Ponašanje čeličnih okvirnih građevina sa zidanim ispunom pri djelovanju potresa

Radić, Ivan

Doctoral thesis / Disertacija

2012

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:133:587230

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

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

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

DOKTORSKI RAD

PONAŠANJE ČELIČNIH OKVIRNIH GRAĐEVINA SA ZIDANIM ISPUNOM PRI DJELOVANJU POTRESA

PODACI O AUTORU

Ime i prezime:	**dr.sc. Ivan Radić, dipl.ing.građ.**
Mjesto i godina rođenja:	Odžak, Republika Bosna i Hercegovina, 1982.
Diplomirao:	Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2006.
Zaposlen:	Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek

PODACI O DOKTORSKOM RADU:

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

POSTUPAK OCJENE I OBRANA:

Prijava teme: ožujak 2012.

Povjerenstvo za ocjenu:

Prof.dr.sc. Damir Markulak, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Građevinski fakultet Osijek, predsjednik

Prof.dr.sc. Ivica Džeba, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Građevinski fakultet Zagreb, član

Prof.dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Građevinski fakultet Osijek, član

Prof.dr.sc. Dragan Morić, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Građevinski fakultet Rijeka, član

Povjerenstvo za obranu:

Prof.dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Građevinski fakultet Osijek, predsjednik

Prof.dr.sc. Damir Markulak, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Građevinski fakultet Osijek, član i mentor

Prof.dr.sc. Ivica Džeba, dipl.ing.građ., redoviti profesor, Građevinski fakultet Zagreb, član

Mjesto i datum obrane: Građevinski fakultet Osijek, 20. prosinca 2012.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK

Doktorski rad

Ponašanje čeličnih okvirnih građevina sa zidanim ispunom pri djelovanju potresa

Ivan Radić

Osijek, 2012.

Mentor rada:

Prof.dr.sc. Damir Markulak, dipl.ing.građ.

Doktorski rad ima 425 stranice.

ŽIVOTOPIS

Ivan Radić rođen je 23. srpnja 1982. godine u Odžaku, Republika Bosna i Hercegovina. Maturirao je s odličnim uspjehom 2001. godine u Graditeljsko-geodetskoj školi Osijek. Iste je godine upisao sveučilišni dodiplomski studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku.
Diplomirao je 13. travnja 2006. godine stekavši visoku stručnu spremu te stručno zvanje diplomiranog inženjera građevinarstva.

Tijekom studiranja dobio je nekoliko priznanja, a ističu se Dekanova nagrada za najbolji uspjeh u studiranju, Nagrada Lions club Osijek za uspješno studiranje te Sveučilišna stipendija za izniman uspjeh na studiju.

Od srpnja 2006. godine zaposlen je na suradničkom mjestu asistenta na Građevinskom fakultetu Osijek. Na radnom mjestu asistenta obavlja poslove koji obuhvaćaju nastavnu, znanstveno-istraživačku i stručnu djelatnost.

Poslijediplomski doktorski studij upisao je 2007. godine na Građevinskom fakultetu Osijek. Iste godine, u sklopu doktorskog studija, proveo je mjesec dana na Građevinskom fakultetu u Ljubljani, gdje se usavršavao u primjeni numeričkog modeliranja pri proračunu konstrukcija.
Od 2007. godine je kao suradnik uključen u znanstveni projekt Ministarstva znanosti obrazovanja i športa, "Seizmički proračun okvirnih konstrukcija s ispunom", voditelj projekta prof.dr.sc. Vladimir Sigmund.

ZAHVALA

Istraživanja sadržana u ovoj disertaciji provedena su u sklopu znanstvenog projekta *Seizmički proračun okvirnih konstrukcija s ispunom* koji je financiralo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske, kojem se na ovaj način zahvaljujem.

Posebnu zahvalnost želim izraziti svom mentoru, prof.dr.sc. Damiru Markulaku, na trudu i vremenu utrošenom pri vođenju izrade ove disertacije. Zahvaljujem mu se na nesebičnom prenošenju znanja, dobronamjernim savjetima, bezrezervnoj podršci, razumijevanju i strpljenju.

Najsrdačnije zahvaljujem prof.dr.sc. Vladimiru Sigmundu, glavnom istraživaču i voditelju spomenutog znanstvenog projekta, na smjernicama i savjetima koji su bili od velike pomoći kako pri izradi same disertacije tako i prilikom provedbe laboratorijskih istraživanja.

Upućujem zahvale zaposlenicima Laboratorija za materijale i eksperimentalnu mehaniku Građevinskog fakulteta u Osijeku, kao i svim sudionicima istraživanja na znanstvenom projektu.

Veliku zahvalnost i poštovanje dugujem i svojim radnim drugovima: Tihomiru Dokšanoviću, Hrvoju Draganiću i Goranu Gaziću. Dragi prijatelji, hvala vam što ste mi bili velika moralna i stručno-tehnička podrška. Bez vas i vašeg truda i zalaganja dovršetak ovog rada ne bi bio moguć.

Zahvaljujem i ostalim kolegama i suradnicima koji ovdje nisu pojedinačno spomenuti, a pomogli su na bilo koji način.

Na kraju, zahvaljujem svojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci i razumijevanju. Hvala vam što ste moje najteže trenutke proživljavali zajedno samnom.

Doktorski rad posvećujem svojim roditeljima.

SAŽETAK

Rad obrađuje problematiku konstruiranja i dimenzioniranja čeličnih okvira sa zidanim ispunom. Ovakve su konstrukcije relativno česte, a značajnija istraživanja njihovoga ponašanja provode se od druge polovice prošloga stoljeća. Unatoč brojnim istraživanjima, još uvijek, postoji problematika procjene ponašanja konstrukcija ove vrste, osobito pri značajnijim horizontalnim djelovanjima jer zbog složenosti konstrukcijskog sustava ne postoji dovoljno pouzdana metoda procjene njezinoga ponašanja koja bi bila ugrađena u konstrukcijske norme, kao što je slučaj kod drugih uobičajenijih i jednostavnijih konstrukcija.

U radu su prezentirani rezultati vlastitih provedenih istraživanja ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom. Disertacijom su obuhvaćena eksperimentalna istraživanja mehaničkih karakteristika zidnih elemenata, zidanog ispuna i čeličnog materijala, a dobiveni podatci korišteni su pri numeričkim simulacijama ponašanja jednokatnih čeličnih okvira sa zidanim ispunom izloženih horizontalnim djelovanjima. Pri istraživanju čeličnih okvira sa zidanim ispunom provedeno je ispitivanje triju serija sa po tri uzorka, uz dodatno ispitivanje i čeličnoga okvira bez ispuna, s ciljem utvrđivanja doprinosa pojedine vrste zidanoga ispuna na nosivost i krutost sustava. U prvoj seriji ispitano je ponašanje čeličnih okvira sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova, u drugoj seriji ispun je bio od porobetonskih blokova, a potom je slijedilo originalno rješenje u kojem je ispun kombiniran od glinenih i porobetonskih blokova. Osnovna ideja ovoga pristupa je kako „mekši“ elementi konstrukcije (porobetonski blokovi), koji povezuju okvir i zidani glineni ispun, u sredini otkazuju ranije, te na taj način seizmički izoliraju zidani ispun od okvira radi što dužega očuvanja duktilnog ponašanja samoga čeličnoga okvira. Taj je način ponašanja povoljniji prilikom preuzimanja velikih opterećenja pri potresu, budući da prvobitni pozitivni doprinos zidanog ispuna većoj krutosti i otpornosti konstrukcije, poslije njegova otkazivanja, uzrokuje značajnije smanjenje preostale duktilnosti čeličnoga okvira.

Prezentirani sustav kombiniranih zidnih elemenata različitih čvrstoća ne uzrokuje značajnije promjene u tehnologiji izvedbe, ne zahtjeva posebne alate i sredstva za ugradnju, a može značajno unaprijediti ponašanje ove vrste konstrukcija pri potresnome opterećenju. Smatra se kako takvo rješenje može biti racionalno s obzirom na relativno čestu primjenu zidanog ispuna u okvirnim konstrukcijama.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata istražena je primjenjivost različitih numeričkih modela pri opisivanju ponašanja ovakvih tipova konstrukcija. Izvršena je kalibracija numeričkih modela prema dobivenim eksperimentalnim rezultatima. Također je provedena i opsežna parametarska analiza s ciljem istraživanja

važnosti i utjecaja pojedinih parametara u konstruiranju ovakvih konstrukcija. Urađen je i numerički primjer u kojem je analizirana višeetažna okvirna čelična konstrukcija, sa i bez zidanog ispuna, kako bi se odredio utjecaj različitih vrsta zidanih ispuna pri ponašanju ovakvih konstrukcija izloženih horizontalnim opterećenjima.

Znanstveni doprinos ovoga rada je daljnje razjašnjenje fenomena ponašanja ovakvih konstrukcija, te prijedlog konstrukcijski jednostavnije metode za preveniranje nepovoljne interakcije zidanog ispuna s čeličnim okvirom pri velikim horizontalnim opterećenjima, a kroz kontrolu oštećenja pojedinih elemenata konstrukcije. Takva bi metodologija mogla biti primjenjiva u inženjerskoj praksi pri postupku proračuna i analize seizmičkog odgovora za optimalno projektiranje i procjenu ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunima u seizmičkim i neseizmičkim područjima.

Znanstveni doprinos rada očituje se i u formiranju baze eksperimentalnih rezultata kao važnoga izvora informacija na temelju kojega se dalje mogu istraživati pojedini fenomeni ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom.

Važan dio rada predstavlja kritička ocjena primjenjivosti različitih vrsta modela za numeričku analizu sustava okvira sa zidanim ispunom, kao i sistematizacija utjecajnih parametara na ponašanje ovakvih konstrukcija kroz provedenu parametarsku analizu.

Na temelju rezultata ovoga rada predložena je odgovarajuća metoda za praktično projektiranje čeličnih okvirnih konstrukcija s kombiniranim sustavom zidanoga ispuna.

ABSTRACT

This thesis presents difficulties related to the design and execution of steel frames with masonry infill. These types of structures are relatively often and significant research on their behavior was conducted from the second half of the past century. Despite numerous investigations related to the evaluation of behavior that these structures exhibit under significant horizontal loads, because of their complexity there is still no applicable method for their reliable assessment, as it is the case with simpler constructions.

Results of original experimental investigation of steel frames with masonry infill are presented and discussed. This investigation included determination of mechanical characteristics of materials used in such a composite system (masonry and steel), and obtained results were used for calibration of infilled steel frame subjected to horizontal loads numerical models. Experimental research of steel frames with masonry infill was carried out through three series that each had three samples which differed by different types of masonry infill, and on a frame without infill in order to determine the contribution that infill has to strength and stiffness of the composite system. First series samples enabled the investigation of steel frames with hollow clay bricks as infill, second sample had lightweight autoclaved aerated concrete (AAC) blocks as infill, and third had infill comprised of both hollow clay and AAC masonry elements. The principle behind the idea of combining infill elements is that „softer“ components (AAC blocks), which link the steel frame columns with hollow clay bricks, fail first during seismic loading, thus enabling independent movement of the steel frame in order to utilize its ductility. This behavior is favorable during seismic loading due to the fact that masonry infill provides initial positive contributions to the strength and stiffness of the whole system, but after its failure significantly reduces residual ductility of the steel frame.

Presented system with combined masonry elements, of different mechanical properties, can significantly improve the behavior of infilled frames under earthquake loading, and at the same time does not significantly change the building technology, requires no special installation tools and no additional resources. As such, its use can be a rational solution when it comes to seismic isolation of masonry infill from steel frames.

On the basis of experimental results it was possible to investigate the applicability of various numerical models when it comes to prediction of such systems behavior. Test results were also used for the calibration of numerical models that enabled implementation of an extensive parametric analysis with the objective of determining the influence and importance that certain parameters have in such composite

systems. Contribution of various masonry elements to the strength and stiffness of infilled steel frames loaded horizontally was analyzed through a numerical example of a multistory, multi-bay construction.

Scientific contribution of this thesis is further clarification of behavior that steel frames with masonry infill exhibit under horizontal loads, and a proposal of a simple construction method which enables the prevention of adverse interaction between masonry infill and steel frame through damage control of specific areas of the infill. Such a methodology could be applied in engineering practice for optimal design and evaluation of behavior of steel frames with masonry infill in seismic and non-seismic areas.

Further scientific contribution is reflected through forming of an experimental database, which can be a valuable source of information for additional research in this field.

An important part of this thesis is a critical review on the possibilities of different models for numerical analysis of steel frames with masonry infill, as well as systematization of influence parameters conducted through extensive parametric study.

Based on results acquired through this paper a new method of practical design of steel frames with masonry infill that is consisted of different elements is presented.

SADRŽAJ

PODACI O AUTORU, RADU, OCJENI I OBRANI DOKTORSKOG RADA……..... II
NASLOVNI LIST..... III
MENTOR I OPSEG DOKTORSKOG RADA..... IV
AUTOROV KRATKI ŽIVOTOPIS..... V
ZAHVALE..... VI
SAŽETAK..... VII
ABSTRACT..... IX
SADRŽAJ……... XI
POPIS OZNAKA..... XV

1. UVOD 1
1.1. Općenito 1
1.2. Predmet i ciljevi istraživanja 2
1.3. Očekivani izvorni znanstveni doprinos..... 3

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PONAŠANJA OKVIRA SA ZIDANIM ISPUNOM..... 5
2.1. Istraživanja ponašanja okvira sa zidanim ispunom..... 5
2.2. Rekapitulacija dosadašnjih istraživanja..... 17

3. PREGLED NORMI ZA ISPITIVANJE ZIDNIH ELEMENATA, MORTA I ZIDNIH PRIZMI..... 22
3.1. Zidni elementi..... 22
3.1.1. Vrste i grupe zidnih elemenata..... 22
3.1.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata..... 24
3.2. Mort..... 27
3.2.1. Vrste mortova..... 27
3.2.2. Ispitivanje tlačne i vlačne čvrstoće morta..... 28
3.3. Zidne prizme..... 30
3.3.1. Eksperimentalno određivanje tlačne čvrstoće ziđa..... 30
3.3.2. Određivanje tlačne čvrstoće ziđa prema EN 1996..... 33
3.3.3. Eksperimentalno određivanje posmične čvrstoće ziđa..... 35
3.3.4. Određivanje posmične čvrstoće ziđa prema EN 1996..... 38
3.3.5. Vlačna čvrstoća ziđa..... 40

4. PROVEDENA LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA 42
4.1. Uvod 42
4.2. Ispitivanje zidnih elemenata 44
4.2.1. Šuplji glineni zidni elementi 44
4.2.2. Zidni elementi od porobetona 45
4.3. Ispitivanje cementno-vapnenog morta i Ytong ljepila 48
4.4. Ispitivanje osnovnog materijala čeličnih okvira 50
4.5. Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih prizmi 53
4.5.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće u vertikalnom smjeru 53
4.5.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće ziđa od glinenih blokova u horizontalnom smjeru 55
4.6. Ispitivanje posmične čvrstoće zidnih prizmi 56
4.7. Ispitivanje vlačne čvrstoće zidnih prizmi 59
4.8. Ispitivanje čeličnih okvira sa zidanim ispunom 61
4.8.1. Postrojenje za ispitivanje 62
4.8.2. Ležajevi 63
4.8.3. Unos opterećenja 64
4.8.4. Geometrijske karakteristike čeličnih okvira 65
4.8.5. Mjereni parametri tijekom ispitivanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom 67
4.8.6. Rezultati ispitivanja okvira sa zidanim ispunom 71
4.8.7. Sumarni pregled rezultata ispitivanja 90
4.9. Komentar dobivenih rezultata 100

5. NUMERIČKO MODELIRANJE OKVIRA SA ZIDANIM ISPUNOM 103
5.1. Uvod 103
5.2. Modeliranje zidanog ispuna zamjenskim dijagonalama 104
5.2.1. Modeliranje zidanog ispuna jednom dijagonalom 104
5.2.1.1. Čelični okviri s ispunom od šupljih glinenih blokova 108
5.2.1.2. Čelični okviri s ispunom od porobetonskih blokova 112
5.2.1.3. Čelični okviri s kombiniranim ispunom 115
5.2.1.4. Zaključno o modelima s jednom zamjenskom dijagonalom 118
5.2.2. Modeliranje zidanog ispuna s tri dijagonale 119
5.2.2.1. Čelični okviri s ispunom od šupljih glinenih blokova 123
5.2.2.2. Čelični okviri s ispunom od porobetonskih blokova 128
5.2.2.3. Čelični okviri s kombiniranim ispunom 131
5.2.2.4. Zaključno o modelima s tri zamjenske dijagonale 134
5.3. Modeliranje zidanog ispuna makro-elementom 136
5.3.1. Model zidanog ispuna - neelastični panel element 136
5.3.1.1. Definiranje ponašanja zidanog ispuna pri djelovanju posmika – „ispun_posmik“ 139
5.3.1.2. Definiranje ponašanja zidanog ispuna u dijagonalnom smjeru – „ispun_dijagonala“ 141
5.3.2. Neelastični elementi okvira – infrmDB, infrmFB 145

5.3.3. Rezultati proračuna na modelima s makro-elementom zidanog ispuna....146
5.3.3.1. Čelični okviri s ispunom od šupljih glinenih blokova....147
5.3.3.2. Čelični okviri s ispunom od porobetonskih blokova....151
5.3.3.3. Čelični okviri s kombiniranim ispunom....154
5.3.3.4. Zaključno o modelima izrađenim u SeismoStruct-u....156
5.4. Modeliranje čeličnih okvira sa zidanim ispunom metodom konačnih elemenata....158
5.4.1. Koncept ponašanja modela materijala SBETA....158
5.4.1.1. Veza naprezanje-deformacija SBETA modela....159
5.4.1.1.1. Ekvivalentna jednoosna zakonitost....159
5.4.1.1.2. Vlak prije raspucavanja....160
5.4.1.1.3. Vlak nakon raspucavanja....160
5.4.1.1.4. Tlak prije maksimalnog naprezanja....163
5.4.1.1.5. Tlak nakon maksimalnog naprezanja....164
5.4.2. Model ponašanja kontaktnog elementa....165
5.4.3. Rezultati proračuna metodom konačnih elemenata....169
5.4.3.1. Čelični okviri s ispunom od šupljih glinenih blokova....171
5.4.3.2. Čelični okviri s ispunom od porobetonskih blokova....178
5.4.3.3. Čelični okviri s kombiniranim zidanim ispunom....187
5.4.3.4. Zaključno o modelima izrađenim u ATENI 2D....195
5.5. Komentar rezultata....197

6. PARAMETARSKA ANALIZA....200
6.1. Provedba parametarske analize....200
6.2. Rezultati parametarske analize....208
6.2.1. Razina uzdužne sile u stupovima čeličnog okvira....208
6.2.2. Čelični okviri s glinenim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira, broja raspona, vrste priključka i kvalitete čeličnog materijala....209
6.2.3. Čelični okviri s porobetonskim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira, broja raspona, vrste priključka i kvalitete čeličnog materijala....217
6.2.4. Čelični okviri s kombiniranim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira, broja raspona, vrste priključka i kvalitete čeličnog materijala....224
6.2.5. Čelični okviri sa zidanim ispunom - varijacija vrste ispuna....233
6.2.6. Čelični okviri sa zidanim ispunom - varijacija debljine oslabljenja i čvrstoća porobetonskih elemenata u kombiniranom ispunu....239
6.2.7. Čelični okviri sa zidanim ispunom – varijacija načina povezivanja čeličnog okvira i zidanog ispuna....242
6.3. Komentar rezultata....244

7. NUMERIČKI PRIMJER – PRORAČUN I MODELIRANJE VIŠEETAŽNE ČELIČNE KONSTRUKCIJE SA ZIDANIM ISPUNOM.....247
7.1. Uvod.....247
7.2. Opis modela konstrukcije.....247
7.3. Rezultati proračuna.....252
7.4. Prijedlog metode proračuna čeličnih konstrukcija s kombiniranim zidanim ispunom.....263
7.5. Zaključno o numeričkom primjeru višeetažne čelične konstrukcije sa zidanim ispunima.....264

8. IDEALIZACIJA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA.....266
8.1. Uvod.....266
8.2. Idealizacija eksperimentalnih rezultata bi-linearnom avelopom nosivosti.....266

9. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJE ISTRAŽIVANJE.....271

LITERATURA.....277
PRILOG A - REZULTATI PARAMETARSKE ANALIZE.....282
PRILOG B – DISIPACIJA ENERGIJE ISPITIVANIH OKVIRA S ISPUNOM.....351
PRILOG C – OPTEREĆIVANJE OKVIRA S ISPUNOM PRILIKOM ISPITIVANJA.....365
PRILOG D – PRORAČUN NOSIVOSTI PROSTORNE ČELIČNE KONSTRUKCIJE.....368
POPIS SLIKA.....393
POPIS TABLICA.....404

POPIS OZNAKA

Latinična slova

A_1 - površina dijagonale 1

A_1 - površina dijagonale 1

A_2 - površina dijagonale 2

A_i - opterećeni poprečni presjek i-tog uzorka ziđa

A_m - površina presjeka zida

b - širina prizme na crti pukotine

b_w - širina ekvivalentne dijagonale

c - kohezija

c_1 - konstanta funkcije širenja pukotine

c_2 - konstanta funkcije širenja pukotine

c_3 - deformacija

d - debljina (visina) prizme na crti pukotine

$\boldsymbol{D}_c$ - matrica materijala

d_m - duljina dijagonale panela

$\Delta\upsilon$ - normalna komponenta relativnog pomaka kontaktnog elementa

$\Delta\upsilon_\varepsilon$ - elastična komponenta relativnog pomaka kontakta

$\Delta\upsilon_{\varepsilon\theta}{}^{\phi}$ - ekvivalentni nelinearni relativni pomak kontakta

$\Delta\varpi_1$ - posmična komponenta relativnog pomaka kontaktnog elementa u smjeru 1

$\Delta\varpi_2$ - posmična komponenta relativnog pomaka kontaktnog elementa u smjeru 2

E - modul elastičnosti

E_0 - početni modul elastičnosti

E_c - sekantni modul elastičnosti pri vršnom naprezanju

E_{ci} - modul elastičnosti iz vlačnog testa

$E_c{}^s$ - sekantni modul elastičnosti

$E_c{}^t$ - tangentni modul elastičnosti

E_d - modul elastičnosti omekšanja

E_{fe} - modul elastičnosti materijala okvira

E_i - modul elastičnosti i-tog uzorka ziđa

E_{me} - modul elastičnosti zidanog ispuna

E_{min}^t - minimalna vrijednost tangentnog modula elastičnosti

f' - srednja vrijednost tlačne čvrstoće ziđa

f_c - tlačna čvrstoća

f'^{ef}_c - efektivno tlačna čvrstoća betona

f'_t - vlačna čvrstoća SBETA modela materijala

f'^{ef}_t - efektivno vlačna čvrstoća SBETA modela materijala

f_b - normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa

$f_{c,h,mu,i}$ - horizontalna tlačna čvrstoća zidnog elementa

$f_{c,v,mu,i}$ - vertikalna tlačna čvrstoća zidnog elementa

f_i - tlačna čvrstoća pojedinog uzorka ziđa

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

f_k - karakteristična tlačna čvrstoća uzorka ziđa

f_m - srednja tlačna čvrstoća morta

f'_{m90} - tlačna čvrstoća zidanoga ispuna u horizontalnom smjeru

f_{md} - proračunska tlačna čvrstoća morta

f_{mt} - vlačna čvrstoća morta

f_{pi} - normalno naprezanje pri ispitivanju posmične čvrstoće ziđa

f_t - vlačna čvrstoća kontaktne zone

$f_{t,mu,i}$ - vlačna čvrstoća zidnog elementa

f_{v0} - posmična čvrstoća ziđa bez normalnog naprezanja

f_{v0k} - karakteristična posmična čvrstoća ziđa bez normalnog naprezanja

f_{v0k} - karakteristična posmična čvrstoća ziđa

f_{vk} - karakteristična posmična čvrstoća ziđa

f'_w - tlačna otpornost ziđa

f_{ws} - posmična otpornost uslijed dijagonalnog tlaka

f_{wu} - otpornost na klizajući posmik

G - posmični modul elastičnosti

G_f - energija loma

H - horizontalna sila pri vlačnom slomu

h_{col} - visina stupa okvira

h_{inf} - visina zidanog ispuna

h_s - visina uzorka ziđa

h_u - visina zidnog elementa

h_z - duljina kontakta između okvira i panela

I_{col} - moment inercije stupa okvira

K - konstanta za proračun karakteristične tlačne čvrstoće ziđa

k - omjer najvećeg i prosječnog posmičnog naprezanja

k - parametar oblika

K_{nn} - početna normalna krutost kontaktnih elemenata

K_{nn}^{min} - minimalna vrijednost normalne krutosti kontaktnih elemenata

K_{tt} - početna posmična krutost kontaktnih elemenata

K_{tt}^{min} - minimalna vrijednost posmične krutosti kontaktnih elemenata

l - udaljenost između osi ležajnih valjaka

L - duljina zida

L'_d - zona pukotine

l_s - duljina uzorka ziđa

l_u - duljina zidnog elementa

N - stvarno vertikalno opterećenje

P - najveća koncentrirana sila pri ispitivanju morta [N]

r_{inf} - duljina zamjenske dijagonale

s_1 - naprezanje u točki loma vlačnog i posmičnog zakona omekšavanja

t - debljina zida

t - debljina kontaktne zone

t_{inf} - debljina zidanog ispuna

U_m - pomak pri maksimalnoj posmičnoj čvrstoći

U_p - pomak pri rezidualnoj posmičnoj čvrstoći

U_y - pomak pri posmičnoj čvrstoći u trenutku popuštanja

v_1 - širina pukotine u točki loma vlačnog i posmičnog zakona omekšavanja

V_m - maksimalna posmična čvrstoća

V_p - rezidualna posmična čvrstoća

V_y - posmična čvrstoća u trenutku popuštanja

w - širina pukotine

w_c - širina pukotine pri kojoj dolazi do potpunog iščezavanja naprezanja

w_d - plastična deformacija

x - normalizirana deformacija

Δu_f - neelastična komponenta relativnog pomaka kontakta

Δv_{fi} - neelastična komponenta relativnog pomaka kontakta

Δv_i - elastična komponenta relativnog pomaka kontakta

Grčka slova

α - kut unutarnjeg trenja

α_{ch} - faktor infleksije deformacije

α_k - karakteristični kut unutarnjeg trenja

α_{re} - faktor deformacije ponovnog opterećenja

α_s - faktor redukcije posmika

β_a - faktor deformacija potpunog rasterećenja

β_{ch} - faktor infleksije naprezanja

γ_{plr} - faktor krutosti pri nultom naprezanju

γ_{plu} - faktor krutosti ponovnog opterećenja

γ_{un} - faktor krutosti početnog rasterećenja

δ - koeficijenta oblika

ε - deformacija

ε_1 - deformacija umanjenja površine dijagonale

ε_2 - deformacija preostale površine dijagonale

ε_c - deformacija pri vršnom naprezanju f'^{ef}_c

ε_{cl} - deformacija zatvaranja pukotina

ε^{eq} - ekvivalentna jednoosna deformacija

ε_i - relativna deformacija i-tog uzorka ziđa pri ispitivanju na tlak

ε_{ult} - granična deformacija

ε_{x1} - faktor krutosti plastičnog rasterećenja

ε_{x2} - faktor deformacije ponavljajućeg ciklusa

θ - kut nagiba zamjenske dijagonale

σ - normalno naprezanje

σ_0 prosječno tlačno naprezanje

σ_c tlačno naprezanje na kontaktnom elementu

σ_c^{ef} - efektivno tlačno naprezanje betona

σ_{ci} naprezanje u vlačnom testu

σ_v - okomito naprezanje u panelu uslijed gravitacijskih opterećenja

τ - posmično naprezanje

τ_0 početna posmična čvrstoća

τ_1 - kontaktno posmično naprezanje u smjeru 1

τ_2 kontaktno posmično naprezanje u smjeru 2

1. UVOD

1.1. Općenito

Okviri sa zidanim ispunom kompozitne su konstrukcije čiji osnovni elementi – okviri i zidani ispun, ukoliko nisu odvojeni posebnim konstrukcijskim mjerama, interaktivno djeluju pri aktiviranju vanjskoga opterećenja. Ovakvi sustavi uobičajena su konstrukcijska rješenja kod gradnje zgrada, a pri praktičnim proračunima još uvijek se često kao nosivi sustav uzima sam okvir, dok se ispun smatra nenosivim, iako je već poznat značajan doprinos ispuna pri povećanju nosivosti i krutosti sustava. Povećanje nosivosti na horizontalne sile okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom važna je karakteristika koju treba uzeti u obzir pri proračunima ovakvih konstrukcija, no zbog složenoga funkcioniranja ovoga sustava vrlo je teško jednostavnijim modelima s preciznošću procijeniti njegovo ponašanje. Posebno je izražen problem procjene odgovora u neelastičnom području te ponašanja u uvjetima seizmičkih opterećenja, gdje je interakcija dijelova kompozitnoga sustava naročito naglašena. Problem se pojavljuje kod procjene utjecaja ispuna na «glavni» konstrukcijski sustav – okvir, a koji može biti i povoljan i nepovoljan, što ovisi o mnogim parametrima. Stoga, većina današnjih propisa još uvijek ide u smjeru izdvajanja «glavnoga» okvirnog sustava iz ove kompozitne konstrukcije te istovremenoga zanemarivanja nosivosti zidanog ispuna, koji se pak, samo uračunava u vlastitu težinu objekta. Nedostatak ovoga pristupa je što takve pretpostavke ne moraju uvijek biti na strani sigurnosti, odnosno zidani ispun može bitno promijeniti predviđeni odgovor okvirnoga sustava promatranog izdvojeno.

Kod čeličnih okvira s ispunom općenito je primijećeno kako se djelovanjem ispuna izvorno izrazito fleksijsko ponašanje čeličnih okvira može promijeniti tako da dolazi do povećanja uzdužnih sila, a smanjenja momenata savijanja te je mehanizam prijenosa sila, zbog aktiviranja tlačnih dijagonala u zidanome ispunu, postao sličniji rešetkastome sustavu. Te velike tlačne sile u dijagonalnome smjeru ispuna izlažu priključke čeličnih okvira znatnijem vlačnom naprezanju pa se u priključcima mogu pojaviti nepovoljna stanja naprezanja zbog „efekta poluge“, stoga ovakav način ponašanja može imati ozbiljnije posljedice za konstrukciju.

Stoga su se u suvremenim pristupima, koji obuhvaćaju gore spomenute specifičnosti ponašanja kompozitnog sustava čelični okvir-zidani ispun, posebno za slučaj potresnih opterećenja, iskristalizirala dva oprječna principa kojima se nastoji jasnije predočiti ponašanje sustava:

- konstrukcijskim mjerama izvode se **ojačanja zidanoga** ispuna s ciljem *preuzimanja većih sila i bolje interakcije* s okvirnom konstrukcijom (npr. betoniranjem dijagonalnih rubova zidanog ispuna ili nanošenjem tankoga sloja betona preko zidanoga ispuna);
- konstrukcijskim mjerama nastoji se **ograničiti zajedničko djelovanje** okvira i zidanog ispuna, što dovodi do *smanjenja sila u samome okviru i manjega oštećenja zidanog ispuna*.

Proračunski najjednostavniji način kako bi se uzeo u obzir utjecaj zidanog ispuna na ponašanje okvira je modeliranje ispuna pomoću zamjenskih dijagonala, dok složeniji modeli uključuju makro (zidani ispun modelira se jednim elementom) i mikro (zidani ispun modelira se kao skupina zidnih elemenata povezanih kontaktnim elementima) modeliranje.

1.2. Predmet i ciljevi istraživanja

Predmet ovoga rada istraživanje je ponašanja čeličnih okvirnih građevina sa zidanim ispunom izloženih horizontalnom opterećenju - potresu. Za ovakav tip konstrukcija još uvijek ne postoje detaljnija pravila za proračun u suvremenim propisima [34], te je zbog toga i odabran za istraživanje. Istraživački rad podijeljen je na tri dijela:

- pregled prethodnih istraživanja na ovome području,
- eksperimentalni dio,
- numerički dio (izrada i kalibriranje odgovarajućih proračunskih modela za opisivanje ponašanja predmetnih konstrukcija, te provedba parametarske analize).

Vlastita eksperimentalna istraživanja bila su podijeljena na dva dijela: ispitivanje komponenti zidanog ispuna (ispitivanje mehaničkih karakteristika zidnih elemenata, morta, kvalitete čeličnog materijala) te ispitivanje samoga sustava zidanog ispuna. Izrađen je niz modela čeličnih okvira (jedno polje – jedan kat), u mjerilu 1:2, koji su se opterećivali horizontalnom cikličkom silom u visini grede okvira. Eksperimentalno je istraženo ponašanje samoga čeličnog okvira bez ispuna i tri serije od po tri čelična okvirna sustava sa zidanim ispunom:

- čelični okviri sa zidanim ispunom od glinenih šupljih blokova (OG-i),
- čelični okviri s "Ytong" zidanim ispunom od porobetonskih blokova (OY-i),
- čelični okviri s kombiniranom ispunom od šupljih glinenih blokova i "Ytong" porobetonskih blokova kao inovativni sustav (OGY-i).

Prilikom pripreme za ispitivanja definirani su najvažniji indikatori pomoću kojih će se utvrditi obilježja ponašanja kompozitnoga sustava. Istraživanjima su se nastojali razlučiti povoljni i nepovoljni učinci zidanoga ispuna na ponašanje čeličnih okvira, a u skladu s time pokušati i iskoristiti uočene povoljne učinke uz istovremeno smanjivanje ili isključivanje nepovoljnih. Na ovaj način pokušalo se ostvariti ciljano/željeno ponašanje čeličnih okvira sa zidanim ispunom pri potresu i drugim horizontalnim opterećenjima (seizmičko inženjerstvo sukladno očekivanom odzivu konstrukcije).

Na osnovu eksperimentalnih rezultata izvršena je kalibracija nekoliko jednostavnijih i složenijih numeričkih modela te je istražena njihova primjenjivost s ciljem što vjernijeg prezentiranja ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom. Provedena je i parametarska analiza u kojoj su varirani najvažniji parametri koji utječu na nosivost okvira sa zidanim ispunom, a na numeričkom primjeru višekatne čelične zgrade sa zidanim ispunom, ilustrirana je njihova primjena.

