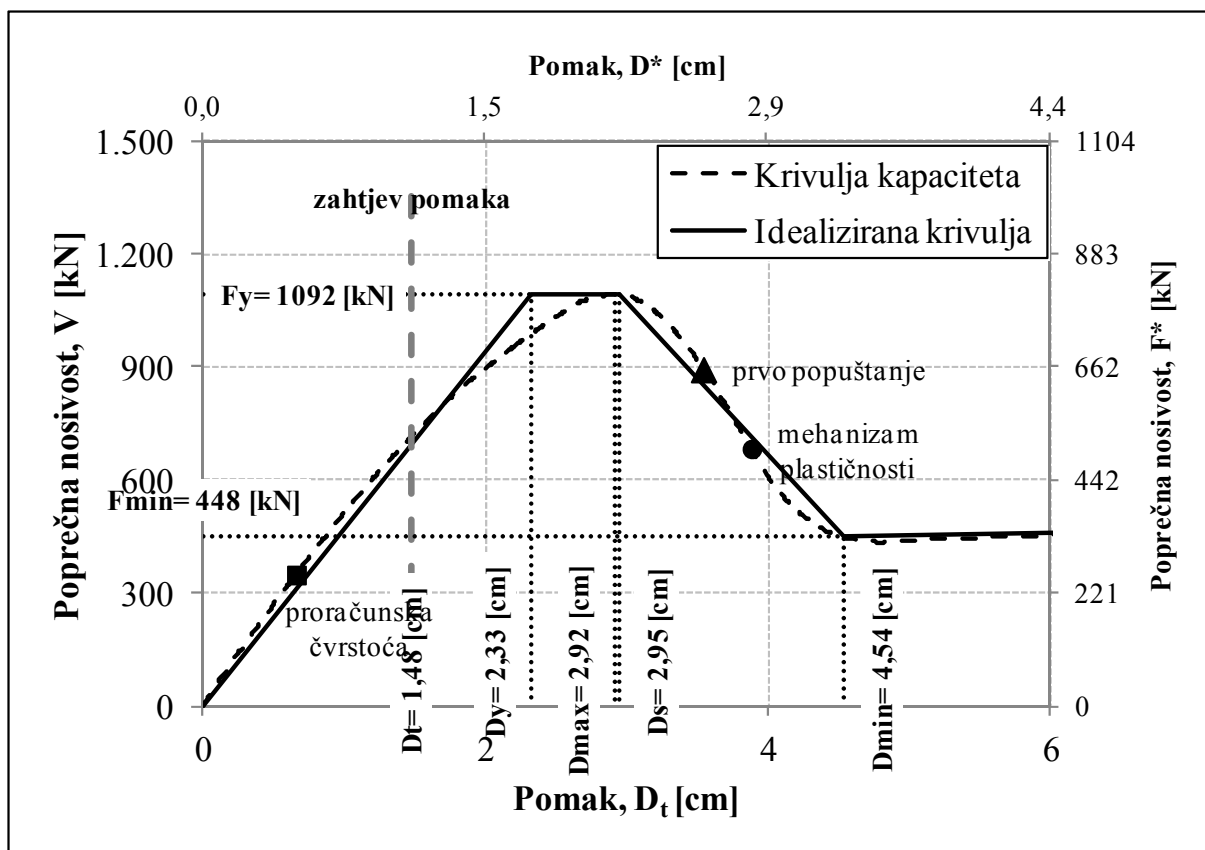
Slika 9.53 Spektri zahtjeva u obliku AD -  $a_g=0,2g$

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1 i 9.4.2.2*, a prikazani su u *tablici 9.40*.

Tablica 9.40 Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir -  $a_g=0,2g$

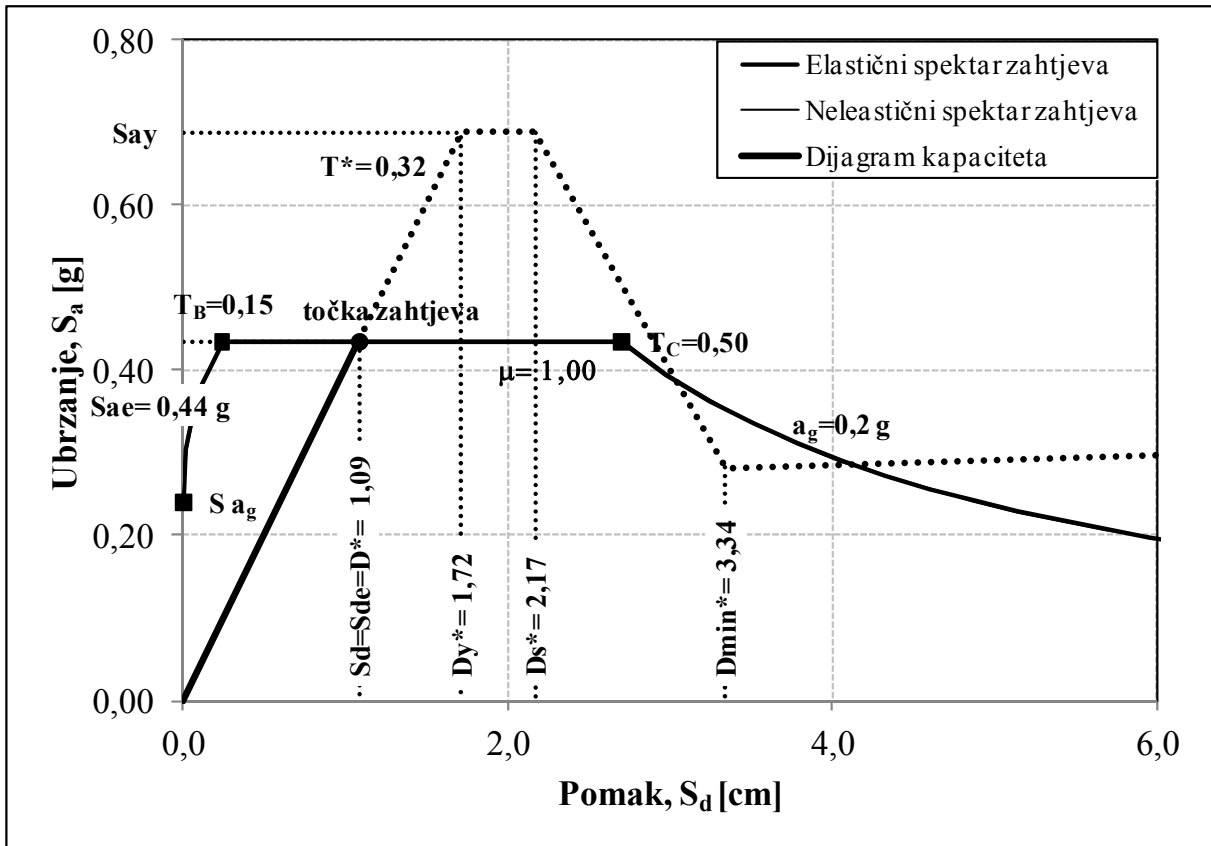
Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=803,59$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_\mu=0,63$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana više - linearnim odnosom sila – pomak, *slika 9.54*. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF, prikazan na *slici 9.55*. Za dobiveni zahtjev pomaka vidimo da imamo linearno ponašanje sustava, *slika 9.54*. Na *slici 9.54*, na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i tri karakteristične točke koje se odnose na: proračunsku čvrstoću (*tablica 9.20*), prvo popuštanje i mehanizam plastičnosti. Točke prvog popuštanja i mehanizma plastičnosti dobivene su zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.



**Slika 9.54** Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,2g$

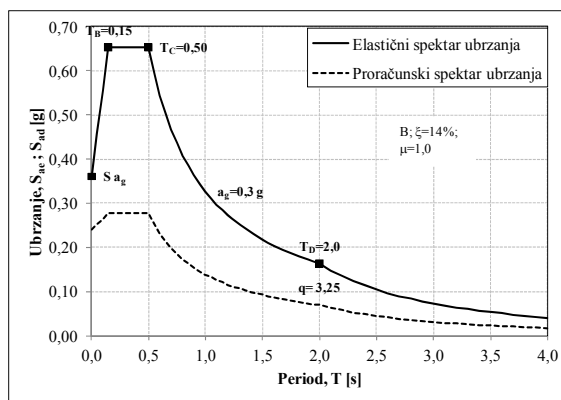
Na kraju, sa *slika 9.54* i *9.55*, možemo uočiti kako ovako projektiran, odnosno dimenzioniran, armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom zadovoljava zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja poslije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova, a i nalazimo se u linearnom području.



Slika 9.55 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,2g$

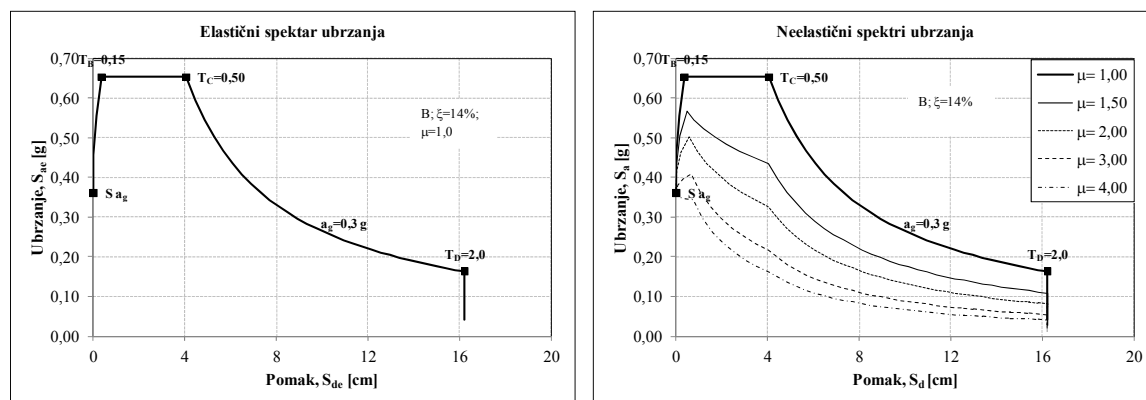
( $a_g=0,3g$ )

Na slici 9.56 prikazan je elastični spekter odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spekter, čime je definiran seizmički zahtjev.



Slika 9.56 Elastični spekter ubrzanja i odgovarajući proračunski spekter -  $a_g=0,3g$

Elastični spekter zahtjeva u obliku AD i neelastični spektri zahtjeva za konstantne vrijednosti duktilnosti prikazani su na slici 9.57.


 Slika 9.57 Spektri zahtjeva u obliku AD -  $a_g=0,3g$ 

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1 i 9.4.2.2*, a prikazani su u *tablici 9.41*.

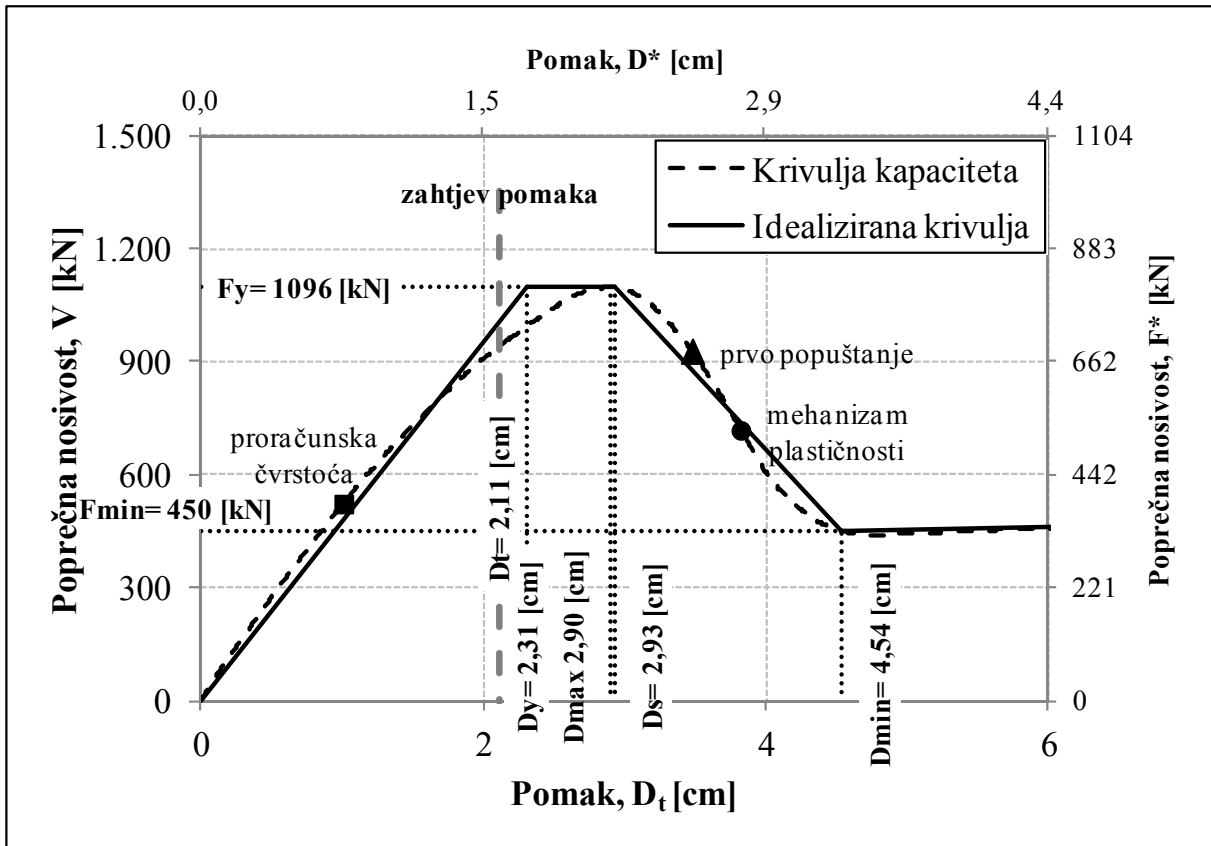
**Tablica 9.41** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,3g$ 

Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=806,937$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_\mu=1,00$

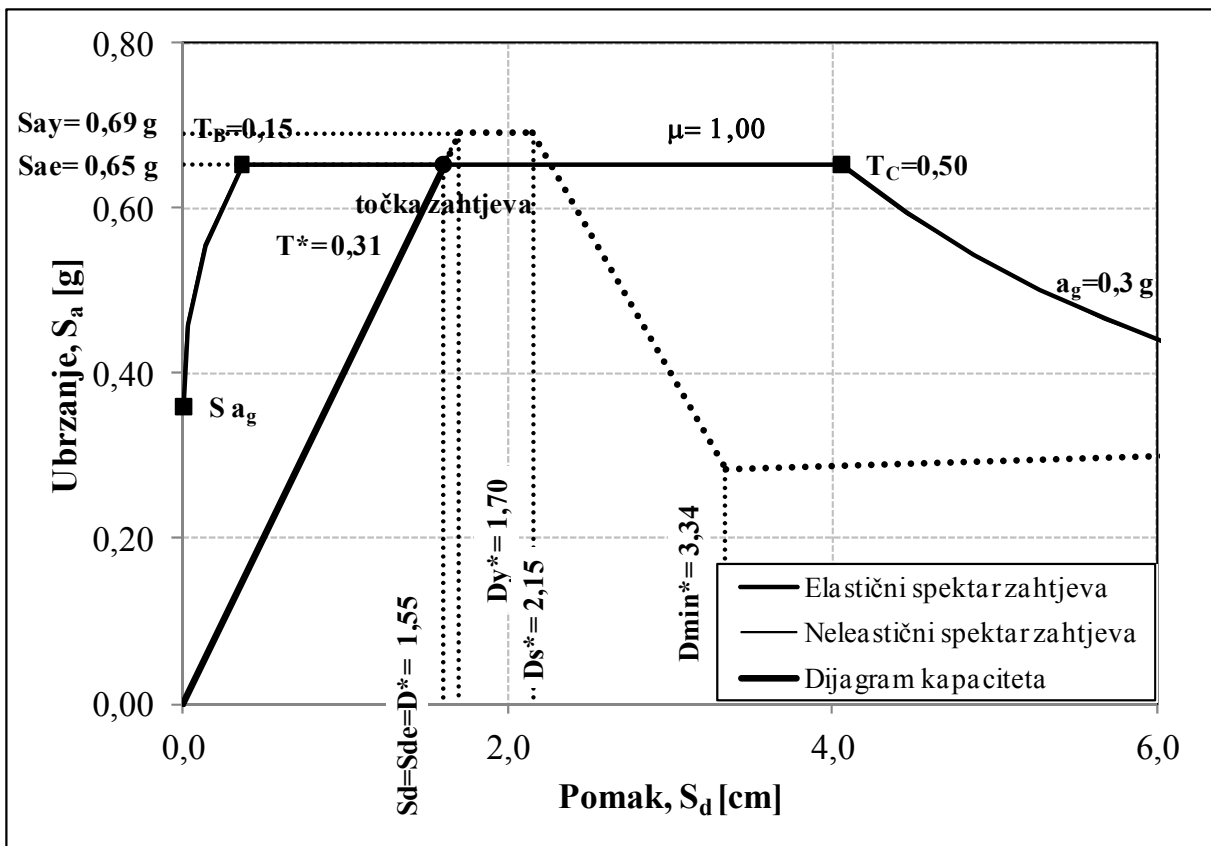
Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana više - linearnim odnosom sila – pomak, *slika 9.58*. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF, prikazan na *slici 9.59*.

Za dobiveni zahtjev pomaka dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja *slika 9.58*. Na *slici 9.58*, na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i tri karakteristične točke koje se odnose na: proračunsku čvrstoću (*tablica 9.20*), prvo popuštanje i mehanizam plastičnosti. Točke prvog popuštanja i mehanizma plastičnosti dobivene su zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

Na kraju, sa *slika 9.58 i 9.59*, možemo uočiti kako ovako projektiran, odnosno dimenzioniran, armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom zadovoljava zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja poslije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova.



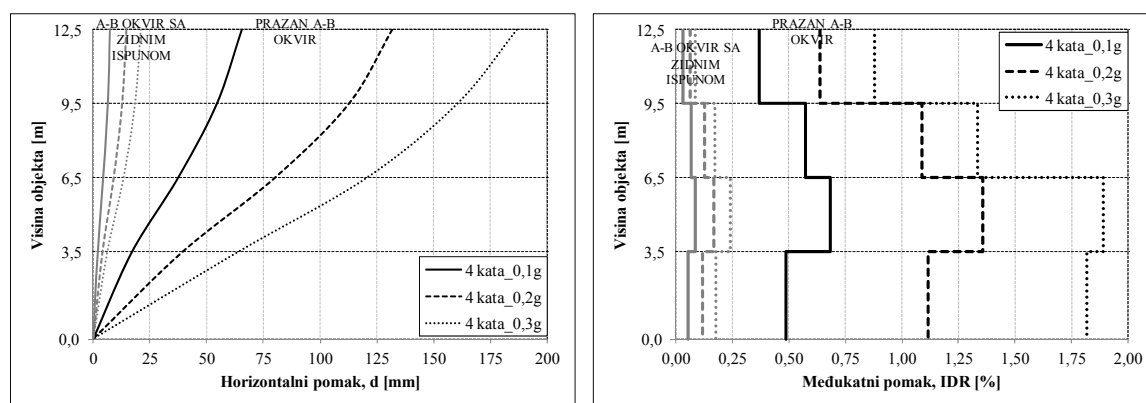
Slika 9.58 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,3g$



Slika 9.59 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,3g$

### 9.4.3.3 Usporedba rezultata praznih armirano-betonskih okvira i armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom – 4. kata

Usporedbu rezultata provesti ćemo prikazom horizontalnih pomaka i međukatnih pomaka promatranih numeričkih modela za zahtijevane pomake, *slika 9.60*. Promatrajući međukatne pomake na *slici 9.60*, vidimo veliku razliku pomaka i međukatnih pomaka između praznih okvira i okvira sa zidnim ispunom. Prazan armirano-betonski okvir koji ne zadovoljava zahtjev pomaka (za 0,3g), može se primijetiti i na navedenoj slici. Taj pomak odnosno međukatni pomak prelazi 1,75%. Inače, pomaci i međukatni pomaci praznog okvira su prosječno 8,3 puta veći od pomaka i međukatni pomaka okvira sa zidnim ispunom na kritičnoj etaži (1. kat). S druge strane, ako promatramo međukatne pomake okvira sa zidnim ispunom i povežemo ih s oštećenjem zidnog ispuna prema eksperimentalnim rezultatima (*točka 4.5.7.2*), možemo reći da imamo umjereno oštećenje zidnog ispuna. Iz navedenog razloga nisu prikazane sile u dijagonalama zidnog ispuna, a iz kojih se može vidjeti navedeno.



Slika 9.60 Horizontalni pomaci i međukatni pomaci za zahtijevane pomake

Također, zanimljivo je usporediti i rezultate prikazane u *tablici 9.42*. Doprinos zidnoga ispuna vidljiv je za sve promatrane parametre, osim za duktilnost, što je i očekivano.

Tablica 9.42 Usporedba rezultata – 4. kata

NUMERIČKI MODEL	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$F_b$ [kN]	$T^*$ [s]	$F_y$ [kN]	$D_y$ [cm]	$F_t$ [kN]	$D_t$ [cm]	$\mu$
Prazan ab okvir – 4. kata	0,98	73,94	1,30	169	6,06	169	6,57	1,08
	1,96	147,89	1,30	260	9,33	260	13,15	1,41
	-	-	-	-	-	-	-	-
Ab okvir sa zidnim ispunom – 4. kata	0,98	173,91	0,32	-	-	387	0,75	1,00
	1,96	347,83	0,32	-	-	716	1,48	1,00
	2,94	521,74	0,31	-	-	939	2,11	1,00



#### 9.4.3.4 Prazan armirano-betonski okvir – 7. katova

Elastični spektar odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar, čime je definiran seizmički zahtjev kao i spektri zahtjeva u obliku AD, isti su kao i kod praznoga armirano-betonskog okvira – 4. kata, te se ovdje i u nastavku neće prikazivati.