1.3. Očekivani izvorni znanstveni doprinos

Iako u svijetu postoji popriličan broj istraživanja koja su se bavila okvirnim konstrukcijama sa zidanim ispunom, istraživanja prezentirana u ovome radu, trebala bi proširiti postojeće spoznaje o složenom ponašanju ovih kompozitnih konstrukcija, s posebnim naglaskom na prijedlog konstrukcijski jednostavne metode, kojom je moguće spriječiti nepovoljne efekte koji se mogu pojaviti interakcijom zidanog ispuna s čeličnim okvirom pri velikim horizontalnim opterećenjima. Metoda se zasniva na kontroli oštećenja pojedinih konstrukcijskih elemenata, a budući da ne komplicira samu izradu konstrukcije - potencijalno je primjenjiva u inženjerskoj praksi pri postupku proračuna i analizi seizmičkog odgovora za optimalno projektiranje i procjenu ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom.

U radu su korištene različite metode modeliranja čeličnih okvira sa zidanim ispunom pa se znanstveni doprinos iskazuje i u daljnjem produbljivanju saznanja vezanih za numeričko modeliranje ovakvoga tipa konstrukcija koje je vrlo složeno, pri čemu treba istaknuti važnost kalibriranja numeričkih modela vlastitim i originalno provedenim eksperimentalnim ispitivanjima. Osim toga, kroz rezultate dobivene različitim načinima modeliranja utjecaja ispuna, moguće je kvantitativno ocijeniti primjenjivost pojedinog načina modeliranja.

Rezultati dobiveni eksperimentalnim ispitivanjima mogu poslužiti za oblikovanje baze podataka koja se potom može koristiti u svrhe raznih korekcija i kalibracija numeričkih modela, ali i za razne probabilističke

procjene sličnih sustava. Takvih je baza premalo pa je svaki doprinos u ovome smjeru značajan za struku i znanost, a ujedno predstavlja i poticaj znanstvenicima koji žele proširiti svoja saznanja u ovome području.

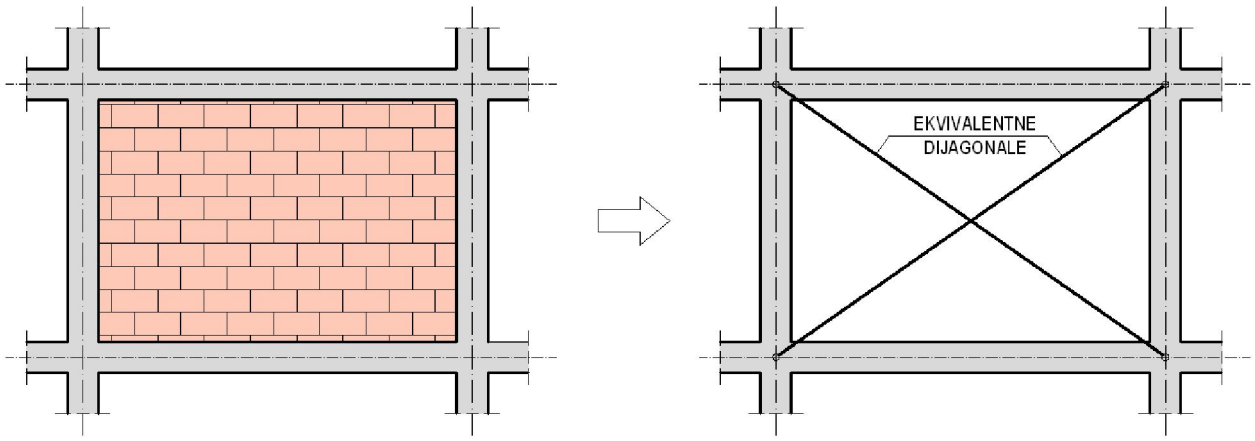
Numerički model kalibriran eksperimentalnim rezultatima poslužio je kao osnova za parametarsku analizu, kojoj je svrha bila utvrđivanje utjecaja raznih parametara na ponašanje okvira pri horizontalnim cikličkim opterećenjima. Provedbom detaljne parametarske analize moguće je na jednostavan način uvidjeti razlike u ponašanju složenoga sustava čeličnog okvira i zidanog ispuna izloženoga horizontalnim djelovanjima, ovisno o raznim geometrijama okvira i svojstvima materijala čelika i zidanog ispuna.

Kroz eksperimentalnu i numeričku analizu okvira s ispunom ostvareni su konkretni rezultati iz čega su proizašle i preporuke za projektiranje i proračun ovakvoga tipa konstrukcija.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PONAŠANJA OKVIRNIH KONSTRUKCIJA SA ZIDANIM ISPUNOM

2.1. Istraživanja ponašanja okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom

Već je poznat utjecaj zidnoga ispuna na ponašanje okvirnih konstrukcija, a prvi koji je uočio kako bi se on mogao uzeti u obzir pri proračunu te predložio koncept korištenja ekvivalentne dijagonale koja simulira ponašanje zidanog ispuna, bio je *Polyakov* (1956), [1]. Ispitivanjem čeličnih okvira sa zidnim ispunom (tri polja, tri kata) zaključio je da se ovakve okvirne konstrukcije ponašaju kao okviri s tlačnim dijagonalama, da se prijenos naprezanja s čeličnoga okvira na zidani ispun događa samo u tlačnim zonama kontakta okvir-zidani ispun, te da se deformacije ispuna, čija je najveća koncentracija u kutovima tlačnih dijagonala, smanjuju prema krajevima vlačne dijagonale. Polyakov je razvio izraze za predviđanje doprinosa svakog zidanog panela otpornosti na bočne sile, ali su izrazi bili točni samo za zadnji kat ispitivane konstrukcije.



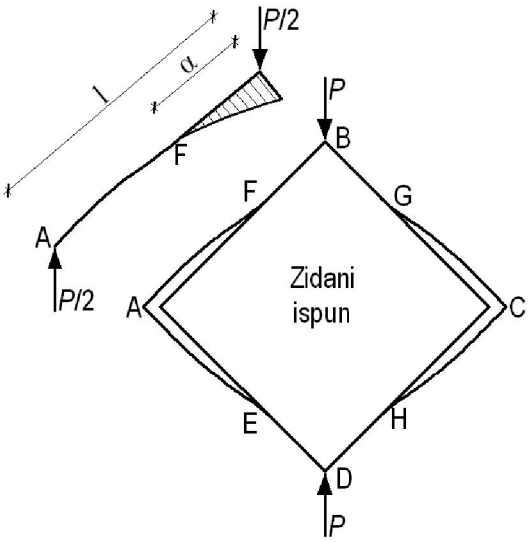
Slika 2.1 – Model sa zamjenskim dijagonalama

Benjamin i *Williams* su 1958. godine na osnovu ispitivanja triju tipova konstrukcija (**čelični okviri** sa zidanim ispunom, **betonski okviri** sa zidanim ispunom i zid od opeke bez okvira) s jednim poljem i jednim katom, razvili približne izraze kojima se može opisati ponašanje ovih konstrukcija, [2].

Ovi izrazi bili su ograničeni samo na uvjete koji odgovaraju onima iz njihovoga istraživanja (omjer duljine i visine zida te mjerilo modela). Uočeno je da omjer duljine (*L*) i visine zidanog ispuna (*H*) značajno utječe na graničnu nosivost i krutost konstrukcije, tj. što je odnos duljine i visine (*L/H*) veći, veća je i nosivost sustava. Zaključeno je kako veličina opeke ne utječe značajno na nosivost sustava, te da okviri nemaju značajnog utjecaja na nosivost, dokle god su toliko „jaki" da se otkazivanje nosivosti sustava događa u zidnome ispunu.

Holmes (1961.) istražuje ponašanje bočno opterećenih **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom od cigle i ispunom od armiranog betona, [3]. Rezultati ovih ispitivanja pokazuju kako armirano-betonski zidovi povećavaju nosivost sustava za 400%, a zidani ispun od cigle za 100%. Uočeno je da se nosivost okvira s ispunom povećava za oko 15%, ako su opterećeni i vertikalno. Na osnovu ovih ispitivanja Holmes predlaže da se širina zamjenske dijagonale uzima kao trećina duljine dijagonale zidanoga ispuna. Također, predlaže i matematičke izraze prema kojima je moguće približno odrediti graničnu nosivost i horizontalni pomak okvira.

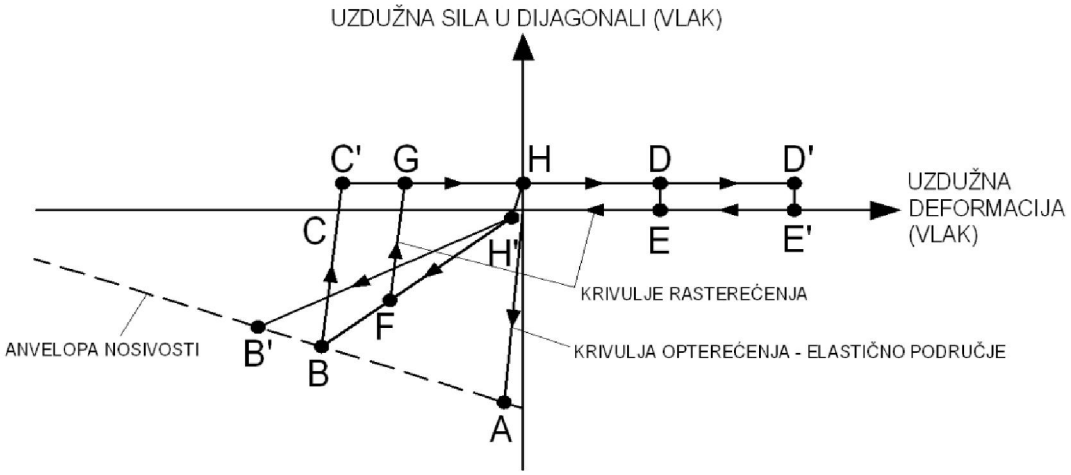
Smith (1962.) provodi ispitivanja bočno opterećenih **čeličnih okvira** pravokutnih poprečnih presjeka s panelima napravljenima samo od morta, [4]. Kutovi panela, koji su u kontaktu s čeličnim okvirom, određuju tlačno područje panela koji na taj način povećava krutost samoga okvira. Smith pokušava predvidjeti bočnu krutost okvira sa zidanim ispunom modelirajući zidani ispun kao tlačnu dijagonalu. Utvrđeno je kako se kontaktna duljina između zidnog panela i čeličnog okvira povećava s povećanjem krutosti samoga čeličnog okvira, a s povećanjem kontaktne duljine povećava se i širina zamjenske tlačne dijagonale.
Smith 1966. proširuje svoja prethodna istraživanja te uvodi parametar α kojim određuje kontaktnu duljinu između okvira i zidnog ispuna, slika 2.2, te pomoću kojega je moguće odrediti širinu zamjenske tlačne dijagonale, [5].
Svoju teoriju pokušava dokazati na nekoliko uzoraka čeličnih okvira s ispunom od betona koji su se sastojali od jednoga ili dvaju katova. Rezultati su pokazali precijenjenu krutost kod čeličnih okvira veće krutosti, posebno kod okvira prvoga kata. Krutosti drugoga kata bile su bolje predviđene, ali je autor smatrao da se radi o slučajnosti. Pri ispitivanjima dolazilo je do kombiniranog oblika sloma zidnoga ispuna: prvo se javljalo dijagonalno vlačno raspucavanje ispuna, a potom tlačni slom. Zaključeno je kako se kod krućih okvira prvo događa dijagonalno raspucavanje, nakon čega slijedi tlačni slom, a kod fleksibilnijih okvira gubitak nosivosti događa se tlačnim slomom zidnoga panela bez pojavljivanja dijagonalnih pukotina.
Smith i Carter 1969. godine razvijaju metodu analize okvira s ispunom temeljenu na konceptu ekvivalentne dijagonale, [6]. Bočna krutost sustava proračunata je na osnovu širine dijagonale, a granična nosivost određena je razmatranjem različitih načina otkazivanja okvira i zidnoga ispuna.



Slika 2.2 – Kontaktna duljina i raspodjela naprezanja na kontaktu okvira i ispuna

Mainstone (1971.), [7], nastavlja razvijati metode analize koje su prethodno osmislili Holmes i Smith. U svojim istraživanjima zaključuje da je najvažniji parametar koji utječe na nosivost sustava, odnos krutosti stupova okvira i zidanog ispuna. Istraživanja, također, pokazuju da se čak i nominalno isti uzorci mogu ponašati na potpuno različite načine.

Klinger i *Bertero* (1976.) provode ispitivanja na modelima s 11 katova i trima rasponima, s ispunom samo u prvom i trećem rasponu, koje su opterećivali cikličkom silom u visini trećega kata, [8]. **Armirano-betonski** okviri s ispunom projektirani su na seizmička opterećenja. Debljina zidanih panela odabrana je prema kriteriju nosivosti stupa na poprečnu silu. Razvijen je prvi makro-model koji simulira ponašanje ispuna dijagonalama u kojem se jedna od dvije dijagonalne naizmjenično „aktivira" pri cikličkim promjenama sile, a koji pri tome uzima u obzir degradaciju krutosti; slika 2.3. Predloženi model nije bio u stanju precizno simulirati eksperimentalne rezultate, posebno u slučajevima kada se radilo o velikim pomacima konstrukcije.



Slika 2.3 – Ponašanje zamjenske dijagonale prema [8]

Barura i *Mallick* (1977.) proučavali su ponašanje **čeličnih okvira** s ispunom od morta na bočno opterećenje, [9]. Predložen je model linearnog elastičnog ponašanja homogenog i izotropnog panela koji u obzir uzima uzdužne deformacije elemenata okvira te proklizavanje panela na kontaktu s okvirom. Ovakvim modelom moguće je predvidjeti duljinu kontakta panela i okvira, naprezanja u panelu, te njegovu krutost i nosivost.

Liauw i *Lee* (1977.) koriste modificirani model sa zamjenskim dijagonalama za simulaciju efektivne krutosti i granične nosivosti **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom koji sadrži i otvore u sredini raspona, [10]. Ispitivanja su provedena na modelu s četiri kata i jednim rasponom. Autori su zaključili kako otvori značajno smanjuju krutost i nosivost okvira s ispunom, te da je zidani panel izložen savijanju, posmiku i tlaku ako se otvor proteže iznad tlačne dijagonale.

Riddington i *Smith* (1977.), [11], koriste metodu konačnih elemenata pri proučavanju ponašanja **armirano-betonskih** okvira s nearmiranim zidanim ispunom. Modeli su omogućavali relativni pomak između okvira i ispuna. Razmatran je učinak nekoliko različitih parametara na ponašanje sustava. Na modelima jedan kat – jedan raspon razmatrani su učinci odnosa duljine i visine panela, različiti rubni uvjeti, te odnos krutosti greda i stupova. Na modelima s trima katovima i jednim rasponom razmatran je učinak rubnih uvjeta na ponašanje, dok je kod modela s trima rasponima i jednim katom razmatran učinak različitih načina nanošenja horizontalnog opterećenja. Zaključeno je kako naprezanja u sredini panela najviše ovise o odnosu duljine i visine panela. Krutost okvira i trenje između okvira i panela imaju malen utjecaj na naprezanja. Naprezanja u tlačnim kutovima panela povećavaju se s povećanjem fleksibilnosti okvira. Povećanje fleksibilnosti okvira ima za posljedicu smanjenje kontaktne duljine između okvira i panela, što dovodi do smanjenja širine ekvivalentne dijagonale. Promjena krutosti grede okvira ima malen utjecaj na ponašanje čitavoga sustava. Korištenom metodom nisu se mogli precizno odrediti pomaci okvira, a korištenjem ekvivalentne dijagonale širine 1/10 širine panela, zglobno povezane s okvirom, mogle su se dobiti konzervativne vrijednosti.

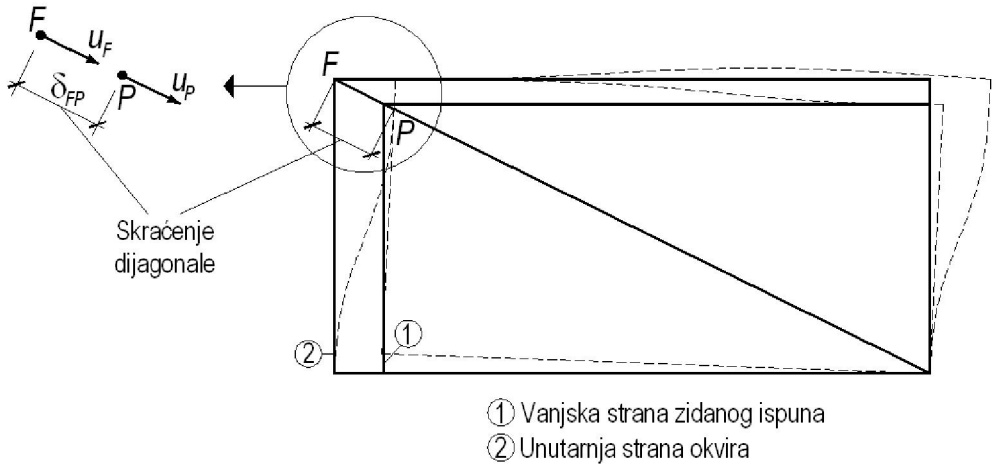
King i *Pandey* (1978.) na modelima **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom koriste metodu konačnih elemenata s kontaktnim elementima koji uzimaju u obzir trenje na kontaktu okvira i panela, [12]. Korištene su različite vrijednosti posmične krutosti na kontaktu okvir-panel, a posmična čvrstoća nije imala značajan utjecaj na ponašanje modela pri većim opterećenjima. Napravljeni su modeli s dva kata i tri raspona s otvorima, te su rezultati uspoređeni s eksperimentalnim. Autori zaključuju kako korištenje pojednostavljenog modela s ekvivalentnom dijagonalom daje zadovoljavajuće rezultate kod bočno opterećenih okvira s ispunom, no to nije slučaj kod modela kojima je zidani panel konstrukcijski povezan s

okvirom, ili u slučaju postojanja većih otvora u panelu. Položaj i duljina kontakta između okvira i ispuna ovise o vertikalnom i bočnom opterećenju.

Riddington (1984.) proučava ponašanje samih **čeličnih okvira**, čeličnih okvira sa zidanim ispunom te čeličnih okvira koji nisu konstrukcijski povezani sa zidanim ispunom, odnosno između kojih postoji razmak (eng. „gap"), [13]. Modeli su bili stvarnih dimenzija, a krutost čeličnih okvira varirana je. Zaključeno je kako razmak između okvira i zidanog ispuna nije poželjan jer znatno utječe na smanjenje krutosti sustava.

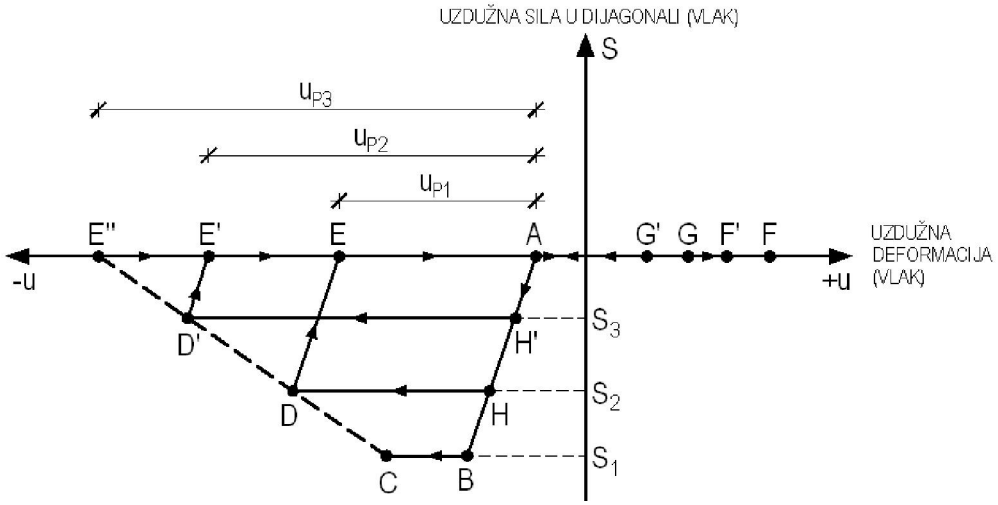
Dawe (1985.), [14], provodi istraživanje posmične otpornosti **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom, te zaključuje da zidani ispun značajno povećava nosivost krutih čeličnih okvira koji osiguravaju povećanu duktilnost sustavu. Posebno povezivanje stupova okvira sa zidanim panelom ili armiranje horizontalnih sljubnica morta ne povećava nosivost sustava, ali može utjecati na raspodjelu pukotina u panelu.

Dhanasekar i *Page* (1986.) istražuju mogućnost primjene metode konačnih elemenata pri određivanju ponašanja okvira s ispunom opterećenih u svojoj ravnini, te razvijaju nelinearni model koji uključuje dvoosno stanje naprezanja u zidanom panelu i jednodimenzionalne kontakt elemente za povezivanje panela s okvirom, [15]. Autori zaključuju da modul elastičnosti panela značajno utječe na ponašanje ovoga kompozitnog sustava u smislu odnosa sila – pomak, ali nema većega utjecaja na konačnu nosivost sustava. Promjene Poissonovoga koeficijenta nisu imale utjecaja na rezultate. Uočeno je kako promjene tlačne čvrstoće zidanog panela ne utječu na nosivost sustava ako je slom nastao dijagonalnim raspucavanjem panela, što nije slučaj ako je posljedica prekoračenja tlačne nosivosti zida, u kutovima okvira, gubitak nosivosti sustava. Vlačna i kohezijska čvrstoća zidanog ispuna jako utječu na ponašanje sustava (odnos sila – pomak), graničnu nosivost, a u ekstremnim slučajevima mogu utjecati i na sam oblik gubitka nosivosti zidnoga panela.



Slika 2.4 – Model zidanog ispuna prema [16]

Doudoumis i *Mitsopoulou* (1986.) razvijaju model baziran na ekvivalentnim dijagonalama koji u obzir uzima smanjenje nosivosti uslijed cikličnog opterećenja, [16]. Pretpostavljaju kako ispun nije čvrsto povezan s okvirom pa je u modelu dijagonala neaktivna do određene razine deformacije okvira (slika 2.5), te da se vlačna naprezanja ne mogu pojaviti na kontaktu između okvira i zidanog panela.
Za opisivanje neelastičnog ponašanja ispuna pod cikličnim opterećenjem predlažu ponašanje modela kako je prikazano na slici 2.5.



Slika 2.5 – Ponašanje zidnoga ispuna prema [16]

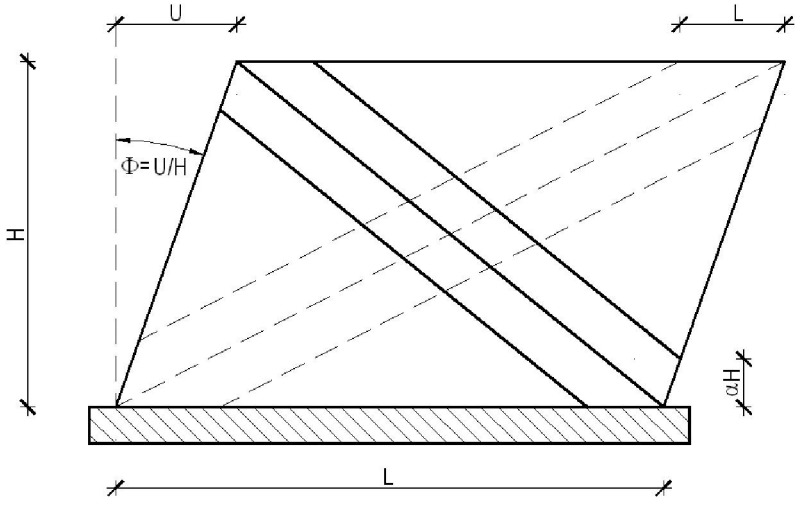
Dawe i *Seah* (1989.) proučavali su učinke armiranja sljubnica morta, loše kvalitete morta, dijagonalnoga armiranja zida, razmaka između okvira i zidanog panela, povezanosti okvira i panela te fleksibilnosti okvira na ponašanje sustava **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom, [17]. Rezultati su pokazali da bolje povezivanje panela i okvira povećava krutost sustava, ali ne utječe značajno na povećanje nosivosti sustava. Armiranje tlačne dijagonale neznatno povećava nosivost te malo odgađa pojavu pukotina. Smanjivanje vlačne čvrstoće i trenja na kontaktu zida i okvira smanjuje nosivost sustava. Armiranje sljubnica morta ograničava nasumično raspucavanje zidanog panela nakon što se dogodi dijagonalno raspucavanje, ali nema značajan utjecaj na povećanje nosivosti okvira sa zidanim ispunom. Loša kvaliteta morta dovodi do smanjenja početne krutosti i nosivosti.

D'Asdia (1990.) je napravio neke usporedbe između numeričkih rezultata dobivenih korištenjem metode konačnih elemenata i analiza na modelu s jednom zamjenskom dijagonalom, [18]. Korišteni su mikro-modeli za procjenu utjecaja različitih parametara na globalni odgovor okvira sa zidanim ispunom, i makro-modeli za procjenu seizmičkoga odgovora cijele zgrade, uzimajući u obzir nelinearne pojave pri cikličkom opterećenju.
Glavna svrha parametarskih studija bila je istražiti vezu na kontaktu ispuna i okvira, te posebno, nepotpuno prianjanje okvira i ispuna, uzimajući u obzir različite vrijednosti koeficijenta trenja.

Pretpostavljeno je elastično-idealno plastično ponašanje za sve armirano betonske elemente i elastično-krto ponašanje ispuna. Kontakt okvira i zidanih panela modelirani su „link“ elementima. Za „link“ elemente pretpostavljana su različita ponašanja, ukoliko se na kontaktu javljao tlak (elasto - plastičan odnos), vlak (elastično-krti odnos) i posmik (elastično-idealno plastičan odnos s graničnom nosivošću određenom na osnovu koeficijenta trenja). Njihov model ponašanja dijagonala bio je baziran, ne samo na geometriji i svojstvu materijala, nego (sukladno zaključcima svojih istraživanja na mikromodelima) i na koeficijentu trenja na kontaktnom području.

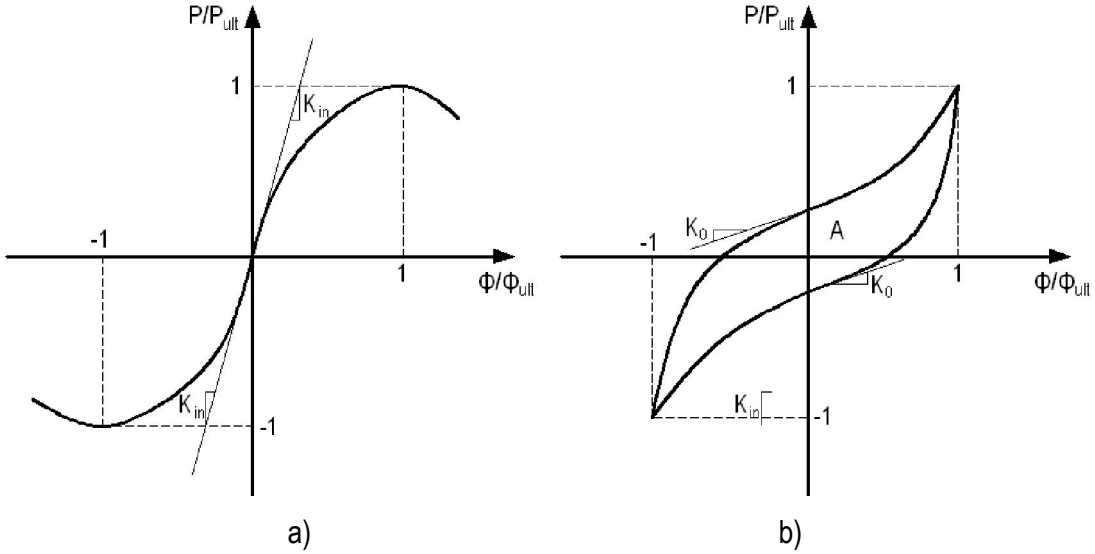
El Haddad (1991.) koristi metodu konačnih elemenata pri određivanju utjecaja raspucavanja zidanog panela i odvajanja panela od okvira na ponašanje sustava, [19]. Predloženi model uzima u obzir veličinu i položaj pukotina, odnos krutosti okvir-ispun, geometrijske karakteristike okvira i kontaktnu duljinu između okvira i panela. Varirajući kontaktne duljine i relativnu krutost ispun/okvir dobivene su raspodjele reznih sila u elementima okvira i naprezanja u raspucalom ispunu. Uočeno je da se momenti savijanja i pomaci okvira smanjuju kako se povećava odnos krutosti ispun/okvir. Momenti savijanja u tlačno opterećenom kutu smanjuju se kako se širina pukotina povećava, a ovaj efekt postaje naglašeniji ukoliko se odnos krutosti panel/okvir smanjuje. Pokazalo se kako se i momenti savijanja u okviru smanjuju s povećanjem kontaktne duljine između stupova okvira i panela.

Chrysostomou (1992.) simulira odgovor okvira s ispunom uslijed potresnih djelovanja, uzimajući u obzir opadanje krutosti i nosivosti ispuna, [20]. Predloženo je da se zidani ispun modelira s tri zamjenske dijagonale u svakom dijagonalnom smjeru (slika 2.6). Udaljenost vanjskih dijagonala definirana je preko parametra α koji izmnožen s duljinom ili visinom panela daje položaj na kojemu se formira plastični zglob u gredi ili stupu. U bilo kojem trenutku tijekom analize konstrukcije aktivne su samo tri paralelne dijagonale, ovisno o smjeru sile koja djeluje na okvir sa zidanim ispunom.



Slika 2.6 – Model sa šest dijagonala [20]

Odnosi sila-pomak ispuna definirani su histereznim modelom opisanim dvjema jednadžbama. Prva jednadžba predstavlja anvelopu nosivosti (slika 2.7 a)), a druga jednadžba histereznu petlju (slika 2.7 b). Jednadžbe, kojima je opisano ponašanje ispuna, ovise o trima parametrima prikazanima na slikama: površini petlje (A), početnoj krutosti (K_{in}), krutosti pri nultoj deformaciji (K_0), i parametru degradacije d koji ovisi o pretrpljenim deformacijama panela i utječe na anvelopu nosivosti.



Slika 2.7 – Anvelopa nosivosti zidanog ispuna (a) i histerezna petlja (b) prema [20]

Nakon provedenih numeričkih istraživanja utjecaja ispuna na čelične okvire (na sustavima jedan kat-jedan raspon, dva kata-tri raspona te deset katova-tri raspona) autor je zaključio da u čeličnim okvirima dolazi do znatnog povećanja uzdužnih sila uz smanjenje momenata savijanja i poprečnih sila, da do najvećih oštećenja panela dolazi na nižim etažama konstrukcije te da položaj oštećenih zidova u konstrukciji određuje i mjesto plastifikacije elemenata okvira.

Lofti i *Shing* (1994.), [21], za modeliranje okvira s ispunom koriste kontaktne elemente i elemente tzv. razmazanih pukotina (eng. „smeared crack elements“). Modelima se moglo simulirati nastajanje i širenje pukotina izazvanih interakcijom normalnih i posmičnih naprezanja, te se točno mogla predvidjeti posmična nosivost zidanoga ispuna.

Saneinejad i *Hobbs* (1995.) predlažu novu metodu za analizu i projektiranje **čeličnih okvira** s betonskim ili zidanim ispunima opterećenih u svojoj ravnini, [22]. Metoda se temelji na prijašnjim eksperimentalnim rezultatima i rezultatima nelinearnih proračuna metodom konačnih elemenata, a uzima u obzir omjer odnosa stranica zidanog ispuna, različite krutosti i čvrstoće greda i stupova okvira i skupljanje betonskoga panela. Primjenom metode proračuna moguće je predvidjeti nosivost i krutost okvira s ispunom kao i

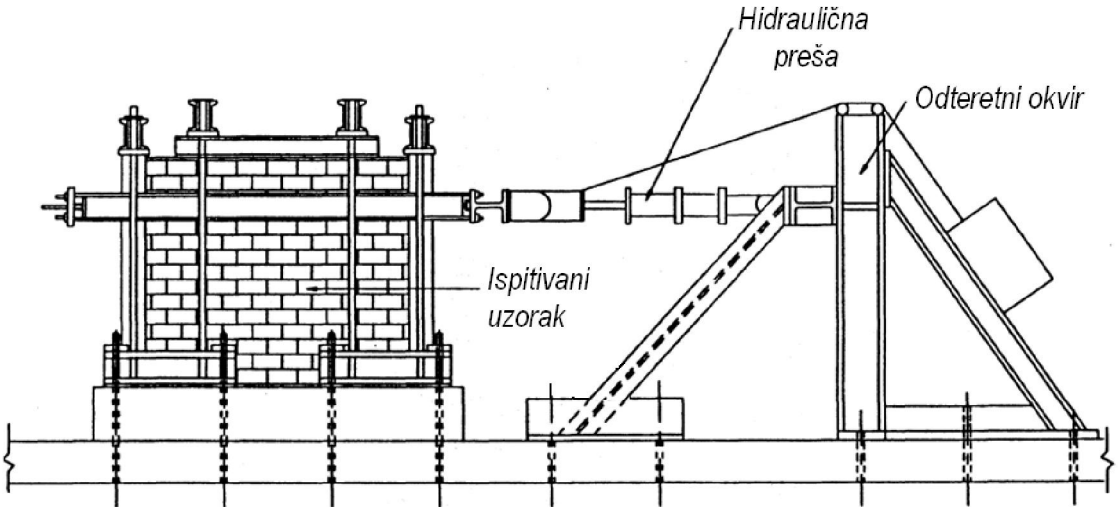
opterećenje pri kojem dolazi do dijagonalnog raspucavanja zidanog panela, a metoda obuhvaća i čelične okvire s nominalno zglobnim i djelomično nepopustljivim priključcima. Također, autori daju i jednostavne izraze pomoću kojih je moguće odrediti kontaktne duljine između okvira i ispuna.

Bennett (1996.) provodi istraživanja ponašanja okvira sa zidanim ispunom tijekom potresa Northridge, [23]. Zidani ispuni u epicentru potresa pretrpjeli su značajna oštećenja, no u nekim su slučajevima pridonijeli seizmičkoj otpornosti. Autor zaključuje da se predloženi model zamjenskih dijagonala, kojeg su razvili Smith i Carter, može koristiti za analizu postojećih konstrukcija uz ograničenje nekih parametara u modelima dijagonala. Za konstrukcije s vrlo krutim stupovima predlaže ograničenje kontaktne duljine između okvira i panela na 20% visine panela, kako bi se izbjegla nerealno velika krutost samoga zidanog ispuna, te uzimanje u obzir samo polovine momenta inercije armirano-betonskih stupova i okvira u raspucalom stanju.

Madan i dr. (1997.) za nelinearne proračune konstrukcija predlažu histerezni model zidanoga panela temeljen na pristupu zamjenske dijagonale, [24]. Histerezna petlja (sila-pomak) dobivena je ispitivanjem trokatnih **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom od glinenih blokova pod cikličkim opterećenjem, te se njome mogla simulirati degradacija čvrstoće i krutosti panela. Modeliranjem ispuna jednim makro-modelom dobiveni su podatci o oštećenjima u konstrukciji te njihovim lokacijama, ali nedostatak metode je u tome što se na ovaj način ne uzimaju u obzir lokalni učinci (npr. interakcija između okvira i panela u pojedinačnim rasponima i katovima).

Mehrabi i *Shing* (1997.), [25], eksperimentalno istražuju 14 **armirano-betonskih** okvira s ispunom od betonskih blokova. Modeli su bili izrađeni u mjerilu 1:2, slika 2.8. Uočeno je da zidani ispun znatno doprinosi krutosti i nosivosti armirano-betonskog okvira. Uzorci ispitivani pod cikličkim opterećenjem pokazali su nižu otpornost i bržu degradaciju nosivosti u odnosu na one ispitivane pod monotonim opterećenjem. Povećanje vertikalnog opterećenja dovodi i do povećanja otpornosti okvira s ispunom na bočne sile.

Rezultati ovih ispitivanja korišteni su kako bi se kalibrirali numerički modeli. Za numeričko modeliranje koriste metodu konačnih elemenata, pri čemu ponašanje morta u reškama ispuna modeliraju kontaktnim elementima koji u obzir uzimaju kohezijsku čvrstoću. Za modeliranje elemenata okvira i zidnih elemenata korišteni su elementi razmazanih pukotina (eng. „smeared crack elements“). Kontaktnim elementima uspješno se moglo simulirati odvajanje zidanog panela od okvira i širenje pukotina duž sljubnica morta. Načini otkazivanja nosivosti, dobiveni metodom konačnih elemenata, bili su slični eksperimentalnim rezultatima. Rezultati numeričkih analiza pokazali su dobro podudaranje s eksperimentalnim rezultatima u smislu krivulja sila-pomak, te početne krutosti i nosivosti sustava.



Slika 2.8 – Ispitivanje okvira s zidanim ispunom

Flanagan i *Bennett 1999.* provode ispitivanja **čeličnih okvira** s glinenim zidanim ispunom opterećenih u svojoj ravnini, [26]. Zidani ispun u svim provedenim eksperimentima otkazao je nosivost prekoračenjem tlačne nosivosti u kutovima ispuna (eng. „corner crushing"), pri čemu se pokazalo kako bočni pomak, pri otkazivanju nosivosti ispuna, ne ovisi o geometrijskim karakteristikama okvira, te da zidani ispun ne utječe značajno na povećanje momenata savijanja u stupovima i gredama okvira. Autori predlažu jednostavan izraz za određivanje nosivosti zidanog panela koji se temelji samo na debljini i mehaničkim karakteristikama zidnih elemenata.

Dawe (2001.) provodi parametarsku analizu **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom koja pokazuje složenost interakcije okvira i panela, [27]. Zaključuje da su najvažniji parametri koji utječu na ponašanje ovoga složenoga sustava: odnos visine i širine panela, čvrstoća i trenje morta, čvrstoća i krutost zidanog panela, stupova i greda okvira, krutost čeličnih priključaka, postojanje gravitacijskog opterećenja na gredama i stupovima okvira, te postojanje razmaka između ispuna i okvira. Također, zaključuje da povezivanje okvira i panela posebnim konstrukcijskim mjerama, kako bi se povećala vlačna i posmična čvrstoća na kontaktu, nema značajan doprinos na ponašanje sustava.

El-Dakhakhni (2003.) proučava ponašanje **čeličnih okvira** s ispunom od betonskih blokova te predlaže jednostavnu metodu procjene krutosti sustava, otpornosti na bočne sile i unutarnjih sila u čeličnom okviru, [28]. Kako bi se dobila preciznija raspodjela momenata savijanja u elementima čeličnog okvira umjesto jedne zamjenske dijagonale, autor predlaže korištenje tri dijagonale. Umjesto korištenja stvarnoga nelinearnog odnosa naprezanja i deformacija, što nije dostupno u mnogim računalnim programima, predlaže se korištenje pojednostavljenog tri-linearnog dijagrama naprezanje-deformacija ili sila-pomak (vidi poglavlje 5.2.2).

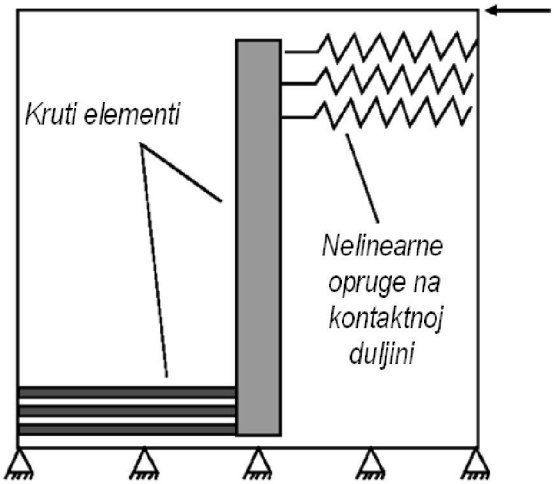
Moghaddam (2004.) provodi analitička i eksperimentalna istraživanja **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom na pet uzoraka, od kojih su dva bila sanirana, [29]. Saniranje je izvršeno na dva načina: betoniranjem kutova panela (u slučaju tlačnog sloma zida u kutovima okvira) ili betoniranjem cijelog panela u tankome sloju (u slučaju da je način otkazivanja nosivosti panela bio dijagonalno raspucavanje). Razvijena je analitička metoda za određivanje posmične nosivosti sustava i rasporeda pukotina u panelu. Pokazalo se da raspored pukotina ne ovisi o kohezijskoj čvrstoći morta, te da pukotine imaju tendenciju širenja u dijagonalnome smjeru. Korištenjem modula elastičnosti zidnih elemenata, dobivenih ispitivanjem u numeričkim analizama, znatno se podcjenjuje krutost okvira sa zidanim ispunom (autor je preciznije ponašanje sustava dobivao s dvostruko većim modulom elastičnosti zidnih elemenata u odnosu na one dobivene ispitivanjem). Rezultati dobiveni metodom konačnih elemenata pokazuju da su kutovi panela izloženi velikim dvoosnim naprezanjima, te su zbog toga osjetljivi na velike bočne sile, a njihova se nosivost može povećati, ukoliko se u kutovima koriste materijali boljih mehaničkih karakteristika (npr. beton). Također, oblaganje panela slojem betona pokazao se učinkovitim načinom saniranja oštećenih zidova.

Moghaddam, 2006. [30], provodi ispitivanja **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom, armiranim zidanim ispunom te ispunom od armiranog betona. Ispitivanja su podijeljena u dvije grupe: ovisno o krutosti čeličnih okvira i mjerilu modela. Za prvu grupu modeli su rađeni u malome mjerilu i okviri su imali zglobne priključke s vrlo krutim gredama i stupovima, dok su za drugu grupu modeli bili u srednjem mjerilu, a priključci u čeličnom okviru bili su nepopustljivi. Zaključeno je da se kod prve grupe modela, kod kojih je krutost samoga okvira puno veća u odnosu na krutost samoga panela, raspucavanje zida događa po horizontalnim sljubnicama morta, dok se kod druge grupe modela raspucavanje događa dijagonalno stepenasto po reškama. Armiranje reški panela ima utjecaj na povećanje nosivosti, ako se raspucavanje panela događa dijagonalno, dok je povećanje nosivosti, kod modela kod kojih se pukotine pojavljuju u horizontalnim reškama, zanemarivo.

Kaltakci (2007.) eksperimentalno i numerički istražuje ponašanje **čeličnih okvira** sa zidanim ispunom od porobetonskih blokova, [31]. Čelični okviri odabrani su zbog činjenice kako je ponašanje čelika kao materijala lakše predvidjeti u odnosu na armirani beton. Analizirano je ponašanje potpuno uzidanih čeličnih okvira te djelomično uzidanih čeličnih okvira. Osim modeliranja zidanog ispuna pomoću zamjenske dijagonale i konačnih elemenata, autor je izradio i modele u kojima zidani ispun zamjenjuje nelinearnim oprugama, slika 2.9. Tri opruge smještene su u gornjem opterećenom kutu i povezane su s krutom gredom u sredini panela, koja je opet s potpuno krutim elementima povezana sa suprotnim kutom panela. Opruge su smještene na kontaktnoj duljini okvira i zidanog ispuna, a kao duljina kontakta određena je vrijednost od

1/3 visine panela. Uspoređujući rezultate dobivene različitim modeliranjem zidanog ispuna s eksperimentalnim rezultatima, može se zaključiti dobro podudaranje rezultata u slučaju potpuno uzidanog čeličnog okvira, dok kod djelomično uzidanih čeličnih okvira, model sa zamjenskom dijagonalom daje nešto veća odstupanja.

Zaključeno je kako zidani ispun znatno utječe na početnu krutost i nosivost sustava. Dodatno povećanje nosivosti, zbog postojanja zidnoga panela, nije nužno samo kako bi se dobilo realno ponašanje konstrukcije, nego je to potrebno i zbog očite prednosti u smislu ekonomičnijega projektiranja ovakvih konstrukcija.



Slika 2.9 – Modeliranje zidnoga ispuna nelinearnim dijagonalama

Ravichandran i *Klingner* (2012.), [32], istražuju ponašanje **čeličnih okvira** s ispunom od porobetonskih blokova. Izrađen je i ispitan čelični okvir pod cikličkim opterećenjem, nakon čega je u isti okvir dodan ispun te je podvrgnut istome opterećenju. Usporedbom rezultata ispitivanja (krivulja bočno opterećenje – pomak) dobiven je uvid u histerezno ponašanje ispuna od porobetona, te su isti rezultati poslužili i za kalibraciju numeričkog modela baziranog na ekvivalentnoj dijagonali. Elementi okvira modelirani su kao elastični elementi s plastičnim zglobovima. Model je pokazao relativno dobro poklapanje s eksperimentalnim rezultatima, a odstupanja su pripisana pojednostavljenom bilinearnom modelu ponašanja plastičnih zglobova.

2.2. Rekapitulacija dosadašnjih istraživanja

Ideja modeliranja ponašanja zidanog ispuna s jednim elementom, kojim se može opisati globalni učinak panela na odziv konstrukcije, uvijek je bila privlačna zbog očite prednosti u smislu jednostavnosti proračuna. Nekoliko eksperimenata, provedenih tijekom druge polovice prošloga stoljeća, ukazali su na to kako bi zamjenska dijagonala s odgovarajućim mehaničkim karakteristikama mogla dati rješenje problema (slika 2.1).

Veća posmična krutost ispuna u odnosu na okvir, uobičajene niske vlačne i posmične čvrstoće na kontaktu između okvira i ispuna, mikro-pukotine u kutovima ispuna gdje su vlačna naprezanja dominantna, doprinose mišljenju da se zamjenska dijagonala može smatrati realnim pojednostavljenjem stvarnoga stanja. U novije vrijeme postalo je jasno kako se samo jednim elementom ne mogu obuhvatiti složeni fenomeni (kao što su degradacija čvrstoće i krutosti pod cikličkim opterećenjem, slom zida okomito na svoju ravninu nakon dijagonalnog raspucavanja ili mogući posmični slom na približno pola visine zida), te su predloženi novi modeli koji su, još uvijek, temeljeni na različitom broju zamjenskih tlačnih dijagonala, a mikro i makro modeli okvira sa zidanim ispunom, iako daju točnije procjene ponašanja sustava zbog svoje složenosti, teško su primjenjivi u praksi jer je teži jednostavnijim i bržim metodama proračuna.

U tablici 2.1 daje se kronološki prikaz istraživanja ponašanja okvira sa zidnim ispunom.

Tablica 2.1 – Istraživanja ponašanja okvira sa zidnim ispunom

Godina	Autor(i)	Tema	Bilješke
1956.	Polyakov	Interakcija između zidanog ispuna i okvira	Prvo spominjanje ekvivalentne dijagonale
1958.	Benjamin, Williams	Ponašanje zidanog ispuna u čeličnim i betonskim okvirima jedan raspon – jedan kat	Parametarska analiza utjecaja omjera visine i širine okvira s ispunom te veličine zidnih elemenata na nosivost sustava
1961.	Holmes	Čelični okviri sa zidanim i betonskim ispunom	Proučava krutost i čvrstoću koristeći metodu ekvivalentne dijagonale
1962.	Smith	Bočna krutost okvira s ispunom	Proučava krutost koristeći samo ekvivalentnu dijagonalu.
1966.	Smith	Ponašanje čeličnih okvira s betonskim ispunom	Uveden omjer krutosti ekvivalentne dijagonale i ispuna
1969.	Smith, Carter	Metoda analize okvira s ispunom	Proučava ekvivalentnu dijagonalu i učinak različitih omjera duljine i visine ispuna

Tablica 2.1 – Istraživanja ponašanja okvira sa zidanim ispunom

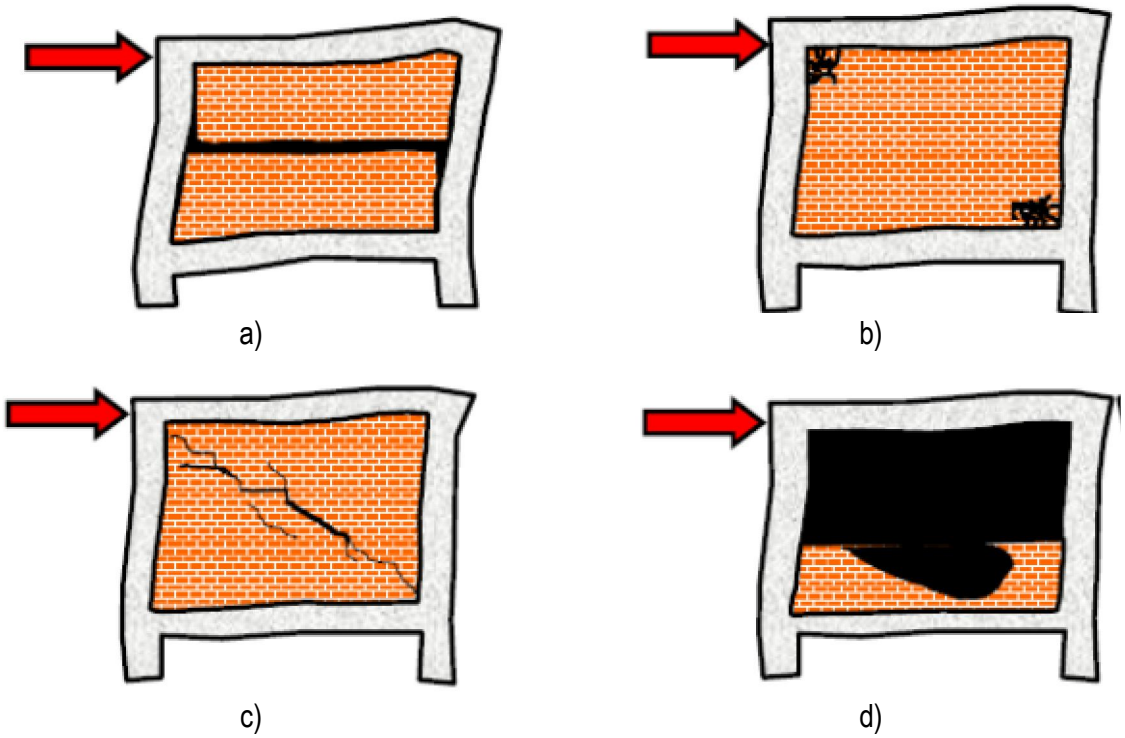
Godina	Autor(i)	Tema	Bilješke
1971.	Mainstone	Nosivost i krutost okvira s ispunom	Proučava krutost i nosivost koristeći ekvivalentnu dijagonalu
1976.	Klingner, Bertero	Višekatni višerasponski betonski okviri izloženi cikličkom opterećenju	Razvijen prvi makromodel koji uzima u obzir degradaciju krutosti
1977.	Liauw, Lee	Čelični okviri sa zidanim ispunom s otvorima	Modificirani model sa zamjenskim dijagonalama, utjecaj otvora na nosivost i krutost
1977.	Riddington, Smith	Betonski okviri s nearmiranim zidanim ispunom	Proučavaju učinak odnosa krutosti okvira i panela, korištenje ekvivalentne dijagonale širine 1/10 širine panela
1978.	King, Pandey	Čelični okviri sa zidanim ispunom	Korištenje metode konačnih elemenata s kontaktnim elementima
1984.	Riddington	Čelični okviri sa zidanim ispunom	Proučava utjecaj postojanja razmaka između okvira i ispuna krutost sustava
1985.	Dawe	Eksperimentalno istraživanje posmične otpornosti sustava	Proučava utjecaj armiranja sljubnica morta i povezanosti stupova i greda okvira s panelom na nosivost sustava
1986.	Dhanasekar, Page	Mogućnost primjene metode konačnih elemenata	Nelinearni model zidanog panela za dvoosno stanje naprezanja
1986.	Doudoumis, Mitsopoulou	Ponašanje okvira s ispunom pod cikličkim opterećenjima	Razvijen model s ekvivalentnim dijagonalama za ciklička opterećenja
1989.	Dawe, Seah	Ponašanje čeličnih okvira sa zidnim ispunom	Proučavaju uvjete kontakta, otvore, krutost okvira i vezu greda
1990.	D'Asdia	Ponašanje okvira sa zidanim ispunom pri seizmičkim opterećenjima	Usporedba rezultata metode konačnih elemenata i modela s ekvivalentnom dijagonalom
1991.	El Haddad	Analiza ponašanja okvira s ispunom metodom konačnih elemenata	Utjecaj raspucavanja i odvajanja panela od okvira
1992.	Chrysostomou	Ponašanje okvira s ispunom pri seizmičkom opterećenju	Modeliranje zidanog ispuna s tri dijagonale
1994.	Lotfi, Shing	Modeliranje okvira s ispunom korištenjem kontaktnih elemenata	Simulacija nastajanja i širenja pukotina
1995.	Saneinjad, Hobbs	Neelastični proračun okvira s ispunom	Proučava krutost, čvrstoću i utjecaj nepovezanosti ispuna i okvira. Koristi idealizaciju s ekvivalentnom dijagonalom.

Ponašanje čistog (čeličnog ili armirano-betonskog) okvirnog sustava dobro je istraženo, te je ovisno o vrsti, namjeni i željenoj preciznosti proračuna, moguće koristiti različite pretpostavke koje se odnose na ponašanje konstrukcijskog sustava i materijala (elastični i plastični modeli, teorija prvog ili drugog reda i sl.).

Kao što se može zaključiti iz tablice 2.1, utjecaj zidanog ispuna na ponašanje okvira ovisi o nizu parametara: geometriji i krutosti okvira te njegovom predviđenom (proračunatom) ponašanju uslijed ekstremnih opterećenja, zatim vrsti, kvaliteti i krutosti zidanog ispuna, vrsti opterećenja kojima je okvir izložen itd.

Ispun se prvenstveno kategorizira prema materijalu i geometrijskoj konfiguraciji. Zidovi od glinene opeke najčešće su upotrebljavani tip ispune. Smještaj ispune u odnosu na stupove okvira može biti centričan ili ekscentričan, a geometrijski odnosi zidanih panela ispune obično su u omjeru 1:1 do 3:1.
U dokumentu [33], prepoznata su četiri moguća načina otkazivanja zidanog ispuna u okvirnim konstrukcijama:

- klizanje po sljubnici morta uslijed djelovanja poprečne sile, slika 2.10 a),
- tlačni slom, slika 2.10 b),
- dijagonalno vlačno raspucavanje, slika 2.10 c),
- slom zida okomito na vlastitu ravninu, slika 2.10 d)



Slika 2.10 – Načini otkazivanja nosivosti zidnoga ispuna

U konstrukcijama se vrlo često pojavljuje otkazivanje nosivosti koje je kombinacija više navedenih osnovnih tipova sloma. Tako se klizanje po sljubnicama morta najčešće pojavljuje zajedno s ostalim oblicima gubitka nosivosti. Ovakav gubitak nosivosti vjerojatan je kada je okvir čvrst i fleksibilan (čelični okvir). Ako su sljubnice morta relativno slabe u odnosu na elemente od kojih je zidan zid (opeka, blok), najslabija ravnina po kojoj će se dogoditi ovakvo otkazivanje nosivosti u blizini je polovice visine zida ispune.

Uslijed horizontalnog opterećenja u ravnini okvira (i ispuna) javljaju se velika tlačna naprezanja u dijagonalnom smjeru ispuna, dok se u poprečnom smjeru, javljaju vlačna naprezanja. Tlačni slom zida, zbog drobljenja tlačnog područja, pojavljuje se zbog velikih koncentracija naprezanja u kutovima tlačne dijagonale ispuna. Za jake (krute) stupove i grede, drobljenje kutova locirano je na relativno malom području, dok se za slabije okvire (osobito betonske okvire), drobljenje tlačnog područja događa na širem području.

Kada vlačne deformacije premaše deformacije pri kojima dolazi do pucanja zida, pojavljuju se dijagonalne pukotine. Kako se pomak konstrukcije povećava, dijagonalne pukotine nastoje se širiti sve dok se naposljetku ne prošire od jednog kuta do dijagonalno suprotnog kuta. Ovakav način raspucavanja evidentan je kod većine zidova koji su podvrgnuti visokim horizontalnim silama i nekada se pojavljuju zajedno s klizanjem po sljubnicama morta.

Do gubitka nosivosti zida, zbog prevaljivanja okomito na vlastitu ravninu, može doći zbog gibanja podloge (potresa) okomito na ravninu zida. Ovakav oblik gubitka nosivosti može se pojaviti u gornjim etažama visokih zgrada, dok se u nižim katovima u kombinaciji s visokim posmičnim silama u ravnini zida, nastoji postupno „išetati“ iz okvira prilikom svakoga ciklusa opterećenja. Ovakav oblik gubitka nosivosti nije čest.

Čelični okviri najčešće su izrađeni od uskopojasnih ili širokopojasnih I profila, a utjecaj ispuna na ponašanje okvira najčešće se očituje na sljedeće načine:

- plastifikacija uslijed savijanja,
- posmični slom,
- otkazivanje priključaka.

S obzirom na činjenicu kako ispun, zbog svoje krutosti, na sebe može navući jače horizontalno opterećenje, kod čeličnih okvira uslijed povećanih sila može doći do tečenja koje se očekuje u blizini krutih priključaka - kod upetih ležajnih veza i u blizini priključaka greda-stup. Može doći i do izbočivanja tlačnih dijelova elemenata, a oblik loma ovisit će o rotacijskom potencijalu čeličnih plastičnih zglobova, kao i do ograničenja međukatnih pomaka zbog prisustva ispune.

Do posmičnog sloma ili izbočivanja hrpta može doći nakon početnog drobljenja zidanog ispuna u kutovima tlačne dijagonale, kada povećane posmične sile djeluju na rubne dijelove stupova (efekt kratkog stupa).

Također, tlačna sila u dijagonalnom smjeru ispuna može dovesti do povećanja vlačne sile u stupovima (mehanizam prijenosa sila zbog aktiviranja dijagonale u zidanoj ispuni postaje sličniji rešetkastom sustavu), te se u priključcima mogu javiti nepovoljna stanja naprezanja zbog «efekta poluge».
Interaktivno ponašanje sustava okvir-ispun izrazito je nelinearne prirode pa je za preciznije modeliranje ovakvih sustava najčešće potrebno kombinirati eksperimentalne postupke, ispitivanje materijala te primjenu nelinearnih analiza i metode konačnih elemenata.

U [34] daju se neke opće smjernice za proračun ovakve vrste konstrukcija, te se razlikuju:

a) Fleksijski okviri s AB ispunom koji je na odgovarajući način povezan s čeličnim okvirom i s njim čini cjelinu,
b) Fleksijski okviri kod kojih je ispun konstrukcijskim mjerama odvojen od čeličnoga okvira,
c) Fleksijski okviri kod kojih je ispun u kontaktu s čeličnim okvirom, ali nije posebnim konstrukcijskim mjerama s njime povezan.

Prva grupa konstrukcija tretira se po pravilima za spregnute konstrukcije čelik-beton, a druga kao čista čelična konstrukcija. Za treću je skupinu potrebno uzeti u obzir interakcije okvir-ispun te ravnomjernu raspodjelu ispuna po visini zgrade. Međutim, osim dopuštanja modeliranja utjecaja ispuna preko zamjenske tlačne dijagonale, detaljnijih podataka o tome kako npr. izračunati geometrijske karakteristike takvoga ekvivalentnog modela ili uvjeta njegove primjene u aktualnoj verziji Eurokoda, nema, [34]. Kako je ta treća skupina u praksi i najraširenija, upravo zbog jednostavnosti izrade, takve su konstrukcije odabrane za temu ovoga rada.

3. PREGLED NORMI ZA ISPITIVANJEZIDNIH ELEMENATA, MORTA I ZIDNIH PRIZMI

U ovome poglavlju opisuje se način ispitivanja mehaničkih karakteristika osnovnih komponenti zidanog ispuna - zidnih elemenata i mortova. Naveden je postupak ispitivanja tlačne čvrstoće zidnih elemenata, te vlačne i tlačne čvrstoće morta. Dan je pregled opekarskih proizvoda i vrsta mortova koji se najčešće koriste u Republici Hrvatskoj. Također, prikazan je i postupak ispitivanja mehaničkih karakteristika malih uzoraka ziđa (zidnih prizmi) koji je neophodan za potrebe praktičnog proračuna i numeričkog modeliranja zidanih konstrukcija. U radu je opisan i postupak izračuna, prema Eurocodu za zidane konstrukcije, [41], najvažnijih mehaničkih karakteristika ziđa (tlačna, vlačna i posmična čvrstoća).

3.1. Zidni elementi

3.1.1. Vrste i grupe zidnih elemenata

Zidni elementi mogu se podijeliti u više raznih skupina, a najznačajnija je podjela prema vrsti materijala od kojega su izrađeni, [35]:

1) glineni zidni elementi (opeka, opečni blokovi), kojima se trajnost postiže pečenjem elementa oblikovanog u sirovoj glini na visokim temperaturama,
2) kalcijsko-silikatni zidni elementi, proizvedeni od smjese silicijskog agregata, vapna i drugih provjerenih materijala, izrađeni pod tlakom i zaparivani,
3) betonski zidni elementi proizvedeni od smjese selektiranog agregata normalne težine i cementa ili drugih provjerenih materijala u čvrsti oblik pod tlakom i/ili vibriranjem,
4) betonski zidnielementiod lakog agregata, proizvedeni od mješavine agregata male gustoće npr. ekspandirana šljaka visokih peći, ekspandirana glina itd., oblikovana pod tlakom i/ili vibriranjem,
5) porasti (autoklavirani i aerirani) betonski zidni elementi, proizvedeni od mješavine finog silicijskog agregata, cementa, vapna i sredstva koje proizvodi zračne mjehuriće. Ta se smjesa njeguje procesom autoklaviranja,
6) kameni zidni elementi, napravljeni od blokova kamena klesanih na određene dimenzije ili od lomljenog kamena nepravilnih dimenzija.

Prema Eurokodu[36] i postotku šupljina u volumenu zidnih elemenata oni se dijele na Grupu 1, Grupu 2, Grupu 3, te Grupu 4, tablica 3.1.

Tablica 3.1 – Geometrijski zahtjevi za Grupe zidnih elemenata

<table>
<tr><td></td><td colspan="8">Materijali i ograničenja za zidne elemente</td></tr>
<tr><td></td><td rowspan="2">Grupa 1
svi materijali</td><td rowspan="2">Zidni elementi</td><td colspan="2">Grupa 2</td><td colspan="2">Grupa 3</td><td colspan="2">Grupa 4</td></tr>
<tr><td colspan="4">Vertikalne šupljine</td><td colspan="2">Horizontalne šupljine</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Volumen svih šupljina
[% od ukupnog volumena]</td><td rowspan="3">≤ 25</td><td>glineni</td><td colspan="2">$> 25 ; \leq 55$</td><td colspan="2">$> 25 ; \leq 70$</td><td colspan="2">$> 25 ; \leq 70$</td></tr>
<tr><td>kalcijsko-silikatni</td><td colspan="2">$> 25 ; \leq 55$</td><td colspan="2">-</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td>betonski</td><td colspan="2">$> 25 ; \leq 60$</td><td colspan="2">$> 25 ; \leq 70$</td><td colspan="2">$> 25 ; \leq 50$</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Volumen bilo koje šupljine
[% od ukupnog volumena]</td><td rowspan="3">$\leq 12{,}5$</td><td>glineni</td><td colspan="2">svaka pojedinačna šupljina ≤ 2
Šupljina za rukovanje $\leq 12{,}5$</td><td colspan="2">svaka pojedinačna šupljina ≤ 2
Šupljina za rukovanje $\leq 12{,}5$</td><td colspan="2">svaka pojedinačna šupljina ≤ 30</td></tr>
<tr><td>kalcijsko-silikatni</td><td colspan="2">svaka pojedinačna šupljina ≤ 15
Šupljina za rukovanje ≤ 30</td><td colspan="2">-</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td>betonski</td><td colspan="2">svaka pojedinačna šupljina ≤ 30
Šupljina za rukovanje ≤ 30</td><td colspan="2">svaka pojedinačna šupljina ≤ 30
Šupljina za rukovanje ≤ 30</td><td colspan="2">svaka pojedinačna šupljina ≤ 25</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Deklarirana debljina stjenke
[mm]</td><td rowspan="4">nema posebnih zahtjeva</td><td></td><td>unutarnje stjenke</td><td>vanjske stjenke</td><td>unutarnje stjenke</td><td>vanjske stjenke</td><td>unutarnje stjenke</td><td>vanjske stjenke</td></tr>
<tr><td>glineni</td><td>≥ 5</td><td>≥ 8</td><td>≥ 3</td><td>≥ 6</td><td>≥ 5</td><td>≥ 6</td></tr>
<tr><td>kalcijsko-silikatni</td><td>≥ 5</td><td>≥ 10</td><td colspan="2">-</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td>betonski</td><td>≥ 15</td><td>≥ 18</td><td>≥ 15</td><td>≥ 15</td><td>≥ 20</td><td>≥ 20</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Kombinirana debljina stjenke*
[mm]</td><td rowspan="3">nema posebnih zahtjeva</td><td>glineni</td><td colspan="2">≥ 16</td><td colspan="2">≥ 12</td><td colspan="2">≥ 12</td></tr>
<tr><td>kalcijsko-silikatni</td><td colspan="2">≥ 20</td><td colspan="2">-</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td>betonski</td><td colspan="2">≥ 18</td><td colspan="2">≥ 15</td><td colspan="2">≥ 45</td></tr>
<tr><td colspan="9">*Kombinirana debljina je ona u kojoj se računaju debljine hrbata i stijenki, mjereno horizontalno preko zidnog elementa pod pravim kutom na lice zida</td></tr>
</table>

3.1.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata

Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata opisano je u normi EN 772-2, [37].Najmanji broj uzoraka treba biti 6, a uzorci se prije nanošenja izravnavajućeg sloja morta uranjaju u vodu i ostavljaju u njoj 18 sati. Izravnavajući slojevi morta u debljini od najmanje 3 mm, čija čvrstoća mora biti veća od čvrstoće samoga zidnogaelementa ili 30 N/mm^2, nanose se i na gornju i na donju plohu uzorka. Na izravnavajućem sloju morta mogu se napraviti male rupe kako bi se omogućio izlaz vode iz šupljina uzorka.

Nakon što izravnavajući sloj očvrsne (3 do 7 dana), uzorci se potapaju u vodu ili se prekrivaju jutenom vrećom te se održavaju vlažnim cijelo vrijeme njegovanja ili se drže u vlažnoj komori relativne vlažnosti 90%.

Prije ispitivanja uzorak mora provesti u vodi najmanje 24 sata.

Prilikom ispitivanja potrebno je paziti da ploha preko koje se prenosi opterećenje jednoliko naliježe na uzorak.

Opterećenje se nanosi u istom smjeru kao i u stvarnoj primjeni i povećava se kontinuirano. Opterećenje treba povećavati brzinomakoja odgovara stroju, ali na polovici očekivanoga maksimalnoga opterećenja treba prilagoditi brzinu nanošenja tako da se opterećenje završi u sljedeće 1 do 2 minute.

Tlačna čvrstoća zidnih elemenata, koja se uzima u proračunu, normalizirana je tlačna čvrstoća f_b. Normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa je čvrstoća prevedena na tlačnu čvrstoću na zraku sušenog zidnog uzorka širine 100 mm i visine 100 mm, a računa se tako da se eksperimentalno dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće izmnože s faktorom, koji uzima u obzir način njege uzoraka (tablica 3.2) i faktoromδkoji u obzir uzima dimenzije ispitivanog uzorka, tablica 3.3.

Uzorci zidnih elemenata za ispitivanje tlačne čvrstoće mogu se njegovati na sljedeće načine:

- Njega sušenjem na zraku: uzorke treba skladištiti najmanje 14 dana u laboratoriju pri temperaturi većoj od 15 °C i relativnojvlažnosti manjoj od 65 %. Uzorci se mogu ispitivati prije 14.dana, ako se postigne stalna masa. Smatra se kako je postignuta stalna masa tijekom procesa sušenjaako je u dvama uzastopnim vaganjima u razmaku, ne manjem od 24 sata, gubitak mase između dvaju mjerenja manji od 0,2 % ukupne mase. Uzorak se suši na temperaturi od 105°C ± 5°C najmanje 24 sata i hladi na sobnoj temperaturi najmanje 4sata.
- Njega sušenjem u sušioniku: a) ispitni uzorak sušise na temperaturi od 105 °C ± 5 °C do konstantne mase. Prijeispitivanja, uzorak se treba ohladiti na temperaturu okoline.

b) ispitni uzorak suši sena temperaturi od 70 °C ± 5 °C do konstantne mase. Nakonsušenja, a prije ispitivanja, ispitne uzorke treba skladištiti na temperaturi 20 °C ± 2 °C dok se nedosegne temperaturna ravnoteža. Nakon toga ispitivanje treba obaviti unutar 24 sata.