$(a_g=0,1g)$

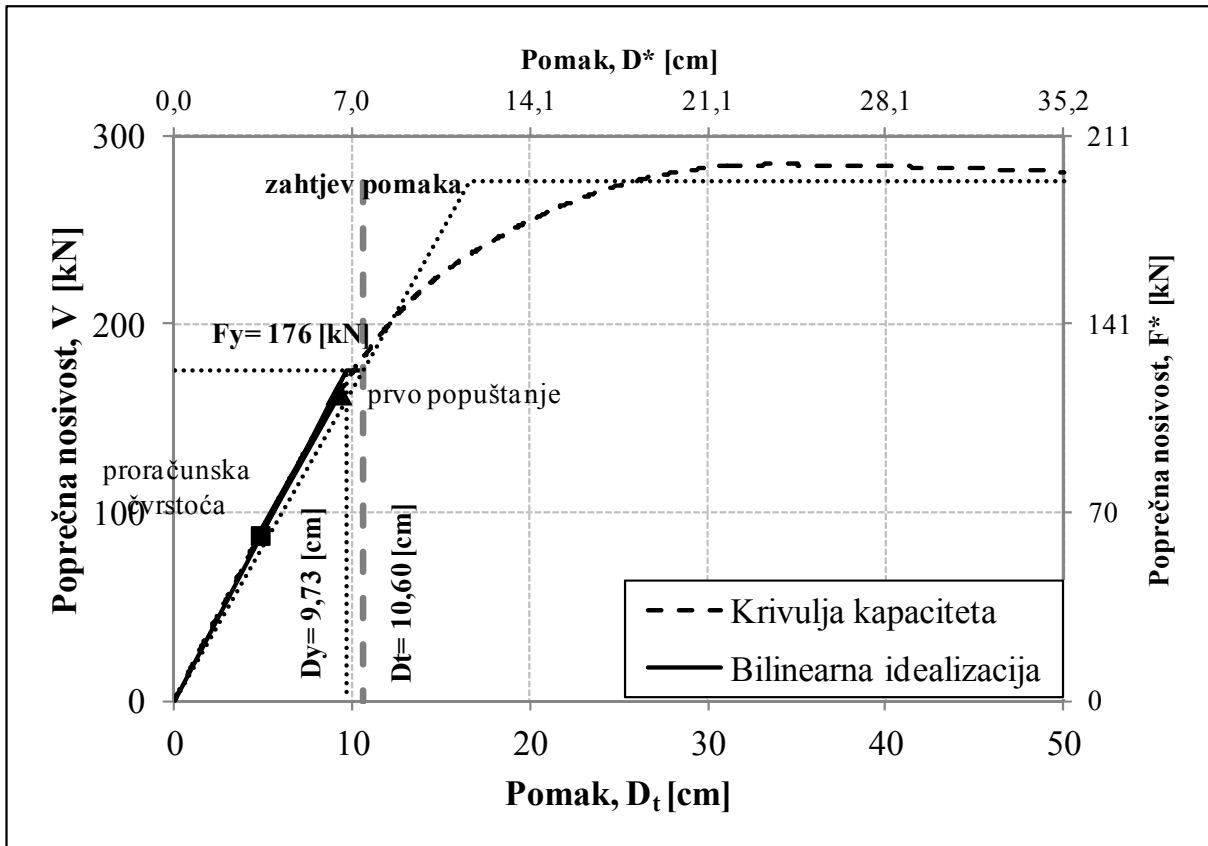
Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1 i 9.4.2.2*, a prikazani su u **tablici 9.43**.

**Tablica 9.43** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,1g$

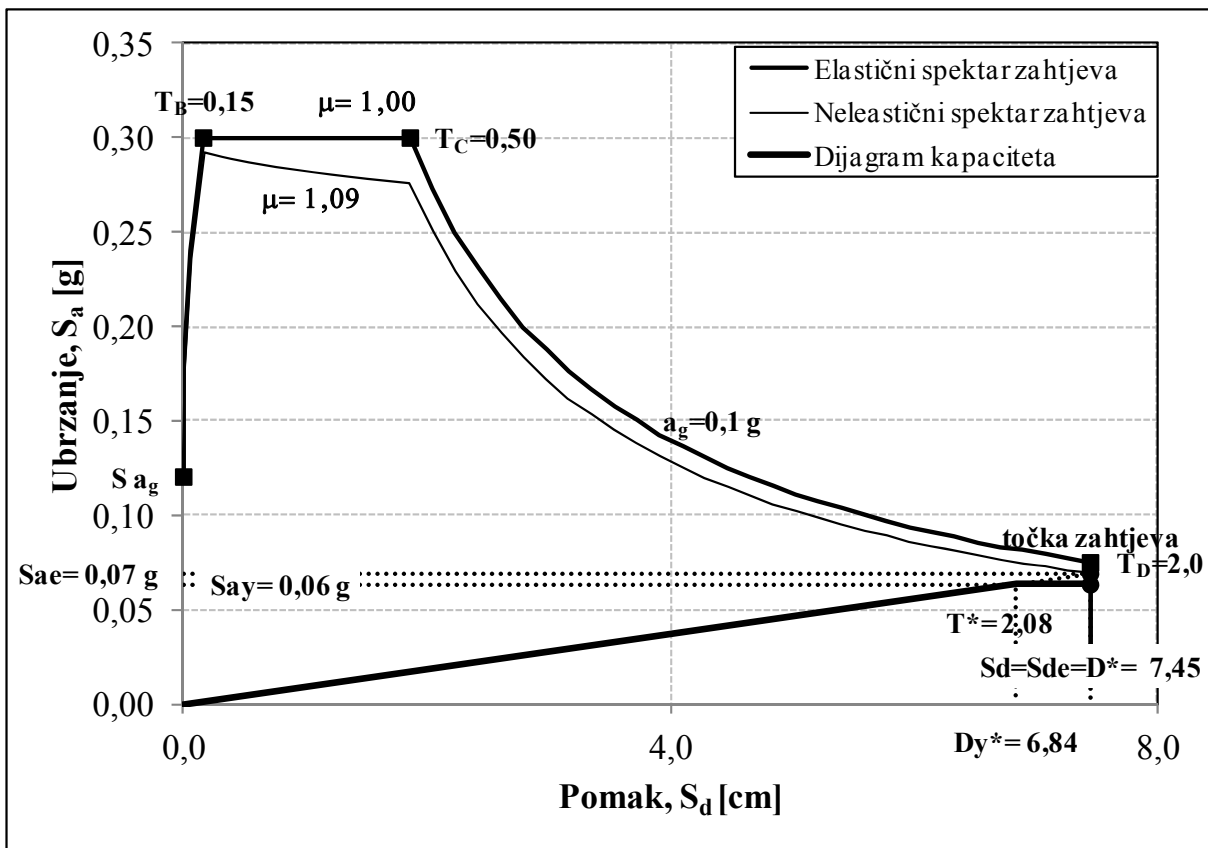
Pretpostavlja se linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela) (MDOF)	$\Phi^T=[0,163; 0,302; 0,442; 0,581; 0,721; 0,860; 1,000]$
Raspodjela masa (MDOF)	Prema <b>tablici 9.4</b>
Raspodjela horizontalnih sila (MDOF)	$P^T=[0,197; 0,363; 0,531; 0,669; 0,866; 1,034; 1,000]$
Ekvivalentna masa (SDOF)	$m^*=198,80$ [t]
Faktor sudjelovanja (konstanta)	$\Gamma=1,423$
Sila popuštanja (SDOF)	$F_{y,*}=123,54$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_{\mu}=1,09$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana blinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (točkasta linija), **slika 9.61**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF, prikazan na **slici 9.62**. Za dobiveni zahtjev pomaka ponovno je izvršena blinearna idealizacija. Za tako idealiziranu krivulju dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, **slika 9.61**.

Na **slici 9.61** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i dvije karakteristične točke koje se odnose na proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**) i prvo popuštanje. Točka prvog popuštanja dobivena je zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

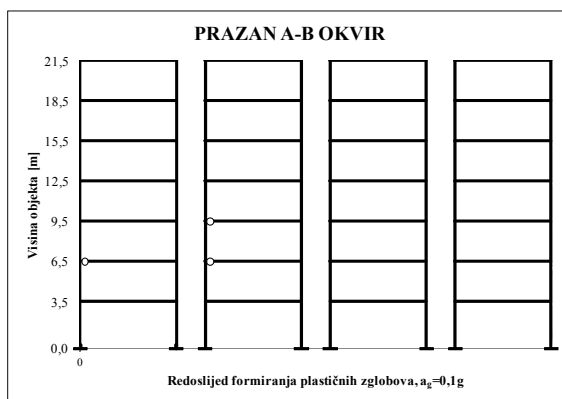


Slika 9.61 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,1g$



Slika 9.62 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,1g$

Na kraju, sa *slika 9.61* i *9.62*, možemo uočiti kako ovako projektiran, odnosno dimenzioniran, armirano-betonski okvir zadovoljava za zahtijevani pomak. Razvijanje plastičnih zglobova, odnosno redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka, prikazan je na *slici 9.63*.



**Slika 9.63** Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka -  $a_g=0,1g$

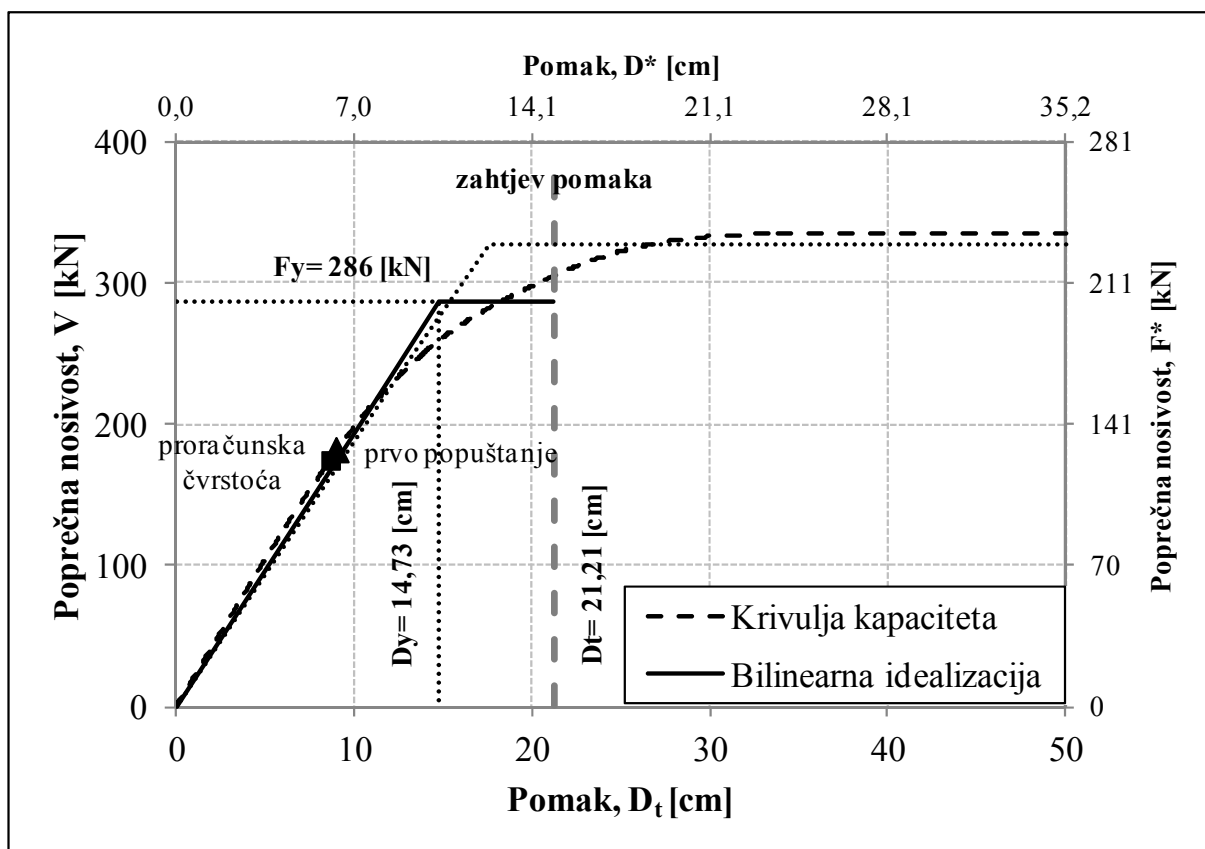
( $a_g=0,2g$ )

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1* i *9.4.2.2*, a prikazani su u *tablici 9.44*.

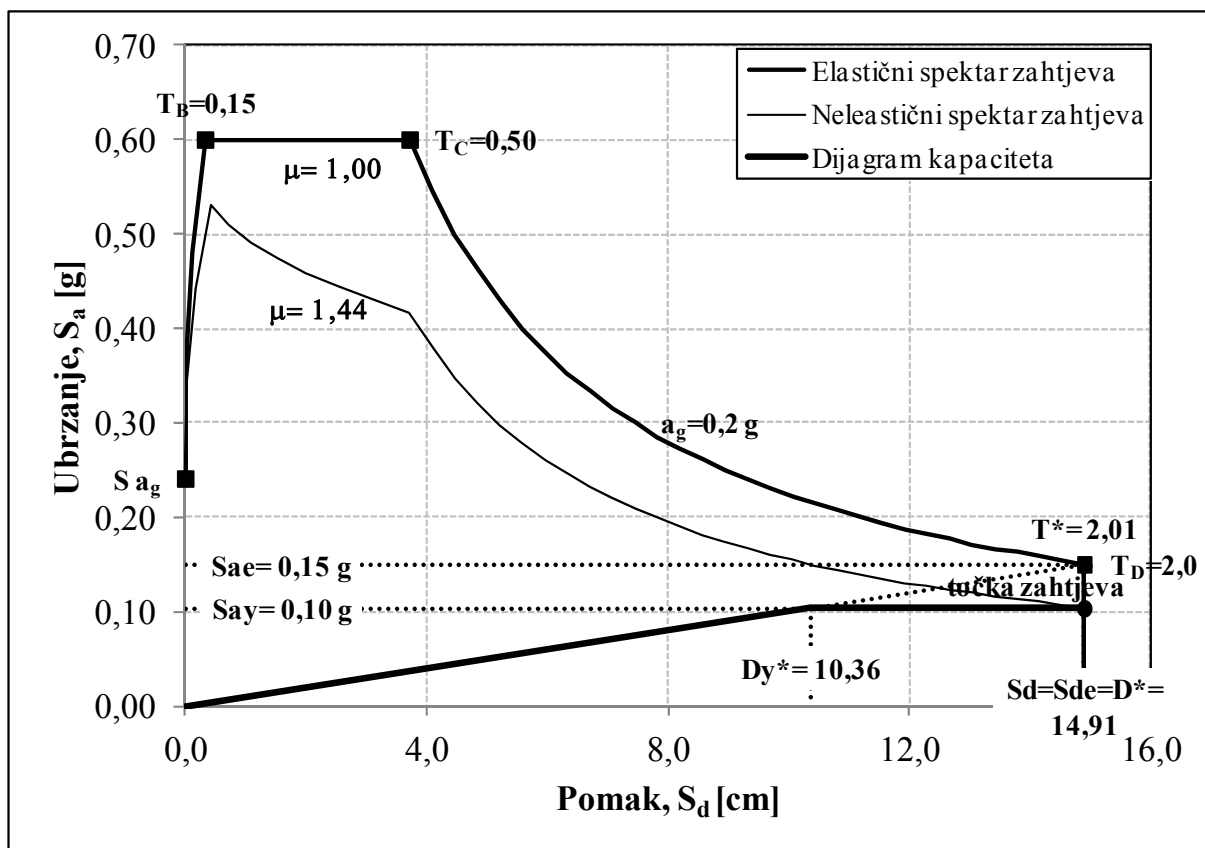
**Tablica 9.44** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,2g$

Pretpostavlja se linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela) (MDOF)	$\Phi^T=[0,163; 0,302; 0,442; 0,581; 0,721; 0,860; 1,000]$
Raspodjela masa (MDOF)	Prema <i>tablici 9.4</i>
Raspodjela horizontalnih sila (MDOF)	$P^T=[0,197; 0,363; 0,531; 0,669; 0,866; 1,034; 1,000]$
Ekvivalentna masa (SDOF)	$m^*=198,80$ [t]
Faktor sudjelovanja (konstanta)	$\Gamma=1,423$
Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=200,98$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_{\mu}=1,44$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana bilinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (točkasta linija), *slika 9.64*. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF, prikazan na *slici 9.65*. Za dobiveni zahtjev pomaka ponovno je izvršena bilinearna idealizacija.

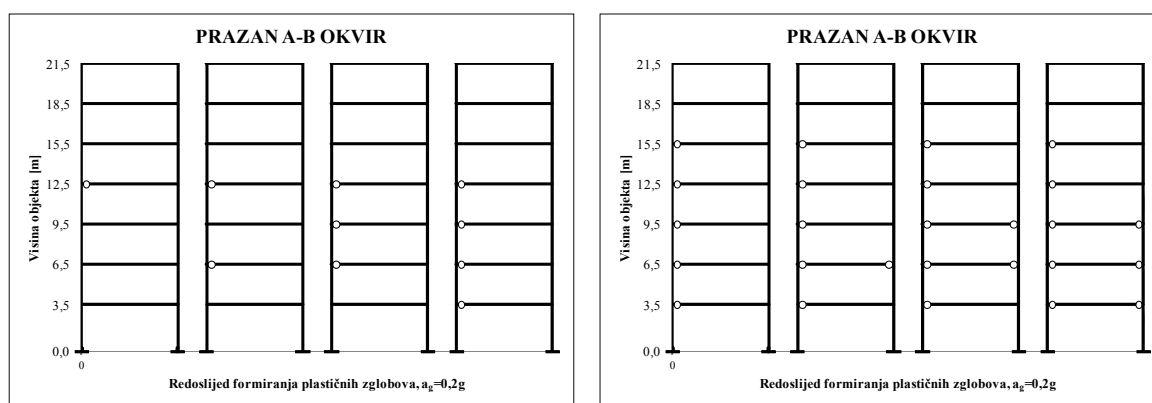


Slika 9.64 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,2g$



Slika 9.65 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,2g$

Za tako idealiziranu krivulju dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, *slika 9.64*. Na *slici 9.64* na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $I$ . Na istoj slici prikazane su i dvije karakteristične točke koje se odnose na proračunsku čvrstoću (*tablica 9.20*) i prvo popuštanje. Točka prvog popuštanja dobivena je zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja. Na kraju, sa *slika 9.64* i *9.65*, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir zadovoljava za zahtijevani pomak. Razvijanje plastičnih zglobova, odnosno redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka prikazan je na *slici 9.66*.



**Slika 9.66** Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka -  $a_g=0,2g$

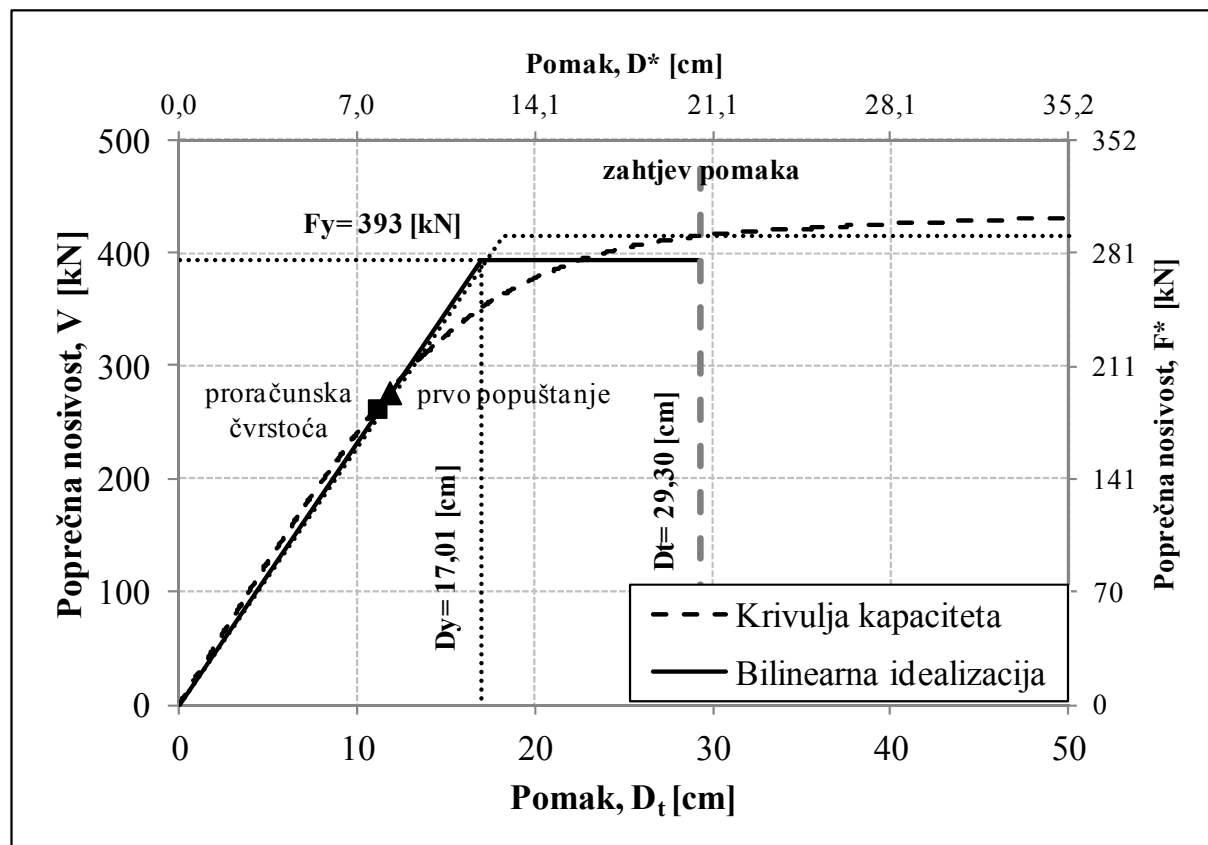
**( $a_g=0,3g$ )**

Parametri koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2 dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 4.3.2.1* i *4.3.2.2*, a prikazani su u *tablici 9.45*.