- Njega do 6% sadržaja vlage: treba proračunati suhu masu zidnih elemenata iz obujma. Masa ispitnog uzorka u vrijeme ispitivanja treba biti masa u suhom stanju pomnožena s 1,06.Uzorak treba sušiti na temperaturi koja ne prelazi 50°C dok se ne postigne masa s točnošću od ±0,2% mase u suhome stanju.Nakon njege do 6% sadržaja vlage, a prije ispitivanja, treba ispitne uzorke skladištiti na sobnojtemperaturi najmanje 5 sati.
- Njega uranjanjem u vodu: ispitne uzorke treba uroniti u vodu temperature 20 °C ± 5°C najmanje 15 sati, a nakon toga trebaih pustiti da se ocijede od 15 do 20 min.

Tablica 3.2 - Faktori pretvorbe za zidne elemente ispitane u vlažnom stanju

Njegovanje uzorka	Faktor pretvorbe
Sušenje na zraku	1,0
Sušenje u sušioniku	1,0
Do 6% sadržaja vlage	0,8
Uranjanjem u vodu	1,2

Tablica3.3 – Vrijednosti koeficijenta oblika δ

Visina zidnog elementa [mm]	Najmanja horizontalna dimenzija zidnog elementa [mm]											
	50	75	90	100	115	125	140	150	200	215	225	>250
40	0,80	0,75	0,72	0,70	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,85	0,80	0,77	0,75	0,74	0,73	0,71	0,70	-	-	-	-
65	0,95	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77	0,75	0,70	0,69	0,68	0,65
100	1,15	1,08	1,03	1,00	0,97	0,95	0,92	0,90	0,80	0,79	0,78	0,75
140	1,27	1,22	1,18	1,16	1,13	1,11	1,08	1,06	0,96	0,95	0,94	0,91
150	1,30	1,25	1,22	1,20	1,17	1,15	1,12	1,10	1,00	0,99	0,98	0,95
190	1,42	1,37	1,34	1,32	1,29	1,27	1,24	1,22	1,12	1,11	1,10	1,07
200	1,45	1,40	1,37	1,35	1,32	1,30	1,27	1,25	1,15	1,14	1,13	1,10
215	1,48	1,43	1,40	1,38	1,35	1,33	1,30	1,28	1,18	1,16	1,15	1,12
>250	1,55	1,50	1,47	1,45	1,42	1,40	1,37	1,35	1,25	1,22	1,20	1,15

Tlačna čvrstoća zidnih elemenata dobije setako da se maksimalno opterećenje pri slomu podijeli s opterećenom bruto površinom, izražava se u N/mm^2 zaokruženo na 0,1 N/mm^2.

3.2. Mort

3.2.1. Vrste mortova

Mort je materijal koji se sastoji od mješavine veziva, agregata i vode, a može sadržavati i dodatke, te služi za povezivanje zidnih elemenata.

U gradnji se koriste sljedeće vrsta mortova:

1) Cementni mort - mort spravljen od određenih omjera cementa i pijeska.
2) Cementno-vapneni mort („produžni mort“)- mješavina određene količine cementa, vapna i pijeska,
3) Vapneni mort - mješavina određene količine hidratiziranog vapna i pijeska.
4) Tankoslojni mort - unaprijed pripremljeni cementni mort s maksimalnim zrnom pijeska od 1,0 mm i s kemijskim dodacima. Debljina ovog morta u horizontalnim sljubnicama iznosi od 1 do 3 mm.
5) Unaprijed pripremljeni mort - vrsta mortakoja se doprema na gradilište u suhom stanju u vrećama, ili već pripremljen za uporabu - vlažan, ali s usporivačem vezanja.
6) Lakoagregatni mort - mort spravljan od lakog agregata čija je gustoća obično manja od 1000 kg/m^3. Agregat može biti: perlit, ekspandirana glina, plovučac, i slično.

Mort se klasificira prema svojoj proračunskoj tlačnoj čvrstoći, a označava se slovom *M* nakon kojeg slijedi broj koji predstavlja tlačnu čvrstoću u N/mm^2. U većini propisa odnos komponenata morta određuje se volumno.

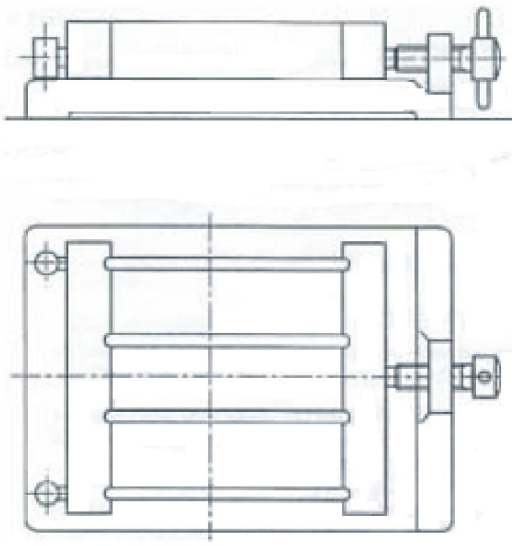
Sastavi mortova prema Eurokod normi [38]dani su u tablici 3.4.

Tablica 3.4 – Volumenski sastav morta prema [38]

Vrsta morta	Minimalna tlačna čvrstoća nakon 28 dana [N/mm^2]	približni sastav		
		cement	vapno	pijesak
M20	20	odrediti ispitivanjem		
M15	15	1	0 - ¼	3
M10	10	1	¼ - ½	4 - 4¼
M5	5	1	½ - 1¼	5 - 6
M2,5	2,5	1	1¼ - 2½	8 - 9
M1	1	1	nije definirano	>9

3.2.2. Ispitivanje tlačne i vlačne čvrstoće morta

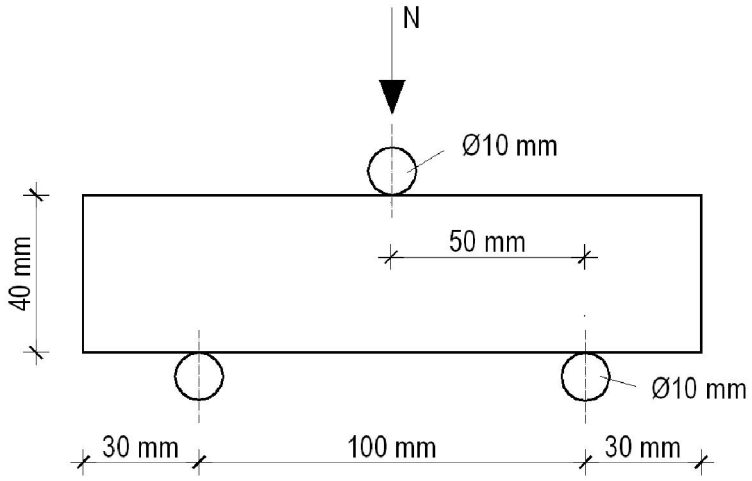
Ispitivanje tlačne čvrstoće morta propisano je u normi [39]. Ispitivanje se vrši na prizmama dimenzija 160 mm x 40 mm x 40 mm ili na kockama sa stranicom 70,7 mm ili 100 mm. Uzorci prizmi morta nabijaju se u čeličnom kalupu, slika 3.1, šipkom kvadratnog presjeka stranice 12 mm i mase 500 g, a za kocke šipkom kvadratnog presjeka stranice 25 mm i mase 1,8 kg. Kalup se napuni do pola i nabija šipkom najmanje 25 puta jednoliko po duljini prizme, a nakon toga se napuni do vrha i opet nabija, te se na kraju gornja površina zaravna nožem koji ima potpuno ravan rub.



Slika 3.1 – Čelični kalup za izradu prizmi morta

Mort se u kalupu njeguje od jednog do tri dana u vlažnoj komori ili u vrećicamana temperaturiod 20±2 °C, nakon čegaslijedi vađenje iz kalupa i njega potapanjem u vodu ili na vlažnom zraku iznad vode.
Kod podvodne njege uzorak se uranja u vodu zasićenu vapnom pri temperaturiod 20±1°C, pri čemu treba voditi računa o tomeda voda slobodno dolazi do svake površine uzorka. Uzorci se vade iz vode 2 minute prije ispitivanja.
Pri njegovanju uzoraka morta na vlažnome zraku, uzorak se postavlja iznad vode u zatvorenu zračnonepropusnu posudu volumena do 0,015 m^3 i pri temperaturiod 20±2 °C. Uzorak se 4 do 6 sati neposredno prije ispitivanja uroni u vodu koja ima temperaturu 20±2°C.

Uzorak se ispituje odmah po vađenju iz vode, dok je još uvijek u vlažnome stanju. Uzorak se postavlja jednom stranom, koja je bila u dodiru s kalupom, na ležajni valjak, slika 3.2 . Opterećenje se nanosi polaganobrzinom između 0,02 do 0,10 N/mm^2/sekunda, dok se uzorak ne slomi. Zabilježi se najveće opterećenje, u *N*. Slomljeni uzorak vraćaseu vodu i tamo drži do ispitivanja tlačne čvrstoće.



Slika 3.2 – Ispitivanje prizmi morta na savijanje

Vlačna čvrstoća morta računa se prema izrazu:

$$f_{mt} = \frac{3Pl}{2bd^2} \tag{3.1}$$

gdje je: P - najveća koncentrirana sila [N]

l - udaljenost između osi ležajnih valjaka [mm]

b - širina prizme na crti pukotine [mm]

d - debljina (visina) prizme na crti pukotine [mm]

Vlačna čvrstoća zaokružujese do najbliže vrijednosti od 0,01 N/mm^2 za pojedinačni uzorak, te 0,05 N/mm^2 za srednju vrijednost od tri ispitivanja.

Pri ispitivanju tlačne čvrstoće morta uzorak se mora centrirati tako da se optereti cijela površina uzorka u dodiru s tlačnim pločama. Ako je slom prizme pri ispitivanju na vlak takav da uzorak nije dovoljno velik, tada se taj uzorak odbacuje.

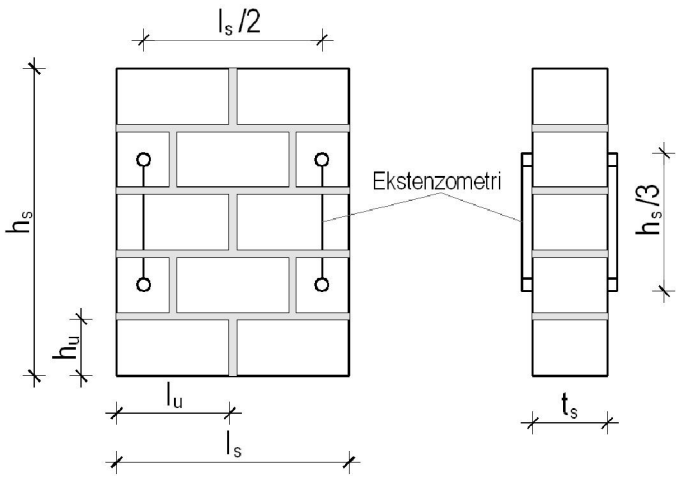
Opterećenje se nanosi bez udarca i povećava se stalnom brzinom od 0,03 do 0,10 N/mm^2 u sekundi do sloma. Tlačna čvrstoća $f_m$morta računa se tako da se slomno opterećenje prizme podijeli s površinom poprečnog presjeka u dodiru s tlačnim pločama, a zaokružuje se do najbliže vrijednosti od 0,05 N/mm^2.

3.3. Zidne prizme

3.3.1. Eksperimentalno određivanje tlačne čvrstoćeziđa

Karakteristična tlačna čvrstoća uzorka ziđa,$f_{k,}$ čvrstoćaje ispod koje se ne očekuje više od 5% rezultata. Karakterističnu tlačnu čvrstoću, f_k, treba odrediti eksperimentalno, no ako to nije moguće, onda svakako treba eksperimentalno odrediti tlačne čvrstoće morta i zidnog elementa. Ako se određuje eksperimentalno,karakteristična tlačna čvrstoća ziđa, f_k, može biti određena ili iz granične čvrstoće ziđa visine kata ispitanog do sloma ili iz tlačne čvrstoće manjih uzoraka ziđa.

Prema normi za ispitivanje nearmiranogziđa na tlak [40], potrebno je najmanje 3 uzorka oblika prikazanog na slici 3.3. U tablici 3.5 prikazane su izmjere malih ispitnih uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće ziđa prema [40].



Slika 3.3–Uzorci ziđa za ispitivanje tlačne čvrstoća ziđa

Tablica 3.5 - Izmjere malih ispitnih uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće ziđa

Izmjera lica zidnog elementa		Izmjera ispitnog uzoraka ziđa			
		Duljina	Visina		Debljina
l_u (mm)	h_u (mm)	l_s	h_s		t_s
<300	< 150	>(2xl_u)	>5h_u	> 3 ts i <15 t_s i >l_s	>t_u
	> 150		>3h_u		
>300	< 150	>(1,5xl_u)	>5h_u		
	> 150		>3h_u		

Ukoliko je očekivana visina ispitnog uzorka u skladu s tablicom 3.5 veća od 1000 mm,dopušteno je smanjiti izmjere uzorka (osim onih koji su načinjeni od zidnih elemenata koji imajušupljine okomito na smjer opterećenja) rezanjem zidnih elemenata pri čemu su slojevi na dnu i vrhu uzorka takvi daje:

1) l_s> 400 mm i l_s>l_u,

2) uzorci uključuju najmanjejednu vertikalnu sljubnicu u središnjem sloju kojaje smještenana sredini,
3) visina rezanih dijelova elemenata na gornjem i donjem sloju nije manja od debljineuzorka (t_s),
4) za sljubnice morta moraju se upotrebljavati izvorna lica zidnih elemenata.

Potrebno je poduzeti mjere za sprječavanje isušivanja uzorka u prva tri dana nakon zidanja, nakon čegase ispitni uzorak može ostaviti nepokriven u laboratorijskom okolišu. Potrebno jeosiguratii to da su lica uzorka na koje se nanosi opterećenje ravna i paralelna jedno naspram drugogate da se nalaze pod pravim kutom prema glavnoj osi uzorka. Ispitni uzorak treba ispitivati kada je mort toliko star da mu tlačna čvrstoća pada unutarpodručja vrijednosti danih u trećem stupcu tablice 3.6. Tlačnu čvrstoću morta potrebno je odrediti u skladu s točkom 3.2.2 ovoga poglavlja, odnosno prema normi [39].

Tablica 3.6 - Dopuštena područja čvrstoće morta unutar kojih ziđe može biti ispitano

Razred morta	Proračunska tlačna čvrstoća f_{md} [N/mm^2]	Srednja tlačna čvrstoća u vrijeme ispitivanja f_m [N/mm^2]
M1	1,0	$1,0 < f_m < 2,5$
M2,5	2,5	$2,5 < f_m < 5,0$
M5	5,0	$5,0 < f_m < 7,5$
M7,5	7,5	$7,5 < f_m < 10,0$
M10	10,0	$10,0 < f_m < 12,5$
M12,5	12,5	$12,5 < f_m < 15,0$
M15	15,0	$15,0 < f_m < 20,0$
M20	20,0	$20,0 < f_m < 30,0$
M30	30,0	$30,0 < f_m < 40,0$

Ako uzorci ziđa trebaju biti ispitani u određeno vrijeme, npr. 28. dan, čvrstoća mortamorase odrediti na taj dan ispitivanja.

Ispitni seuzorak u stroj za ispitivanje postavlja centralno. Treba provjeriti jesu li obje površine uzorka u punom dodiru sa strojem za ispitivanje i,ukoliko je potrebno, treba upotrijebititanki sloj za izravnavanje.

Pri ispitivanju, opterećenje treba povećavati postupno tako da slombude dosegnut 15 do 30 min od početka opterećenja. Okvirno, brzina nanošenja opterećenja iznosi oko 0,15 MPa/min za zidne elemente male čvrstoće, te oko 1,25 MPa/minza zidne elemente velike čvrstoće.

Ako treba odrediti modul elastičnosti, ispitivanje se provodi tako da se ispitni uzorak ziđa opremimjernim uređajima (slika 3.3)kako bi se mjerila promjena visine. Tlačnu silu potrebno je nanijeti u najmanje tri koraka do polovice vjerojatne vrijednosti dosegnute najveće sile.Nakonsvakogakoraka, tlačnu silu

trebadržati stalnom, (2±1) minute kako bi se odredila promjena u visini.Nakon što je završeno mjerenje zadnjeg koraka, tlačna sila povećavase stalnom brzinom dosloma. Ako je na raspolaganju naprava za mjerenje,koja može mjeriti pomak dok se sila povećavakontinuirano, odabere se stalna brzina opterećenja ili pomaka tako da se najveća sila dosegne nakon15 do 30 min.

Tlačna čvrstoća ziđapojedinog uzorka ziđaproračunava seprema izrazu:

$$f_i = \frac{F_{i,\max}}{A_i} \tag{3.2}$$

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

A_i - opterećeni poprečni presjek *i*-tog uzorka ziđa [mm^2]

Tlačna čvrstoća ziđa, *f'*, određuje se kao srednja vrijednost svih uzoraka i zaokružuje se na najbližu vrijednost do 0,1 N/mm^2

Karakteristična tlačna čvrstoća usvaja se kao minimalna vrijednost od:

$$f_k = \frac{f'}{1{,}2} \text{ ili } f_k = f_{i,\min} \tag{3.3}$$

gdje je: $f_{i,min}$ - najmanja pojedinačna vrijednost čvrstoće ispitanih uzoraka [N]

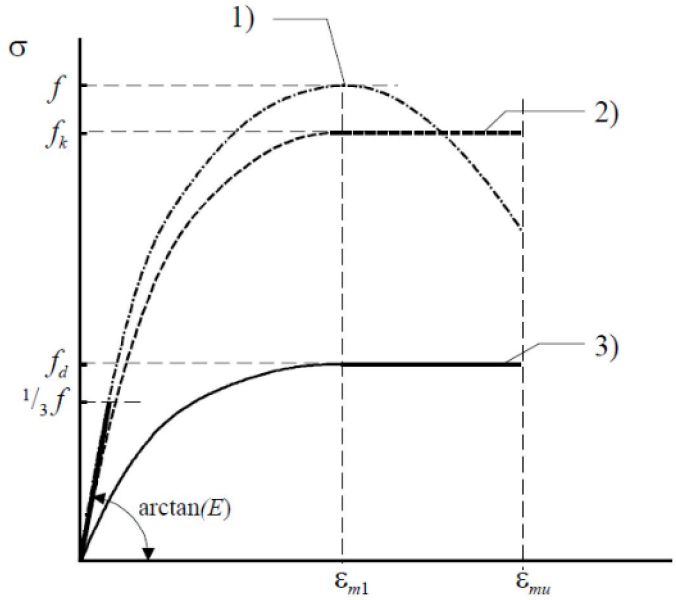
f' - srednja vrijednost tlačne čvrstoće ziđa [N/mm^2]

Modul elastičnosti uzorka E_i jednak je sekantnom modulu pri srednjoj relativnoj deformaciji ε_i na sva četiri mjerna mjesta, koje su očitane pri naprezanju jednakom jednoj trećini najviše dosegnutog naprezanja:

$$E_i = \frac{f_i}{3\varepsilon_i} \tag{3.4}$$

Vrijednost modula elastičnosti zaokružuje se do najbližih 100 N/mm^2.

Na slici 3.4 prikazan je odnos naprezanje-deformacija za ziđe. Na slici je s 1) označeno stvarno ponašanje uzorka pri tlačnom ispitivanju, s 2) idealizirani dijagram (parabola + pravokutnik), a s 3) proračunski dijagram.



Slika 3.4 - Odnos naprezanje-deformacija za tlačno opterećeno ziđe

3.3.2. Određivanje tlačne čvrstoće ziđa

Karakteristična tlačna čvrstoća ziđa zidanog u mortu općenamjene ili lakoagregatnom mortu može se odrediti iz sljedećegizraza prema EN 1996 [41]:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \tag{3.5}$$

gdje je: K –konstanta koja ovisi o tipu zidnih elemenata i načinu izvedbe zida, tablica 3.7

f_b –normalizirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata u N/mm^2

f_m – tlačna čvrstoća morta za opću namjenu u N/mm^2

Karakteristična tlačna čvrstoća ziđa zidanoga u tankoslojnom mortu (debljine od 0,5 mm do 3 mm), s glinenim zidnim elementima Grupe 1 i 4, kalcijsko-silikatnim zidnim elementima ili zidnim elementima od porobetona, računa se prema izrazu:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,85} \tag{3.6}$$

Karakteristična tlačna čvrstoća ziđa zidanog u tankoslojnom mortu (debljine od 0,5 mm do 3 mm), rabeći zidne elemente Grupe 2 i 3, može se odrediti iz izraza:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \tag{3.7}$$

Izrazi (3.5) do (3.7) smiju se primjenjivati ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

- normalizirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata f_b nije veća od 75 N/mm^2 pri izvedbi zida s mortom opće namjene,
- normalizirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata f_b nije veća od 50 N/mm^2 pri izvedbi zida s tankoslojnim mortom ,
- srednja vrijednost tlačne čvrstoće morta ne smije biti veća od 20 N/mm^2, niti veća od $2f_b$u zidu zidanom mortom opće namjene,
- srednja vrijednost tlačne čvrstoće morta ne smije biti veća od 10 N/mm^{2}u zidu zidanom tankoslojnim mortom,
- debljina ziđa jednaka je duljini ili širini zidnog elementa, tako da u zidu nema sljubnica morta koje su paralelne s licem zida,
- reške u zidovima izvedenim s mortom opće namjene i lakoagregatnim mortom ne smiju imati debljinu manju od 6 mm, niti veću od 15 mm,
- reške u zidovima izvedenim s tankoslojnim mortom ne smiju imati debljinu manju od 0,5 mm, niti veću od 3 mm.
- trebaju biti zadovoljeni uvjeti iz poglavlja 8 EN 1996 [41], u kojima se propisuju detalji pri izvedbi ziđa, kao što su: preklapanje zidnih elemenata, minimalne površine poprečnih presjeka zidova, zaštitni slojevi i minimalne površine armature, ukoliko se radi o armiranom ziđu; sidrenje i preklapanje armature, spojevi zidova s podnom i stropnom konstrukcijom i td.

Tablica 3.7–Vrijednosti konstante *K*za proračun karakteristične tlačne čvrstoće zida

Zidni elementi		Mort opće namjene	Tankoslojni mort	Lakoagregatni mort	
				600 < ρ < 800 kg/m^3	800 < ρ < 1300 kg/m^3
Glineni	Grupa 1	0,55	0,75	0,3	0,4
	Grupa 2	0,45	0,7	0,25	0,3
	Grupa 3	0,35	0,5	0,2	0,25
	Grupa 4	0,35	0,35	0,2	0,25
Kalcij - silikatni	Grupa 1	0,55	0,8	X	X
	Grupa 2	0,45	0,65	X	X
Betonski	Grupa 1	0,55	0,8	0,45	0,45
	Grupa 2	0,45	0,65	0,45	0,45
	Grupa 3	0,4	0,5	X	X
	Grupa 4	0,35	X	X	X
Porobetonski	Grupa 1	0,55	0,8	0,45	0,45
X - Kombinacija mort/zidni element, ne koristise					

Prema [41],ukoliko nema eksperimentalnih rezultata, sekantni modul elastičnosti možese za proračune pretpostaviti kao:

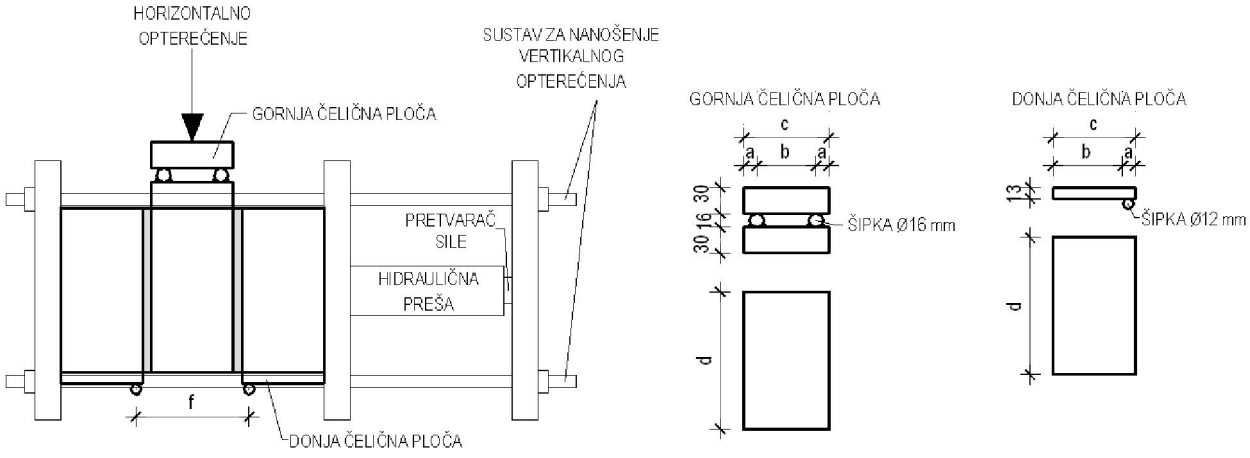
$$E = K_E \cdot f_k \tag{3.8}$$

gdje je: K_E – konstanta propisana Nacionalnim dodatkom, a preporučena vrijednost prema [41] je 1000.

3.3.3. Eksperimentalno određivanje posmične čvrstoćeziđa

Karakteristična posmična čvrstoća ziđa,f_{vk}, može se dobiti ispitivanjem uzorka prema [42], a kako je prikazano na slici 3.5 a).Sustav za unošenje vertikalnogaopterećenja sastoji se od hidrauličke preše(koja stvara opterećenje koje se preko čeličnih ploča prenosi na ispitni uzorak), pretvarača sile (kojim se kontrolira veličina unesenog opterećenja), te čeličnih ploča preko kojih se opterećenje, stvoreno hidrauličkom prešom, prenosi na uzorak.

Sustav za unošenje horizontalnog opterećenja čine gornje i donje čelične ploče. Gornja čelična ploča sastoji se od dvije ploče debljine 3 cm međusobno spojene šipkama ø16 mm. Debljina donjih čeličnih ploča iznosi 13 mm, a na njih su zavarene šipke promjera ø12 mm. Dimenzije ploča proizlaze iz dimenzija zidnogaelementa ispitivanog ziđa. Gornje i donje ploče sustava prikazanesu slikama3.5 b) i c). Veličine a,b,c,d danesu u tablici 3.8.



a) b) c)

Slika 3.5– Posmično ispitivanje ziđa

Tablica 3.8 – Izmjere gornje i donje čelične ploče

Izmjere zidnog elementa			Izmjere gornjih čeličnih ploča				Izmjere gornjih čeličnih ploča				
l_u [mm]	d_u [mm]	h_u [mm]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	f (mm)
190	250	190	8	174	190	250	8	182	190	250	226
	290					290				290	
200	375	238	8	79	95	375	8	87	95	375	131
250	120	65	12	41	65	120	12	53	65	120	109
		120		96	120			108	120		164
		140		116	140			128	140		184
		190		166	190			178	190		234
	150	150		126	150	150		138	150	150	194
	190	140		116	140	190		128	140	190	184
		190		166	190			178	190		234
		250		71	95			83	95		139
	250	140		116	140	250		128	140	250	184
		190		166	190			178	190		234
	375	238		71	95	375		83	95	375	139
290	120	190	14	162	190	120	14	176	190	120	238
	190	140		112	140	190		126	140	190	188
		190		162	190			176	190		238
		238		67	95			81	95		143
	250	190		162	190	250		176	190	250	238
		238		67	95			81	95		143
300	250	238	15	65	95	250	15	80	95	250	145
380	250	140	25	90	140	250	25	115	140	250	210
		160		70	160			135	160		230
		238		47	97			72	97		167

Prema normi [42], za eksperimentalno određivanje posmične čvrstoće ziđa potrebno je najmanje 9 ispitnih uzoraka prema izmjerama danim u tablici 3.9, pri čemu su l_u i h_u duljina i širina zidnog elementa, a l_s duljina ispitnog uzorka.

Tablica 3.9 – Izmjere uzorka za posmično ispitivanje

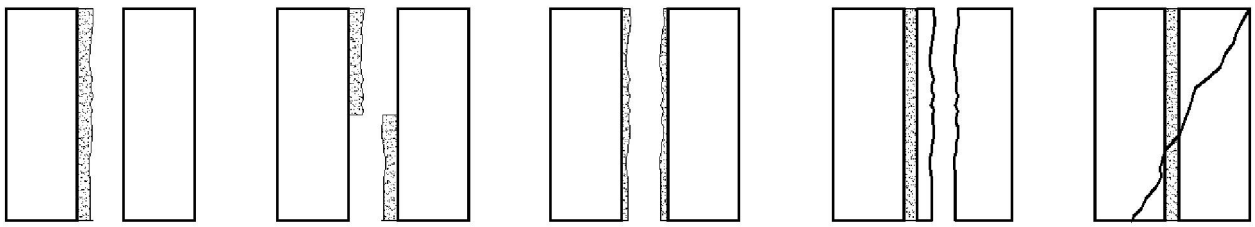
l_u[mm]	h_u[mm]	l_s [mm]
≤ 300	≤ 200	$l_s = l_u$
> 300	>200	l_s= 300

Opterećenje površine zidnih elemenata ne smiju imaju prašine na sebi. Donji element trebapostaviti na čistu ravnu površinu. Sljedeći element mora se postaviti tako da se postigne konačnadebljina morta od 8 do 15 mm za ziđe s uobičajenim sljubnicama, ili 1 do 3 mm za ziđe stankoslojnim sljubnicamamorta.

Neposredno nakon izrade uzoraka potrebno ih je opteretiti jednoliko raspodijeljenom masom kako bise postiglo vertikalno naprezanje između 2,0 i 5,0x10^{-3} N/mm^2. Za sve mortove, osim vapnenog,treba se spriječiti isušivanje ispitnih uzorakatijekom vremena njege potpunim prekrivanjem polietilenskom folijom i držati ispitne uzorkeneporemećene do ispitivanja. Uzorci se ispituju pristarosti od 28±1 dan, osim ako nije drukčije navedeno za vapneni mort. Također je potrebno i odrediti tlačnu čvrstoćumorta pri istoj starosti prema [39].

Ispituju se najmanje tri ispitna uzorka za svako od tri predtlačenja. Za zidne elemente čija je tlačna čvrstoća veća od 10 N/mm^2, koristi se predtlačenje od približno 0,2, 0,6 i 1,0 N/mm^2. Za zidne elemente čija je tlačna čvrstoća manja od 10 N/mm^2,predtlačenje je u iznosu od približno 0,1, 0,3 i 0,5 N/mm^2.

Ako slom nastupi posmičnim slomom zidnog elementa usporedno sa sljubnicom (slika 3.6d)), ili drobljenjem ili cijepanjem zidnog elementa (slika 3.6e)), tada je potrebno upotrijebiti druge (sljedeće) ispitne uzorke sve dok se ne dobiju tri posmična sloma prema slikama 3.6 a), b) i c) za svaku razinu predtlačenja ili, umjesto toga, upotrijebiti dobivene rezultate kao donju granicu posmične čvrstoće za svaku razinu predtlačenja.Ako je potrebno,može se upotrijebiti drugo predtlačenje kako bi se postigao dovoljan broj lomova.



Slika 3.6–Mogući oblici sloma pri ispitivanju posmične čvrstoće ziđa

Za svaki ispitni uzorak proračunava se posmična čvrstoću i naprezanje predtlačenja do najbližih 0,01 N/mm^2 primjenom izraza:

$$f_{v0i} = \frac{F_{i,\max}}{2A_i} \tag{3.9}$$

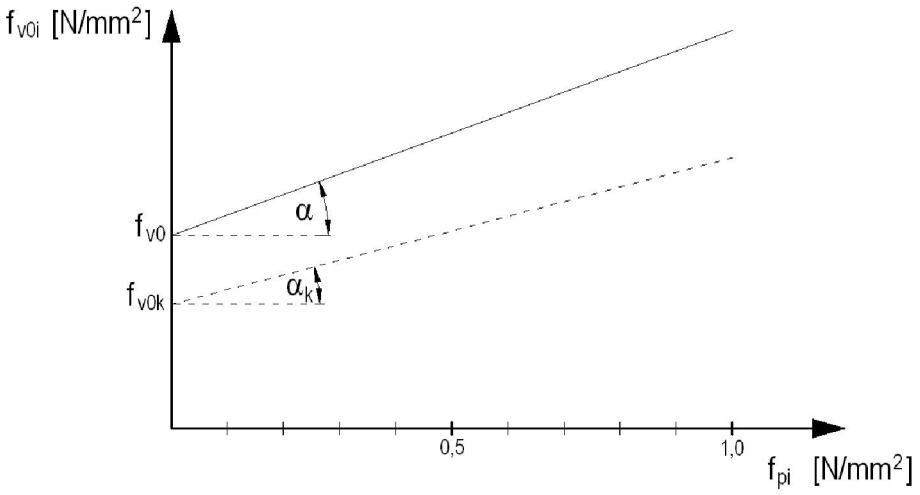
$$f_{pi} = \frac{F_{pi}}{A_i} \tag{3.10}$$

gdje je: $F_{i,max}$ – maksimalna horizontalna sila [N]

F_{pi} –sila predtlačenja [N]

A_i – površina poprečnog presjeka uzorka [mm^2]

Nakon što se nacrta graf pojedinih posmičnih čvrstoća f_{voi} u odnosu na tlačno naprezanje f_{pi} prema slici 3.7, moguće je odrediti srednju početnu posmičnu čvrstoću f_{vo} pri nultom normalnom naprezanju te kut unutarnjegatrenja.



Slika 3.7–Posmična čvrstoća i kut unutarnjeg trenja

Posmična čvrstoća zaokružuje se na 0,01 N/mm^2, a kut unutarnjega trenja αdo najbližeg cijelog stupnja određenoga iz nagiba crte.

Karakteristične vrijednosti početne posmične čvrstoće f_{vok} i kuta unutarnjega trenja tan$\alpha_k$računaju se prema izrazima:

$$f_{v0k} = 0{,}8 \cdot f_{v0} \tag{3.11}$$

$$\tan\alpha_k = 0{,}8 \cdot \tan\alpha \tag{3.12}$$

3.3.4. Određivanje posmične čvrstoće ziđa

Kada ne postoje eksperimentalno dobiveni rezultati, karakteristična posmična čvrstoća f_{vk}nearmiranogziđa izgrađenogamortom opće namjene, tankoslojnim mortom debljine od 0,5 do 3mm ili lakoagregatnim mortom, uz uvjet da su horizontalne i vertikalne sljubnice potpuno ispunjene mortom, može se prema [41] odrediti iz izraza:

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0{,}4\sigma_d \tag{3.13}$$

gdje je: f_{vk0} – posmična čvrstoća bez tlačnog naprezanja [N/mm^2]

σ_d –proračunsko vertikalno tlačno naprezanje u zidu u razini koja se promatra uzimajući u obzir kombinaciju opterećenja koja daje najmanje vertikalno opterećenje

Vrijednost f_{vk} iz izraza (3.13) mora biti manja od $0{,}065f_b$, ali ne manje od vrijednosti f_{vk0}.

Proračunsko vertikalno tlačnonaprezanje u zidu σ_d moguće je odrediti iz:

$$\sigma_d = \frac{N_g}{t \cdot L} \tag{3.14}$$

gdje je: N_g – vrijednost tlačne sile povoljnog stalnog opterećenja [N]

t –debljina zida [mm]

L – duljina zida [mm]

Ako vertikalne sljubnice nisu ispunjene mortom, ali su susjedne plohe zidnih elemenata postavljene jedna uz drugu, vrijednost posmične čvrstoće f_{vk} može se uzeti kao najmanja vrijednost od:

$$f_{vk} = 0{,}5f_{vk0} + 0{,}4\sigma_d \tag{3.15}$$

ili $f_{vk} = 0{,}045f_b$ ali ne manje od vrijednosti f_{vk0}.

Prema [41] vrijednosti karakteristične početne posmične čvrstoće f_{vk0} mogu se odrediti prema tablici 3.10.

Tablica 3.10 – Vrijednosti karakteristične početne posmične čvrstoće f_{vk0}

Zidni elementi	f_{vko} [N/mm2]			
	Mort opće namjene		Tankoslojni mort	Lakoagregatni mort
Glineni	M10 - M20	0,3	0,3	0,15
	M2,5 - M9	0,2		
	MI - M2	0,1		
Kalcijsko - silikatni	M10 - M20	0,2	0,4	0,15
	M2,5 - M9	0,15		
	MI - M2	0,1		
Betonski	M10 - M20	0,2	0,3	0,15
Porobetonski	M2,5 - M9	0,15		

3.3.5. Vlačna čvrstoća ziđa

Europska norma [41] ne predviđa određivanje vlačne čvrstoće ziđa, a ne postoji ni europska norma za metodu ispitivanja togasvojstva.

Prema [35], referentna vlačna čvrstoća (čvrstoća ziđa kod koje dolazi do vlačnog otkazivanja kada je zidistodobno opterećen vertikalnim i horizontalnim opterećenjem) može se odrediti ispitivanjem prikazanim na slici 3.8 a), gdje je zid opterećen nepromjenjivim vertikalnim opterećenjem (*N*) i postupno rastućom horizontalnom silom (*H*) do dijagonalnogasloma. Referentna vlačna čvrstoća računa se iz izraza:

$$f_t = -\frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + \left(k\tau\right)^2} \tag{3.16}$$

$$\tau = \frac{f_t}{k}\sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_t}} \tag{3.17}$$

gdje je: σ_0 – prosječno tlačno naprezanje ($\sigma_0 = N/A_m$)

N –stvarno vertikalno opterećenje

τ – prosječno posmično naprezanje ($\tau = H/A_m$) pri slomu

H – horizontalna sila pri vlačnom slomu

k – omjer najvećeg i prosječnog posmičnog naprezanja (k≈1,5)

A_m – površina presjeka zida ($A_m = t \cdot L$)

L – duljina zida

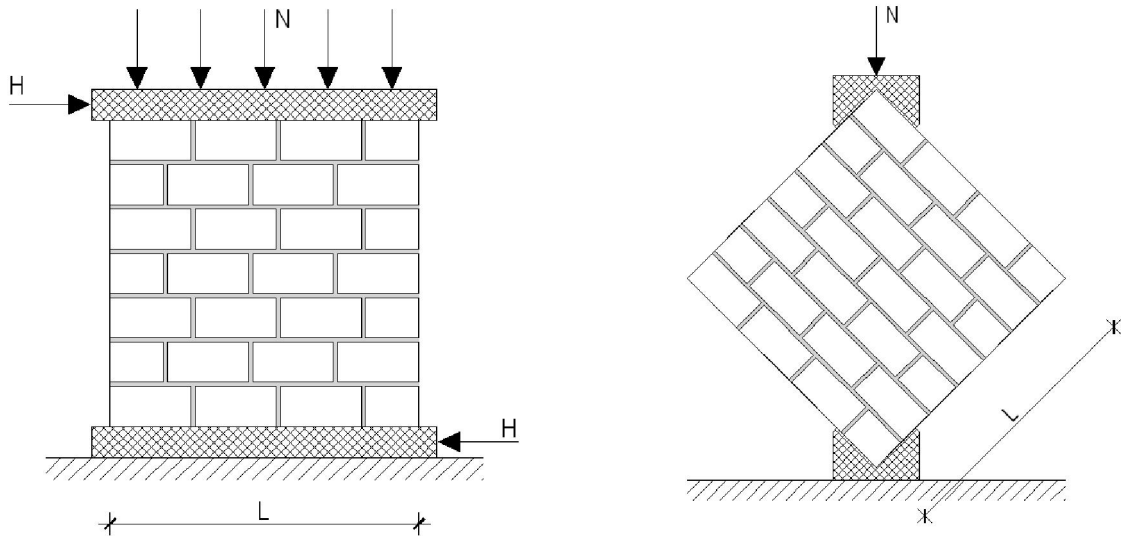
t – debljina zida

Važno je napomenuti da se u izrazima (3.16) i (3.17) ne smije umjesto τ uzeti posmična čvrstoća f_{vk} dobivena ispitivanjem prikazanim na slici 3.5 jer se tada dobiju nerealno visoke vrijednosti vlačne čvrstoće ziđa.

Drugo ispitivanje pomoću kojega je moguće odrediti referentnu vlačnu čvrstoću prikazano je na slici 3.8 b). Pri ovom ispitivanju opterećenje se postupno povećava duž jedne dijagonale.

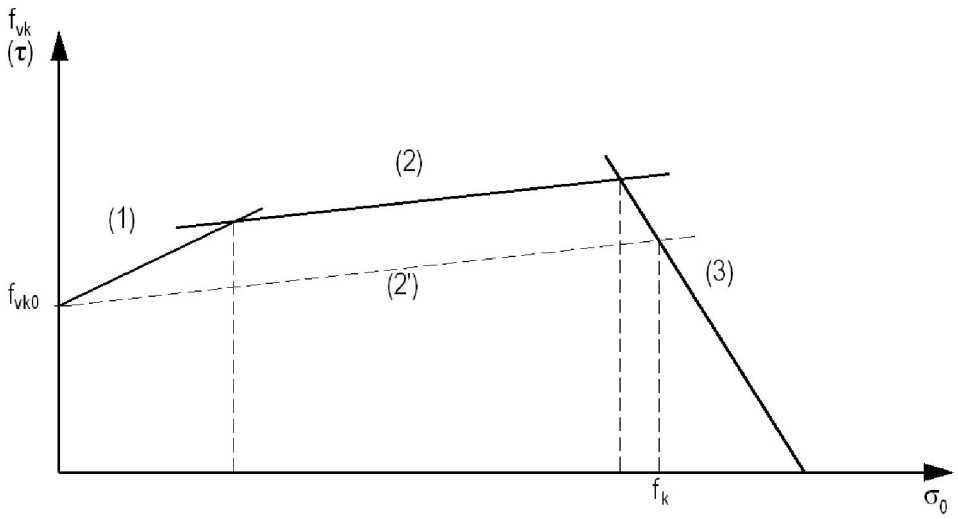
Referentna vlačna čvrstoća kod ovakvoga ispitivanja računase prema izrazu:

$$f_t = \frac{2N}{\pi \cdot t \cdot L\sqrt{2}} \tag{3.18}$$



Slika 3.8 – Ispitivanje vlačne čvrstoće ziđa

Na slici 3.7 prikazan je dijagram karakteristične posmične čvrstoće ziđa u ovisnosti o vertikalnom naprezanju, prema ispitivanju prikazanom na slici 3.6 a).



Slika 3.9 – Dijagram karakteristične posmične čvrstoće ziđa u ovisnosti o vertikalnom naprezanju

U području (1) vrijedi izraz (3.13), u području (2) vrijedi izraz (3.17), a područje (3) omeđenoje čvrstoćom ziđaf_k prema izrazima (3.5) do (3.7). Pravac (3) na slici definiran je izrazom $f_{vk}=f_k-\sigma_0$. Ukoliko izraz (3.17) pokazuje manje vrijednosti od izraza (3.13), dijagram se sastoji samo od linije (2') i linije (3).

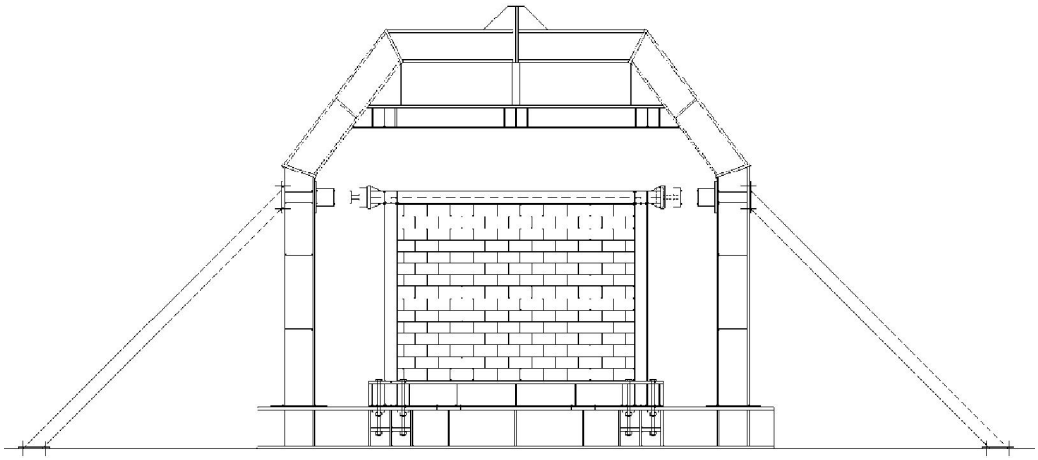
4. PROVEDENA LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA

4.1. Uvod

Eksperimentalna istraživanja,provedena u laboratoriju Građevinskoga fakulteta Osijek, obuhvatila su ispitivanje mehaničkih karakteristika komponenata konstrukcije čeličnih okvira sa zidanim ispunom:

- ispitivanje zidnih elemenata:
  - šuplji glineni blokovi (ispitivanje prema normi HRN EN 772-2:2004)
  - blokovi od porobetona (HRN EN 772-2:2004),
- ispitivanje morta:
  - vapneno-cementni mort (HRN EN 1015-11:2000),
  - ljepilo proizvođača - *Ytong* ljepilo (HRN EN 1015-11:2000),
- ispitivanje čeličnoga materijala (HRN EN 10002-1:2008),
- ispitivanje zidnih prizmi:
  - ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih prizmi (HRN EN 1052-1:2004),
  - ispitivanje posmične čvrstoće zidnih prizmi (HRN EN 1052-3:2004),
  - ispitivanje vlačne čvrstoće zidnih prizmi (prema [35]).

U svrhu istraživanja ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom, izrađeno je i ispitano 9 modela čeličnih okvira (jedno polje – jedan kat) u mjerilu 1:2, koji su se opterećivali horizontalnom cikličkom silom u visini grede okvira, kako je prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1 – Shema reaktivnog okvira i ispitivanog čeličnog okvira sa zidanim ispunom

Uzorci su, s obzirom na postavljeni cilj istraživanja, bili podijeljeni na tri serije od po tri različita čelična okvirna sustava:

- čelični okviri sa zidanom ispunom od glinenih šupljih blokova – oznaka OG-i,
- čelični okviri s "Ytong" zidanom ispunom od porobetonskih blokova – oznaka OY-i,
- čelični okviri s kombiniranom ispunom od šupljih glinenih blokova i*Ytong* porobetonskih blokova kao inovativni sustav – oznaka OGY-i.

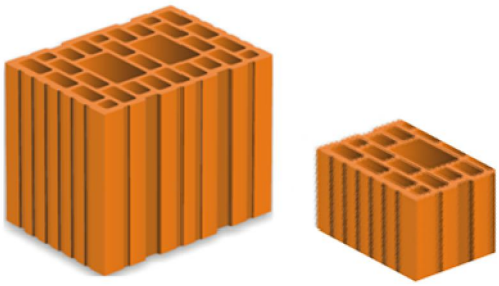
Dodatno je ispitan "čisti" čelični okvir bez zidanog ispuna u svrhu određivanja utjecaja ispuna na povećanje krutosti sustava i njegovu graničnu nosivost.

Jedan od ciljevaeksperimentalnih ispitivanja bio je istraživanje ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom, koji se najčešće koristi u Republici Hrvatskoj, pa su iz tog razloga odabrane dvije skupine zidnih elemenata: šuplji glineni blokovi (kao reprezenti ispuna veće nosivosti) i *Ytong*porobetonski blokovi (kao reprezenti „mekšeg" ispuna).
Osnovna hipoteza bila je da će kod kombiniranoga modela (ispun od glinenih blokova i blokova od porobetona) tijekomjakihpotresa, „mekši" (porobetonski) elementi konstrukcije koji povezuju okvir i zidni ispun otkazati, te na taj način seizmičkiizolirati čelični okvir odzidanog ispuna kako bi se izbjeglo nepovoljno djelovanje ispuna.

4.2. Ispitivanje zidnih elemenata

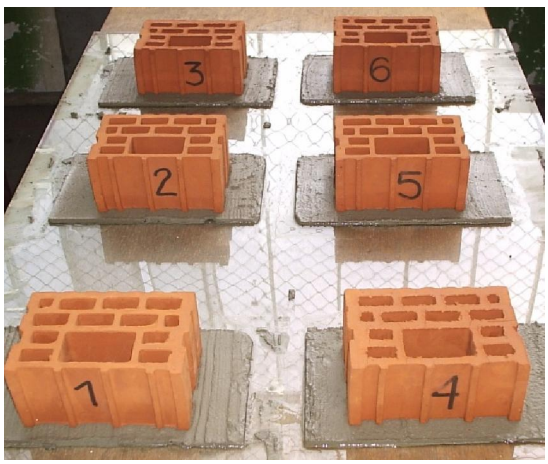
4.2.1. Šuplji glineni zidni elementi

Šuplji glineni blokovi, tipa „V5“ (dimenzija 250x190x190 mm), koji se često koriste u Republici Hrvatskoj, prikazani su na slici 4.2.S obzirom na mjerilo modela ovi blokovi izrezanisu na četvrtine kako bi broj horizontalnih reški bio približno jednak broju reški stvarnih izvedenihzidanih građevina od ovakve vrste opekarskih proizvoda.Dimenzije izrezanih blokova bile su /h/t=190/90/120 mm, a ti su blokovi korišteni pri izradi modela serija OG-i i OGY-i.Deklarirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata je 15 N/mm^2.
Izrezani dijelovi ispitani su na vertikalni i horizontalni tlak prema [37].



Slika 4.2 – Standardni šuplji glineni blok tipa V5 i izrezani blok korišten u modelima OG-ii OGY-i

Na slici 4.2 prikazan je postupak izrade i pripreme uzoraka zidnih elemenata za ispitivanje tlačne čvrstoće. Uzorci su izrezani, uronjeni u vodu na 18 sati, a nakon toga nanesen je izravnavajući sloj morta, slika 4.3 a). Nakon otvrdnuća morta (slika 4.3 b)), ispitana je tlačna čvrstoća zidnih elemenata, slika 4.4.



a)

b)

Slika 4.3 – Priprema šupljih glinenih zidnih elemenata za ispitivanje tlačne čvrstoće

a) b) c)

Slika 4.4 – Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata: a) zidni element u tlačnoj preši, b) i c) zidni elementi nakon sloma

U tablici 4.1. prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće glinenih zidnih elemenata. Osim ovih ispitivanja, provedeno je i ispitivanje čvrstoće elemenata na savijanje iz čega je, prema [42], proračunata njihova vlačna čvrstoća.

Tablica 4.1- Tlačne čvrstoće šupljih glinenih zidnih elemenata

Uzorak	$f_{c,v,mu,i}$ [N/mm^2]	$f_{c,h,mu,i}$ [N/mm^2]	$f_{t,mu,i}$ [N/mm^2]
G_1	13,3	2,3	0,7
G_2	13,3	2,0	0,8
G_3	13,3	2,1	0,7
G_4	12,6	2,0	0,7
G_5	13,0	2,0	0,9
G_6	12,8	1,9	0,9

$f_{c,v,mu,i}$ – vertikalna tlačna čvrstoća zidnog elementa

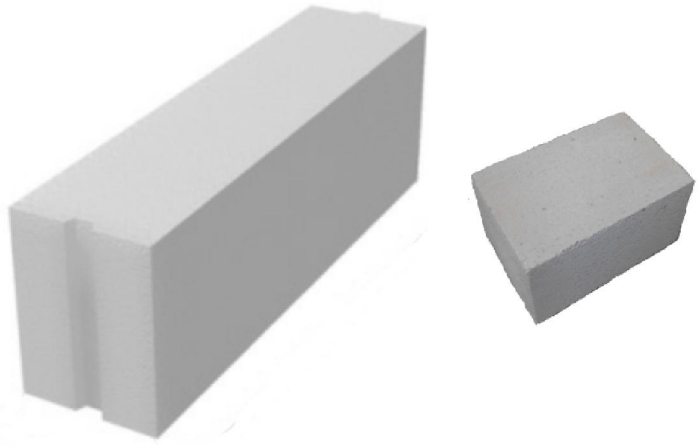
$f_{c,h,mu,i}$– horizontalna tlačna čvrstoća zidnog elementa

$f_{t,mu,i}$ – vlačna čvrstoća zidnog elementa

4.2.2. Zidni elementi od porobetona

Puni zidni elementi (za modele serije OY-ii OGY-i) od porobetona, slika 4.5 a), ispitivani su samo na vertikalni tlak jer je pretpostavljeno da će zbog izotropnosti materijala i čvrstoća u drugome smjeru biti približno jednaka. Ispitivanje tlačne čvrstoće punih porobetonskih blokova provedeno je na neizrezanim blokovima.Dimenzije izrezanog porobetonskog bloka korištenog u eksperimentu su l/h/t = 625x90x125 mm

za modele serije OY-i, te l/h/t = 190x90x120 mm za modele serije OGY-i, slika 4.5 b). Slika 4.6 prikazuje ispitivanje punog zidnog elementa od porobetona i oblik tlačnog sloma.



a) b)

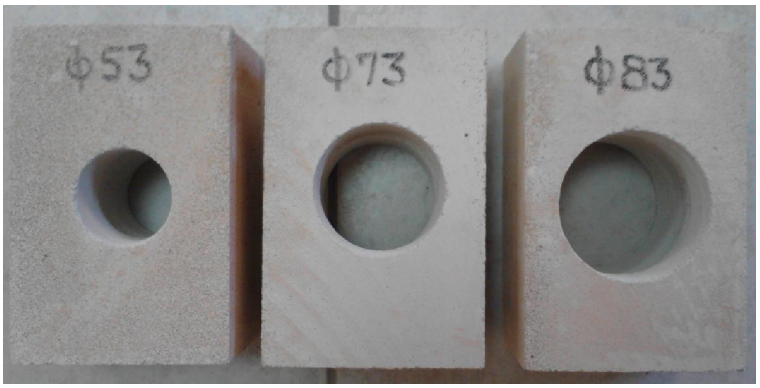
Slika 4.5 – Zidni elementi od porobetona: a) puna veličina, b) izrezani portobetonski blok

a) b)

Slika 4.6 –Ispitivanje punog zidnog elementa od porobetona (a), porobetonski blok nakon sloma (b)

Za izbušene zidne elemente od porobetona, slika 4.7, za modele serije OGY-i, ispitane su tlačne čvrstoće u oba međusobno okomita pravca. Promjeri rupa u izbušenom bloku iznosili su 53, 73 i 83 mm. Na slici 4.8 prikazano je tlačno ispitivanje izbušenih porobetonskih blokova.
Tablica 4.2. prikazuje rezultate ispitivanja tlačne čvrstoće punih porobetonskih blokova, te tlačne čvrstoće u horizontalnom i vertikalnom smjeru izbušenih porobetonskih blokova.

Iako su porobetonski blokovi imali slabije mehaničke karakteristike od šupljih glinenih blokova u pogledu tlačne čvrstoće, dodatno su oslabljeni rupama s ciljem postizanjaranijeg otkazivanja nosivosti, te su kao takvi korišteni pri izradi zidnog ispuna u modelima serije OGY-i.



Slika 4.7 – Izbušeni porobetonski blokovi

Slika 4.8– Ispitivanje izbušenih porobetonskih blokova

Tablica 4.2- Tlačne čvrstoće zidnih elemenata od porobetona

Uzorak	Blokovi od porobetona	Izbušeni blokovi od porobetona					
	$f_{c,v,h,mu,i}$ [N/mm^2]	$f_{c,v,mu,i}$ [N/mm^2]			$f_{c,h,mu,i}$ [N/mm^2]		
		Ø53mm	Ø73 mm	Ø83 mm	Ø53mm	Ø73 mm	Ø83 mm
Y_1	2,2	2,0	2,1	1,8	0,8	0,5	0,3
Y_2	2,3	2,1	2,1	1,7	1,2	0,5	0,3
Y_3	2,1	2,3	2,2	1,6	0,7	0,3	0,4
Y_4	2,1	1,9	1,9	1,5	0,8	0,5	0,3
Y_5	1,9	2,3	2,0	1,4	0,8	0,3	0,3
Y_6	2,2	2,1	1,9	1,6	1,0	0,5	0,3

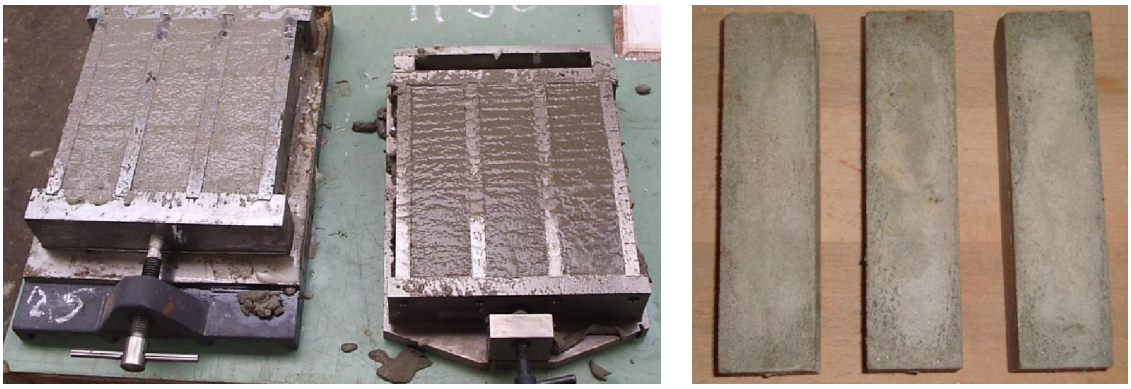
$f_{c,v,h,mu,i}$ – vertikalna i horizontalna tlačna čvrstoća porobetonskog zidnog elementa

$f_{c,v,mu,i}$ – vertikalna tlačna čvrstoća izbušenog porobetonskogzidnog elementa

$f_{c,h,mu,i}$ – horizontalna tlačna čvrstoća izbušenog porobetonskogzidnog elementa

4.3. Ispitivanje cementno-vapnenog morta i Ytong ljepila

Pri izradi zidnih prizmi od glinenih blokova korišten je cementno-vapneni mort s volumenskim omjerima cementa, vapna i pijeska od 1:1:5, dok je za zidne prizme od porobetonskih blokova korišteno ljepilo proizvođača. Vapneno-cementni mort i ljepilo ispitani su prema normi [39]. Slika 4.9 prikazuje izradu uzoraka prizmi morta dimenzija 40/40/160 mmna kojima se ispituje njihova vlačna i tlačna čvrstoća.



a) b)

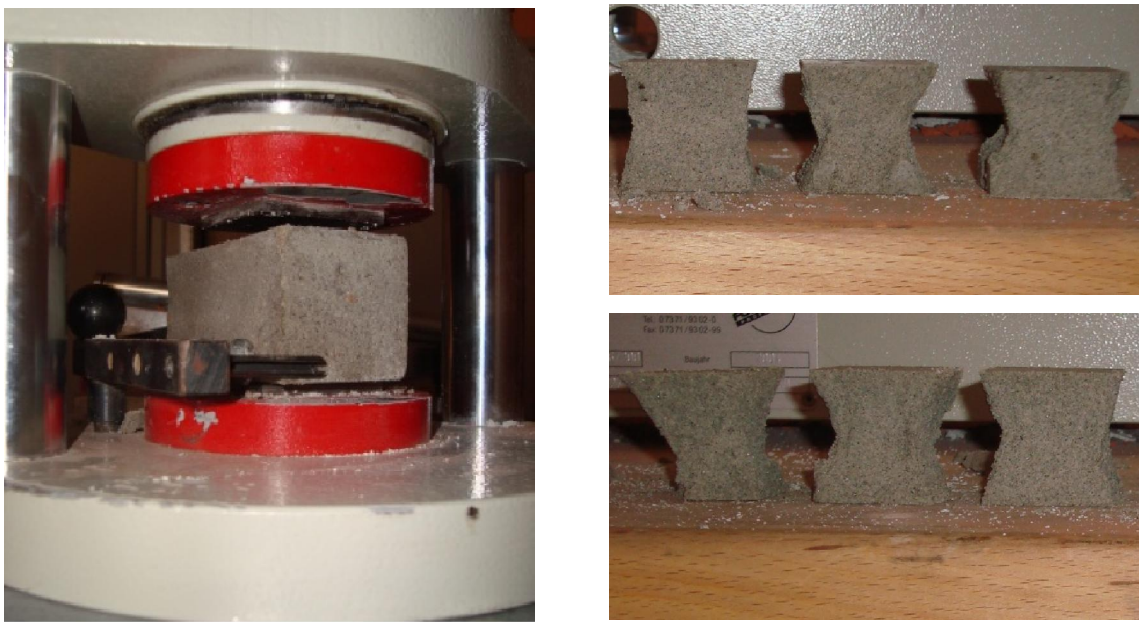
Slika 4.9– Uzorci morta: a) izrada prizmi, b) prizme nakon očvršćenja

Kako je opisano u [39], uzorci su prvo ispitivani na savijanje iz čega je moguće proračunati njihovu vlačnu čvrstoću, slika 4.10a),te je od 3 prizme dobiveno 6 polovica, slika 4.10b), koje su potom ispitane na tlak.

a) b)

Slika 4.10– Ispitivanje prizmi: a) vlačno ispitivanje, b) ispitani uzorci

Na slici 4.11 prikazano je ispitivanje tlačne čvrstoće morta, te slomljene prizme morta.



a) b)

Slika 4.11– Ispitivanje prizmi: a) tlačno ispitivanje, b) ispitani uzorci

U tablici 4.3 prikazane su sile sloma pri vlačnom i tlačnom ispitivanju prizmi morta, te preračunate vlačne i tlačne čvrstoće.

Tablica 4.3 – Vlačna i tlačna čvrstoća cementno-vapnenog morta

Uzorak	Vlačno ispitivanje		Tlačno ispitivanje	
	Sila sloma $F_{mt,i}$ [N]	Vlačna čvrstoća $f_{mt,i}$ [N/mm^2]	Sila sloma $F_{m,i}$ [N]	Tlačna čvrstoća $f_{m,i}$ [N/mm^2]
CVM_1	340	0,80	8900	5,56
			7800	4,88
CVM_2	310	0,73	7600	4,75
			7800	4,88
CVM_3	300	0,70	8000	5,00
			8000	5,00

Prosječna tlačna čvrstoća morta iznosila je f_m=5,02 N/mm^2, a prosječna vlačna čvrstoća bila je f_{mt}=0,74 N/mm^2.

Isti postupak pripreme i ispitivanja prizmi primijenjen je i za *Ytong* ljepilo. Dobivene su veće vrijednosti u odnosu na cementno-vapneni mort pa tako prosječna tlačna čvrstoća iznosi f_m=9,13 N/mm^2, dok je prosječna vlačna čvrstoća f_{mt}=2,36 N/mm^2. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.4.

Tablica 4.4 – Vlačna i tlačna čvrstoća *Ytong* ljepila

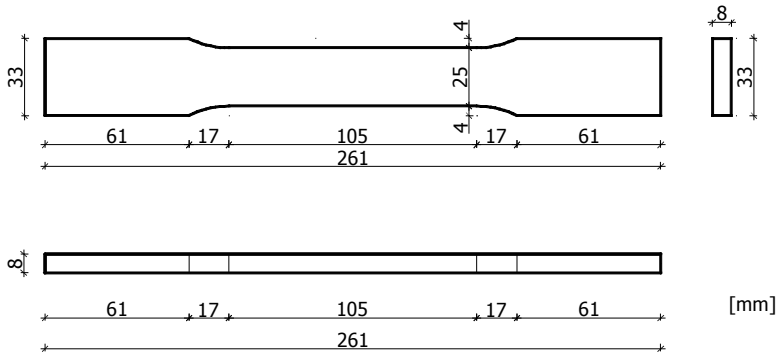
Uzorak	Vlačno ispitivanje		Tlačno ispitivanje	
	Sila sloma $F_{mt,i}$ [N]	Vlačna čvrstoća $f_{mt,i}$ [N/mm^2]	Sila sloma $F_{m,i}$ [N]	Tlačna čvrstoća $f_{m,i}$ [N/mm^2]
YM_1	0,98	2,30	14,00	8,75
			14,50	9,06
YM_2	0,96	2,25	14,60	9,13
			15,00	9,38
YM_3	1,08	2,53	14,50	9,06
			15,00	9,38

4.4. Ispitivanje osnovnog materijala čeličnih okvira

Mehaničke karakteristike čelika od kojeg su izrađeni okviri određene su vlačnim pokusom u kidalici marke WOLPERT–Zwick/Roell, kapaciteta 400 kN, slika 4.12.Ispitivanje je provedeno na Institutu građevinarstva Hrvatske u Zagrebu.

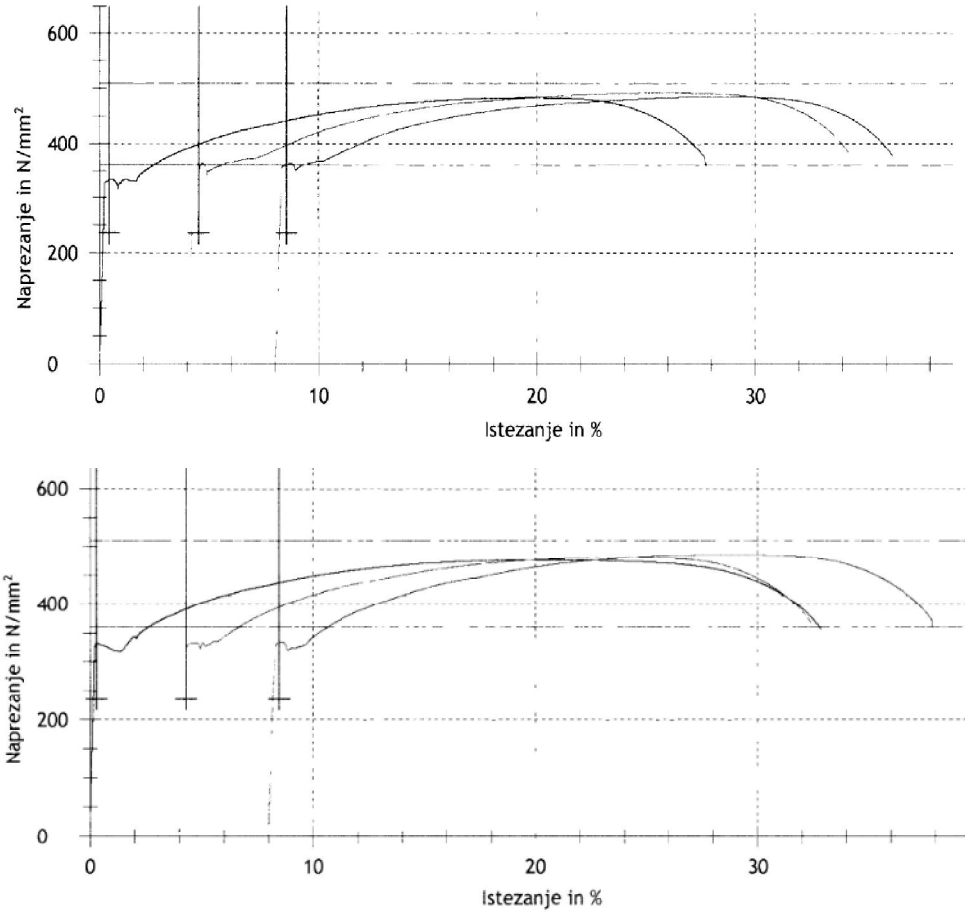
Slika 4.12 – Ispitivanje čeličnih epruveta

Epruvete su izvedene kao proporcionalno kratke s početnom mjernom duljinom L_0=80 mm. Ukupna duljina epruveta iznosila je 261 mm, dok je nominalna debljina i širina uzorka bila 8 mm i 25 mm, slika 4.13. Uzorci za ispitivanje uzeti su iz pojasnica profila HEA 120.