**Tablica 9.45** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,3g$

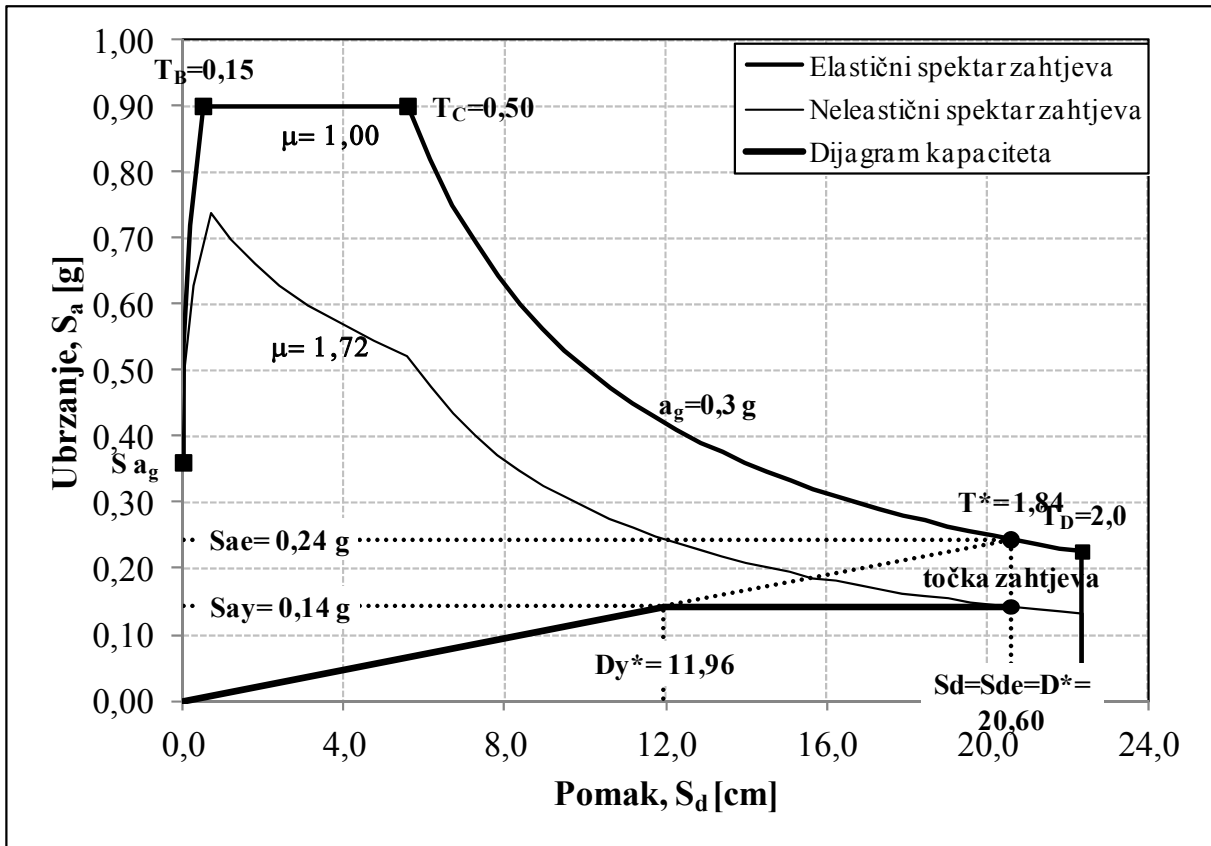
Pretpostavlja se linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela) (MDOF)	$\Phi^T=[0,163;0,302;0,442;0,581;0,721;0,860;1,000]$
Raspodjela masa (MDOF)	Prema <i>tablici 9.4</i>
Raspodjela horizontalnih sila (MDOF)	$P^T=[0,197;0,363;0,531;0,669;0,866;1,034;1,000]$
Ekvivalentna masa (SDOF)	$m^*=198,80$ [t]
Faktor sudjelovanja (konstanta)	$I=1,423$
Sila popuštanja (SDOF)	$F_{y,*}=276,56$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_{\mu}=1,39$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana bilinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (točkasta linija), *slika 9.67*. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF, prikazan na *slici 9.68*. Za dobiveni zahtjev pomaka ponovno je izvršena bilinearna idealizacija. Za tako idealiziranu krivulju dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, *slika 9.67*. Na *slici 9.67* na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i dvije karakteristične točke koje se odnose na proračunsku čvrstoću (*tablica 9.20*) i prvo popuštanje. Točka prvog popuštanja dobivena je zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

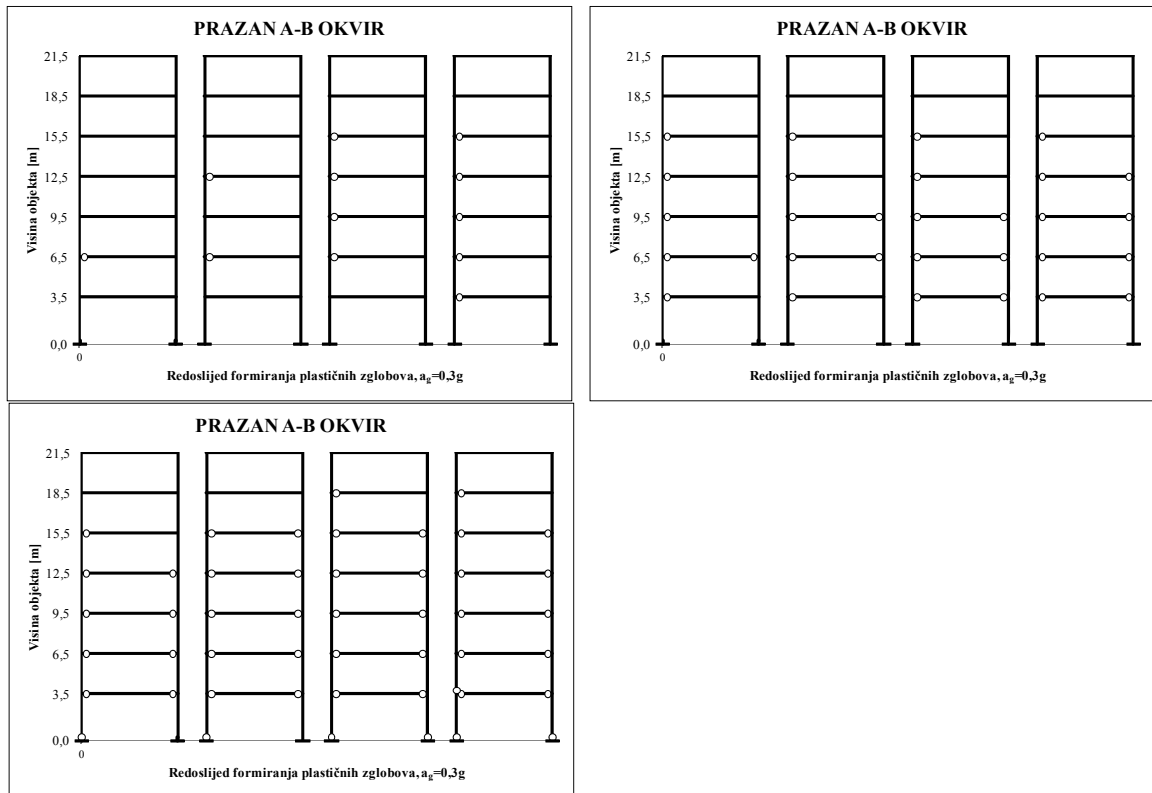


**Slika 9.67** Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,3g$

Na kraju, sa *slika 9.67* i *9.68*, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir zadovoljava za zahtijevani pomak. Razvijanje plastičnih zglobova, odnosno redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka, prikazan je na *slici 9.69*.



Slika 9.68 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,3g$



Slika 9.69 Redoslijed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka -  $a_g=0,3g$

#### 9.4.3.5 Armirano betonski okvir sa zidnim ispunom – 7. katova

Elastični spektar odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar, čime je definiran seizmički zahtjev kao i spektri zahtjeva u obliku AD, isti su kao i kod armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom – 4. kata, te se ovdje i u nastavku neće prikazivati.

$(a_g=0,1g)$

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama* 9.4.2.1 i 9.4.2.2, a prikazani su u **tablici 9.46**. Pretpostavljeni linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela), raspodjela masa, raspodjela horizontalnih sila, ekvivalentna masa i faktor sudjelovanja, isti su kao i kod praznih armirano-betonskih okvira, te se ovdje neće navoditi.

**Tablica 9.46** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,1g$

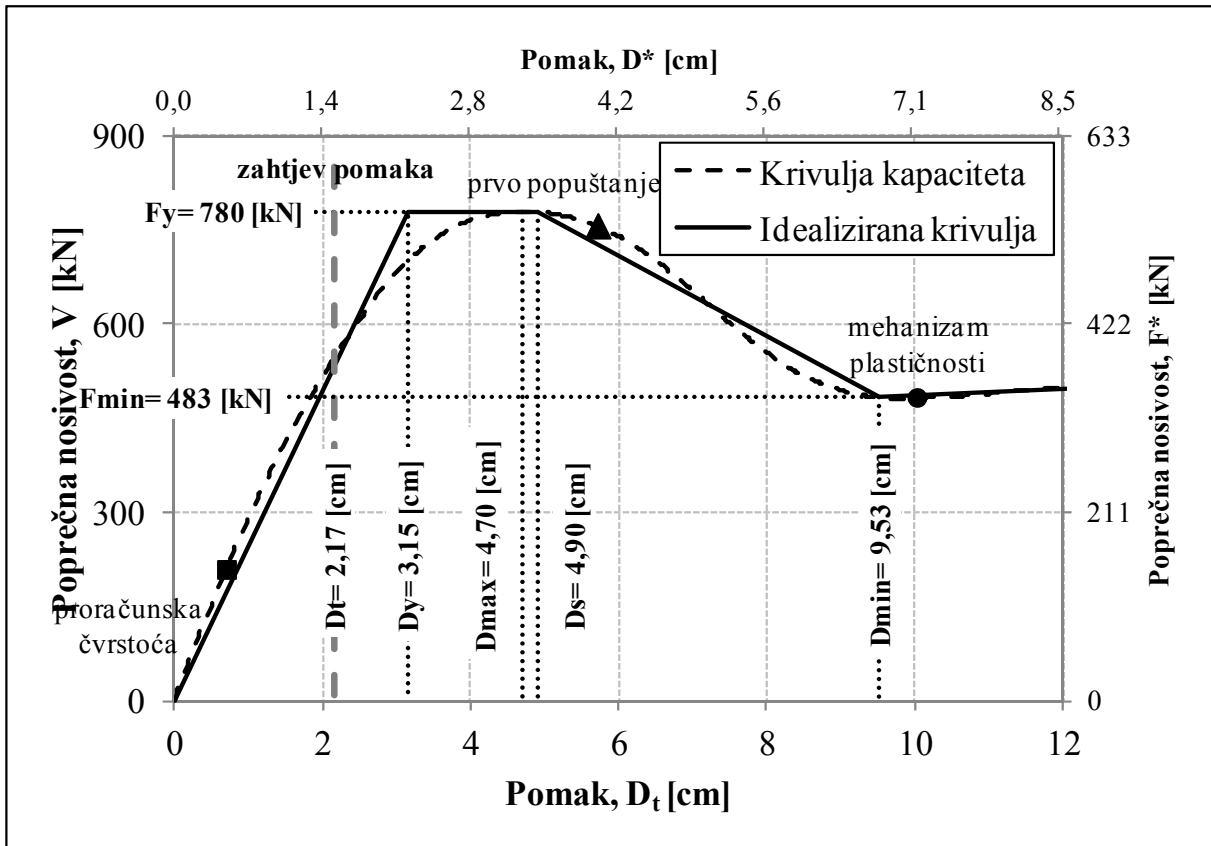
Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=547,96$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_\mu=0,69$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana više - linearnim odnosom sila – pomak, **slika 9.70**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF prikazan na **slici 9.71**. Za dobiveni zahtjev pomaka vidimo kako imamo linearno ponašanje sustava, **slika 9.70**.

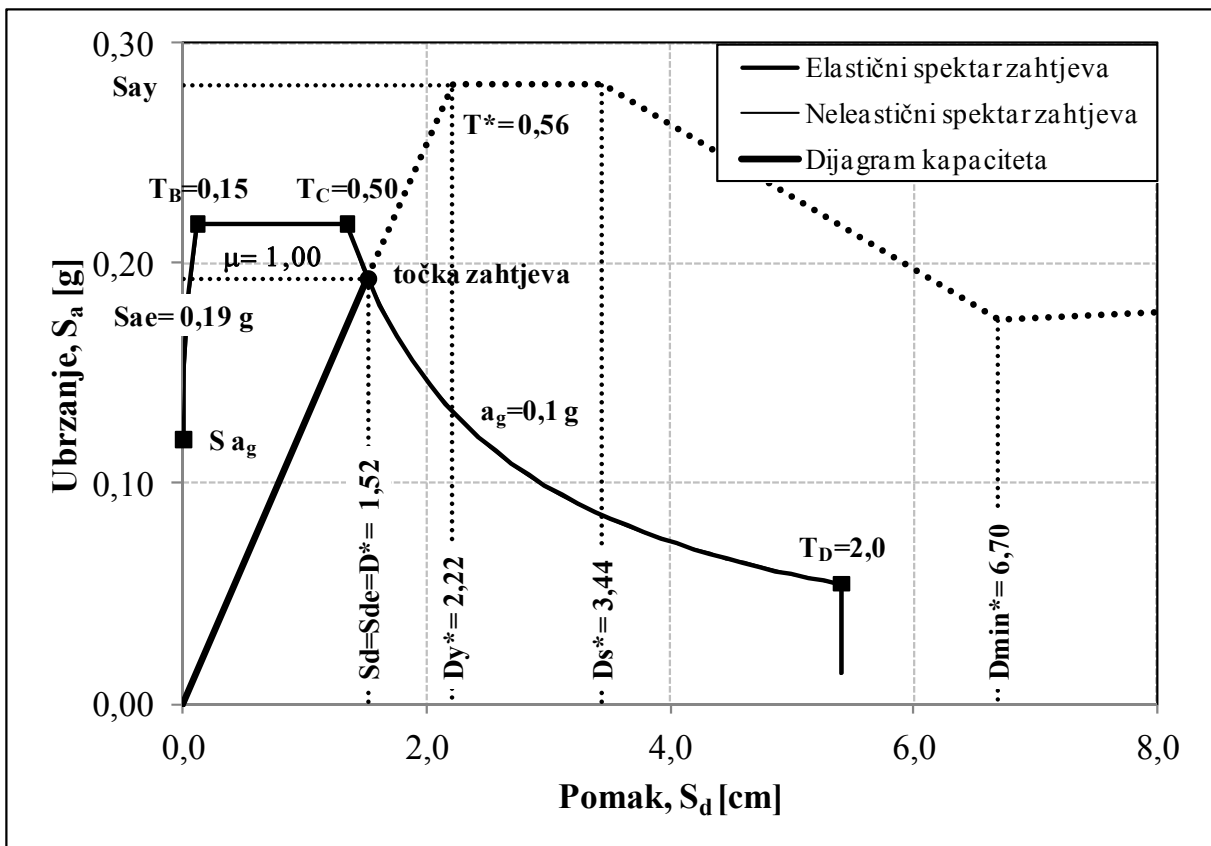
Na **slici 9.70** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i tri karakteristične točke koje se odnose na: proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**), prvo popuštanje i mehanizam plastičnosti. Točke prvog popuštanja i mehanizma plastičnosti dobivene su zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

Na kraju, sa **slika 9.70** i **9.71**, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski sa zidnim ispunom zadovoljava zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja poslije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova, a i nalazimo se u linearnom području.





Slika 9.70 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,1g$



Slika 9.71 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,1g$

$(a_g=0,2g)$

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1 i 9.4.2.2*, a prikazani su u **tablici 9.47**.

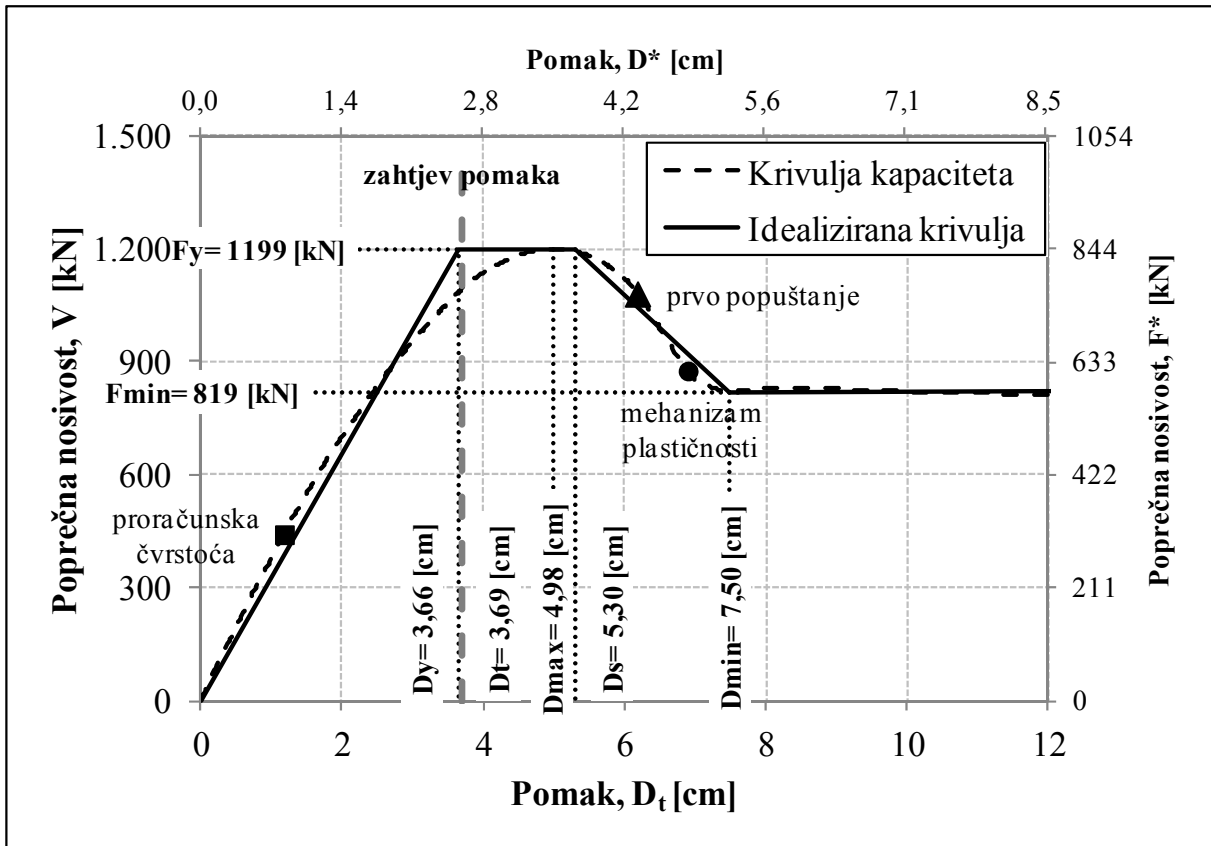
**Tablica 9.47** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,2g$

Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=842,81$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_d=1,01$

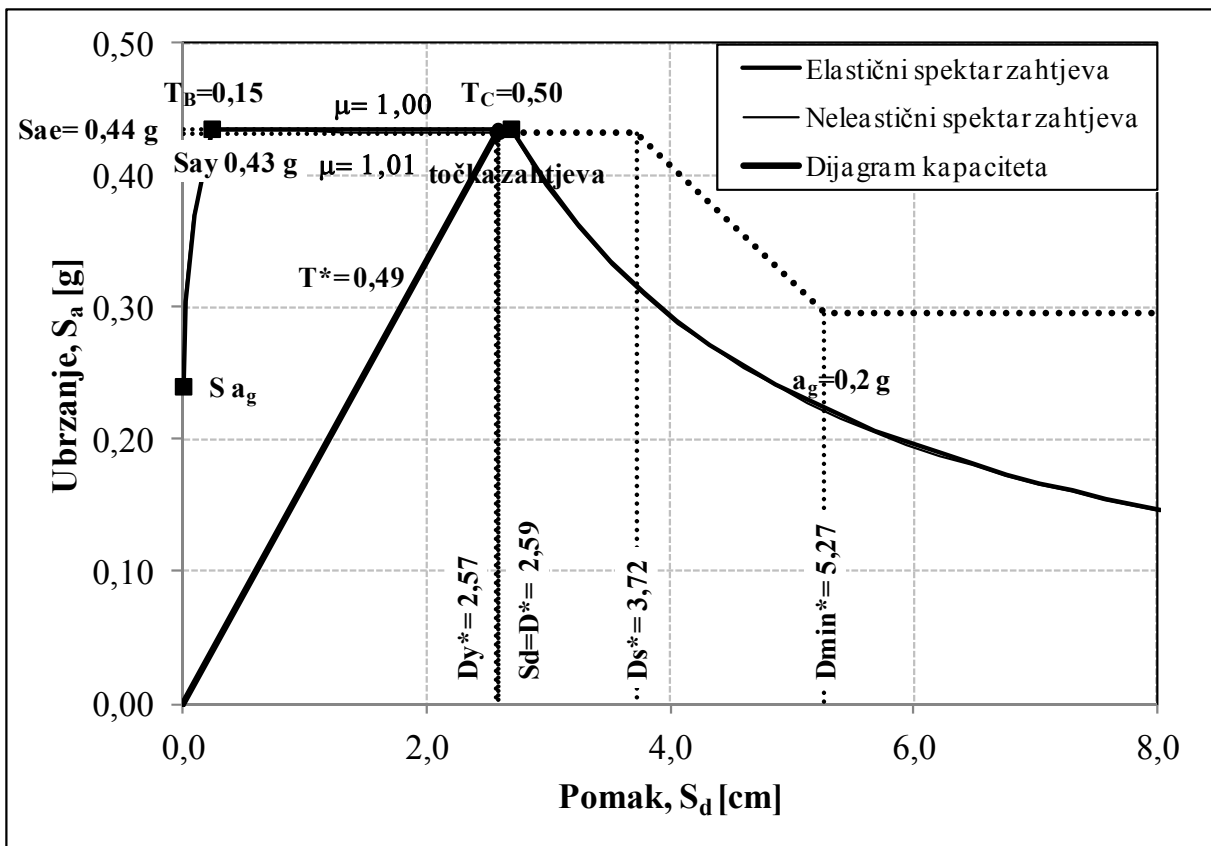
Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana više - linearnim odnosom sila – pomak, **slika 9.72**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF prikazan na **slici 9.73**. Za dobiveni zahtjev pomaka dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, **slika 9.72**.

Na **slici 9.73** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i tri karakteristične točke koje se odnose na: proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**), prvo popuštanje i mehanizam plastičnosti. Točke prvog popuštanja i mehanizma plastičnosti dobivene su zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojemu je provedena metoda postupnog guranja.

Na kraju, sa **slika 9.72 i 9.73**, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom zadovoljava za zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja poslije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova.



Slika 9.72 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,2g$



Slika 9.73 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,2g$

**( $a_g=0,3g$ )**

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1 i 9.4.2.2*, a prikazani su u **tablici 9.48**.

**Tablica 9.48** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,3g$ 

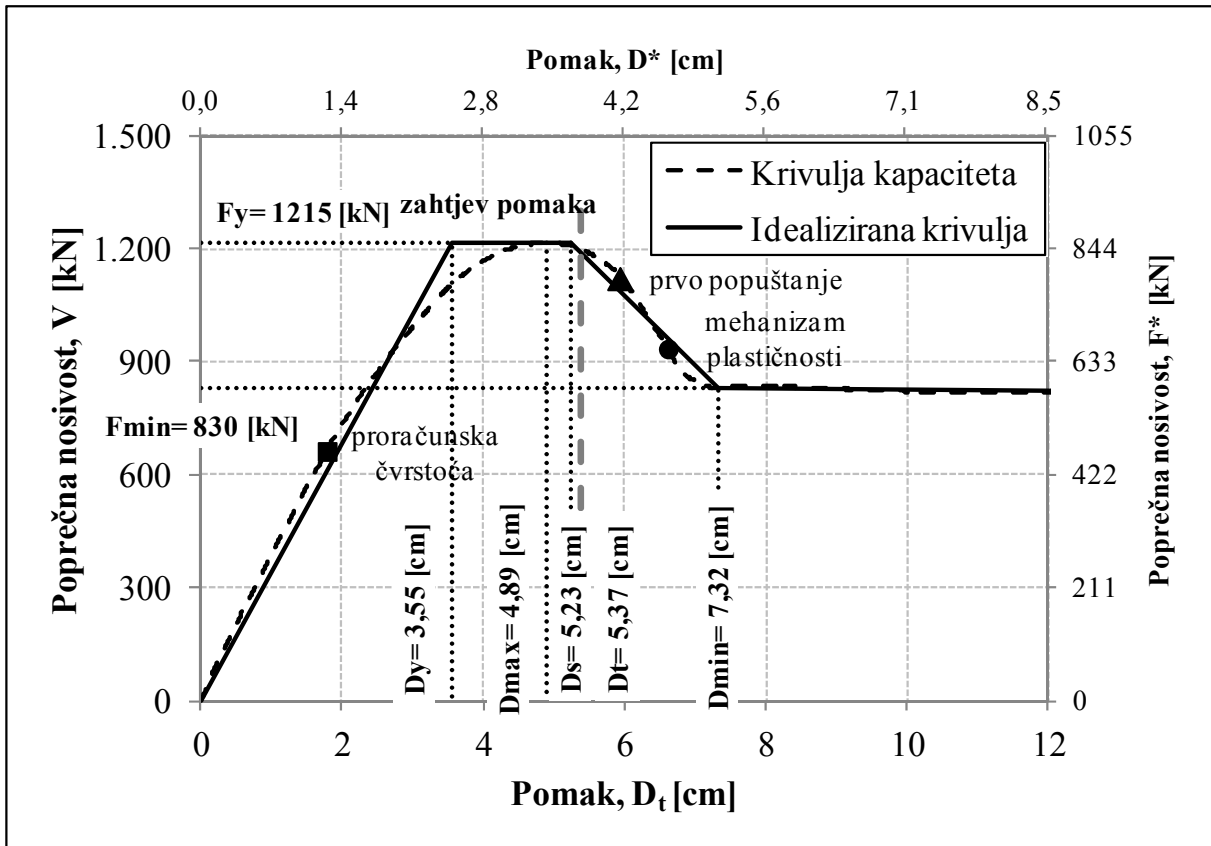
Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=854,22$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_d=1,51$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana više - linearnim odnosom sila – pomak, **slika 9.74**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF prikazan na **slici 9.75**. Za dobiveni zahtjev pomaka dobivena je nosivost pri zahtijevanom pomaku, **slika 9.74**.