Slika 4.13 – Geometrija čeličnih epruveta osnovnog materijala

Ispitivanjem su određene granice popuštanja f_y i vlačne čvrstoće f_u za ukupno 6 uzoraka. Radni dijagrami dobiveni ispitivanjem prikazanisu na slici 4.14, a vrijednosti granice popuštanja i vlačna čvrstoća, te stvarna geometrija poprečnog presjeka uzoraka dane su tablici 4.5.



Slika 4.14 –Radni dijagrami čelika dobiveni ispitivanjem

Tablica 4.5 – Geometrijske i mehaničke karakteristike uzoraka za ispitivanje

UZORAK	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm^2]	f_y [N/mm^2]	f_u[N/mm^2]
S_1	7,8	24,8	193	332	477
S_2	8,0	24,5	195	320	481
S_3	8,0	24,5	196	333	486
S_4	8,0	24,6	197	332	483
S_5	7,5	24,5	184	345	492
S_6	7,7	24,5	189	358	484

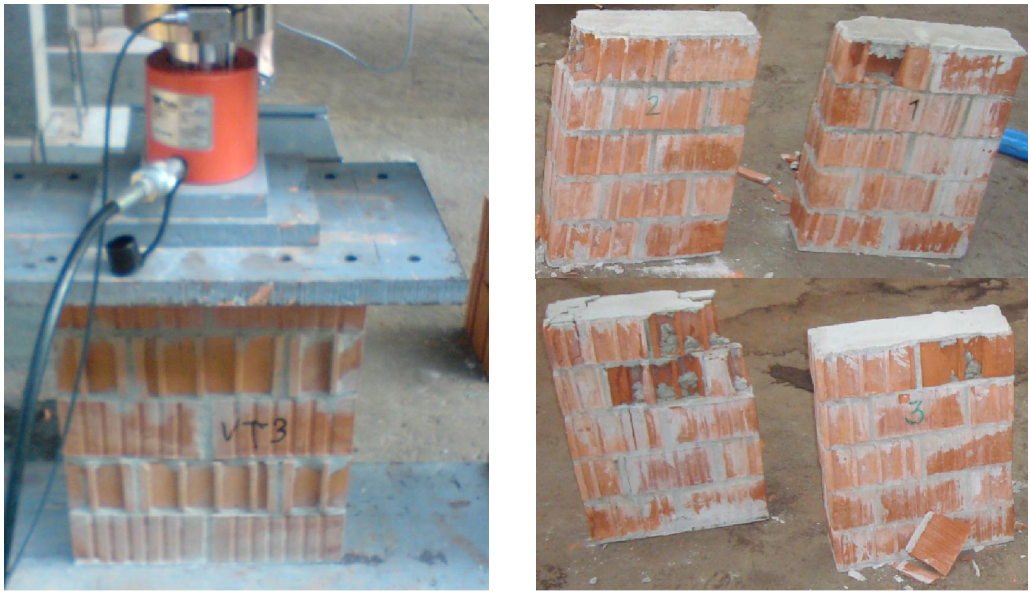
Prosječna granica popuštanja čeličnih epruveta iznosi f_y=337N/mm^2, dok je vlačna čvrstoća f_u=483N/mm^2. Slika 4.15 prikazuje ispitane čelične epruvete.

Slika 4.15 – Ispitani uzorci čelika

4.5. Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih prizmi

4.5.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće u vertikalnom smjeru

Ispitivanje je provedeno na po tri nearmirana zidna uzorka, izrađena od šupljih glinenih blokova i porobetonskih blokova, u skladu s [40]. Za mjerenje deformacije korišteni su LVDT-i u vertikalnom smjeru, a sila je nanošena hidrauličkom prešom kapaciteta 350 kN. Uzorci su ispitivani 28 dana nakon izrade. Na slikama4.16i 4.17 prikazani su uzorci ziđa od šupljih glinenih blokova i porobetonskih blokova tijekom ispitivanja i nakon sloma.



a) b)

Slika 4.16 – Ispitivanje tlačne čvrstoće šupljih glinenih blokova: a) Uzorak pri ispitivanju, b) uzorak od porobetona nakon sloma

Tlačne čvrstoće pojedinih uzoraka f_i i moduli elastičnosti E proračunati su prema normi [40], odnosno korištenjem izraza (3.2) i (3.4) navedenimau 3. poglavlju ovogarada.

U tablicama4.6i 4.7prikazane su vrijednosti maksimalne dosegnute sile $F_{i,max}$, površina poprečnog presjeka uzorka A_i tlačna čvrstoća uzorka $f_{i,,}$modul elastičnosti E za nearmirano ziđe od šupljih glinenih zidnih elemenata zidanih u cementno-vapnenom mortu, te vrijednosti porobetonskih zidnih elemenata zidanih tankoslojnim mortom (Ytong ljepilo).

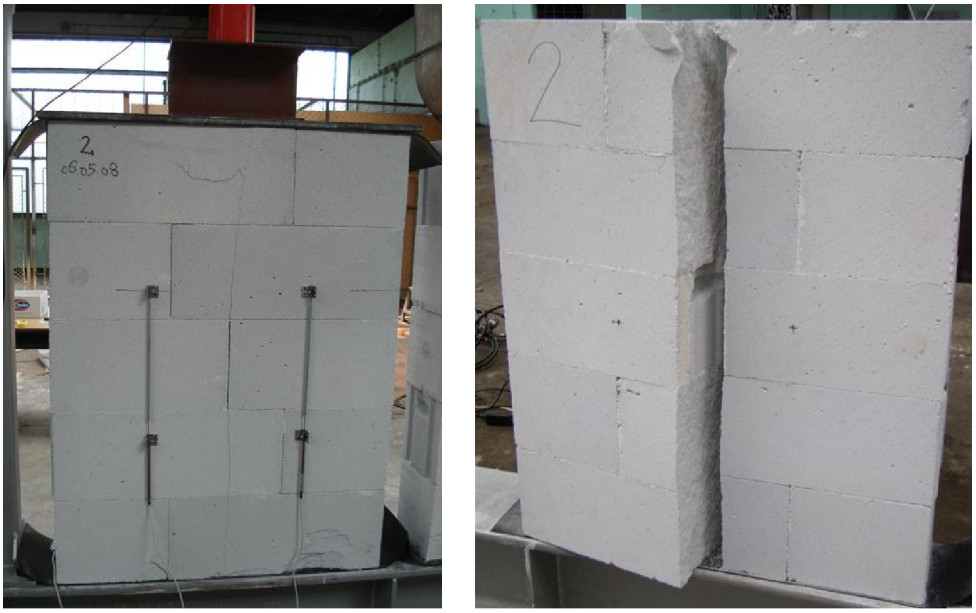
Tablica 4.6 – Tlačna čvrstoća i moduli elastičnosti ziđa od šupljih glinenih blokova

Uzorak	Sila sloma $F_{i,max}$ [kN]	Površina presjeka zida A_i[mm^2]	Tlačna čvrstoća zida f_i[N/mm^2]	Modul elastičnosti E[N/mm^2]
1	91,0	48750	1,9	4798
2	105,0	48750	2,2	4487
3	96,0	48750	2,0	4527
4	95,0	48750	1,9	4640

Srednja vrijednost tlačne čvrstoće prema tablici 2.5 iznosi f'=2,0 N/mm^2, dok srednja vrijednost modula elastičnosti zaokružena na najbližih 100 N/mm^2, iznosi E=4600 N/mm^2.

Prema normi [40], karakteristična tlačna čvrstoća ziđa iznosi, prema izrazu (3.3):

$$f_k = \frac{f'}{1{,}2} = \frac{2{,}0}{1{,}2} = 1{,}67 \ \ N/mm^2$$



a) b)

Slika 4.17 – Ispitivanje tlačne čvrstoće porobetonskih blokova a) Uzorak pri ispitivanju, b) uzorak od porobetona nakon sloma

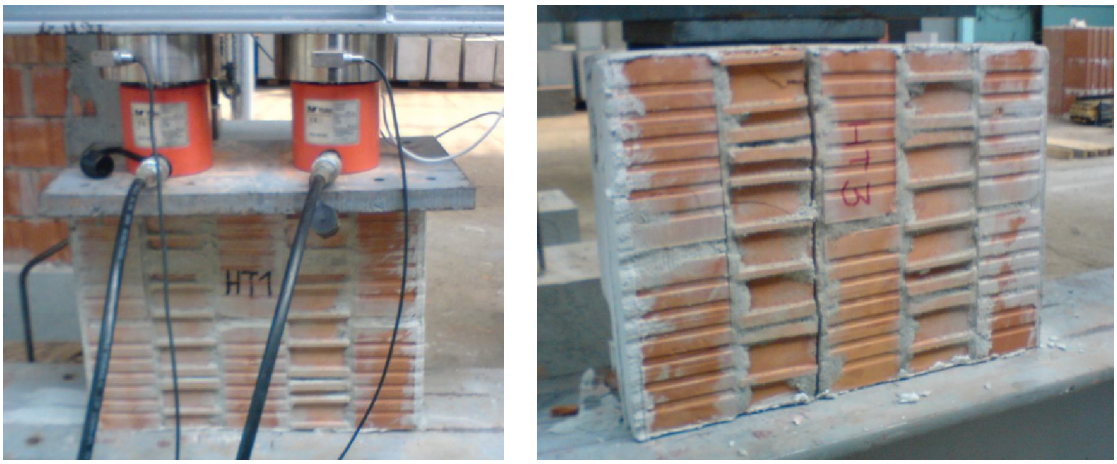
Tablica 4.7– Tlačna čvrstoća i moduli elastičnosti ziđa od porobetonskih blokova

Uzorak	Sila sloma $F_{i,max}$ [kN]	Površina presjeka zida A_i[mm^2]	Tlačna čvrstoća zida f_i[N/mm^2]	Modul elastičnosti E[N/mm^2]
1	247,00	48750	1,24	1654
2	226,00	48750	1,03	842
3	247,00	48750	1,37	1027

Srednja vrijednost tlačne čvrstoće porobetonskih blokova iznosi f'=1,21 N/mm^2, srednja vrijednost modula elastičnosti E=1200 N/mm^2, a karakteristična tlačna čvrstoća ziđa iznosif_k=1,01 N/mm^2

4.5.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće ziđa od glinenih blokova u horizontalnom smjeru

Da bi se odredilasvojstvaziđauhorizontalnom smjeru,ispitivanjasu provedenana na trima zidnim uzorcima izrađenima od šupljih glinenih blokova.Uzorci suizrađenina isti načinkao i uzorciza ispitivanje na vertikalni tlak, a ispitivanja suprovedena28 dana od izrade uzoraka. Uzorci od porobetonskih blokova nisu ispitivani na horizontalni tlak jer se pretpostavljalo kako će vrijednosti biti približno jednake onima iz ispitivanja na vertikalni tlak zbog izotropije ovoga materijala te jako velike čvrstoće ljepila kojim se ovakvi blokovi povezuju.Na slici 4.18 prikazano je ispitivanjetlačne čvrstoće zidnih prizmi od šupljih glinenih blokova u horizontalnom smjeru. U tablici 4.8 prikazani su rezultati ispitivanja.



a) b)

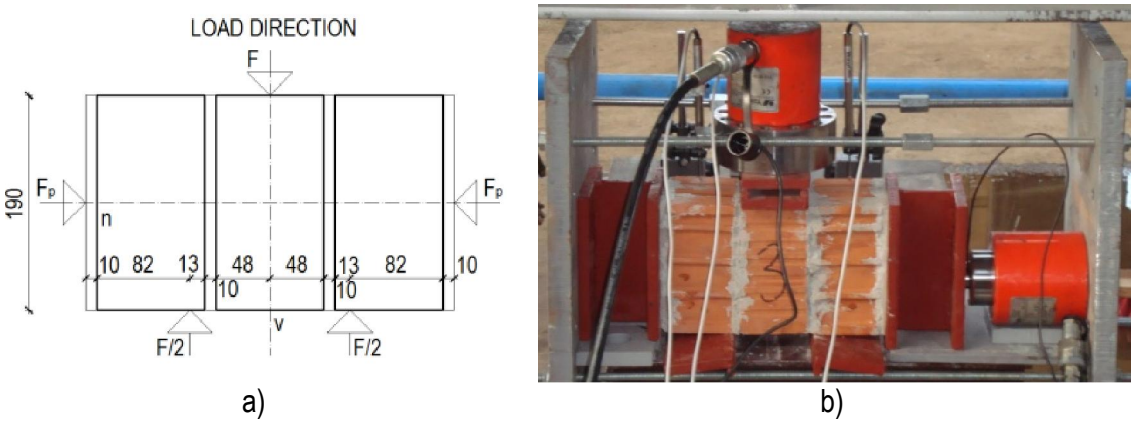
Slika 4.18 – Ispitivanje tlačne čvrstoće u horizontalnom smjeru šupljih glinenih blokova: a) uzorak pri ispitivanju, b) uzorak nakon sloma

Tablica 4.8 – Tlačna čvrstoća i moduli elastičnosti ziđa od porobetonskih blokova

Uzorak	Sila sloma $F_{i,max}$ [kN]	Površina presjeka zida A_i[mm^2]	Tlačna čvrstoća zida f_i[N/mm^2]
1	73,2	66875	1,1
2	71,0	66875	1,1
3	74,4	66875	1,1

4.6. Ispitivanje posmične čvrstoće zidnih prizmi

Kako bi se utvrdilapočetna posmičnačvrstoća f_{vk0}ikutunutarnjegatrenjatanΦ, korištene su smjernice dane u [42], te je ispitano ukupno dvanaestuzoraka čije su dimenzije prikazane na slici 4.19. Ispitivanja suprovedena28 dana od izrade uzoraka, i to tako dasuse u serijamaod po četiriuzorkakoristile različite razine normalnih naprezanja$f_{n,p}$ = 0,2N/mm^2, 0,6N/mm^2 i 1,0N/mm^2.



a) b)

Slika 4.19 – Ispitivanje posmične čvrstoće zidnih prizmi: a) dimenzije uzorka, b) postavke mjerne opreme

Na slici 4.20 prikazani su uzorci ziđa nakon ispitivanja. Slika 4.20 a) prikazuje nepravilan oblik sloma jer je do sloma došlo i u samom zidnom elementu, dok slika 4.20 b) prikazuje pravilan oblik sloma, odnosno slom po sljubnici morta. Na slici 4.21 prikazani su svi ispitani uzorci.

a) b)

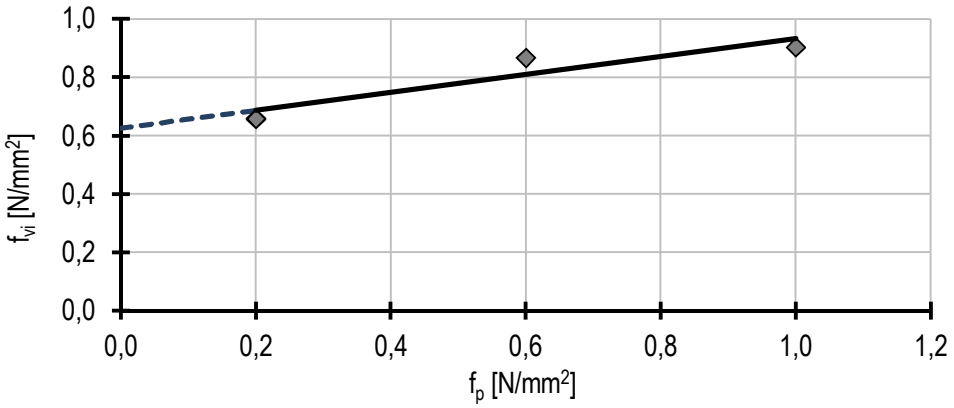
Slika 4.20 – Ispitivanje posmične čvrstoće: a) nepravilan oblik sloma, b) pravilan oblik sloma

Slika 4.21 – Određivanje posmične čvrstoće – ispitani uzorci

U tablici 4.9 dani su rezultati ispitivanja posmične čvrstoće svih 12 uzoraka prema normi [42]. Zvjezdicom su označeni uzorci koji zbog nepravilnog oblika sloma nisu uzeti u obzir pri proračunima početne posmične čvrstoće f_{vk0} i kuta unutarnjeg trenjatanα. Na slici 4.22 prikazan je dijagram ovisnosti posmične čvrstoće i naprezanja predtlačenja, a ekstrapolacijom (iscrtkana linija) dobivene su vrijednosti početne posmične čvrstoće i kuta unutarnjeg trenja.

Tablica 4.9 – Posmična čvrstoća ziđa od šupljih glinenih blokova

Uzorak	Normalno naprezanje f_p[N/mm^2]	Sila sloma $F_{i,max}$ [kN]	Posmična čvrstoća zida f_{vi}[N/mm^2]
1*	0,20	37,41	0,82
2		26,85	0,59
3		25,20	0,55
4		37,96	0,83
5	0,60	33,78	0,74
6		43,70	0,96
7*		27,80	0,61
8		41,11	0,90
9*	1,0	45,41	1,00
10		45,66	1,00
11		35,70	0,78
12		42,17	0,92
* odbačeni uzorci			



Slika 4.22 - Srednje vrijednosti posmične čvrstoće pri različitim normalnim naprezanjima

Linearnom ekstrapolacijom utvrđeno je kakopočetna posmičnačvrstoća f_{v0} iznosi 0,63 N/mm^2, a kut unutarnjeg trenja tanα iznosi 0,34. Karakteristične vrijednosti početne posmične čvrstoće i kuta unutarnjeg trenja, prema izrazima (3.11) i (3.12), iznose f_{vk0}=0,50 N/mm^2 i tanα_k=0,27.

Posmična čvrstoća ziđa od porobetonskih blokova nije mogla biti određena jer su svi uzorci imali nepravilan oblik sloma, što je posljedica male tlačne čvrstoće zidnih porobetonskihelemenatau odnosu na veliku čvrstoću ljepila proizvođača. Vrijednosti početne posmične čvrstoće i kuta unutarnjeg trenja koje deklarira proizvođač iznose f_{vk0}=0,30 N/mm^2 i tanα_k=0,4, [44].

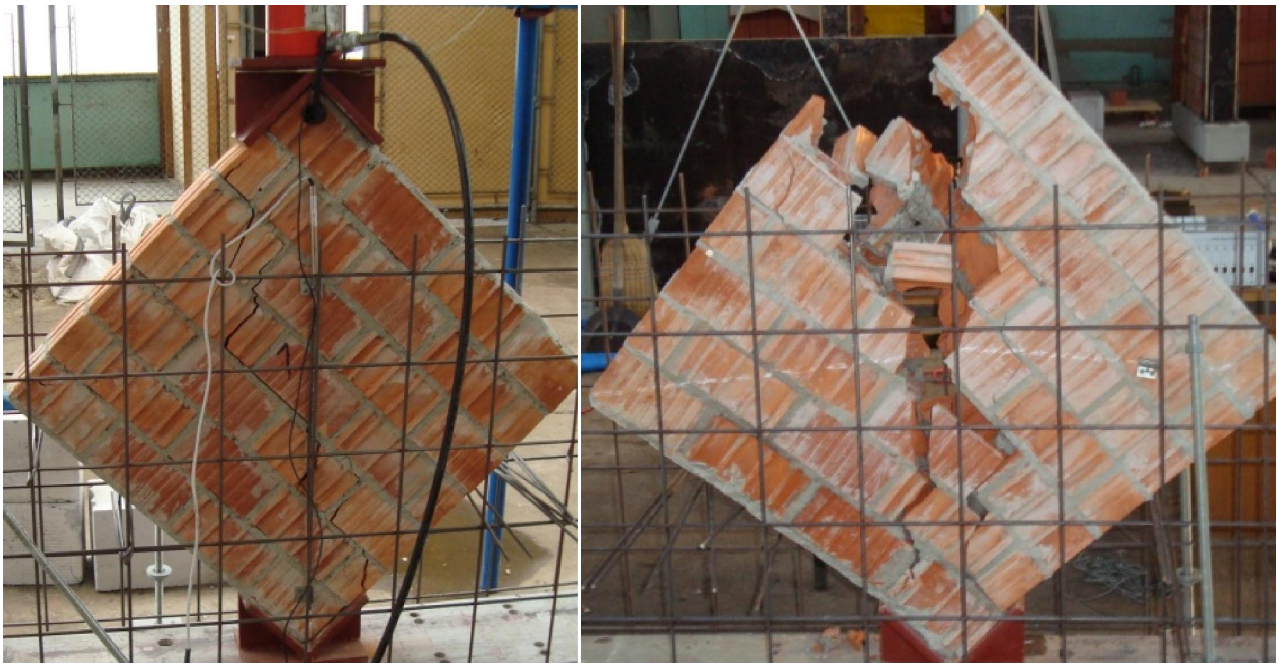
4.7. Ispitivanje vlačne čvrstoće zidnih prizmi

Vlačnačvrstoćaziđaod glinenih i porobetonskih zidanih elemenata utvrđena je ispitivanjem početiriuzorkazidanihprizmi. Prizme su bile pravilnog kvadratnog oblika, što je naročito bilo važno zbog centričnog unošenja sile u uzorak.

Za unošenje opterećenja u ispitne uzorke korištena je hidraulična preša kapaciteta 300 kN, a intenzitet sile mjeren je pretvaračem sile spojenim na računalo s odgovarajućim programskim paketom za bilježenje i analizu eksperimentalnih rezultata –*DEWESoft*, [68]. Ispitivanja su provedenapostupnim povećavanjem vertikalne tlačne sile duž jedne dijagonale, kako je opisano u točki 3.3.5. Ovakvim ispitivanjem moguće je dobiti i vrijednosti posmične čvrstoće prema [45] i [54].

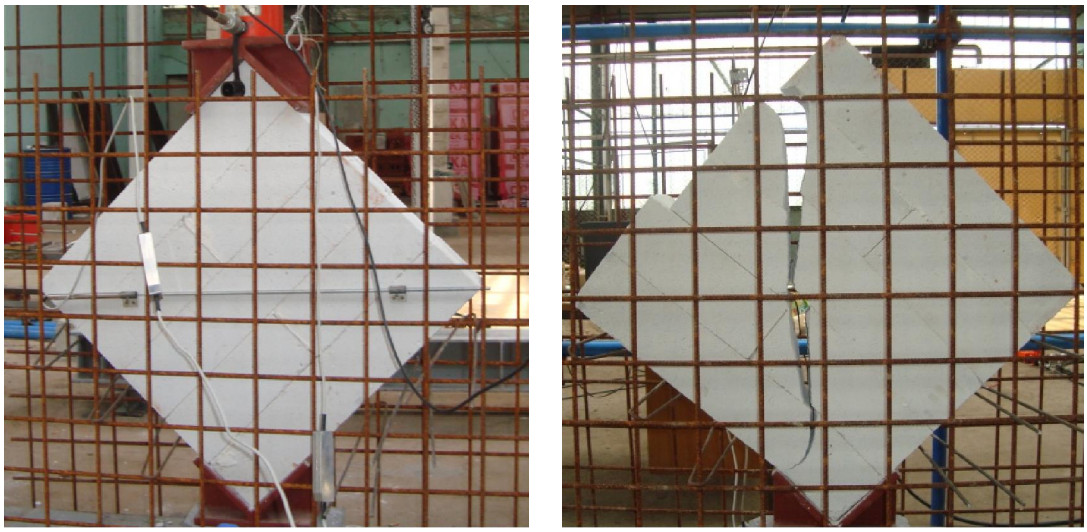
Za ovo ispitivanje korištena su dva linearna varijabilnadiferencijalna pretvornika *(*LVDT) za mjerenje vertikalnih i horizontalnihrelativnih deformacijazidanih uzorka prilikom unošenja sila u ispitne uzorke zidanih prizmi. Uzorcisu bili smješteni u, za ovo ispitivanje posebno izrađene, čelične elemente pomoću kojih je uzorak pridržan, a i pomoću kojih je u njega unošena sila.

Na slikama 4.23 i 4.24 prikazano je ispitivanje vlačne čvrstoće šupljih glinenih i porobetonskih blokova, te oblik sloma nakon ispitivanja. Armaturna mreža koja se vidi na slikama služila je za zaštitu mjernih instrumenata u slučaju pada zida jer je primijećeno da se slom događa naglo i bez najave (krti slom).



a) b)

Slika 4.23 – Ispitivanje vlačne čvrstoće ziđa od šupljih glinenih blokova: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon sloma



a) b)

Slika 4.24 – Ispitivanje vlačne čvrstoće ziđa od porobetonskih blokova: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon sloma

U tablici 4.10 danesu vrijednosti vlačne i posmične čvrstoće koje su proračunate korištenjem izraza iz [35], [45] i [54]. Prema [54] vrijednost posmične čvrstoće koja se može dobiti pomoću ove vrste ispitivanja moguće je izračunati na dva načina, s obzirom na to da je stanje naprezanja u kojemu se uzorak nalazi, podložno različitom tumačenju. U uvjetima čistog posmika, koje bi ovo ispitivanje trebalo simulirati, izraz za posmičnu čvrstoću jednak je onomu prema [45], a ukoliko se uzorak promatra kao homogeni volumenski element i prema linearnoj elastičnoj teoriji, kao što to čine neki autori [55, 56], moguće je izračunati čvrstoću prema izrazu iz [54]:

$$f_{vi} = \frac{F_{i,\max}}{2A} \tag{4.1}$$

gdje je $F_{i,max}$ sila pri slomu, a A površina poprečnog presjeka uzorka.

Nakon proračuna posmične čvrstoće pomoću dostupnih izraza tesu vrijednosti korištene u proračunima za model s jednom dijagonalom, a izraz prema [54] dao je vrijednosti koje su omogućile najbolje poklapanje s rezultatima ispitivanja svih inačica okvira s ispunom.

Tablica 4.10 – Vlačne i posmične čvrstoća uzoraka od glinenih i porobetonskih blokova

Uzorak	Glineni blokovi				Porobetonski blokovi			
	Sila sloma $F_{i,max}$ [kN]	Vlačna čvrstoća zida f_{ti}[N/mm^2]	Posmična čvrstoća zida [45] f_{vi}[N/mm^2]	Posmična čvrstoća zida [53] f_{vi}[N/mm^2]	Sila sloma $F_{i,max}$ [kN]	Vlačna čvrstoća zida f_{ti}[N/mm^2]	Posmična čvrstoća zida [45] f_{vi}[N/mm^2]	Posmična čvrstoća zida [53] f_{vi}[N/mm^2]
1	49	0,24	0,38	0,28	43	0,22	0,35	0,25
2	42	0,21	0,32	0,24	35	0,18	0,28	0,20
3	32	0,16	0,25	0,18	45	0,23	0,37	0,26
4	35	0,17	0,27	0,20	44	0,23	0,36	0,25

4.8. Ispitivanje čeličnih okvira sa zidanim ispunom

Ideja prema kojoj su organizirana ispitivanja bila je pokušaj da se pogodnim konstrukcijskim mjerama utječe na ponašanje okvira sa zidanim ispunom pri većim horizontalnim, najčešće, potresnim opterećenjima. Može se smatrati da zidani ispun do određene razine opterećenja (npr. uobičajena uporabna opterećenja i opterećenja manjim horizontalnim opterećenjem kao što je vjetar) ima pozitivnu ulogu, budući da doprinosi povećanju krutosti cijele konstrukcije, njezinoj stabilnosti i otpornosti. Međutim, pri većim horizontalnim opterećenjima, vrlo brzo, dolazi do prekoračenja otpornosti zidanog ispuna, njegovog raspucavanja te značajnijeg utjecaja na globalni sustav prenošenja opterećenja, a što može imati negativne posljedica za čeličnu okvirnu konstrukciju.

Stoga je ideja u ovome radu bila iskoristiti pozitivne efekte zidanog ispuna do određene *prihvatljive* razine opterećenja, a potom, prije nastupanja „nepovoljne faze“ ostvariti kontrolu ponašanja globalnog sustava na način da se zidani ispun „odvoji“ od okvirnog čeličnog sustava i tako omogući njegovo puno duktilno ponašanje u daljnjem preuzimanju opterećenja. Pri tome je osnovni cilj bio izvesti to na jednostavan način, koji neće uključivati posebne naprave koje bi značajnije usložnjavale ili usporavale gradnju, težilo se k jednostavnijem postupku koji bi mogao imati praktičan značaj.

Tako se i došlo na ideju da se kod zidanog ispuna kombiniraju dva materijala različitih mehaničkih karakteristika, i to tako da se rubni dijelovi ispuna (uz stupove čelične okvirne konstrukcije) zidaju od „slabijeg“ materijala čije su mehaničke karakteristike određene tako da omogućavaju pravovremeno „popuštanje“, odnosno „gnječenje“, kako bi se za daljnja povećanja djelovanja, okviru omogućilo samostalno djelovanje. Taj je efekt moguće postići na više različitih načina, npr. pogodnim kombiniranjem različitih marki čvrstoće blokova iste vrste, kombiniranjem marki čvrstoće različitih vrsta blokova ili pak odgovarajućim „oslabljenjima“ blokova uz rub okvira.U ovom je eksperimentalnom istraživanju to zamišljeno na način da se za ispun kombiniraju blokovi od različitog materijala, teda se uz to uključe i odgovarajuća oslabljenja blokova uz rub okvira. Oslabljenja blokova ostvarenasu jednostavnim bušenjem rupa različitih promjera kroz blokove od porobetona, slika 4.7.

Kako bi se dobio što bolji uvid u učinak opisane konstrukcijske mjere, ispitivanje je provedeno prvo na zasebnim setovima okvira od istovrsnog materijala (glineni šuplji blok, OG-i, te puni blokovi od porobetona, OY-i), a potom na setu okvira s kombiniranim zidanim ispunom izrađenom na prethodno opisani način (OGY-i).

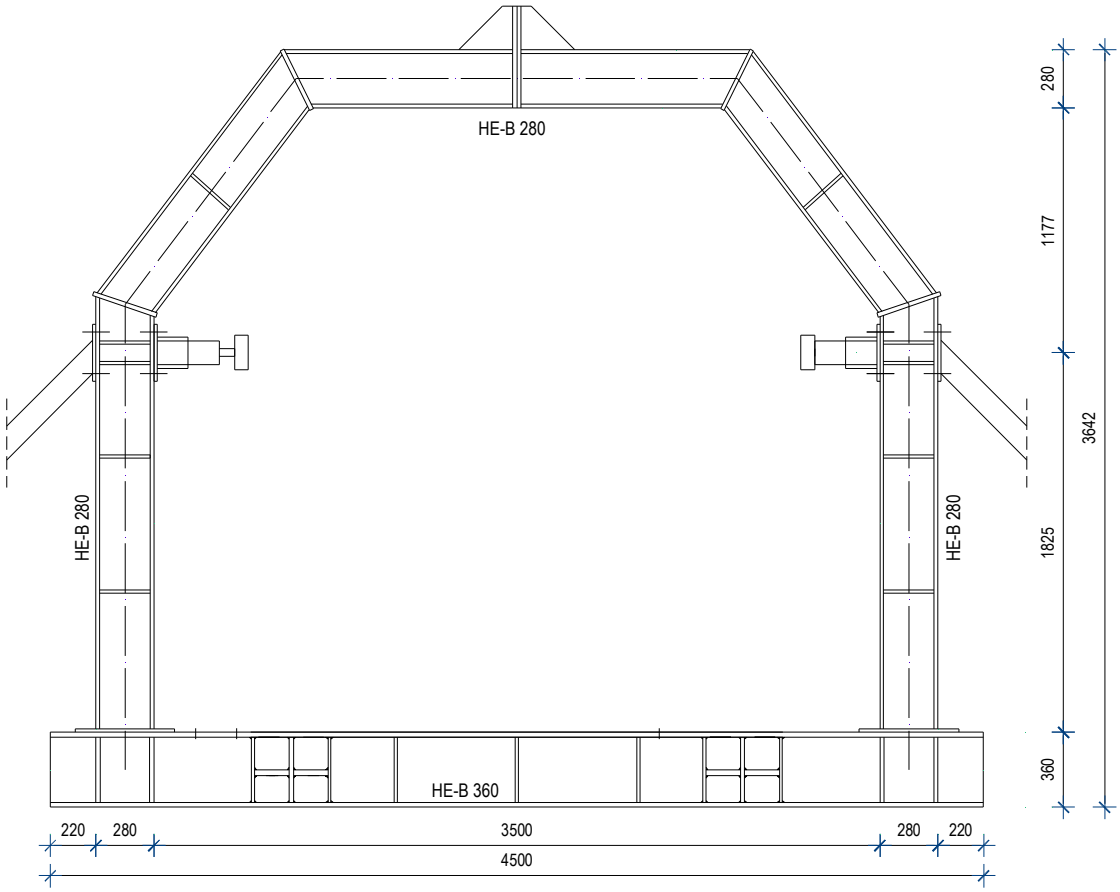
Pri tome se, zbog nemogućnosti preciznoga izračunao potrebnome prošupljenju, išlo s tri različita promjera rupe u porobetonskim blokovima:

- OGY-1 - promjer rupe d=53 mm,
- OGY-2 - promjer rupe d=73 mm,
- OGY-3 - promjer rupe d=83 mm.

Takvim pristupom kasnije je planirano točnijim numeričkim modeliranjem izvršiti kalibriranje modela kojim bi se potvrdili rezultati istraživanja i koji bi se kasnije mogao koristiti za složenije modele okvira.