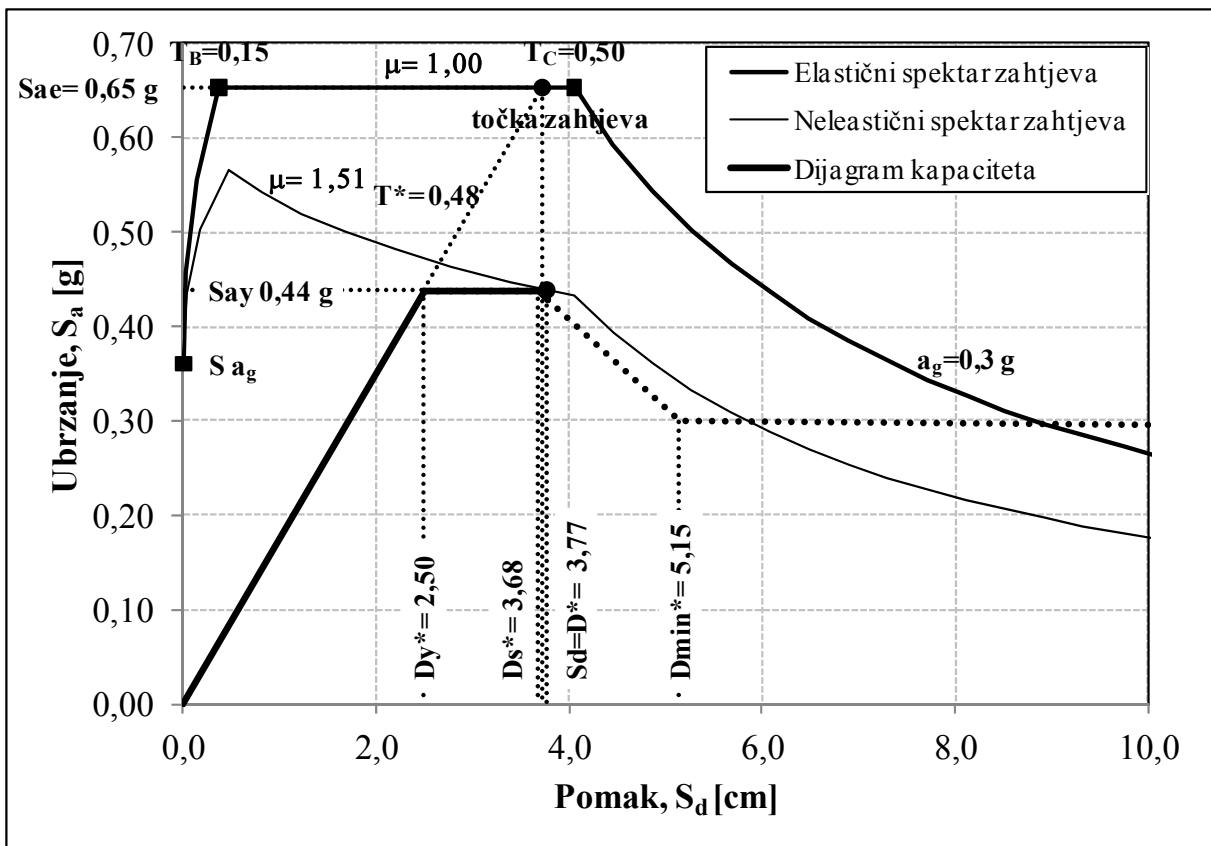
Na **slici 9.74** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i tri karakteristične točke koje se odnose na: proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**), prvo popuštanje i mehanizam plastičnosti. Točke prvog popuštanja i mehanizma plastičnosti dobivene su zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

Na kraju, sa **slika 9.74 i 9.75**, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom zadovoljava za zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja poslije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova.

Ovdje treba napomenuti kako su sile u dijagonalama 1. i 2. kata, dobivene linearnim proračunom, bile veće od nosivosti dijagonale za 10-15%. Unatoč tome, pristupilo se dimenzioniranju elemenata armirano-betonskog okvira i provedena je nelinearna analiza iz koje možemo vidjeti da za takvu razliku sila u dijagonalama, ovako dimenzioniran armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom, ipak zadovoljava za zahtijevani pomak. Što se tiče oštećenja zidnoga ispuna, to ćemo vidjeti u idućoj točki na osnovu nivoa međukatnih pomaka. Očekuju se međukatni pomaci veći od 0,50%.



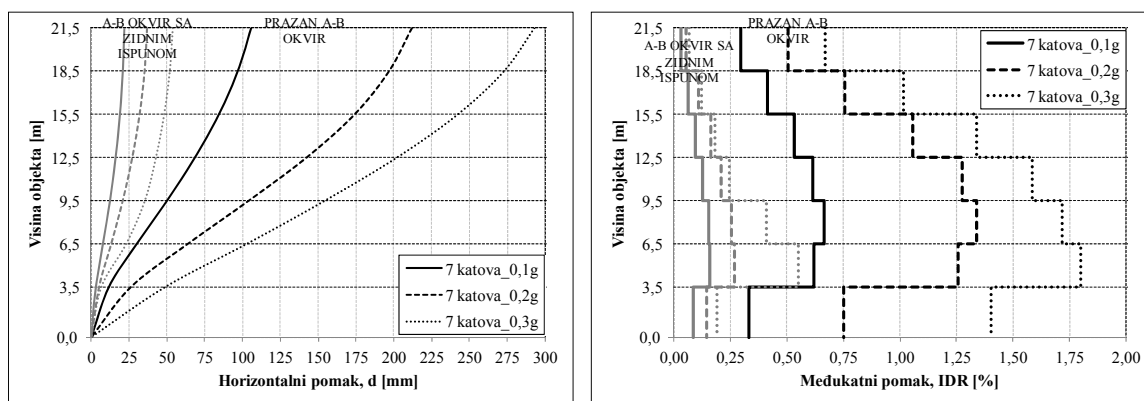
Slika 9.74 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,3g$



Slika 9.75 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,3g$

### 9.4.3.6 Usporedba rezultata praznih armirano-betonskih okvira i armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom – 7. katova

Promatrajući pomake i međukatne pomake na *slici 9.76*, vidimo veliku razliku pomaka i međukatnih pomaka između praznih okvira i okvira sa zidnim ispunom. Inače, pomaci i međukatni pomaci praznog okvira prosječno su 4,36 puta veći od pomaka i međukatnih pomaka okvira sa zidnim ispunom na kritičnoj etaži (1. i 2. kat). S druge strane, ako promatramo međukatne pomake okvira sa zidnim ispunom i povežemo ih s oštećenjem zidnoga ispuna prema eksperimentalnim rezultatima (*točka 4.5.7.2*), možemo reći kako imamo umjereno oštećenje zidnoga ispuna do međukatnih pomaka od 0,30%, srednje teško oštećenje od 0,30-0,50% IDR i teško oštećenje od 0,50-0,75% IDR. Zbog toga i nisu prikazane sile u dijagonalama zidnoga ispuna, a iz kojih se može vidjeti navedeno. Također, sa *slike 9.76* vidimo kako je najveće (najizraženije) oštećenje zidnoga ispuna na 1. i 2. katu za  $a_g=0,3g$ , gdje su sile u dijagonalama dobivene linearnim proračunom bile veće od nosivosti dijagonale, ovakvo ponašanje je i očekivano.



Slika 9.76 Horizontalni pomaci i međukatni pomaci za zahtijevane pomake

Također, zanimljivo je usporediti i rezultate prikazane u *tablici 9.49*. Doprinos zidnoga ispuna vidljiv je za sve promatrane parametre, osim za duktilnost, što je i očekivano.

Tablica 9.49 Usporedba rezultata – 7. katova

NUMERIČKI MODEL	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$F_b$ [kN]	$T^*$ [s]	$F_y$ [kN]	$D_y$ [cm]	$F_t$ [kN]	$D_t$ [cm]	$\mu$
Prazan ab okvir – 7. katova	0,98	87,66	2,08	176	9,73	176	10,60	1,08
	1,96	175,31	2,01	286	14,73	286	21,12	1,44
	2,94	262,97	1,76	393	17,01	393	29,30	1,72
Ab okvir sa zidnim ispunom – 7. katova	0,98	209,12	0,56	-	-	548	2,17	1,00
	1,96	442,75	0,49	1199	3,66	1199	3,69	1,01
	2,94	664,12	0,48	1215	3,55	1207	5,23	1,51

### 9.4.3.7 Prazan armirano-betonski okvir – 10. katova

Elastični spektar odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar, čime je definiran seizmički zahtjev kao i spektri zahtjeva u obliku AD, isti su kao i kod praznoga armirano-betonskoga okvira – 4. kata, te se ovdje i u nastavku neće prikazivati.

$(a_g=0,1g)$

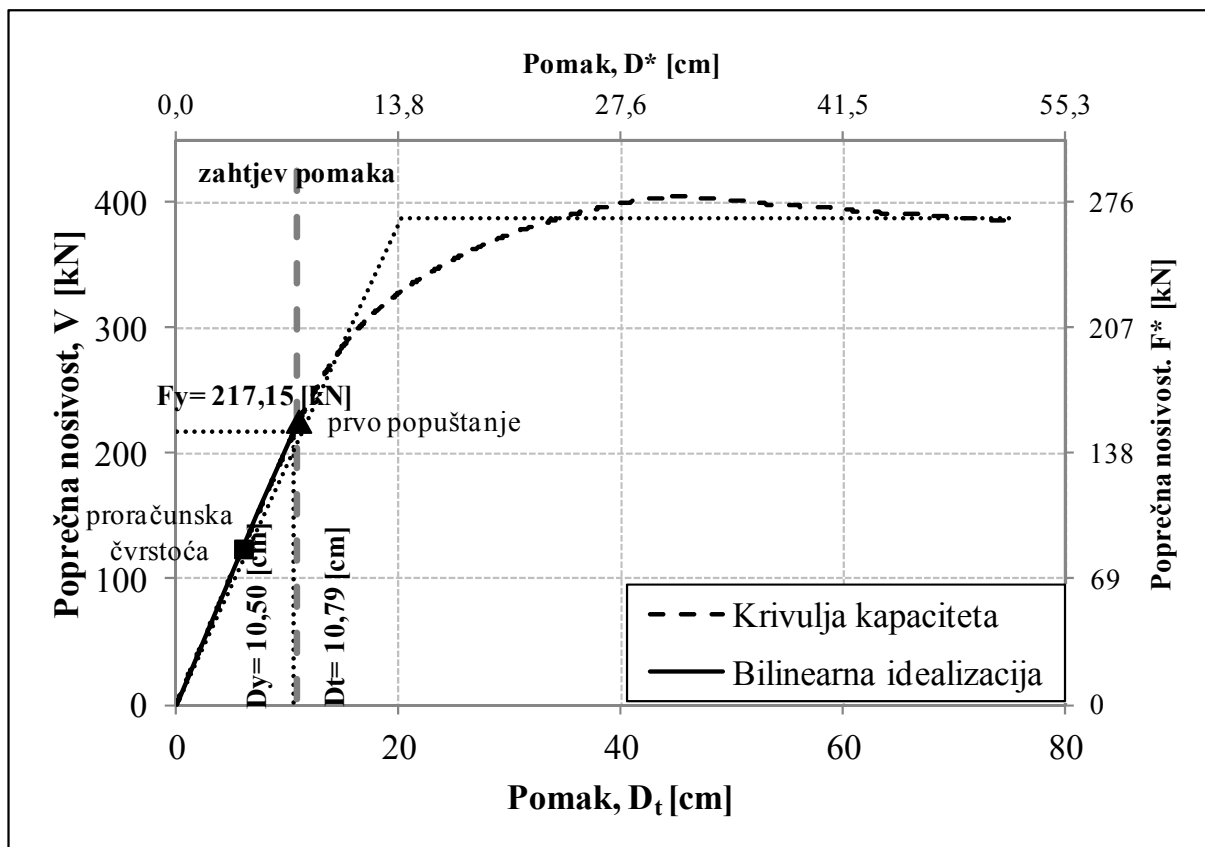
Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1 i 9.4.2.2*, a prikazani su u **tablici 9.50**.

**Tablica 9.50** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,1g$

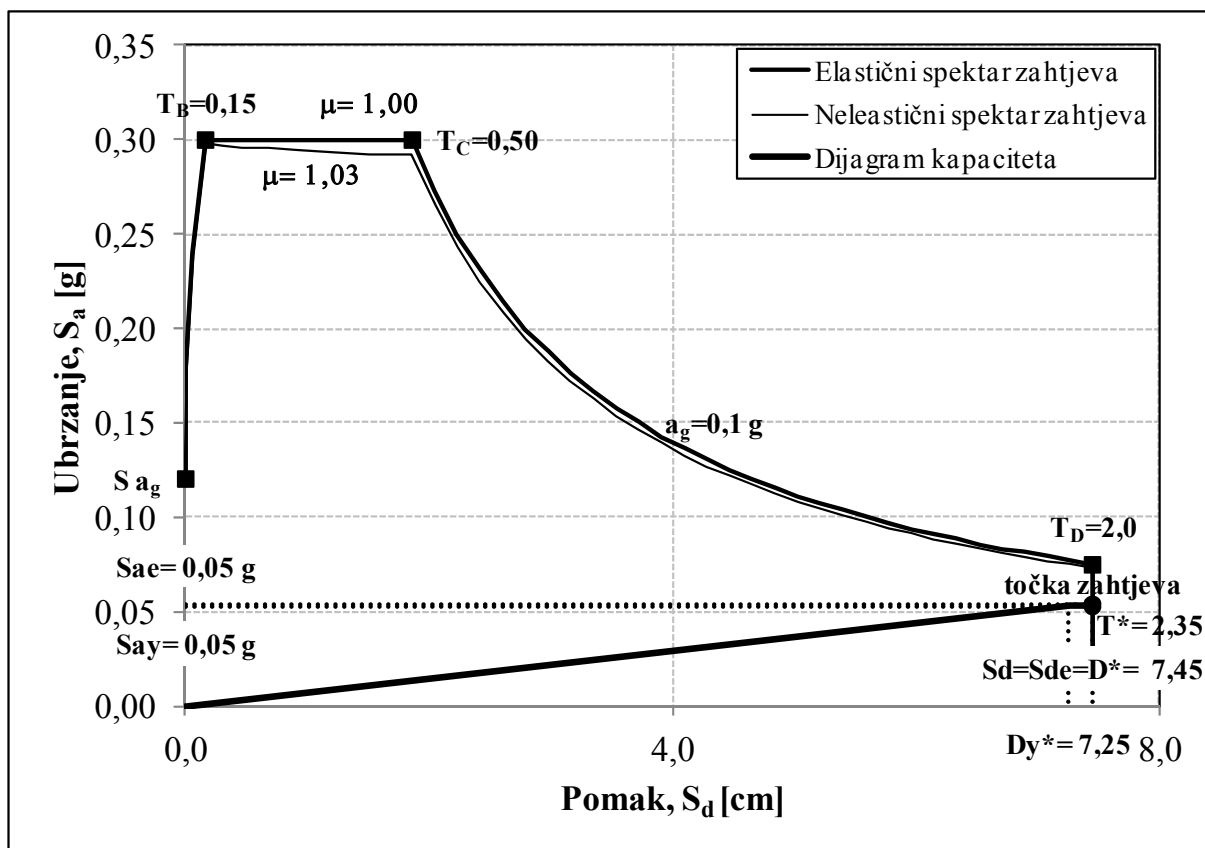
Pretpostavlja se linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela) (MDOF)	$\Phi^T=[0,115; 0,213; 0,311; 0,410; 0,508; 0,607; 0,705; 0,803; 0,902; 1,000]$
Raspodjela masa (MDOF)	Prema <b>tablici 9.5</b>
Raspodjela horizontalnih sila (MDOF)	$P^T=[0,140; 0,258; 0,378; 0,497; 0,616; 0,735; 0,854; 0,974; 1,093; 1,000]$
Ekvivalentna masa (SDOF)	$m^*=290,38$ [t]
Faktor sudjelovanja (konstanta)	$\Gamma=1,448$
Sila popuštanja (SDOF)	$F_{y^*}=150,00$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_{\mu}=1,03$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana bilinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (točkasta linija), **slika 9.77**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF prikazan na **slici 9.78**. Za dobiveni zahtjev pomaka ponovno je izvršena bilinearna idealizacija. Za tako idealiziranu krivulju dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, **slika 9.77**.

Na **slici 9.77** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i dvije karakteristične točke koje se odnose na proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**) i prvo popuštanje. Točka prvog popuštanja dobivena je zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.



Slika 9.77 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,1g$



Slika 9.78 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,1g$



Na kraju, sa *slika 9.77* i *9.78*, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom zadovoljava za zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja neposredno prije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova.

$(a_g=0,2g)$

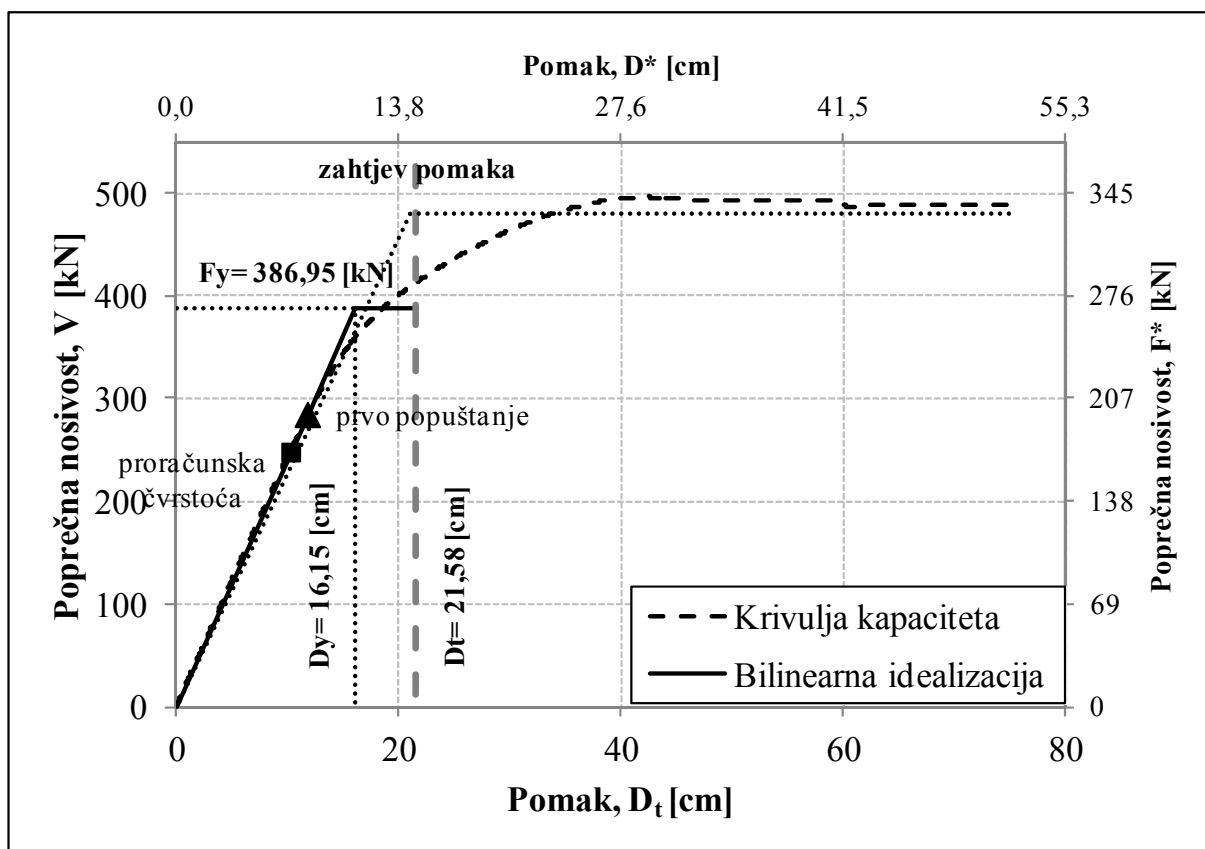
Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1* i *9.4.2.2*, a prikazani su u *tablici 9.51*.