4.8.1. Postrojenje za ispitivanje

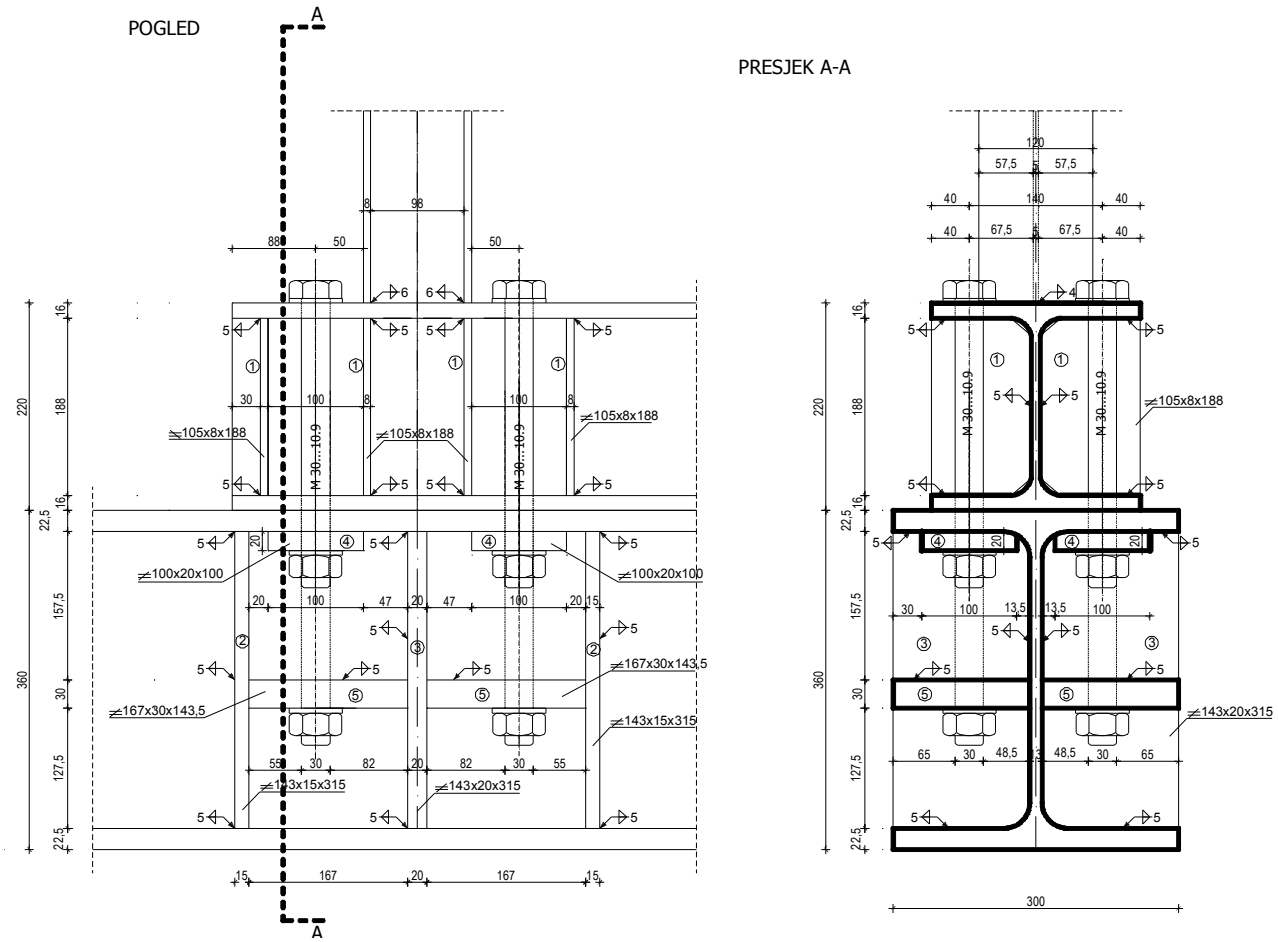
Svi čelični okviri ispitani su u reaktivnom okviru prikazanom na slici 4.25. Okvir je izrađen od valjanih profila HEB 280 i HEB 360. Svijetla širina i visina iznose 3500x3000 mm. Reaktivni okvir dodatno je ukrućen s dva kosnika cijevnog profila s ciljem anuliranja njegovih horizontalnih pomaka za predviđeni intenzitet sile pri ispitivanju modela čeličnih okvira sa zidanim ispunom.



Slika 4.25 – Reaktivni okvir

4.8.2. Ležajevi

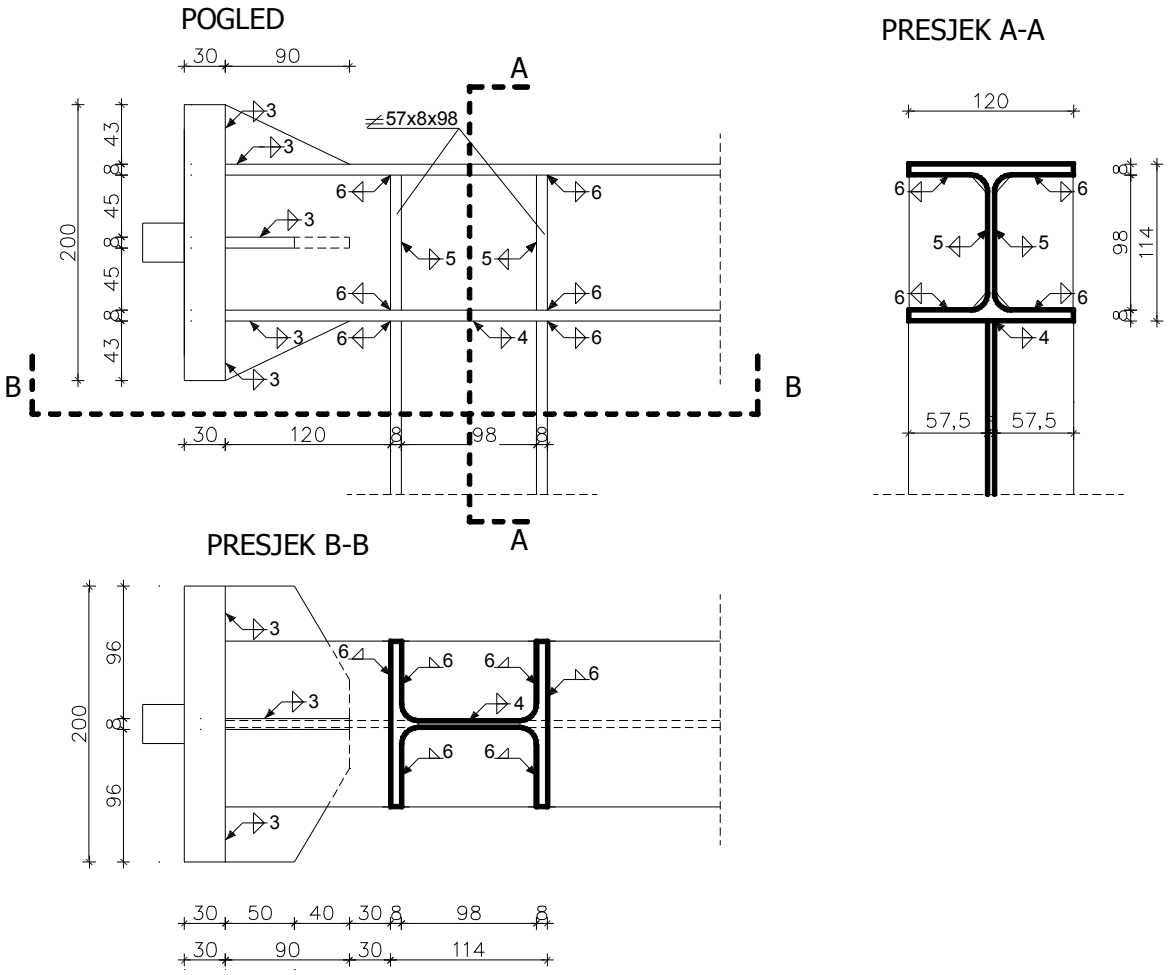
Čelični okviri su se na odteretni okvir spajali vijcima M30 i M20, kvalitete 10.9. Ukupno je korišteno 8 vijaka M30 (na svakoj strani stupa okvira po 4 komada), te su u sredini okvira ugrađena 4 vijka M20 kako bi se relativni pomaci ispitivanoga čeličnog i reaktivnog okvira sveli na minimum. Odteretni okvir posebno je pojačan ugradnjom poprečnih i uzdužnih ukrućenja na mjestima ležajeva. Na slici 4.26 prikazan je detalj ležaja.



Slika 4.26 – Detalj ležaja

4.8.3. Unos opterećenja

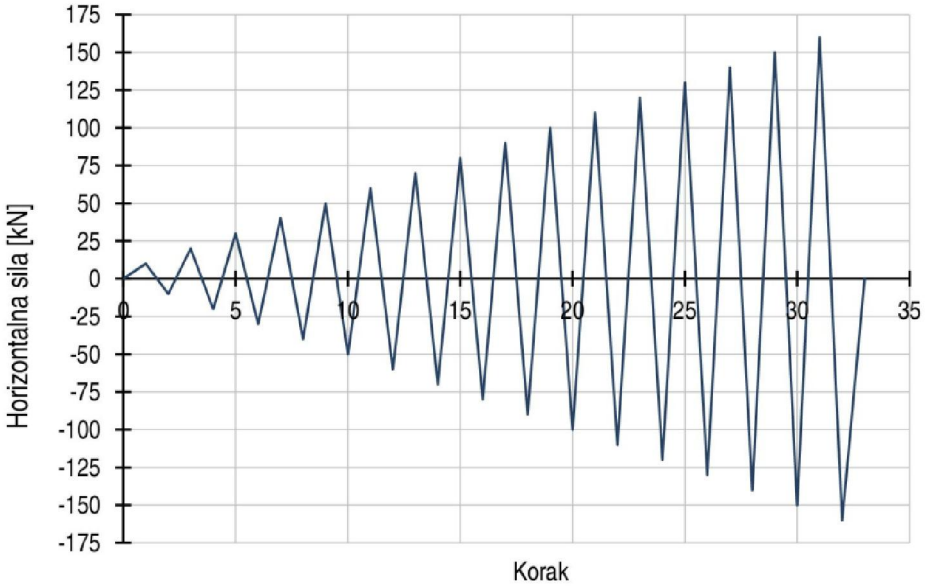
Opterećenje na čelične okvire sa zidanim ispunom unošeno je hidrauličkim prešama marke *Yale*, model YCH 33/150, kapaciteta 355 kN, slika 4.27. Na produžene grede okvira zavarivane su čelične ploče s istacima na koje su postavljani pretvarači sile (kapaciteta 300 kN) spojenina računalo s odgovarajućim programskim paketom (*DEWESoft*).



Slika 4.27 – Unošenje opterećenja u čelični okvir

Čeličnim pločama smještenima na krajevima grede željelo se postići ravnomjernije i centričnije unošenje opterećenja preko grede u okvir jer koncentriranije opterećenje može dovesti do lokalnih naprezanja većeg intenziteta te prijevremenog otkazivanja nosivosti, dok se u slučaju ekscentričnog opterećenja javljaju dodatni momenti savijanja, koji također nepovoljno utječu na nosivost.Također, ove ploče preko kojih se unosilo opterećenje dodatnosuukrućene čeličnim pločama debljine 8,0 mm, slika 4.27, kako bi se izbjeglo moguće izbočivanje hrpta i pojasnica grede.

Za unošenje horizontalne sile naizmjencesu korištene dvije hidraulične preše, pri čemu se u prvoj fazi kontrolirao intenzitet sile, a u drugoj fazi, u kojoj je zidani ispun pretrpio značajna oštećenja te je uočeno da nema daljnjeg povećanja sile, kontrolirao se horizontalni pomak okvira. Shematski prikaz opterećivanja okvira sa zidanim ispunom u prvoj fazi prikazan je na slici 4.28, a u PriloguC može se pronaći točan dijagram opterećivanja za svaki ispitani okvir.



Slika 4.28 – Način nanošenja horizontalnog opterećenja

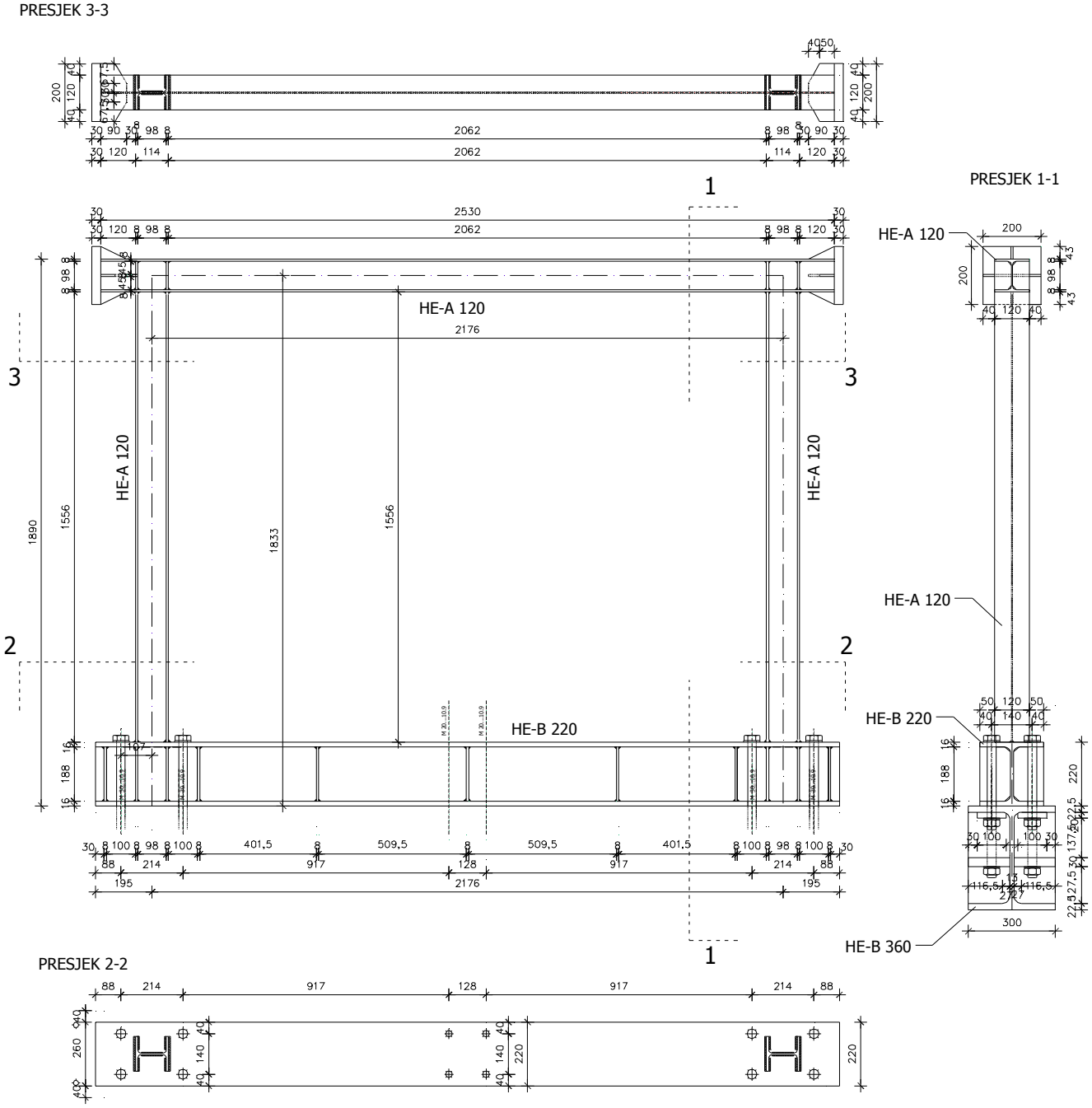
4.8.4. Geometrijske karakteristike čeličnih okvira

Geometrijske izmjere ispitivanih čeličnih okvira sa zidanim ispunom prikazane su na slici 4.29. Osne dimenzije okvira iznose 2176x1613 mm, dok su dimenzije svijetlih otvora 2062x1556 mm. Ukupna dužina grede iznosi 2590 mm. Za stupove i grede okvira korišteni su profili HEA 120, čija površina poprečnog presjeka iznosi A=25,34 cm^2, a moment inercije oko jače osi I_y=606,2 cm^4. Visina i širina profila HEA 120 su h=114 mm i b=120 mm, apojasnice i hrptovi imaju debljine odt_f=8,0 mm i t_w=5,0 mm. Za ležajnu gredu korišten je profil HEB 220, visine i širine h=b=220 mm, površine poprečnog presjeka A=91,04 cm^2,

momenta inercije I_y=8091 cm^4, te debljina pojasnice i hrptova t_f=16,0 mm i t_w=9,50 mm. Ukupna duljina ležajne grede iznosila je 2566 mm.

Spoj grede i stupova izveden je tako da je greda prepuštena preko stupova, a stupovi su zavareni za donju pojasnicu grede.Debljina zavara na pojasnicama stupova iznosi 6,0 mm, a zavara na hrptu stupa 4,0 mm. U ravnini pojasnica stupova greda je ojačana čeličnim poprečnim ukrutama debljine 8,0 mm.

Ukupna masa čeličnog okvira (bez zidanog ispuna) iznosi 348,10 kg.



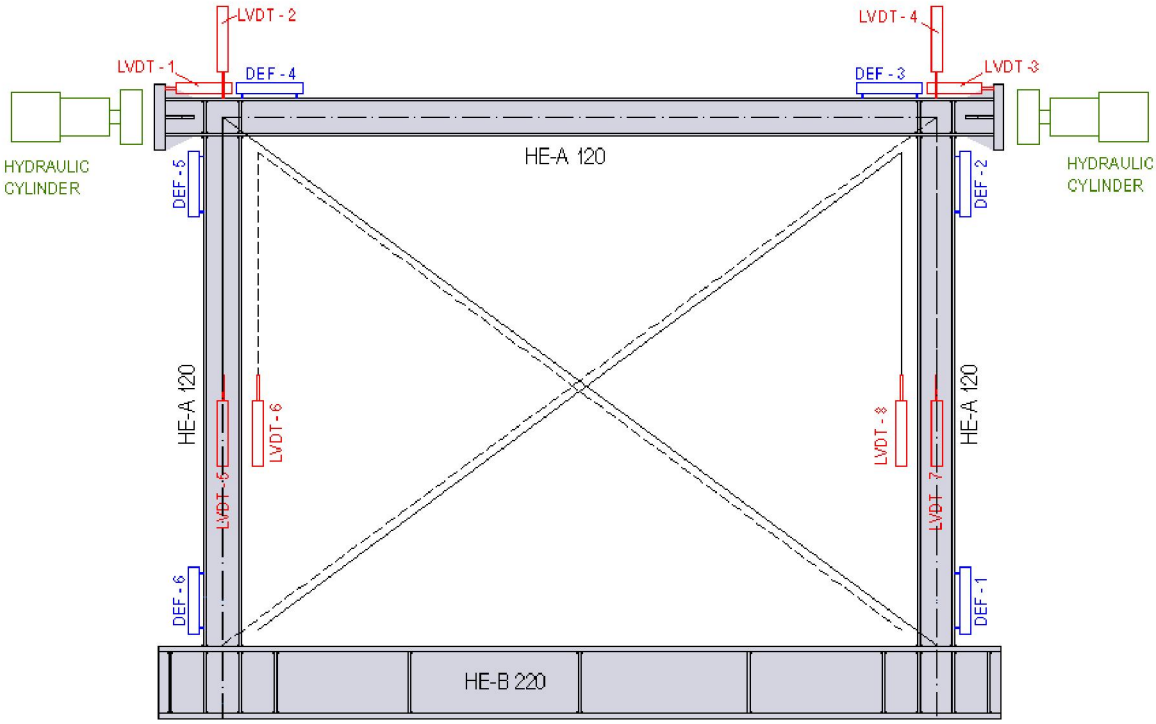
Slika 4.29 – Geometrijske izmjere ispitivanih čeličnih okvira sa zidanim ispunom

4.8.5. Mjereni parametri tijekom ispitivanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom

Tijekom ispitivanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom mjereni su sljedeći parametri:

- horizontalni pomaci čeličnog okvira u ravnini grede,
- vertikalni pomaci čeličnog okvira (u ravnini oba stupa),
- produljenje/skraćenje dijagonala čeličnog okvira,
- produljenje/skraćenje dijagonala zidanog ispuna,
- relativne deformacije stupova i greda na kritičnim mjestima,
- veličine horizontalne sile,
- horizontalni pomaci reaktivnog okvira.

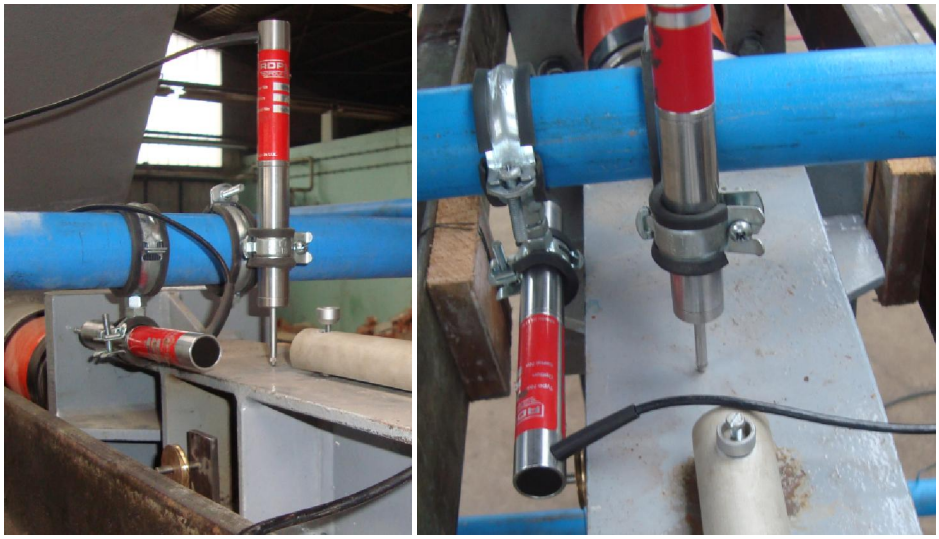
Slika 4.30 prikazuje položaje mjernih instrumenata za vrijeme ispitivanja.



Slika 4.30 - Položaji mjernih instrumenata

Horizontalni i vertikalni pomaci okvira, slika 4.31, kao i produljene, odnosno skraćenje dijagonala, mjereni su linearnim varijabilnimdiferencijalnim pretvornikom (LVDT). Za mjerenje horizontalnih pomaka reaktivnog okvira korištena je digitalna mikroura smještena u ravnini hidraulične preše.Horizontalni pomaci čeličnog okvira sa zidanim ispunom mjereni su u visini grede na lijevome i desnome kraju čeličnog okvira (slika 4.30, LVDT-1 i LVDT-3), a vertikalni pomaci mjereni su u ravnini stupova okvira (slika 4.30, LVDT-2 i LVDT-4). Promjene duljine dijagonala mjerene su na obje strane

zida sa po dva LVDT-a, pri čemu je jedan služio za mjerenje promjene duljine dijagonale samoga okvira (slika 4.30, LVDT-5 i LVDT-7), a drugi za promjenu duljine dijagonale na zidanom ispunu (slika 4.30, LVDT-6 i LVDT-8).

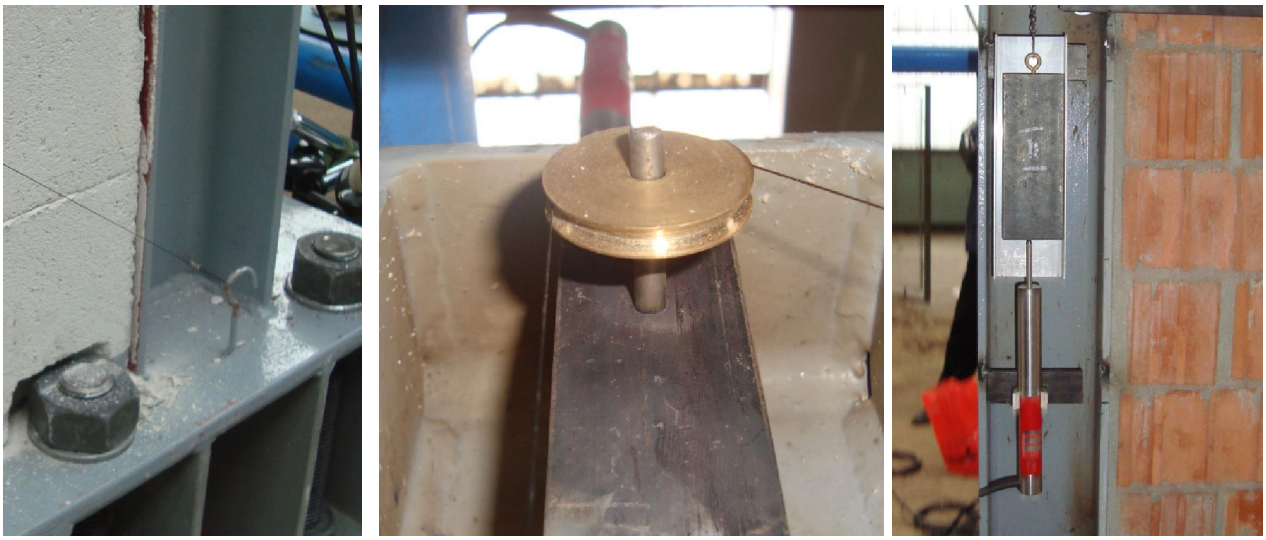


Slika 4.31 - LVDT-i za mjerenje horizontalnih i vertikalnih pomaka

Mjerenje produljenja/skraćenja dijagonala zidanog ispuna vršeno je pomoću žice koja je na jednom kraju pričvršćena za rub zida slika, 4.32 a), zatim je prebačena preko kotačića učvršćenog na suprotnom kraju zida (slika 4.32 b)), te je na drugome kraju na nju obješen uteg koji je smješten u metalnu vodilicu (slika 4.32 c)). Na sličan način mjereno je produljenje/skraćenje dijagonala čeličnog okvira, slika 4.33.

a) b) c)

Slika 4.32 - Mjerenje produljenja/skraćenja dijagonala zidanog ispuna



Slika 4.33 - Mjerenje produljenja/skraćenja dijagonala čeličnog okvira

Relativne deformacije čeličnog okvira mjerene su deformetrima na kritičnim mjestima: pri dnu stupova (slika 4.30, DEF-1 i DEF-6, slika 4.34 a)), pri vrhu stupova (slika 4.30, DEF-2 i DEF-5, slika 4.34 b))kao i na lijevom i desnom kraju grede (slika 4.30, DEF-3 i DEF-4, slika 4.34 c)). Mjerna duljina deformetara iznosi 200 mm.

a) b) c)

Slika 4.34 - Mjerenje relativnih deformacija čeličnog okvira

Na slikama od 4.35 do 4.37 prikazano je ispitivanje čeličnih okvira sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova, porobetonskih blokova i s kombiniranim ispunom od glinenih i porobetonskih blokova.

Slika 4.35 - Ispitivanje čeličnog okvira sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova (OG-i)

Slika 4.36 - Ispitivanje čeličnog okvira sa zidanim ispunom od porobetonskih blokova (OY-i)

Slika 4.37 - Ispitivanje čeličnog okvira s kombiniranim ispunom od šupljih glinenih i porobetonskih blokova (OGY-i)

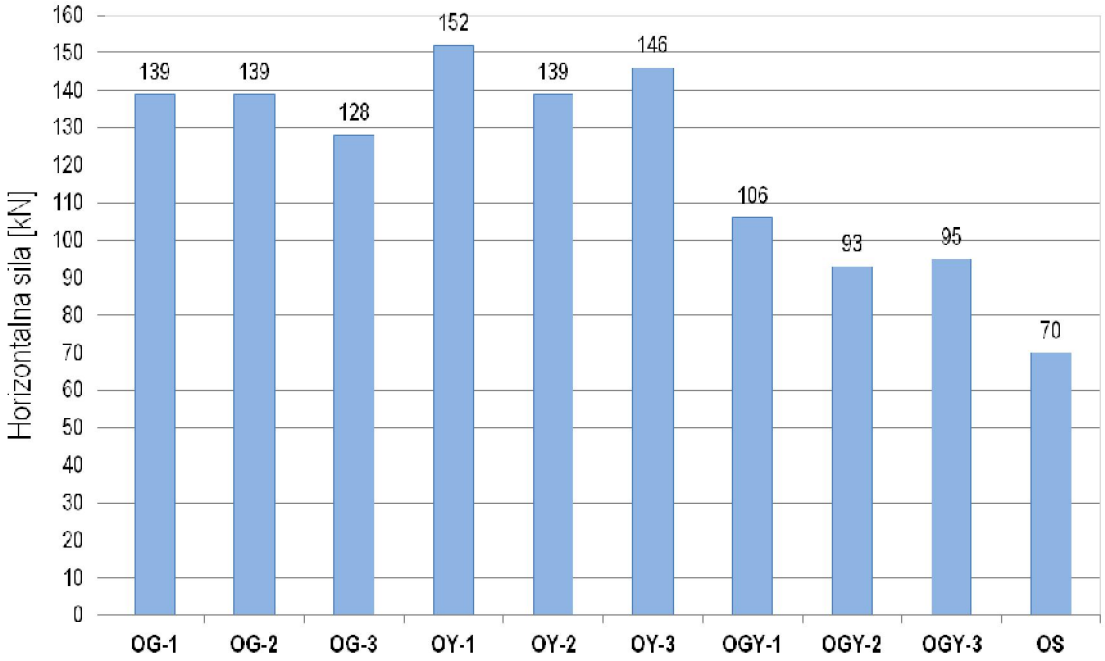
4.8.6. Rezultati ispitivanja okvira sa zidanim ispunom

Laboratorijski je ispitano ukupno devetčeličnih okvirnih nosača sa zidanim ispunom, od čega su tri bila s ispunom od šupljih glinenih blokova (oznaka OG-i), tri s ispunom od porobetonskih blokova (OY-i) i tri s kombiniranim ispunom od glinenih blokova i porobetonskih blokova (OGY-i). Ispitan je i jedan čelični okvir bez ispuna (oznaka OS).

Rezultati provedenih laboratorijskih ispitivanja kao konačan rezultat za svaki ispitivani čelični okvir sadrže:

- najveću silu koju je okvir s ispunom mogao preuzeti,
- horizontalne pomake mjernih mjesta na ispitivanom okviru,
- promjene duljine dijagonale zidanog ispuna i čeličnog okvira,
- deformacije kritičnih presjeka čeličnog okvira.

Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom i čeličnog okvira bez ispuna prikazane su na slici 4.38



Slika 4.38 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom i čeličnog okvira bez ispuna

U nastavku su danikomentari ponašanjasvakoga ispitivanoga modela, dijagrami histereznih petlji, produljenja/skraćenja dijagonalate prikazi deformacija.

Čelični okvir sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova – OG-1

Kod ovogamodela zabilježena je najveća nosivost na horizontalnu siluu odnosu na sva tri okvira sa zidnim ispunom od šupljih glinenih blokova (sustavi OG-i). Maksimalna horizontalna sila koju je okvir s ispunom preuzeo iznosila je 139 kN, uz pripadajući horizontalni pomak u visini osi grede od 15,07 mm, što daje međukatni pomak od 0,93%.

Maksimalni izmjereni horizontalni pomak iznosi 21,33 mm (međukatni pomak 1,32%) uz vrijednost horizontalne sile od 135 kN. Pojava prve značajnije pukotine uočena je pri sili od 59 kN i horizontalnom pomakuu visini grede čeličnogaokvira od 1,84 mm (međukatni pomak 0,11 %). Prve pukotine nastale su u sredini glinenogazidanog ispuna i išle su okomito kroz glinene blokove. Dijagonalno raspucavanjeispuna koje se proteže iz kutova okvira događa se pri sili od 90 kN. Otkazivanje nosivosti zidanog ispuna nastupilo je dijagonalnim raspucavanjem u kombinaciji s prekoračenjem tlačne nosivosti ispuna.

Okvir je ciklički opterećivan u ravnini grede dointenziteta horizontalne sile od 130 kN, a nakon što je primijećeno kako sustav okvira i zidanog ispuna nije u stanju preuzeti daljnji porast sile, prešlo se na kontroliranje horizontalnog pomaka, odnosno okvir je postupno guran u jednu stranu u koracima od po 1 mm.

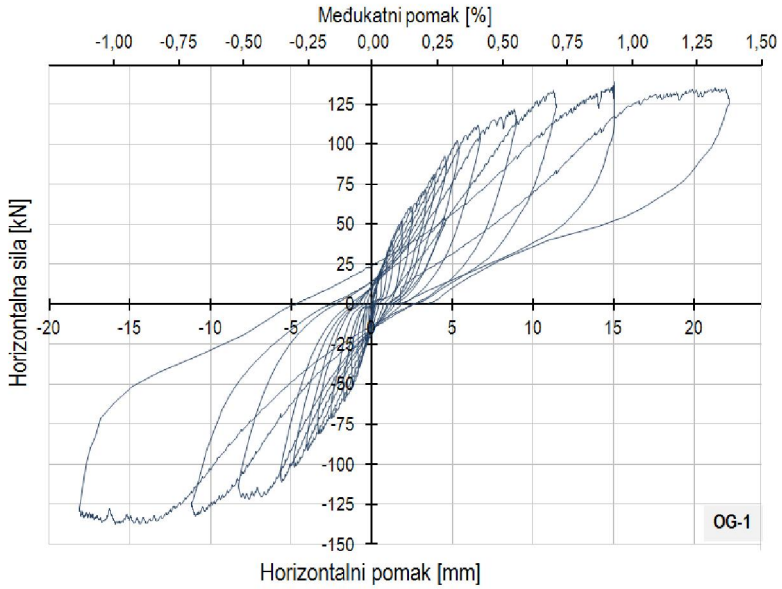
Ispitivanjasvih modela iz serija OG-i i OY-i bila su prekidananakon ispunjenja dvaju uvjeta:kada sustav više nije bio u mogućnosti preuzeti daljnje poraste horizontalne sile, te kada,zbog ograničenja mjernih instrumenata (LVDT-i), nije bilo moguće mjeriti horizontalne pomake modela. Uređaji za mjerenje horizontalnih pomaka imali su mogućnost mjerenja ukupnogapomaka do 45 mm, pa je npr. za pozitivne cikluse opterećivanja predviđeno mjerenje horizontalnih pomaka od približno 22,5 mm, te isto toliko i za negativne cikluse (22,5+22,5=45 mm).

Pri maksimalnoj sili, produljenja dijagonala okvira i zidanog ispuna iznose redom 12,52 mm i 10,59 mm, što daje promjene duljine u iznosima od 4,67 ‰ i 4,33 ‰, dok su skraćenja dijagonale čeličnog okvira 15,85 mm (5,91 ‰), a zidanog ispuna 14,13 mm (5,78 ‰). Dijagram skraćenja/produljenja dijagonala prikazan je na slici 4.40.