**Tablica 9.51** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,2g$

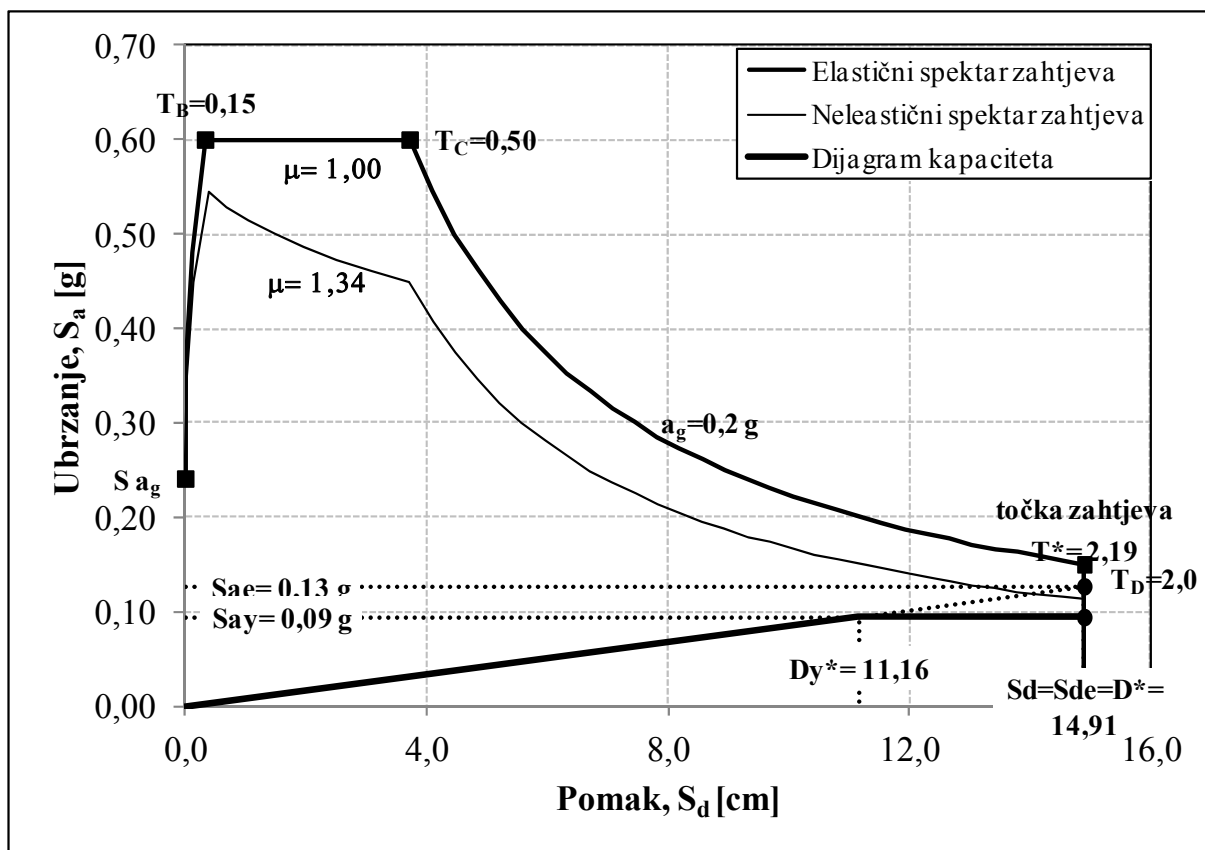
Pretpostavlja se linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela) (MDOF)	$\Phi^T=[0,115; 0,213; 0,311; 0,410; 0,508; 0,607; 0,705; 0,803; 0,902; 1,000]$
Raspodjela masa (MDOF)	Prema <i>tablici 9.5</i>
Raspodjela horizontalnih sila (MDOF)	$P^T=[0,140; 0,258; 0,378; 0,497; 0,616; 0,735; 0,854; 0,974; 1,093; 1,000]$
Ekvivalentna masa (SDOF)	$m^*=290,38$ [t]
Faktor sudjelovanja (konstanta)	$\Gamma=1,448$
Sila popuštanja (SDOF)	$F_{y,*}=267,29$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_{\mu}=1,34$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana bilinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (točkasta linija), *slika 9.79*. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF prikazan na *slici 9.80*. Za dobiveni zahtjev pomaka ponovno je izvršena bilinearna idealizacija. Za tako idealiziranu krivulju dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, *slika 9.79*.

Na *slici 9.79* na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i dvije karakteristične točke koje se odnose na proračunsku čvrstoću (*tablica 9.20*) i prvo popuštanje. Točka prvog popuštanja dobivena je zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojemu je provedena metoda postupnog guranja.

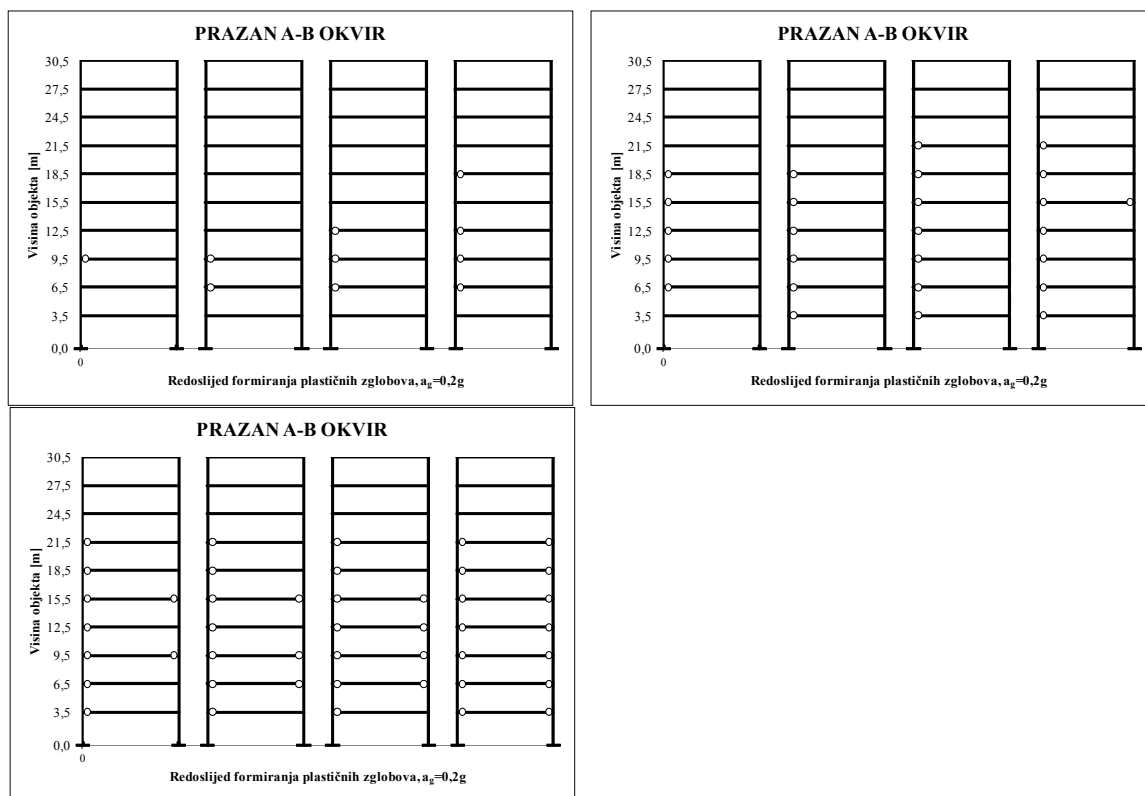


Slika 9.79 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,2g$



Slika 9.80 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,2g$

Na kraju, sa *slika 9.79* i *9.80*, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir zadovoljava za zahtijevani pomak. Razvijanje plastičnih zglobova, odnosno redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka, prikazani su na *slici 9.81*.



**Slika 9.81** Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka -  $a_g=0,2g$

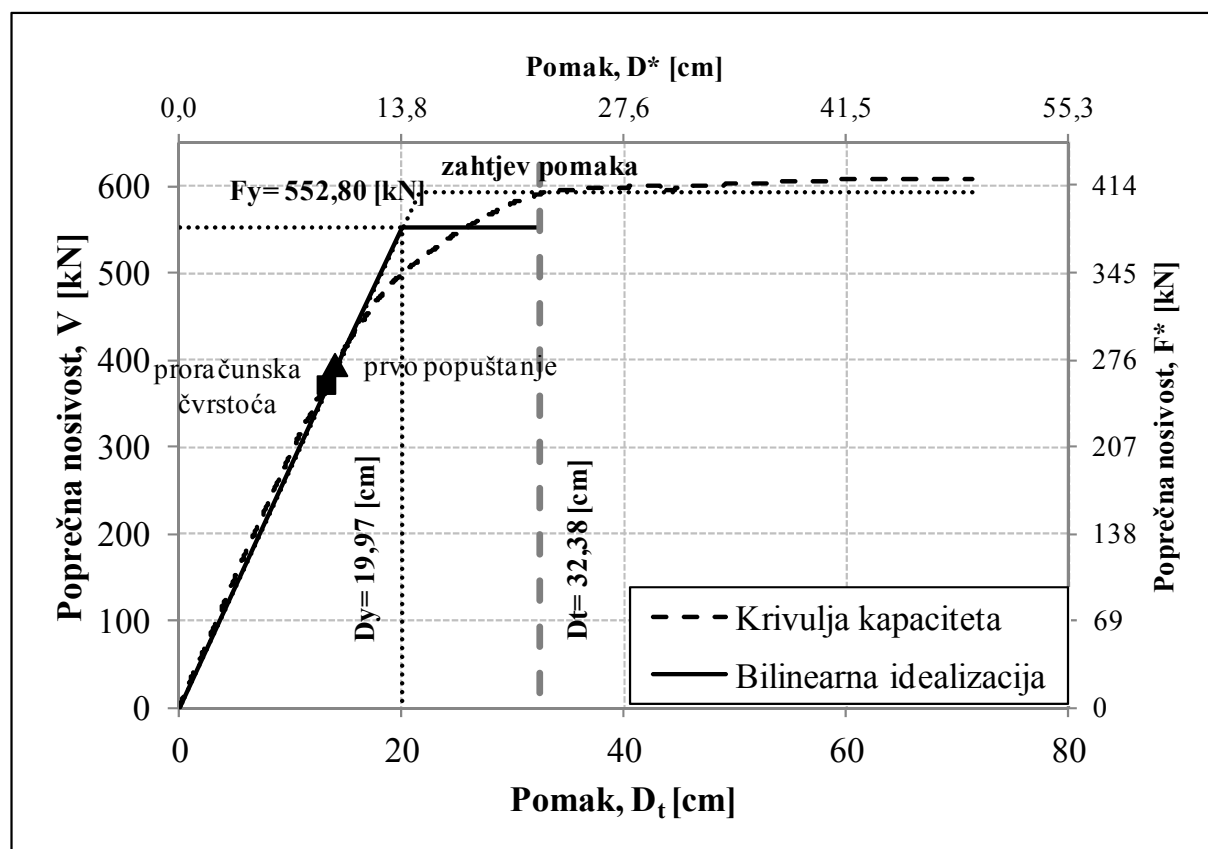
**( $a_g=0,3g$ )**

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 9.4.2.1* i *9.4.2.2*, a prikazani su u *tablici 9.52*. Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana bilinearnim, elastoplastičnim odnosom sila – pomak (točkasta linija), *slika 9.82*. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF, prikazan na *slici 9.83*. Za dobiveni zahtjev pomaka ponovno je izvršena bilinearna idealizacija. Za tako idealiziranu krivulju dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, *slika 9.82*. Na *slici 9.82* na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i dvije karakteristične točke koje se odnose na proračunsku čvrstoću (*tablica 9.20*) i prvo popuštanje.

Točka prvog popuštanja dobivena je zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

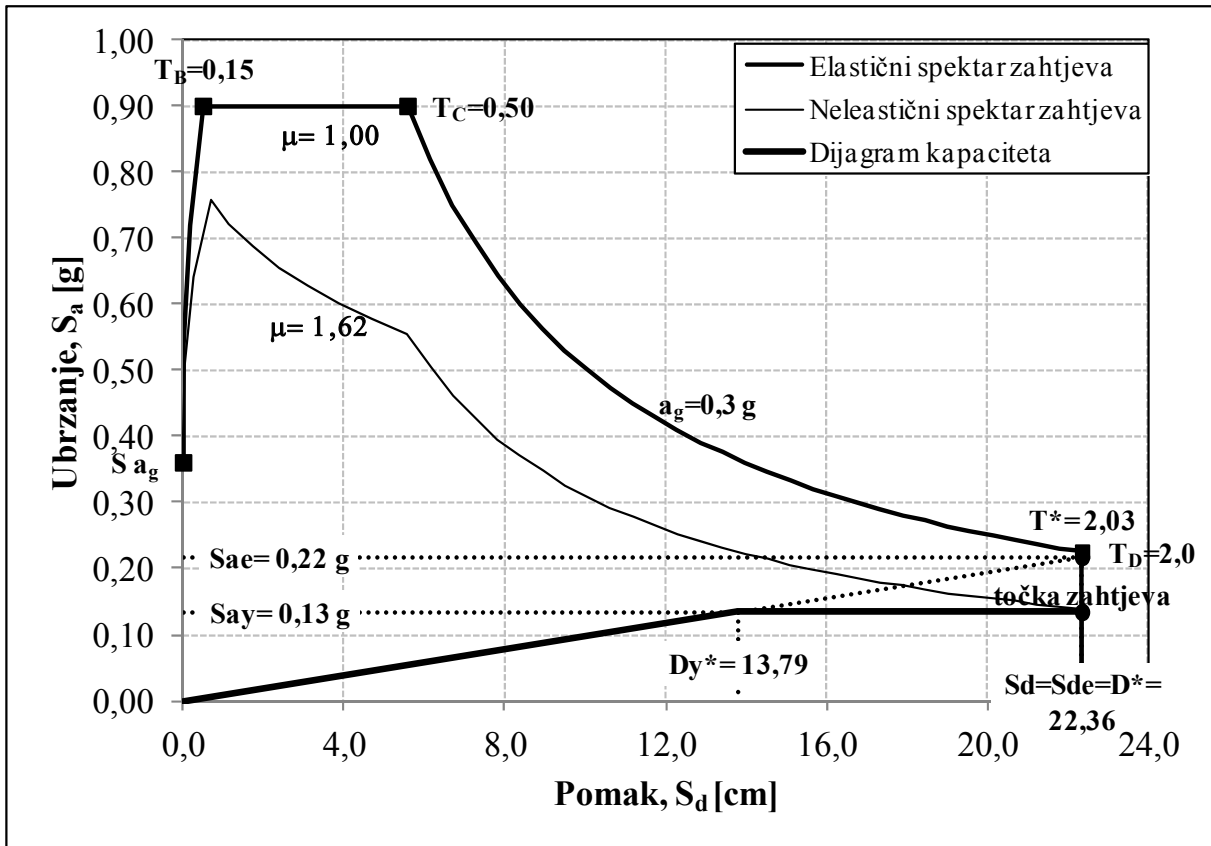
**Tablica 9.52** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,2g$

Pretpostavlja se linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela) (MDOF)	$\Phi^T=[0,115; 0,213; 0,311; 0,410; 0,508; 0,607; 0,705; 0,803; 0,902; 1,000]$
Raspodjela masa (MDOF)	Prema <i>tablici 9.5</i>
Raspodjela horizontalnih sila (MDOF)	$P^T=[0,140; 0,258; 0,378; 0,497; 0,616; 0,735; 0,854; 0,974; 1,093; 1,000]$
Ekvivalentna masa (SDOF)	$m^*=290,38$ [t]
Faktor sudjelovanja (konstanta)	$\Gamma=1,448$
Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=381,85$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_\mu=1,62$



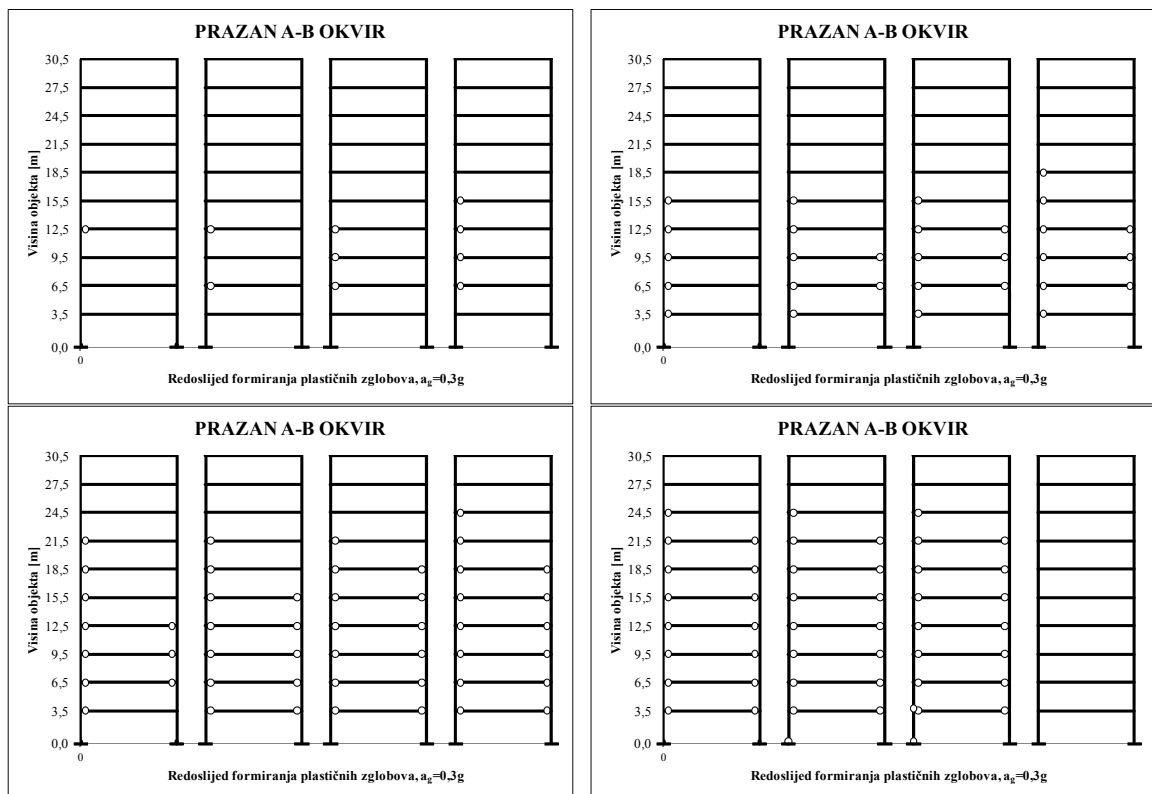
**Slika 9.82** Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i bilinearna idealizacija (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,3g$

Na kraju, sa *slika 9.82* i *9.83*, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir zadovoljava zahtijevani pomak.



Slika 9.83 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,3g$

Razvijanje plastičnih zglobova, odnosno redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka, prikazani su na *slici 9.84*.



Slika 9.84 Redosljed formiranja plastičnih zglobova do zahtijevanog pomaka -  $a_g=0,3g$

#### 9.4.3.8 Armirano betonski okvir sa zidnim ispunom – 10. katova

Elastični spektar odziva ubrzanja i odgovarajući proračunski spektar, čime je definiran seizmički zahtjev kao i spektri zahtjeva u obliku AD, isti su kao i kod armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom– 4. kata, te se ovdje i u nastavku neće prikazivati.

$(a_g=0,1g)$

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama* 9.4.2.1 i 9.4.2.2, a prikazani su u **tablici 9.53**. Pretpostavljeni linearni oblik pomaka (trokutasta raspodjela), raspodjela masa, raspodjela horizontalnih sila, ekvivalentna masa i faktor sudjelovanja, isti su kao i kod praznih armirano-betonskih okvira, te se ovdje neće navoditi.

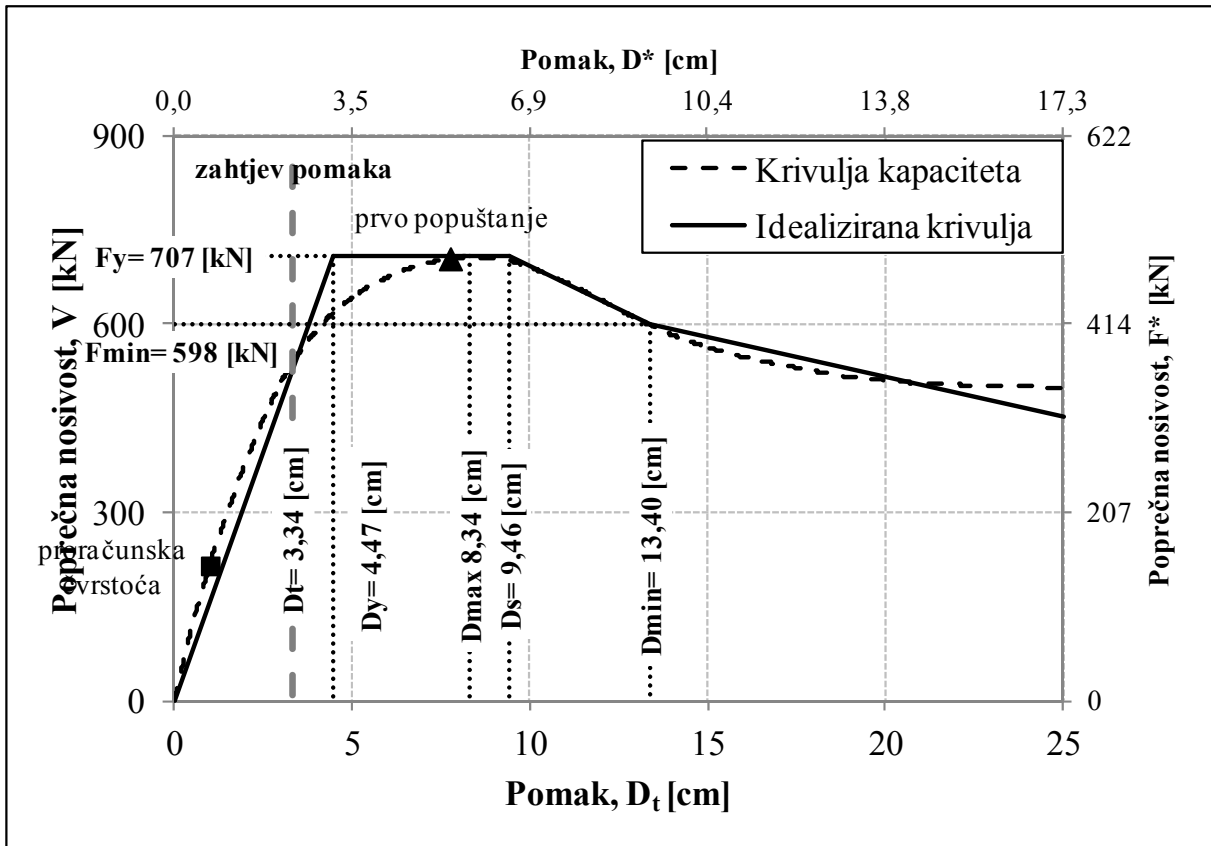
**Tablica 9.53** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,1g$

Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=488,12$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_\mu=0,75$

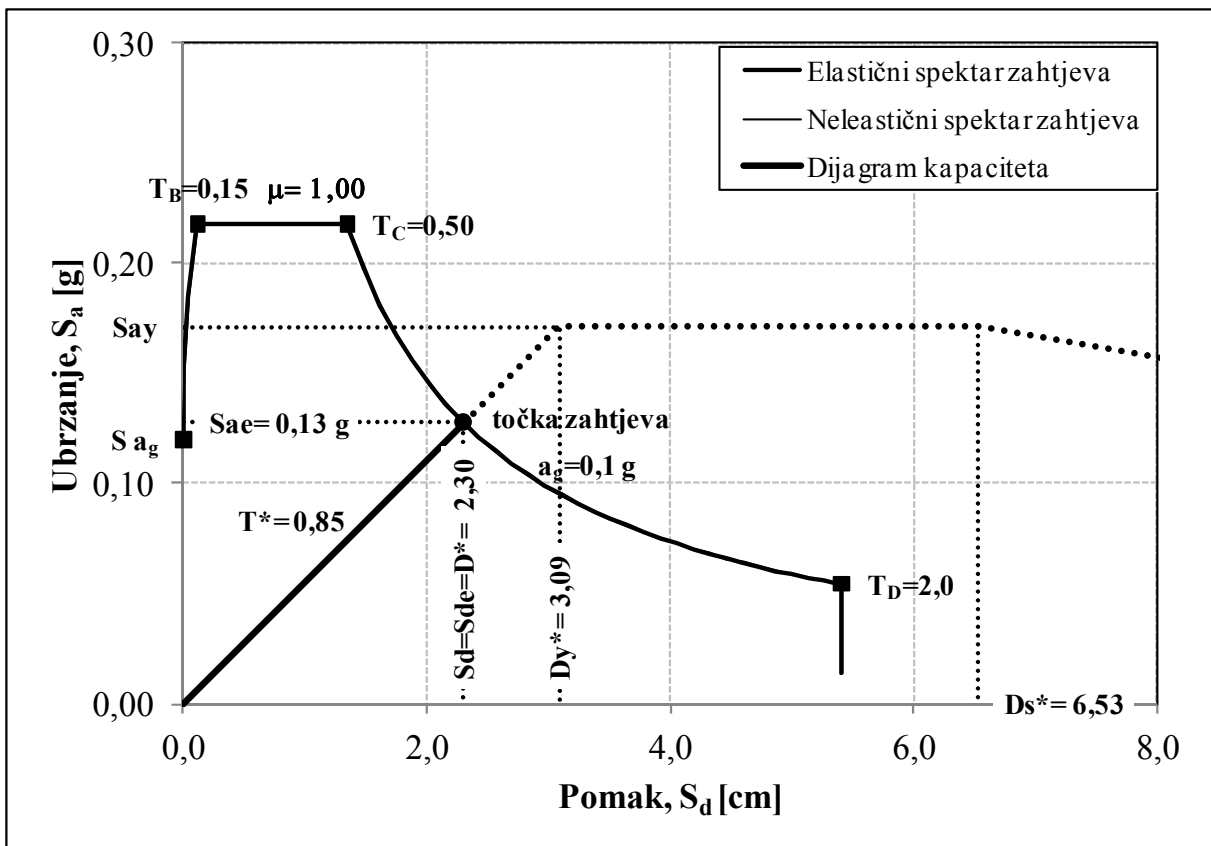
Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana više - linearnim odnosom sila – pomak, **slika 9.85**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF prikazan na **slici 9.86**. Za dobiveni zahtjev pomaka vidimo kako imamo linearno ponašanje sustava, **slika 9.85**.

Na **slici 9.85** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i dvije karakteristične točke koje se odnose na proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**) i prvo popuštanje. Točka prvog popuštanja dobivena je zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

Na kraju, sa **slika 9.85** i **9.86**, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom zadovoljava zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja poslije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova, a i nalazimo se u linearnom području.



Slika 9.85 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,1g$



Slika 9.86 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,1g$

$(a_g=0,2g)$

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 4.3.2.1 i 4.3.2.2*, a prikazani su u **tablici 9.54**.

**Tablica 9.54** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,2g$

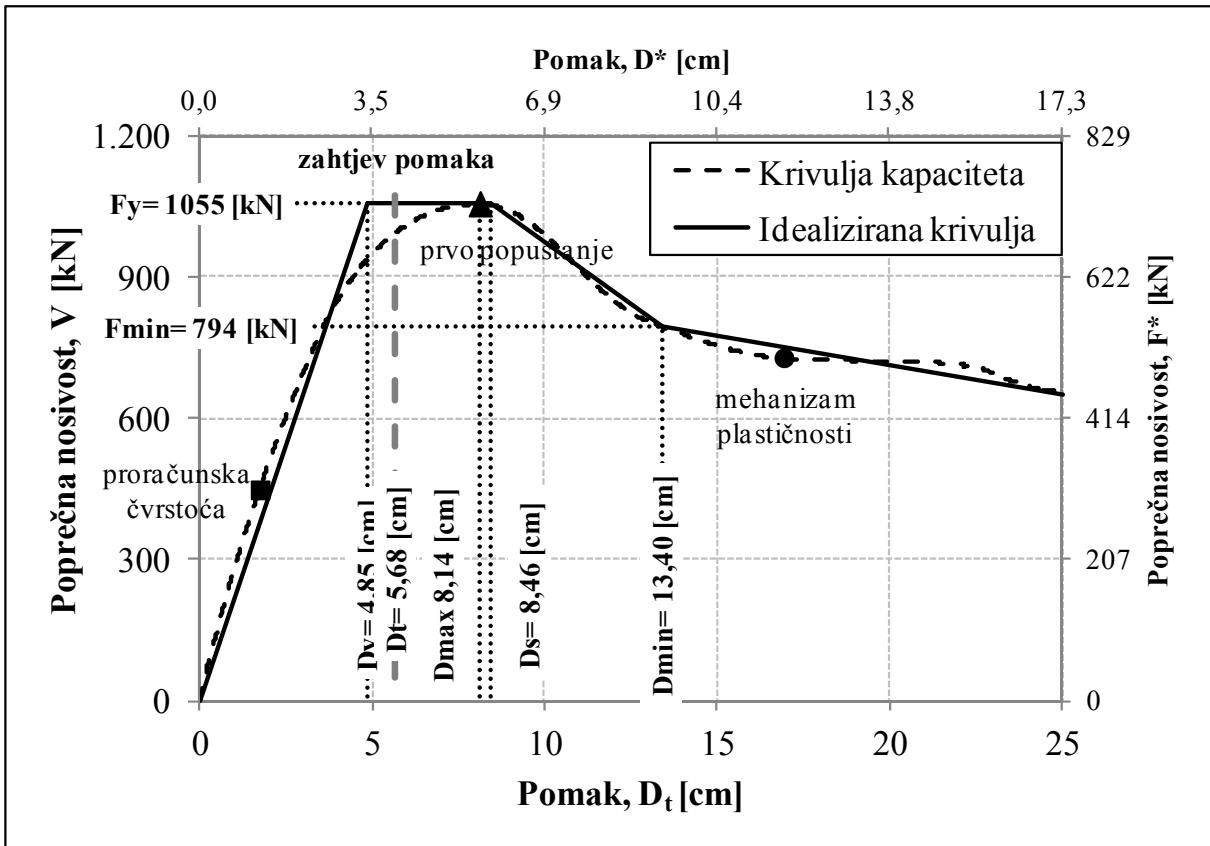
Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=728,61$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_d=1,17$

Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana više - linearnim odnosom sila – pomak, **slika 9.87**. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF prikazan na **slici 9.88**. Za dobiveni zahtjev pomaka dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, **slika 9.87**.

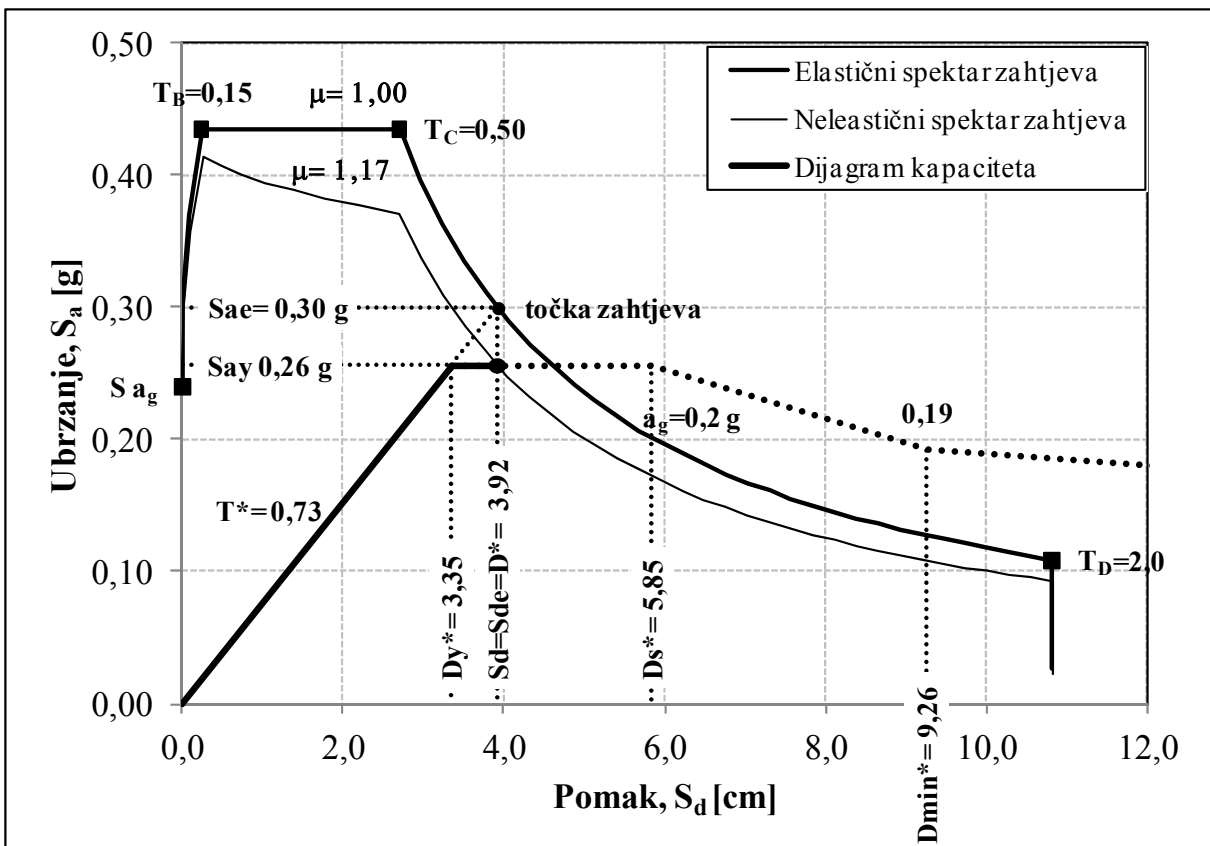
Na **slici 9.86** na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ . Na istoj slici prikazane su i dvije karakteristične točke koje se odnose na proračunsku čvrstoću (**tablica 9.20**) i prvo popuštanje. Točka prvog popuštanja dobivena je zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

Na kraju, sa **slika 9.87 i 9.88**, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom zadovoljava za zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja poslije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova.





Slika 9.87 Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,2g$



Slika 9.88 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,2g$

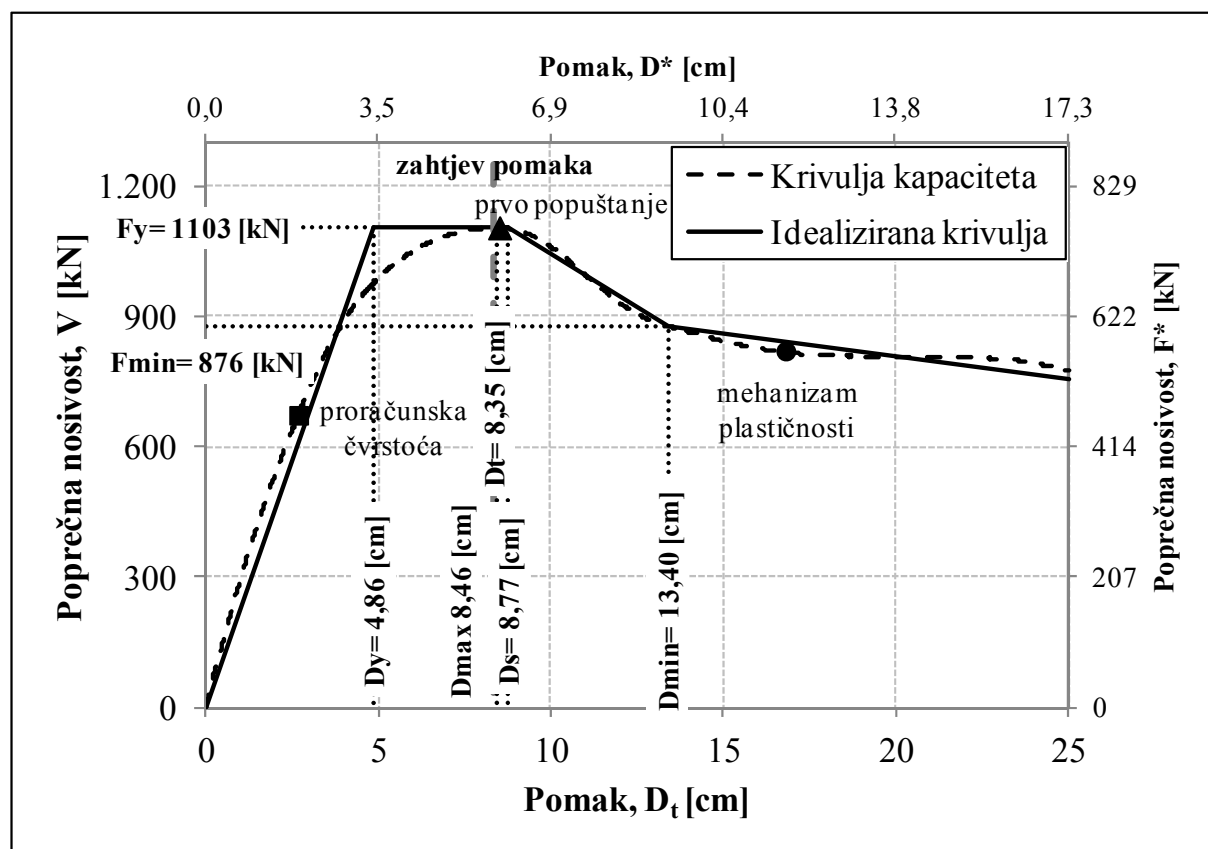
$(a_g=0,3g)$

Sažeti prikaz svih potrebnih parametara, koji nisu prikazani na slikama za primjenu metode N2, dobiveni su prema izrazima kako je to detaljno opisano u *točkama 4.3.2.1 i 4.3.2.2*, a prikazani su u *tablici 9.55*.

**Tablica 9.55** Vrijednosti pojedinih parametara za prazan armirano-betonski okvir –  $a_g=0,3g$

Sila popuštanja (SDOF)	$F_y^*=761,91$ [kN]
Faktor umanjenja (SDOF)	$R_\mu=1,72$

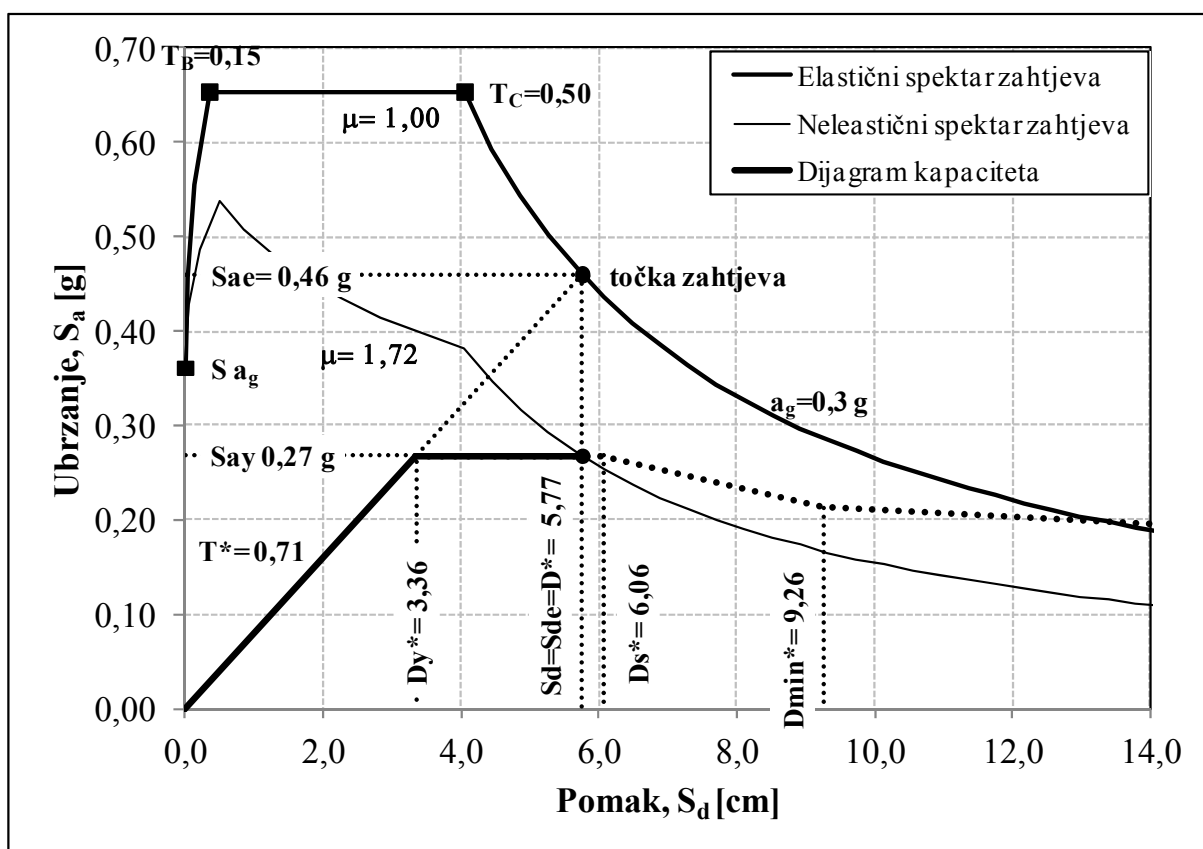
Metodom postupnog guranja dobivena je krivulja kapaciteta koja je idealizirana više - linearnim odnosom sila – pomak, *slika 9.89*. Nakon toga, provedeni su ostali koraci opisani u metodi N2 i dobiven je seizmički zahtjev za model SDOF prikazan na *slici 9.90*. Za dobiveni zahtjev pomaka dobivena je granica popuštanja (sila popuštanja) i pomak na granici popuštanja, *slika 9.89*. Na *slici 9.89* na primarnim osima nalazi se odnos sila – pomak za model MDOF, dok se na sekundarnim osima nalazi isti odnos za model SDOF, ovdje se jednostavno radi o različitom mjerilu koje je jednako faktoru sudjelovanja,  $\Gamma$ .



**Slika 9.89** Krivulja kapaciteta nosivosti dobivena postupnim guranjem i idealizirana više – linearna krivulja (spektar kapaciteta) -  $a_g=0,3g$

Na istoj slici (*slika 9.89*) prikazane su i dvije karakteristične točke koje se odnose na proračunsku čvrstoću (*tablica 9.20*) i prvo popuštanje. Točka prvog popuštanja dobivena je zadavanjem kriterija deformacije za materijal (beton, čelik) u programu u kojem je provedena metoda postupnog guranja.

Na kraju, sa *slika 9.89* i *9.90*, možemo uočiti da ovako projektiran, odnosno dimenzioniran armirano-betonski okvir zadovoljava za zahtijevani pomak. Kako nam je točka prvog popuštanja poslije zahtijevanog pomaka nema razvijanja plastičnih zglobova.

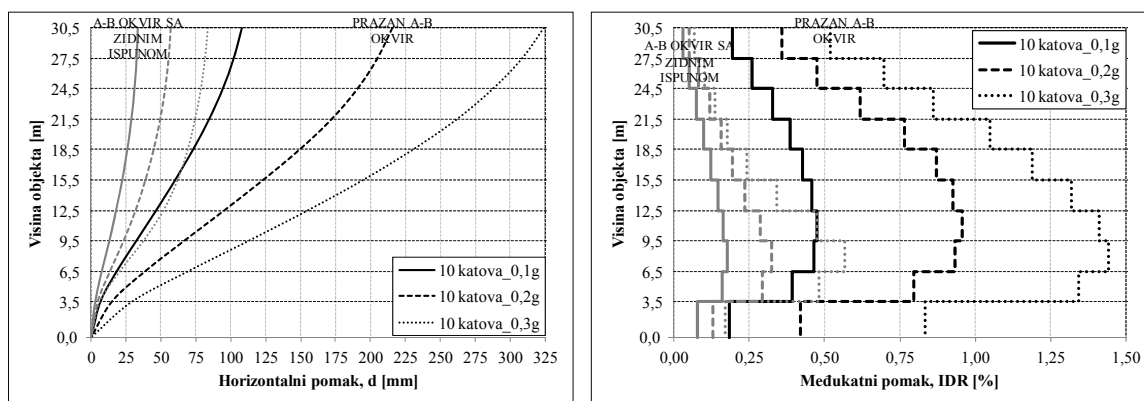


Slika 9.90 Spektri zahtjeva i dijagram kapaciteta za promatrani numerički model -  $a_g=0,3g$

Ovdje treba napomenuti kako su sile u dijagonalama na prvom, drugom, trećem i četvrtom katu, dobivene linearnim proračunom, bile veće od nosivosti dijagonale za 6-22%. Unatoč tome, pristupilo se dimenzioniranju elemenata armirano-betonskog okvira i provedena je nelinearna analiza iz koje možemo vidjeti kako za takvu razliku sila u dijagonalama, ovako dimenzioniran armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom ipak zadovoljava za zahtijevani pomak. Što se tiče samoga oštećenja zidnoga ispuna, to ćemo vidjeti u idućoj točki na osnovu nivoa međukatnih pomaka. Očekuju se međukatni pomaci na veći od 0,50%.

### 9.4.3.9 Usporedba rezultata praznih armirano-betonskih okvira i armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom – 10. katova

Promatrajući pomake i međukatne pomake na *slici 9.91*, vidimo veliku razliku pomaka i međukatnih pomaka između praznih okvira i okvira sa zidnim ispunom. Inače, pomaci i međukatni pomaci praznog okvira su prosječno 2,86 puta veći od pomaka i međukatni pomaka okvira sa zidnim ispunom na kritičnim etažama (2. i 3. kat). S druge strane, ako promatramo međukatne pomake okvira sa zidnim ispunom i povežemo ih sa oštećenjem zidnog ispuna prema eksperimentalnim rezultatima (*točka 4.5.7.2*), možemo reći da imamo umjereno oštećenje zidnog ispuna do međukatnih pomaka od 0,30%, srednje teško oštećenje od 0,30-0,50% međukatnih pomaka i teško oštećenje od 0,50-0,75% međukatnih pomaka. Iz navedenog razloga nisu prikazane sile u dijagonalama zidnog ispuna, a iz kojih se može vidjeti navedeno. Također, sa *slike 9.91* vidimo da je najveće (najizraženije) oštećenje zidnog ispuna na 2., 1., 3. i 4. katu za  $a_g=0,3g$ , gdje su sile u dijagonalama dobivene linearnim proračunom bile veće od nosivosti dijagonale, ovakvo ponašanje bilo je i za očekivati.



Slika 9.91 Horizontalni pomaci i međukatni pomaci za zahtijevane pomake

Također, zanimljivo je usporediti i rezultate prikazane u *tablici 9.56*. Doprinos zidnog ispuna vidljiv je za sve promatrane parametre, osim za duktilnost, što je bilo očekivano.

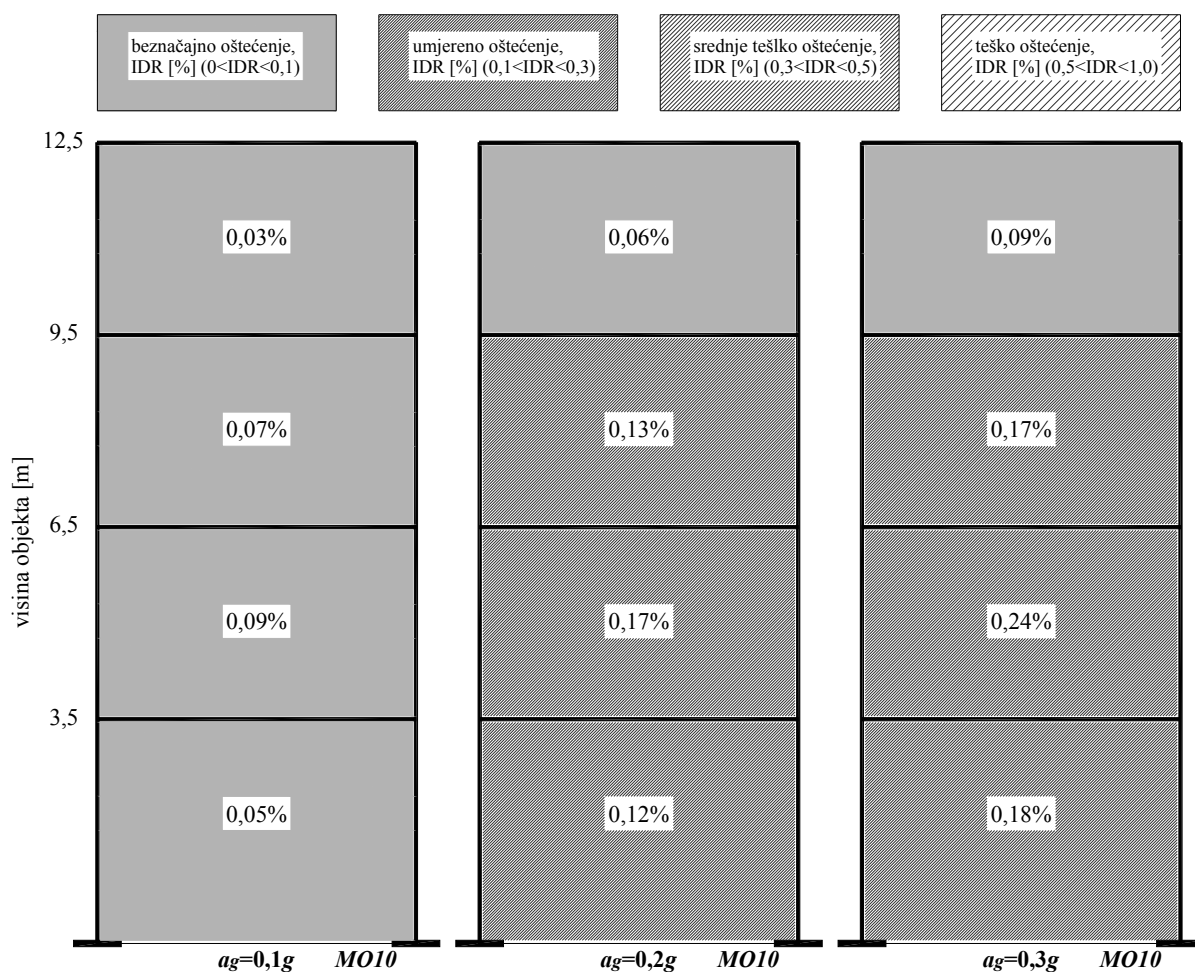
Tablica 9.56 Usporedba rezultata – 10. katova

NUMERIČKI MODEL	$a_g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$F_b$ [kN]	$T^*$ [s]	$F_y$ [kN]	$D_y$ [cm]	$F_t$ [kN]	$D_t$ [cm]	$\mu$
Prazan ab okvir – 10. katova	0,98	124,14	2,35	218	10,50	218	10,79	1,03
	1,96	248,29	2,19	387	16,15	387	21,58	1,34
	2,94	372,43	2,03	553	19,97	553	32,38	1,62
Ab okvir sa zidnim ispunom – 10. katova	0,98	215,66	0,85	-	-	539	3,34	1,00
	1,96	449,42	0,73	1055	4,85	1055	5,68	1,17
	2,94	674,13	0,71	1103	4,86	1103	8,35	1,84

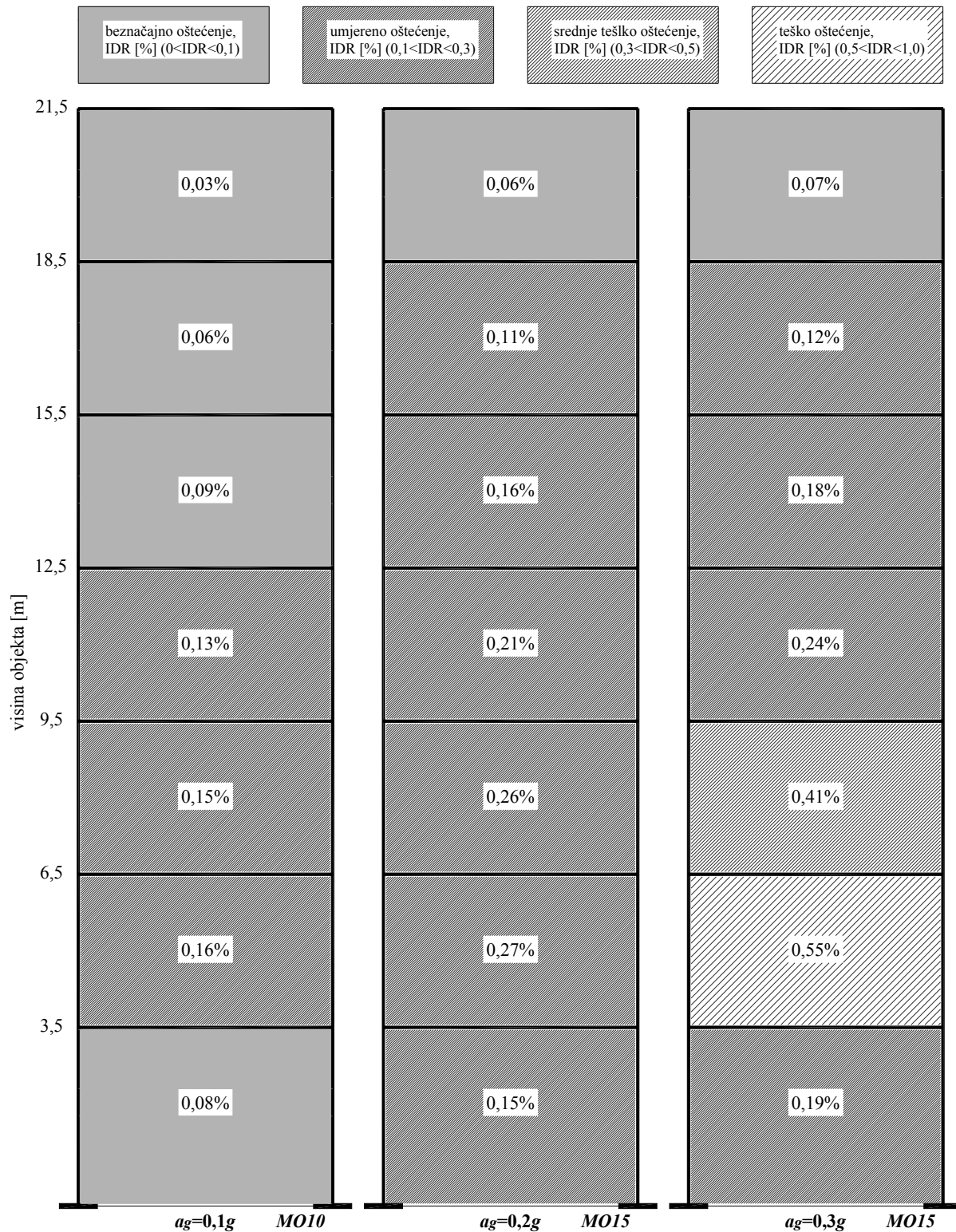
### 9.4.3.10 Prikaz oštećenja zidnog ispuna na numeričkim modelima

Na kraju ovoga potpoglavlja dan je grafički prikaz oštećenja zidnoga ispuna u ovisnosti o relativnom međukatnome pomaku. Na *slikama 9.92-9.94* prikazana su oštećenja zidnoga ispuna u ovisnosti o međukatnom pomaku za sve promatrane numeričke modele sa zidnim ispunom. Također, s navedenih slika može se vidjeti na svakome pojedinom katu koliki je međukatni pomak, odnosno pripadajuće oštećenje zidnoga ispuna.

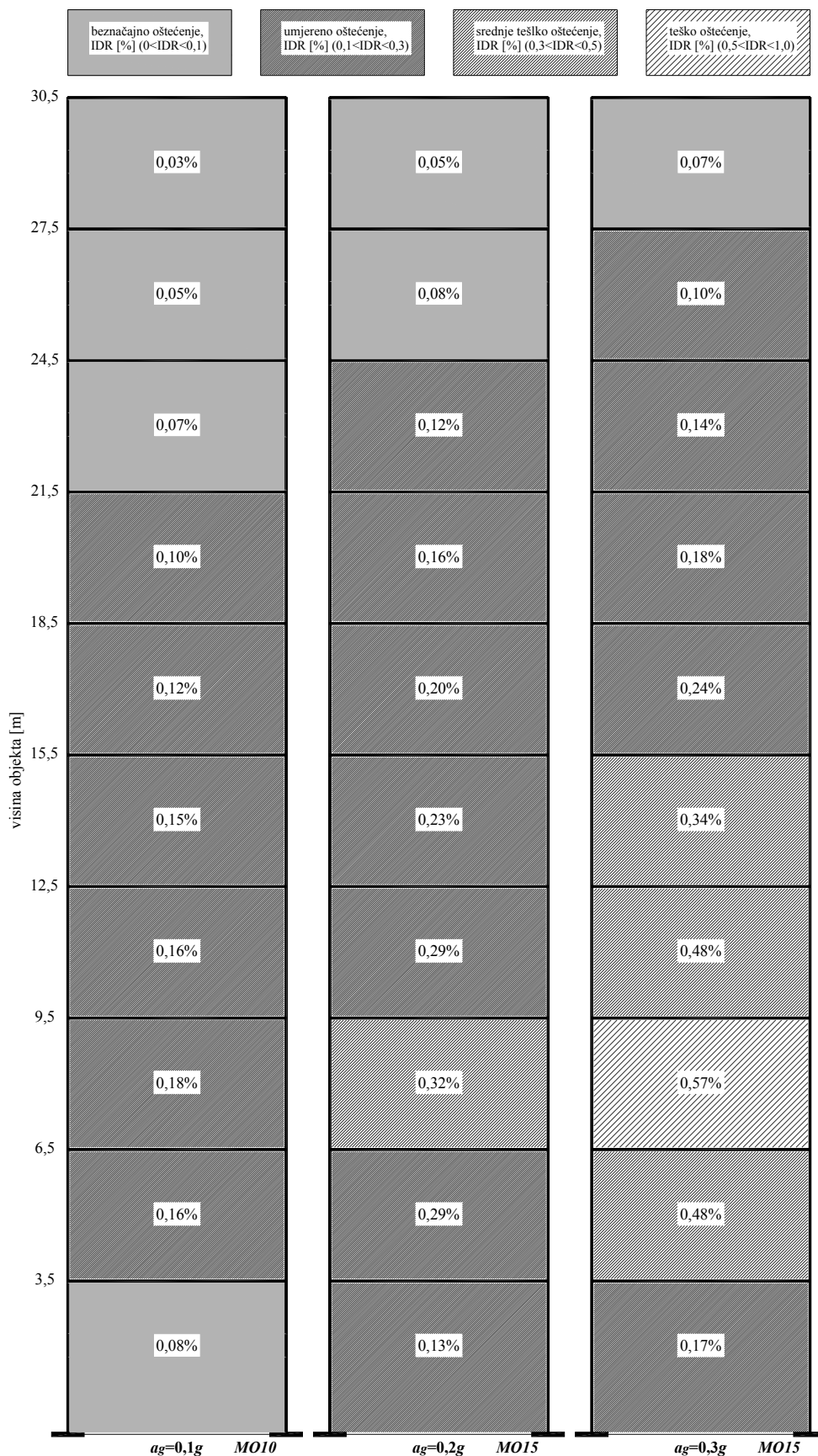
Kako je ranije rečeno, stupanj oštećenja zidnoga ispuna određen je na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja, a u ovisnosti o katnome pomaku (*točka 4.5.7.2*).



**Slika 9.92** Oštećenje zidnog ispuna za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu za numeričke modele - 4. kata



Slika 9.93 Oštećenje zidnog ispuna za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu za numeričke modele - 7. katova



Slika 9.94 Oštećenje zidnog ispuna za različita proračunska ubrzanja na temeljnom tlu za numeričke modele - 10. katova

## 9.5 ZAKLJUČAK POGLAVLJA

S ciljem primjene okvira s ispunom, kao sustava za preuzimanje horizontalnih djelovanja u svakodnevnoj inženjerskoj praksi, predložena je metoda linearnog proračuna. Metoda analizira armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom kao sustav („okvir+zid“) i primjenjuje se za dimenzioniranje sustava.

Predložena metoda je izložena, a i dokazana je njezina pouzdanost na modelima višekatnih armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom. Ona ima sljedeća svojstva:

- Sastoji se od 4 koraka. Najvažniji dio prvoga koraka u predloženoj metodi proračuna jest definiranje geometrijskih i materijalnih svojstava štapa tlačne dijagonale u linearnome području.
- Kod numeričkih modela reduciran je moment inercije i posmična površina presjeka svih elemenata armirano-betonskog okvira i zidnog ispuna na polovinu svoje vrijednosti, kao i torzioni moment inercije koji je reduciran na desetinu svoje vrijednosti.
- Numerički modeli pravilnog su oblika po tlocrtu i po visini. Zidni ispun ispunjen je cijelom visinom. Ulazni podatci, proračun vlastitih vrijednosti, seizmička analiza kao i dimenzioniranje, napravljeno je za sve modele za tri proračunska ubrzanja na temeljnom tlu.
- Izvršeno je dimenzioniranje modela (okvir bez i sa ispunom) sukladno suvremenim europskim propisima.
- Za odabrane dimenzije modela napravljena je kontrola očekivanoga ponašanja primjenom metode N2. Ovime je predložena metoda dokazana kao uporabljiva, a ovaj korak može se, kao opcija, koristiti i u predloženoj metodi proračuna, naročito za proračunska ubrzanja veća od 0,2g. Naime, iz promatranih numeričkih modela moglo se ustanoviti, tek primjenom ove opcije, kako određena statička rješenja ne zadovoljavaju tražene zahtjeve, prvenstveno zahtjev međukatnih pomaka.
- Usporedbom rezultata praznih armirano-betonskih okvira i sustava „okvir+zid“ mogu se izvesti zaključci. Kod modela od 4 kata doprinos zidnog ispuna značajan je. Proračunska nosivost prosječno je 2,35, a stvarna 2,52 puta veća kod modela „okvir+zid“, nego kod čistih okvira. Osnovni period osciliranja značajno je manji, a zahtijevani pomaci prosječno su 8,8 puta manji kod modela „okvir+zid“.



Oštećenje zidnoga ispuna za sve modele za sva proračunska ubrzanja na temeljnom tlu umjerena su, imamo međukatne pomake manje od 0,30%.

- Kod numeričkih modela od 7 katova, uočeno je kako svi modeli zadovoljavaju tražene zahtjeve. Kod ovih modela za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu od 0,2g i 0,3g izvršena je korekcija zidnog ispuna. Doprinos zidnoga ispuna, također je značajan. Proračunska nosivost prosječno je 2,39 (2,53), a stvarna 3,46 puta veća kod modela „okvir+zid“, nego kod čistih okvira. Također, osnovni period osciliranja značajno je manji, a zahtijevani pomaci prosječno su 5,40 puta manji kod modela „okvir+zid“. Kod ovih modela imamo tri stupnja oštećenja zidnoga ispuna ovisno o proračunskom ubrzanju na temeljnom tlu.

Za najmanje i srednje proračunsko ubrzanje ( $a_g=0,1g$ ,  $a_g=0,2g$ ) imamo umjereno oštećenje zidnoga ispuna, međukatni pomaci na svim etažama manji su od 0,30%.

Za najveće proračunsko ubrzanje ( $a_g=0,3g$ ) imamo umjereno, srednje teško i teško oštećenje zidnoga ispuna. Teško oštećenje (IDR 0,50-1,00%) imamo na prvoj etaži, srednje teško oštećenje (IDR 0,30-0,50%) imamo na drugoj etaži, na ostalim etažama imamo umjereno oštećenje (IDR <0,30%).

- Kod numeričkih modela od 10 katova, uočeno je također, kako svi modeli zadovoljavaju tražene zahtjeve. Kod ovih modela za proračunsko ubrzanje na temeljnom tlu od 0,2g i 0,3g izvršena je, također korekcija zidnoga ispuna.

Doprinos zidnoga ispuna, kao i kod prethodnih modela, također je značajan. Proračunska nosivost prosječno je 1,74 (1,81), a stvarna 2,40 puta veća kod modela „okvir+zid“ nego kod čistih okvira. Također, osnovni period osciliranja je značajno manji, a zahtijevani pomaci prosječno su 3,64 puta manji kod modela „okvir+zid“. Kod ovih modela, kao i kod modela od 7 katova, imamo tri stupnja oštećenja zidnoga ispuna, ovisno o proračunskom ubrzanju na temeljnom tlu.

Za najmanje proračunsko ubrzanje ( $a_g=0,1g$ ) imamo umjereno oštećenje, međukatni pomaci na svim etažama manji su od 0,30%.

Za srednje proračunsko ubrzanje ( $a_g=0,2g$ ) imamo umjereno i srednje teško oštećenje zidnoga ispuna. Srednje teško oštećenje (IDR 0,30-0,50%) imamo na drugoj etaži, na ostalim etažama imamo umjereno oštećenje (IDR <0,30%).

Za najveće proračunsko ubrzanje ( $a_g=0,3g$ ) imamo umjereno, srednje teško i teško oštećenje zidnoga ispuna. Teško oštećenje (IDR 0,50-1,00%) imamo na drugoj etaži, srednje teško oštećenje (IDR 0,30-0,50%) imamo na prvoj, trećoj i četvrtoj etaži, na ostalim etažama imamo umjereno oštećenje (IDR <0,30%).

Pokazano je kako Metoda proračuna armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom ima opravdanja. Ono se nalazi u znatno manjim očekivanim pomacima sustava pri djelovanju potresa, manjim troškovima popravka, te određenom uštedom armature, koja je detaljno prikazana u ovome *Poglavlju*.

Preporučuje se dimenzionirati elemente okvira sa zidnim ispunom tako da oštećenje zidnoga ispuna na svim etažama ne prelazi 0,50% međukatnog pomaka. Osim promjene elemenata armirano-betonskog okvira, ovo se može postići i promjenom svojstava zidnoga ispuna u razumnim granicama.

## POGLAVLJE 10: OSVRT, ZAKLJUČAK I PREPORUKE

### 10.1. OSVRT

Primjena armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom izvedenim nakon očvršćivanja okvira tradicionalna je pri izvedbi niskih i srednje visokih objekata i čini većinu građevina u Republici Hrvatskoj, a i u cijeloj Jugoistočnoj Europi. Izvješća s potresom pogođenih područja pokazala su kako postoji međudjelovanje armirano-betonskog okvira i ispuna te da se doprinos ispuna ne smije zanemariti jer može uzrokovati neočekivane mehanizme sloma. Danas je svijest o tome uvelike prisutna, što je vidljivo kroz postojeće normative za projektiranje građevina, ali još uvijek ne postoji dovoljno istraživačkoga iskustva. Dosadašnje spoznaje o utjecaju ispuna oprečne su, stoga smjernice za projektiranje pretežno uzimaju u obzir njegov negativni utjecaj, dok se pozitivni doprinos zanemaruje. Nepovoljni utjecaj ispuna posljedica je nejednolike raspodjele u tlocrtu ili po visini na razini cijelog objekta, dok se na razini okvira očituje u stvaranju koncentriranih sila na okvir i nastanku nepovoljnih i/ili nepredviđenih konstruktivnih sustava. Zanemarivanjem ispuna, konstrukcija ima drukčiji odgovor od očekivanoga, te objekt može doći u neželjeno stanje. Uzimanjem ispuna u obzir realnije se predstavlja stvarno ponašanje građevine, a moguće su i racionalizacije u dimenzioniranju.



**Slika 10.1** Provođenje eksperimentalnog ispitivanja

U okviru doktorskoga rada istražen je utjecaj različitih ispuna na seizmički odgovor armirano-betonskog okvira dimenzioniranog prema Eurokodovima. Istraživanje se sastojalo iz eksperimentalnog, analitičkog i numeričkog dijela s ciljem iznalaženja inženjerski prikladnih metoda proračuna armirano-betonskoga okvira s ispunom.

Eksperimentalna ispitivanja izvedena su na armirano-betonskim okvirima koji su naknadno ispunjeni zidnim ispunom. Model armirano-betonskog okvira dobiven je na osnovu modela prototipa, koji je pravilna sedmero-katna armirano-betonska okvirna konstrukcija tlocrtnih dimenzija 17x16m i visine prve etaže 3,75, te ostalih šest etaža po 3m. Prototip je projektiran sukladno važećim propisima (EC2, EC8) od betona klase C30/37 i rebraste armature B500B. Na osnovu takvoga prototipa, dobiven je stvarni (praktičan) model armirano-betonskoga okvira u mjerilu 1:2,5 pri kojem su poštivana pravila skaliranja. Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja zidnih elemenata, dobivene su osnovne mehaničke karakteristike istih. Izvršena je podjela zidnog ispuna na jaki zidni ispun (od opečnih blokova MO10 i MM5), srednji zidni ispun (od opečnih blokova MO5 i MM5) i meki zidni ispun (od porobetonskih blokova MO2,5 i MM13,5). Podjela je izvršena kako bi se eksperimentalno utvrdio utjecaj čvrstoće zidnih elemenata, odnosno zidnoga ispuna na ponašanje armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom. Ispitano je ukupno 10 modela opterećenih vertikalnim stalnim opterećenjem na stupovima i cikličkim statičkim horizontalnim opterećenjem. Ispitana su po tri modela od svake vrste zidnoga ispuna i jedan model praznog armirano-betonskoga okvira. Dobiveni su eksperimentalni rezultati koji su detaljno obrađeni u pogledu: mehanizma sloma zidnoga ispuna, poprečne nosivosti, poprečne krutosti, histerezne energije (energija disipacije, energija apsorpcije i koeficijent prigušenja) i kategorizacije oštećenja zidnoga ispuna.

Problemi u tretiranju armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom proizlaze iz nedovoljne istraženosti ponašanja kompozitnog sustava. Okviri su fleksibilne i duktilne konstrukcije, što je i potvrđeno u ovome radu. Zidni ispun je krut i krt materijal koji ne podnosi velike deformacije. Suvremenim projektiranjem seizmički otpornih građevina nastoji se s određenom pouzdanošću procijeniti stupanj oštećenja objekta (i s ekonomskog aspekta) pri djelovanju potresa, uz uvjete ograničenoga oštećenja pri slabim i srednje jakim, te sprječavanje rušenja pri jakim potresima. Težnja je, s obzirom na zahtjeve korisnika, objekt izvesti i projektirati racionalno i ekonomično sa željenom pouzdanošću. Ovo istraživanje treba doprinijeti boljem razumijevanju međudjelovanja armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom.

## 10.2. ZAKLJUČAK

Uzimanjem zidnoga ispuna u obzir kod armirano-betonskih okvira poboljšava se ponašanje sustava („okvir+zid“) što se tiče poprečne nosivosti, poprečne krutosti i histerezne energije apsorpcije i disipacije do relativnog katnoga pomaka od 1,0%. Vrijednosti navedenih parametara bile su povezane sa stupnjem oštećenja zidnoga ispuna.

Provedena ispitivanja pokazala su kako su poprečne nosivosti armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom puno veće od poprečne nosivosti praznoga armirano-betonskog okvira, osobito pri malim katnim pomacima. Veća čvrstoća zidnoga ispuna značila je i veću poprečnu nosivost, poprečnu krutost i veću disipaciju histerezne energije. Pri tome, početne poprečne nosivosti nisu ovisile o vrsti zidnoga ispuna. Praćenjem primarnih krivulja (krivulja nosivosti) uočljiv je početni linearni dio, što ukazuje na to da se armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom ponaša kao kompozitni konstrukcijski sustav. Kod svih ispitivanih modela vidljiva je pojava prvih pukotina pri katnome pomaku od približno 0,05%, kao i prvenstveno linearno elastično ponašanje. Sustav zadržava svoju poprečnu nosivost sve do katnih pomaka od 0,5%, ali s puno manjom krutošću. Eksperimentalni rezultati pokazuju kako armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom zadržavaju svoju nosivost sve do katnog pomaka od cca. 1,0% kada je već doprinos zidnoga ispuna izgubljen u potpunosti, a oštećenja koja nastaju, značajna su. Nakon te razine katnoga pomaka, pozitivnog doprinosa zidnoga ispuna više nema, dok negativni doprinos može prevladati ako armirano-betonski okvir nije pravilno dimenzioniran na djelovanje posmika.

Kako je početna krutost modela armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom znatno veća, također je kod istih opadanje krutosti puno izraženije u usporedbi s praznim armirano-betonskim okvirom. Isto tako, važno je za spomenuti, da se sekantna krutost modela armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom s povećanjem poprečne sile, odnosno katnoga pomaka približava sekantnoj krutosti modela praznog armirano-betonskoga okvira, tj. smanjuje se. To je područje katnog pomaka od 1% pa na više.

U pogledu histerezne energije, možemo reći kako je apsorbirana energija kod armirano-betonskih okvira ispunjenih zidnim ispunom veća nego kod praznoga armirano-betonskog okvira (do iste razine pomaka). Jači zidni ispun ima veći kapacitet apsorpcije (primanja) energije. Zidni ispun povećava kapacitet apsorpcije energije armirano-betonskog okvira. S povećavanjem nivoa katnog pomaka, povećava se i količina apsorbirane energije. Promatrajući energiju disipacije (trošenja) možemo doći do sličnih zaključaka kao i kod energije apsorpcije (primanja).

Jednostavnije rečeno, armirano-betonski okviri sa zidnim ispunom imaju svojstvo boljeg trošenja i primanja energije u odnosu na prazan armirano-betonski okvir, naravno, do određenih nivoa katnih pomaka.

Mehanizam sloma zidnog ispuna uvijek je, manje-više, bila kombinacija nekoliko mehanizama sloma. To su bili dijagonalni slom zidnoga ispuna, stepeničasti posmični ili, pak, dijagonalni posmični slom. Zidni ispun izgrađen od porobetonskih blokova spojenih ljepilom imao je drugačiju strukturu, odnosno jaki mort i slab zidni element. Stoga je oblik pukotina bio bitno drugačiji od zidnoga ispuna od opečnih blokova.

Na osnovu svih obrađenih eksperimentalnih rezultata, utvrđivanje oštećenja zidnoga ispuna izvršeno je na osnovu relativnih katnih pomaka. Promatranjem razine oštećenja (pojavljivanjem pukotina u zidnom ispunu, odvajanje zidnog ispuna od ab okvira, ispadanjem zidnog ispuna, itd.) zidnoga ispuna u ovisnosti o nivou relativnog katnog pomaka, definirana su sljedeća područja relativnih katnih pomaka, gdje im je pridružen odgovarajući stupanj oštećenja: za  $IDR \leq 0,10\%$  imamo beznačajno oštećenje ( $1^0$ ); za  $0,10\% < IDR \leq 0,30\%$  imamo umjereno oštećenje ( $2^0$ ); za  $0,30\% < IDR \leq 0,50\%$  imamo srednje teško oštećenje ( $3^0$ ); za  $0,50\% < IDR \leq 1,00\%$  imamo teško oštećenje ( $4^0$ ); za  $IDR > 1,00\%$  imamo prekomjerno visok stupanja oštećenja ili rušenje ( $5^0$ ).

Analitički rezultati dobiveni su na osnovu postojećih istraživačkih modela i postupaka proračuna armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom (metodom zamjenjujuće dijagonale). Inicijalni analitički model dao je vrlo dobre rezultate u pogledu poprečne nosivosti, dok je prognoza očekivanih pomaka bila loša.

Numerički rezultati dobiveni su primjenom numeričkog makro-modela pomoću kojeg je modeliran zidni ispun (neelastični panel element). Ulazni podaci neophodni za proračun modela, dobiveni su usklađivanjem s modelima iz eksperimenata. Numerički rezultati korišteni su za analizu utjecaja ulaznih parametara na poprečnu nosivost, poprečnu krutost, histerezne energije i sile u dijagonalama zidnoga ispuna kod armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom. Nakon provedene kalibracije eksperimentalnih i numeričkih rezultata, možemo reći kako podešeni numerički modeli dobro opisuju ponašanje armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom od opečnih blokova i malo lošije opisuju ono sa zidnim ispunom od porobetonskih blokova, te se mogu koristiti i za daljnje analize. Najveće razlike kod usporedbe rezultata pojavljuju se kod malih nivoa katnih pomaka (do  $0,05\%$  IDR), povećanjem nivoa katnih pomaka razlika postaje zanemariva (manja od  $10\%$ ).

Dodatna parametarska analiza provedena je na tako podešenom numeričkom modelu. Promatrani su sljedeći parametri: geometrija armirano-betonskog okvira, geometrija tlačne dijagonale, čvrstoće dijagonale (zidnog ispunja), vertikalno opterećenje u stupovima, količine armature u stupovima, poprečni presjek stupova, broj polja, te način nanošenja horizontalnoga opterećenja. Promatranjem navedenih parametara ocijenjen je njihov utjecaj na ponašanje armirano-betonskoga okvira sa zidnim ispunom u pogledu: poprečne nosivosti, poprečne krutosti, sila u dijagonalama zidnoga ispunja i unutarnjih sila u stupovima okvira. Proširena parametarska analiza omogućila je generaliziranje zaključaka i iznalaženja praktičnog prijedloga metode proračuna za sustav „okvir+zid“. Kako su nelinearni proračuni još uvijek na razini akademije, ta metoda mora biti linearna uz uvažavanje uočenih nelinearnih ponašanja.

S ciljem primjene rezultata u svakodnevnoj inženjerskoj praksi, na osnovu rezultata eksperimenta i numeričkih analiza, predložena je metoda linearnog proračuna armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom. Metoda analizira armirano-betonski okvir sa zidnim ispunom kao sustav („okvir+zid“) i primjenjuje se za dimenzioniranje sustava. Ona se zasniva na modeliranju zidnoga ispunja kao tlačnih štapova (tlačne dijagonale) koji povezuju nasuprotne uglove armirano-betonskog okvira. Kontrola očekivanog ponašanja modela (demand vs. capacity) pri djelovanju potresa, provedena je primjenom N2 metode, tj. određivanjem očekivanog pomaka u nelinearnom statičkom području. Rezultati su pokazali kako uzimanje u obzir zidnoga ispunja ima veliko opravdanje. Zahtijevani pomaci su više od tri puta manji nego kod praznih okvira. Ovo se još, osim opisanim rezultatima, može potkrijepiti i uočavanjem određene uštede armature u okvirima sa zidnim ispunom. Kod predložene metode proračuna, preporuča se da se elementi ab okvira dimenzioniraju tako da oštećenje zidnog ispunja na svim etažama ne prelazi 0,50% relativnog međukatnog pomaka.

### 10.3. PREPORUKE

#### 10.3.1 Preporuke za armiranje stupova armirano-betonskog okvira

Kod numeričkog modeliranja armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom većih katnosti, uočeni su oblici pomaka koji ukazuju na moguću „meku etažu“. Zbog ovoga se daje preporuka o progušćenju poprečne armature takvih stupova cijelom visinom, a ne samo u blizini spoja s gredama. Progušćivanje poprečne armature u stupovima potrebno je izvesti na svim etažama (poljima), gdje je sila u tlačnoj dijagonali veća ili jednaka 70%-tnoj nosivosti tlačne dijagonale. Ovo je preporuka koju treba primjenjivati dok se ne istraži utjecaj zidnoga ispunja na poprečnu armaturu u stupovima armirano-betonskog okvira.

### 10.3.2 Preporuke za ograničenje međukatnih pomaka

Kako ne bi došlo do potpunog oštećenja zidnoga ispuna, odnosno njegovoga ispadanja, preporuča se ograničenje međukatnog pomaka od 0,50% za armirano-betonske okvire ispunjene zidnim ispunom (neovisno o katnosti). Naime, na osnovu provedenih eksperimentalnih ispitivanja u ovome radu, a i drugih istraživača koji su provodili slična eksperimentalna ispitivanja, potpuno oštećenje zidnoga ispuna događa se pri međukatnim pomacima jednakim ili većim od 1,0% (pri navedenom pomaku zidni ispun više ne sudjeluje u nosivosti sustava („okvir+zid“), tada horizontalne sile preuzima sam armirano-betonski okvir).

### 10.3.3 Preporuke za daljnji rad

Tijekom rada uočena su područja koja zahtijevaju daljnja istraživanja, te su preporuke za daljnji rad sljedeće:

- Potrebno je dodatno istraživanje zidnoga ispuna od porobetonskih blokova u pogledu njegovih materijalnih svojstava koja se dobivaju na osnovu elementa i ljepila kojim se izvodi zidanje takvih elemenata. Uočeno ponašanje teško se opisuje standardnim metodama za zidane zidove.
- Istraživanje utjecaja zidnog ispuna na slabo armirane armirano-betonske okvire.
- Istraživanje utjecaja različitih načina povezivanja okvira i zidnog ispuna s ciljem osiguranja duljeg kompozitnog djelovanja.
- Istraživanje graničnih stanja međudjelovanja zidnog ispuna i okvira (kutevi unutarnjeg trenja, kohezija, poprečna armatura u stupovima).
- Istraživanje mogućnosti smanjenja minimalne uzdužne armature u stupovima armirano-betonskog okvira, naročito armirano-betonskog okvira sa zidnim ispunom (koja sada iznosi 1% od površine poprečnog presjeka stupa) za područja nižeg seizmičkog intenziteta.
- Daljnje poboljšanje predložene metode proračuna armirano-betonskih okvira sa zidnim ispunom s ciljem projektiranja sukladno očekivanome ponašanju.



---

## LITERATURA

---

- [1] Angel, R, Abrams, D. and Shapiro, D, Uzarski, J, Webster, M. Behavior of reinforced concrete frames with masonry infills. Civil Engineering studies-structural research series no. 589. Department of Civil Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, March 1994.
- [2] Armin, B. Mehrabi. Experimental Evaluation of Masonry – Infilled RC Frames. Journal of Structural Engineering, March 1996.
- [3] Arshad, K. Hashmi and Alok Madan. Damage forecast for masonry infilled reinforced concrete framed buildings subjected to earthquakes in India. *Current science*, VOL. 94, NO. 1, 10 January 2008.
- [4] Brokken, S. T. Bertero, V. V. Studies on effects on infills in seismic resistant R/C construction. Report NO. EERC 81-12, October 1981.
- [5] Colangelo, F. Pseudo-dynamic seismic response of reinforced concrete frames infilled with non-structural brick masonry. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2005; 34:1219–1241.
- [6] Crisafulli, F.J. Seismic behavior of reinforced concrete structures with masonry infills. Doctoral Dissertation. 1997, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [7] Crisafulli, F.J., A.J. Carr. Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2007, 40 (2), 69-77.
- [8] Čaušević, M. *Dinamika konstrukcija-potresno inženjerstvo, aerodinamika, konstrukcijske euronorme, Golden marketing-Tehnička knjiga*, 2010.
- [9] Čaušević, M., Zahenter, E. Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema EN 1998-1:2004, *Građevinar*, 59 (2007) 9, 767-777.
- [10] Čaušević, M. *Dinamika konstrukcija – diskretni sustavi, Školska knjiga Zagreb*, 2005.
- [11] Čaušević, M. *Potresno inženjerstvo, Sveučilišni udžbenik, Školska knjiga Zagreb*, 2001.
- [12] Das, D. and Murty, C.V.R. Brick masonry infills in seismic design of RC frame buildings: Part 2 – Behaviour. *The Indian Concrete Journal*, August 2004.
- [13] Decanini, L., Mollaioli, F., Mura, A., Saragoni, R. Seismic performance of masonry infilled R/C frames. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada. August 1-6, 2004.
- [14] Didier Combescure, Pierre Pegon. Application of the local-to-global approach to the study of infilled frame structure under seismic loading. *Nuclear Engineering and Design* 196 (2000) 17-40.
- [15] Dolšek, M., Fajfar, P. The effect of masonry infills on the seismic response of a four storey reinforced concrete frame-a deterministic assessment. *Engineering Structures* (2008).
- [16] Dolšek, M., Fajfar, P. The effect of masonry infills on the seismic response of a four storey reinforced concrete frame-a probabilistic assessment. *Engineering Structures* (2008).
- [17] Dolšek, M., Fajfar, P. Simplified seismic assessment of infilled reinforced concrete frames. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.
- [18] Dolšek, M., Fajfar, P. Simplified non-linear seismic analysis of infilled reinforced concrete frames. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2005; 34:49-66.
- [19] Dolšek, M., Fajfar, P. Inelastic spectra for infilled reinforced concrete frames. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2004; 33:1395-1416.

- [20] Dowe, J. L. & Seah, C. K., 1989. Analysis of concrete masonry infilled steel frames subjected to inplane loads. Proceeding of the 5th Canadian Masonry Symposium, Vancouver, pp. 329-340.
- [21] Dukuze, A, Dawe, J. L. Inplane distortion of unreinforced masonry panels infilling RC frames. Seventh Canadian Masonry Symposium, McMaster University, Hamilton, Ontario. June 4-7, 1995.
- [22] Durrani, A. J. & Luo, Y. H., 1994. Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills. Report NCEER-94-0004, Proc. from the NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills, pp. 1-8.
- [23] Elkhoraibi, T and Mosalam, K. M. Pseudo-dynamic experiment on one-story RC structure with and without masonry infill. Proceedings of the 8<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering, April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA, Paper No. 1470
- [24] Eurocode 2: Design of concrete structures. EN 1992, CEN, Brussels; 2004.
- [25] Eurocode 6: Design of masonry structures. EN 1996, CEN, Brussels; 2005.
- [26] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1, CEN, Brussels; 2005.
- [27] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. EN 1998-3, CEN, Brussels; 2005.
- [28] Fajfar, P., Gašperšič, P. The M2 method for the seismic damage analysis of RC buildings. Earthquake engineering & structural dynamics. 1996; 25:31-46.
- [29] Fajfar, P., Fischinger, M., Isaković, T. Metoda procjene seizmičkog ponašanja zgrada i mostova, Građevinar, 52 (2000) 11, 663-671.
- [30] Fajfar, P. A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. Earthquake Spectra 2000; 16(3):573-92.
- [31] Federal Emergency management Agency (FEMA), Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, Basic Procedures Manual, ATC-43, FEMA 306, ATC, California, 1999.
- [32] Gazić, G., Kalman, T., Sigmund, V. Određivanje ponašanja i granične nosivosti okvira s ispunom. Zbornik radova Četvrtog susreta hrvatskog društva za mehaniku. Slavonski Brod: Hrvatsko društvo za mehaniku, 2011. 149-154.
- [33] Giselle, M. Fonseca, Roberto M. Silva, and Paulo B. Lourenço. THE BEHAVIOR OF TWO MASONRY INFILLED FRAMES: A NUMERICAL STUDY.
- [34] Harris, Harry G, Sabnis, Gajanan M. Modeling and Experimental Techniques, Second Edition, 1999 by CRC Press by LLC, Florida, US.
- [35] Han-Seon, Lee, Sung-Woo, Woo, Effect of masonry infills on seismic performance of a 3-storey R/C frame with non-seismic detailing, Earthquake Engng Struct. Dyn. 2002; 31:353–378 (DOI: 10.1002/eqe.112).
- [36] Hemant B. Kaushik, Durgesh C. Rai and Sudhir K. Jain. Code Approaches to Seismic Design of Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames:A State-of-the-Art Review. Earthquake Spectra, Volume22, No.4, pages 961–983, November 2006.
- [37] Holmes, M., 1961. Steel frames with brickwork and concrete infilling. ICE Proc., 19(4), pp. 473-478.
- [38] Imran, L, Aryanto, A. Behavior of Reinforced Concrete Frames In-Filled with Lightweight Materials Under Seismic Loads. Civil Engineering Dimension, Vol. 11, No. 2, September 2009; 69-77.

- [39] Kadir, M. R. A., 1974. The structural behaviour of masonry infill panels in framed structures. University of Edinburgh: PhD Thesis.
- [40] Kakaletsis, D.J, Karayannis, C.G. Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading, *Journal of Earthquake Engineering*, 12:197-221, 2008.
- [41] Kalman-Šipoš. T., Sigmund, V., Hadzima Nyarko, M. Earthquake performance of infilled frames using neural networks and experimental database. *Engineering Structures*. 51(2013); 113-127.
- [42] Kalman T., Sigmund V., Žarnić R. Evaluation of masonry panel models for nonlinear analysis of infilled r/c frames. Fourteenth european conference on earthquake engineering, Ohrid, Makedonija : MAEE, Macedonian Association for Earthquake Engineering, 2010. 309-1-309-8
- [43] Kalman, T., Sigmund, V. Seismic capacity of infilled frames using neural networks. 6th ICCSM Proceedings, Zagreb, Croatian Society of Mechanics, 2009.
- [44] Kalman, T., Sigmund, V. Prediction of behavior of the infilled r/c frames under lateral loads. *Modeling of Structures*. Mostar, BH : University of Mostar, 2008. 237-250.
- [45] Klinger, R. E. Bertero, V. V. Infilled frames in earthquake-resistant construction. Report NO. EERC 76-32, December 1976.
- [46] Khalid, M. Mosalam. Shake-Table Experiment on One- Story RC Structure With and Without Masonry Infill. NATO International Workshop on: Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction, Istanbul-Turkey, 30 May -1 June, 2005
- [47] Liauw, T. C. & Kwan, K. H., 1984. Nonlinear behaviour of non-integral infilled frames. *Comp. And Struct.*, Volume 18, pp. 551-560.
- [48] Lourenço, P. B., Alvarenga, R. C., Silva, R. M. VALIDATION OF A SIMPLIFIED MODEL FOR THE DESIGN OF MASONRY INFILLED FRAMES.
- [49] Magnes, G. and Pampanin, S. Seismic response of gravity-load design frames with masonry infill. 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004, Paper No. 4004.
- [50] Mainstone, R. J., 1974. Supplementary note on the stiffness and strength of infilled frames, Current Paper CP13/74. Buildig Research Establishment.
- [51] Mainstone, R. On the Stiffness and Strength of Infilled Frames. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Supplement*, Vol. 48, 1971; 57-90.
- [50] Markulak, Damir; Radić, Ivan; Sigmund, Vladimir. Cyclic testing of single bay steel frames with various types of masonry infill. *Engineering Structures*. 51(2013); 267-277.
- [52] Markulak, D., Sigmund, V., Radić, I. Modeliranje čeličnih okvira sa zidanim ispunom. *Građevinar*. 60 (2008) , 4; 317-326.
- [53] Matošević, Đ, Sigmund, V, Zovkić, J. Experimental Testing of Masonry and Masonry Piers. 6th ICCSM Proceedings, Zagreb : Croatian Society of Mechanics, 2009.
- [54] Mehrabi, A.B, Shing, P.B, Schuller, M, Noland, J. Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 122(3), 1996; 228-237.
- [55] Mitrović, S., Čaušević, M. Nelinearni statički seizmički proračun konstrukcija, *Građevinar*, 61 (2009) 6, 521-531.
- [56] Paulay, T., Priestley, M.J.N. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. J. Wiley and Sons, NY, 1992.

- [57] Penava, D., Sigmund, V. Nelinearna analiza horizontalno opterećenog armirano-betonskog okvira s ispunom, primjenom metode konačnih elemenata. Građevinski fakultet Osijek; 2010.
- [58] Penava, D., Butenweg C., Sigmund V. Osvrt na nelinearnu analizu horizontalno opterećenog okvira s ispunom primjenom metode konačnih elemenata. Zbornik radova Trećeg susreta Hrvatskog društva za mehaniku. Osijek : Hrvatsko društvo za mehaniku, 2010. 53-58
- [59] Penelis, G. G. & Kappos, A. J., 1997. Earthquake-resistant concrete structures. London: E & FN Spon.
- [60] Perera, R. Performance evaluation of masonry-infilled RC frames under cyclic loading based on damage mechanics. *Engineering Structures* 27 (2005) 1278–1288.
- [61] Sigmund, V., Zovkić, J., Sigmund, Z. Experimental Tests of R/C frames with Masonry infill. 14ECEE, Ohrid (Macedonia), 2010.
- [62] Sigmund, V., Matošević, Đ., Bošnjak-Klečina, M. Experimental tests of confined masonry walls. Fourteenth european conference on earthquake engineering. Ohrid, Makedonija: MAEE, Macedonian Association for Earthquake Engineering, 2010. 346-1-346-8
- [63] Sigmund, V., Zovkić, J., Matošević, Đ. Eksperimentalno ispitivanje omeđenog zida i a-b okvira sa zidanom ispunom. GNP 2010-Građevinarstvo-nauka i praksa, Zbornik radova, Knjiga 1. Podgorica, Crna Gora : Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, 2010. 153-158
- [64] Sorić, Z. Zidane konstrukcije I, 2. izd. vlast. nakl. Zagreb; 2004.
- [65] Stafford-Smith, B.S. Behavior of square infilled frames. *ASCE*. 1966;1(92): 381-403.
- [66] Stafford-Smith, B., Carter, C. A method of analysis for infilled frames. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*. 1969; 44:31-48.
- [67] Stavridis A. Analytical and Experimental Study of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames Infilled with Masonry Walls [disertacija]. University of California, San Diego; 2009.
- [68] Suyamburaja Arulselvan and K.Subramanian. Experimental Investigation on Three Dimensional RC Infilled Frame - RC Plane Frame Interactions With Slab for Seismic Resistance. *American Journal of Applied Sciences* 5 (4): 328-333, 2008.
- [69] Tassios, P., 1984. Masonry infill and RC walls (an invited state-of the art report). Warsaw (Poland), Centre for Building System, Research and Development.
- [70] Tomažević, M. Earthquake-Resistance Design of Masonry Buildings (Series on Innovation in Structures and Construction-Vol. 1). Imperial College Press, London, 1999.
- [71] Tomažević, M., Bosiljkov, V., Lutman, M. Masonry research for Eurocodes.
- [72] Tomičić, I. Betonske konstrukcije. DHGK, Zagreb, 1996.
- [73] Zovkić, J., Sigmund, V., Guljaš, I. Cyclic testing of a single bay reinforced concrete frames with various types of masonry infill. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 41 (2012), 14: 41-60.
- [74] Zovkić, J., Sigmund, V., Guljaš, I. Testing of R/C frames with masonry infill of various strength . 15th World Conference on Earthquake Engineering/IAEE (ur.). Lisboa, Portugal: International Association for Earthquake Engineering, 2012. WCEE2012\_2307-1-WCEE2012\_2307-10
- [75] Žarnić R., Gostić, S., Adam J. Crewe and Colin A. Taylor. Shaking table tests of 1:4 reduced-scale models of masonry infilled reinforced concrete frame buildings. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2001; 30:819-834