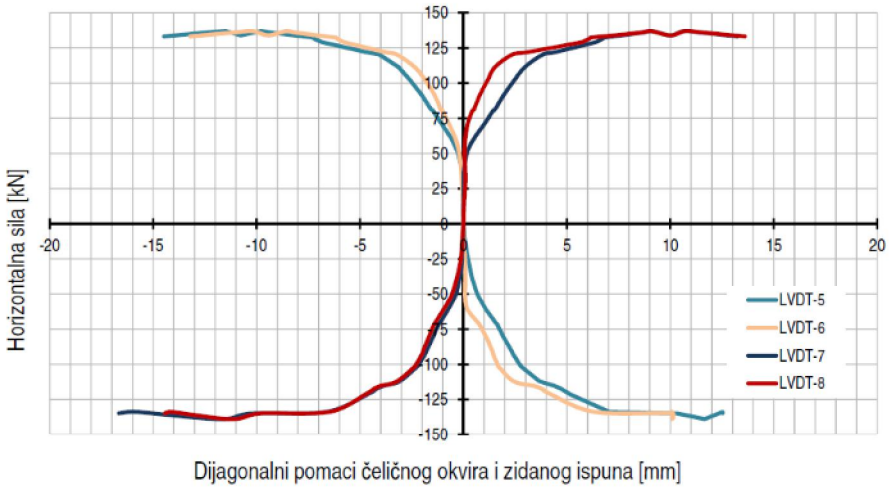
Najveći vertikalni pomak okvira u ravnini lijevoga stupa (slika 4.30, LVDT-2) iznosi 1,32 mm, a u ravnini desnoga stupa 0,91 mm.

Iz mjerenja deformetara pri dnu stupova (slika 4.30, DEF – 1 i DEF -6) uočeno je kako je ovaj okvir ispitivan približno do granice popuštanja teda nije značajno ušao u plastično područje, slika 4.41. Izmjerena relativna deformacija iznosi 0,163%, dok je deformacija na granici popuštanja 0,16%.Relativne deformacije pri vrhu stupa i na gredi bilesumanje od deformacija pri dnu stupa i iznose redom 0,08% i 0,12%.

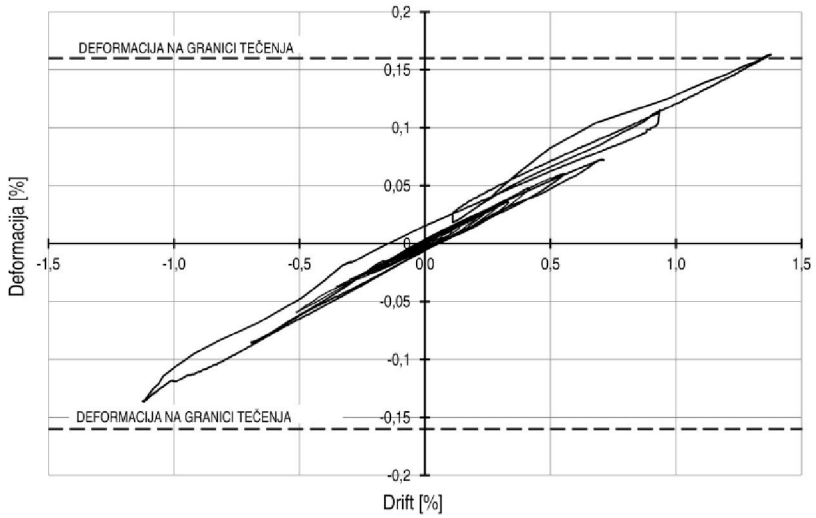
Početna krutostmodela OG-1 iznosila je 32,07 kN/mm.



Slika 4.39 – Histerezna petlja za okvir OG-1



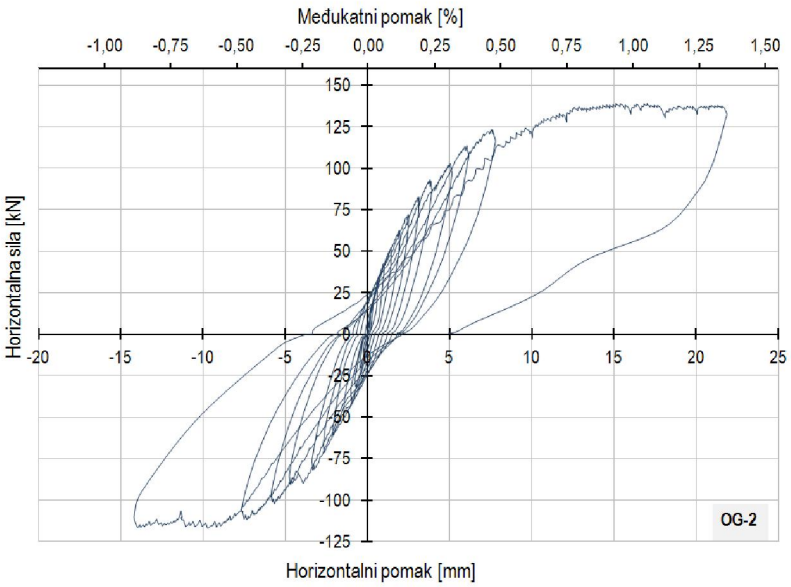
Slika 4.40 – Pomaci dijagonala – okvir OG-1



Slika 4.41 – Deformacije pri dnu stupa– okvir OG-1

Čelični okvir sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova – OG-2

Nosivost okvira OG-2 iznosi 139 kN uz pripadni horizontalni pomak od 15,12 mm, odnosno međukatni pomak od 0,94 %.Najveći izmjereni horizontalni pomak okvira OG-2 iznosi 21,87 mm (međukatni pomak 1,36 %) uz horizontalnu silu od 132 kN. Prva pukotina nastala je pri sili od 70 kN i horizontalnimpomakom od 2,51 mm, što iznosi 0,16 % u odnosu na visinu okvira.Pukotina se nalazila u sredini zida te spuštala okomito na blok. Uz pojavu prve pukotine primijećeno je i odvajanje zidanog ispuna uz stupove okvira. Dijagonalno raspucavanje događa se pri sili od 90 kN. Oblik sloma isti je kao i kod okvira OG-1. Histerezna petlja za okvir OG-2 prikazana je na slici 4.42.



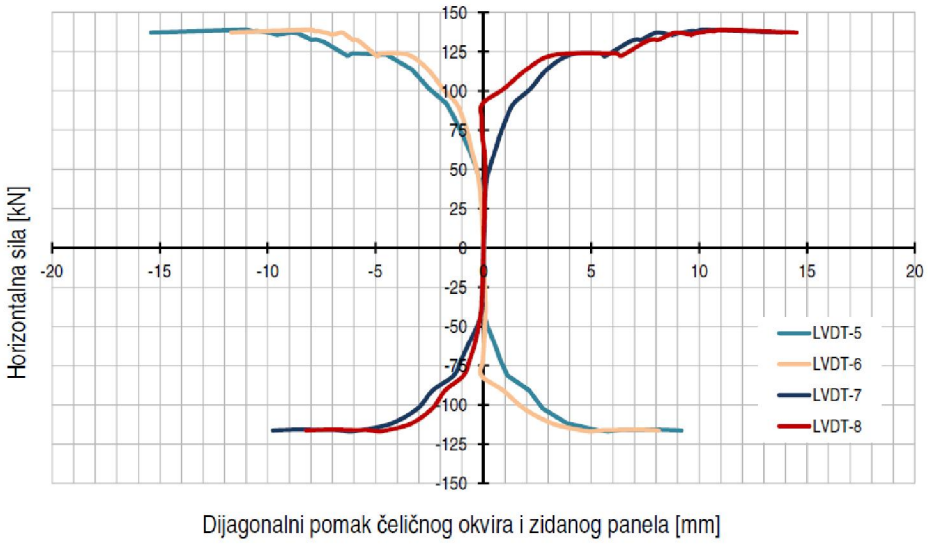
Slika 4.42 – Histerezna petlja za okvir OG-2

Nakonneuspješnog pokušaja dostizanja vrijednosti horizontalne sile od 120 kN u negativnom ciklusu (negativni predznaci horizontalne sile i pomaka) promijenjen je smjer sile te režim opterećivanja, odnosno pri opterećivanju se kontrolirao pomak u koracima od po 1 mm.

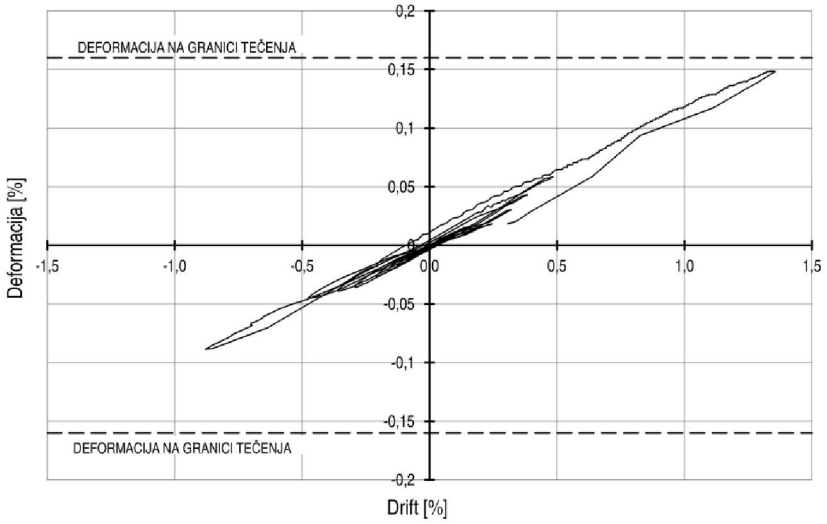
Najveće produljenje dijagonale čeličnog okvira iznosi 10,98 mm, a skraćenje 8,03 mm, što u promilima od duljine dijagonale iznosi redom 4,49 ‰ i 3,29 ‰, slika 4.43. Kod zidanog ispuna maksimalno produljenje iznosi 10,19 mm (3,80 ‰), a skraćenje 11,01 mm (4,11 ‰).

Izmjereni vertikalni pomaci iznose 1,95 mm u ravnini lijevoga stupa, te 0,98 mm kod desnoga stupa. Deformacija pri dnu stupa iznosila je 0,148 %, pri vrhu stupa 0,049 %, a na gredi 0,102 %. Iz ovoga se može zaključiti kako čelični okvir nije ušao u plastično područje. Prikaz deformacije pri dnu stupa može se vidjeti na slici 4.44.

Početna krutost modela iznosila je 27,89 kN/mm.



Slika 4.43 – Pomaci dijagonala – okvir OG-2



Slika 4.44 – Deformacije pri dnu stupa – okvir OG-2

Čelični okvir sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova – OG-3

Najveća izmjerena sila kod okvira OG-3 iznosi 128 kN, uz pripadajući horizontalni pomak od 23,80 mm, te međukatni pomak od 1,48 %. Maksimalni pomak okvira iznosi 24,20 mm (međukatni pomak 1,50 %) uz koji je izmjerena horizontalna sila od 124 kN. Kao i kod prethodnih dvaju okvira s ispunom od šupljih glinenih blokova, prva pukotina nalazilase u sredini zida te se protezala okomito kroz blok, a zabilježena je pri horizontalnoj sili od 51 kN i horizontalnom pomaku od 1,50 mm (međukatni pomak iznosi 0,09 %). Dijagonalno raspucavanje zida događa se pri sili od 90 kN. Kod ovoga okvira uočeno je značajno drobljenje

zidanog ispuna u blizini stupova okvira te je primijećeno stepenasto dijagonalno raspucavanje zida po sljubnicama morta.

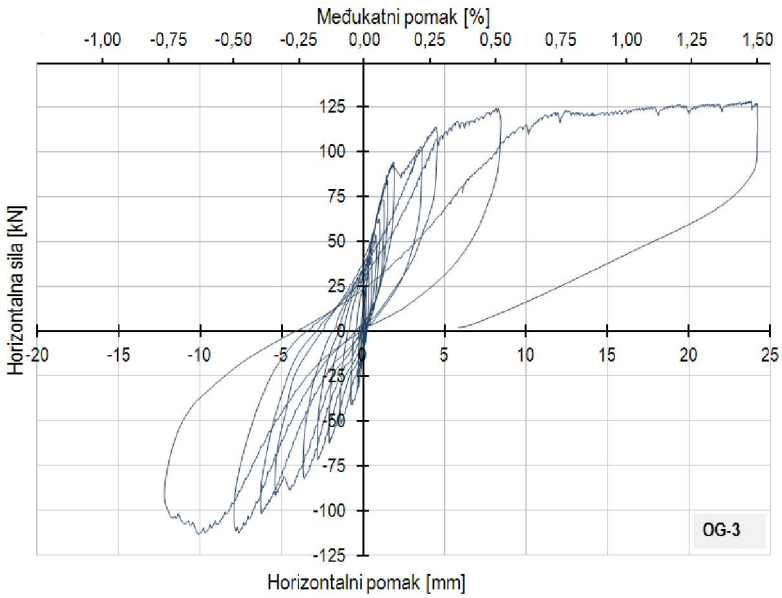
Okvir je opterećivan cikličkom silom do 120 kN, nakon čega se prešlo na kontrolu pomaka, zbog ranije navedenih razloga.

Maksimalno produljenje i skraćenje dijagonale čeličnog okvira iznose 14,40 mm i 18,04 mm, odnosno 5,37 ‰ i 6,73 ‰ u odnosu na duljinu dijagonale nedeformiranog čeličnog okvira. Zidani ispun ima produljenje dijagonale 15,99 mm (6,54 ‰), a skraćenje 17,64 mm (7,21 ‰), slika 4.46.

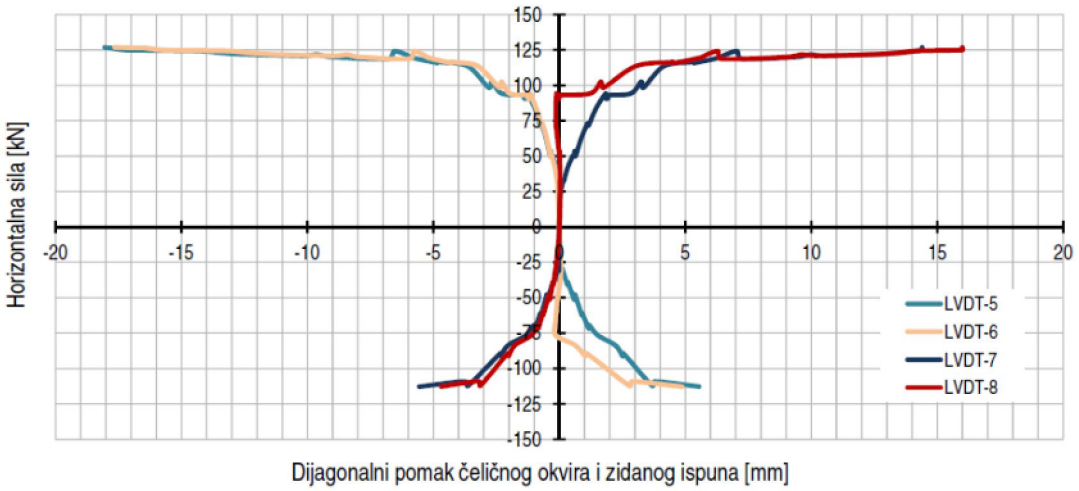
Izmjereni vertikalni pomaci iznose 1,17 mm u ravnini lijevoga stupa i 0,85 mm kod desnogastupa.

Deformacija pri dnu stupa iznosi 0,168 %, pri vrhu stupa 0,108 %, dok je na gredi izmjerena deformacija od 0,117 %. Deformacija pri dnu stupa prikazana je na slici 4.47.

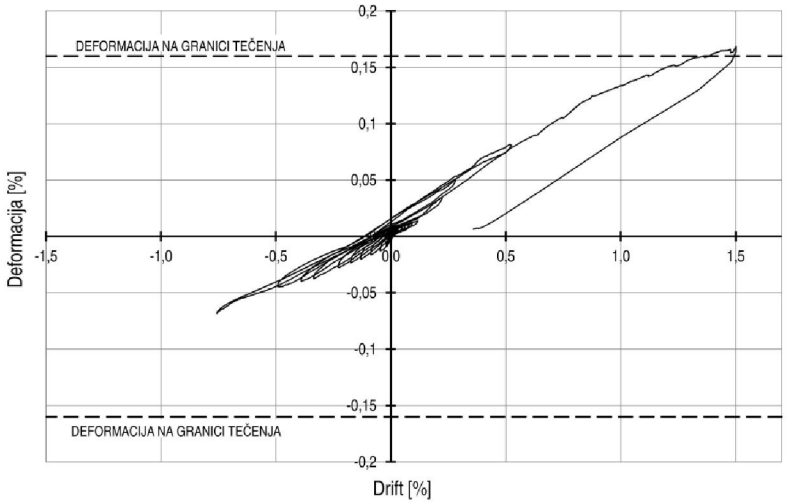
Krutost modela iznosila je 34,0 kN/mm.



Slika 4.45 – Histerezna petlja za okvir OG-3



Slika 4.46 – Pomaci dijagonala – okvir OG-3



Slika 4.47 – Deformacije pri dnu stupa – okvir OG-3

Čelični okvir sa zidanim ispunom od porobetonskih blokova – OY-1

Od svih ispitivanih okvira sa zidanim ispunom kod ovoga je izmjerena najveća nosivost, koja je iznosila 152 kN. Također, što će kasnije u radu biti i prikazano, i na ostalim dvama ispitanim okvirima s porobetonskim zidanim ispunom zabilježena je veća (model OY-3) ili jednaka (OY-2) nosivost na horizontalnu silu u odnosu na modele serije OG-i, slika 4.38. Razlog veće otpornosti okvira s porobetonskim zidanim ispunom na horizontalne sile u odnosu na okvire s glinenim ispunom, iako su mehaničke karakteristikeporobetonskog ispuna(tlačna čvrstoća, modul elastičnosti) nešto slabije od glinenog, je u njegovoj većoj kompaktnosti koja je posljedica većih dimenzija zidnih porobetonskih elemenata u odnosu na glinene, te u dvostruko većoj čvrstoći tankoslojnog morta (Ytong ljepila) u odnosu na cementno-vapneni mort koji je korišten pri izradi modela OG-i.

Horizontalni pomak pri najvećoj izmjerenoj sili iznosio je 26,29 mm, što u postotku od katne visine iznosi 1,63 %. Najveći izmjereni horizontalni pomak iznosi 26,83 mm (međukatni pomak 1,66 %), uz izmjerenu horizontalnu od 149 kN. Prva pukotina nastala je pri horizontalnoj sili od 54 kN i horizontalnom pomaku od 2,01 mm (međukatni pomak 0,12 %), te se protezala dijagonalno kroz veći broj blokova. Oblik otkazivanja nosivosti zidanog ispuna dijagonalno jeraspucavanje uz posmično otkazivanje (klizanje) po horizontalnim sljubnicama zida.

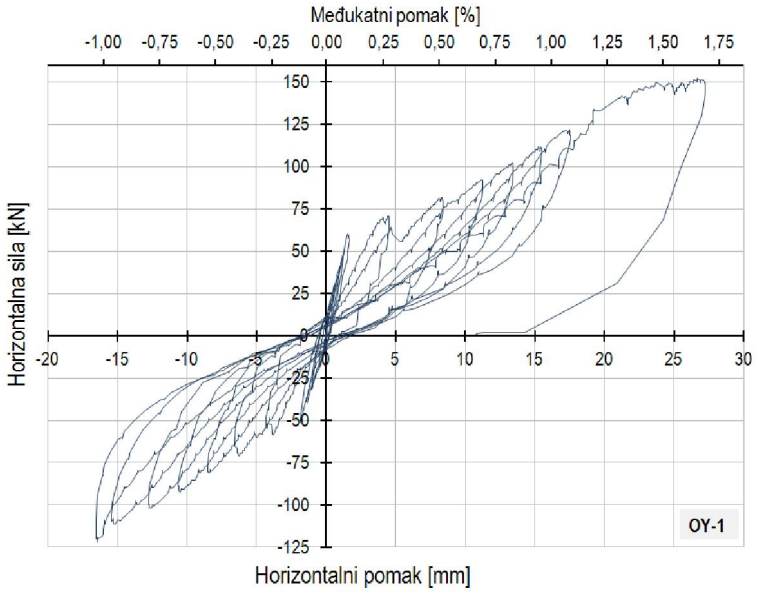
Cikličko opterećivanje okvira trajalo je do sile od 120 kN, nakon čega se pristupilo guranju okvira u jednu stranu u koracima od po 1 mm. Kod modela serije OY-i kontrola pomaka primjenjivana je kada se uočilo da okvirna čelična konstrukcija ulazi u plastično područje, što je bilo moguće pratiti očitavanjem zapisa deformetara.

Produljenje dijagonale čeličnog okvira i zidanog ispuna od porobetonskih blokova iznose 15,88 mm i 14,43 mm, odnosno u promilima od početnih duljina dijagonala 5,92 ‰ i 5,99 ‰, dok je skraćenje dijagonale

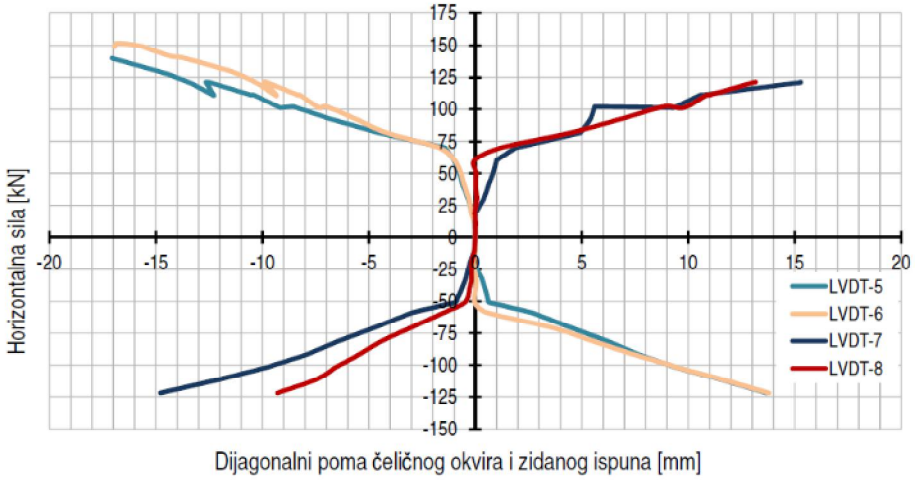
čeličnog okvira 17,77 mm (6,64 ‰), a zidanog ispuna 17,03 mm (6,97 ‰).Vertikalni pomaci okvira iznose 0,66 mm (lijevi stup okvira) i 2,31 mm (desni stup).

Najveća izmjerena deformacija pri dnu stupa iznosi 0,249 %, iz čega se može zaključiti da je čelični okvir ušao u plastično područje (kako je ranije rečeno deformacija na granici tečenja iznosi 0,16 %). Deformacije pri vrhu stupa i na gredi manje su i iznose 0,093 % i 0,129 %.

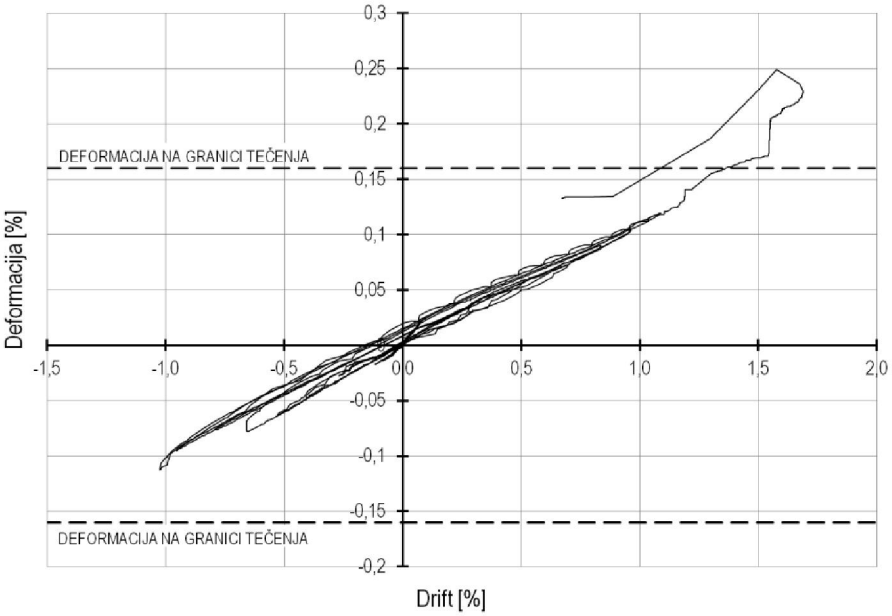
Početna krutost modela manjaje od onih koje su dobivane ispitivanjem okvira s ispunom od glinenih blokova, a iznosila je 26,93 kN/mm. Slikom 4.48 prikazana je histerezna petlja ispitnog uzorka OY-1 na kojoj je uočljivapočetna „utegnutost“ sustava, koja nije primijećena i kod modela OY-2 i OY-3, te koja je, najvjerojatnije, posljedica nepreciznosti pri izradi modela, u smislu da se uslijed rezanja porobetonskih blokova, kako bi odgovarali odabranom mjerilu, nisu mogli dobiti zidni elementi identičnih visina pa je zadnji red zidanog ispuna, u dodiru s gredom čeličnoga okvira, bio različito popunjen kod modela OY-i.



Slika 4.48 – Histerezna petlja za okvir OY-1



Slika 4.49 – Pomaci dijagonala – okvir OY-1



Slika 4.50– Deformacije pri dnu stupa – okvir OY-1

Čelični okvir sa zidanim ispunom od porobetonskih blokova – OY-2

Horizontalna sila koju je mogao preuzeti okvir s porobetonskim zidnim ispunom OY-2iznosila je 139 kN, te je pri ovoj vrijednosti sile izmjeren horizontalni pomak u ravnini grede okvira od 30,31 mm. Ovaj pomak odgovara međukatnom pomaku od 1,88 %. Eksperimentalnim ispitivanjem modela OY-2 izmjeren je najveći horizontalni pomak od 30,73 mm (međukatni pomak 1,91 %) pri horizontalnoj sili u visini grede čelične okvirne konstrukcije od 130 kN.

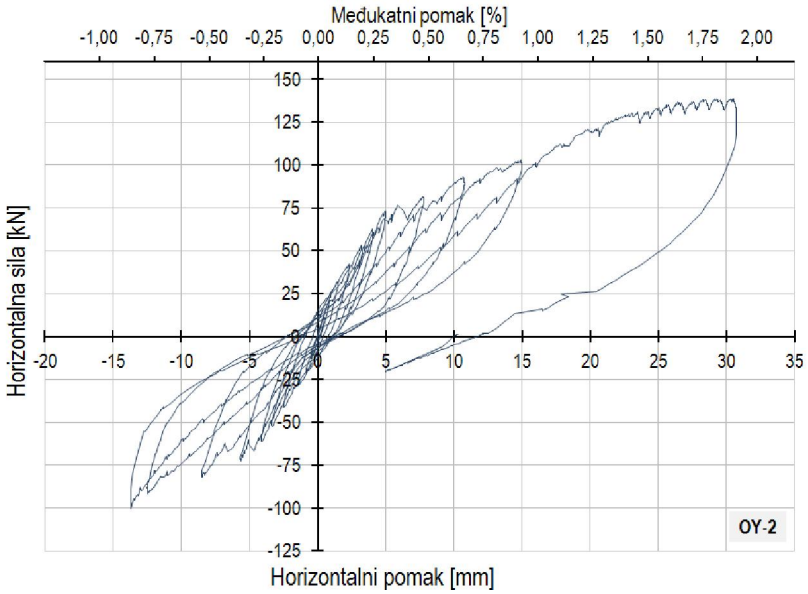
Prihorizontalnojsili od 51 kN, pomaku okvira od 3,39 mm, odnosno međukatnom pomaku okvira 0,21 %, dolazi do značajnog odvajanja zidanogporobetonskog ispuna od čeličnoga okvira. Dijagonalne pukotine počinju se otvarati pri horizontalnoj sili od 63 kN. Način sloma zidanog ispuna isti je kao i kod okvira OY-1.

Kontroliranje pomaka, umjesto sile, započeto je nakon dostizanja sile od 100 kN.

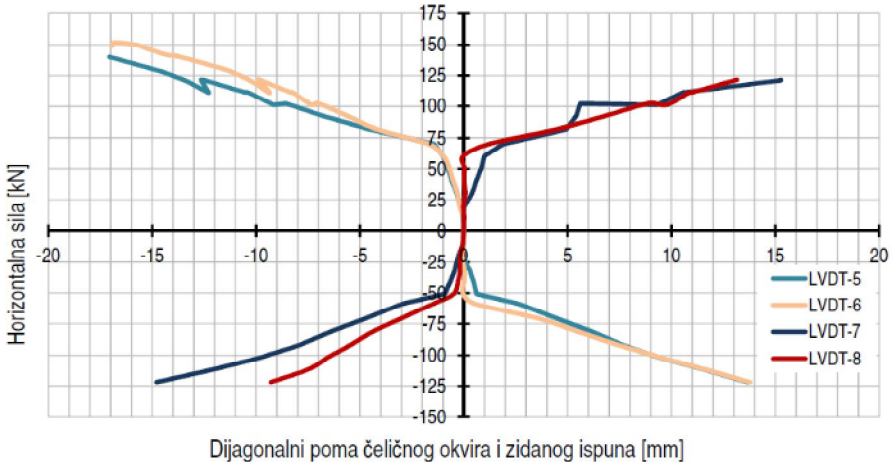
Produljenje dijagonale čeličnog okvira pri maksimalnoj horizontalnoj sili iznosilo je 23,33 mm, što je promjena duljine u odnosu na duljinu dijagonale u nedeformiranom stanju sustava od 8,70 ‰.Skraćenje duljine dijagonale pri najvećem horizontalnom opterećenju iznosilo je 18,03 mm (6,73 ‰). Produljenje dijagonale zidanog ispuna bilo je 15,91 mm (6,51 ‰), a skraćenje 18,04 mm (6,73 ‰).

Deformacija pri dnu stupa iznosi 0,205 %, pa se kao i kod okvira OY-1, može zaključiti da je čelični okvir ušao u plastično područje, slika 4.53.Relativna deformacija pri vrhu stupa iznosilo je 0,083 %, a na gredi čeličnoga okvira 0,140 %.

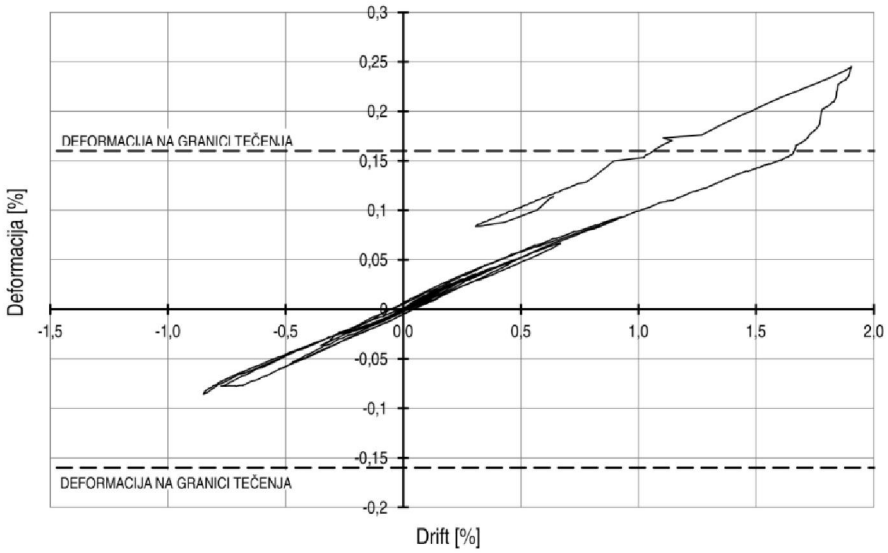
Početnakrutostmodela OY-2 iznosila je15,07 kN/mm.



Slika 4.51 – Histerezna petlja za okvir OY-2



Slika 4.52 – Pomaci dijagonala – okvir OY-2



Slika 4.53– Deformacije pri dnu stupa – okvir OY-2

Čelični okvir sa zidanim ispunom od porobetonskih blokova – OY-3

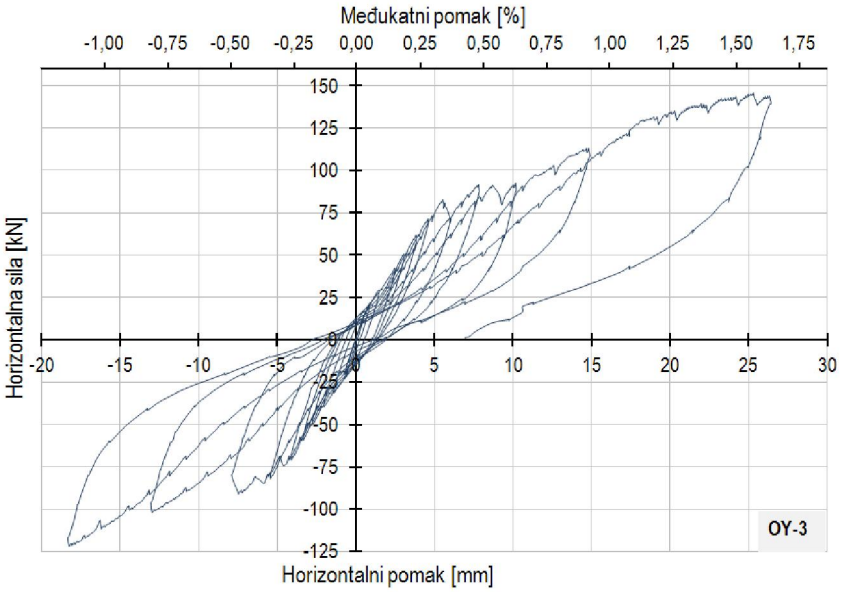
Nosivost okvira OY-3 na horizontalnu silu iznosila je 146 kN, uz horizontalni pomak 25,32 mm (međukatni pomak 1,57 %). Najveći pomak ovoga okvira izmjeren je pri horizontalnoj sili od 139 kN i iznosio je 26,47 mm (1,64 %). Okvir je nakon horizontalne cikličke sile od 120 kN postupno guran do maksimalnog pomaka od 26,47 mm. Horizontalna sila u visini grede okvira pri maksimalnom pomaku iznosi 139 kN, a međukatni pomak je 1,64 %.

Prva značajnija pukotina u porobetonskom zidanom ispunu nastaje uz lijevi stup čeličnogaokvira, na trećini njegove visine, pri horizontalnoj sili od 49 kN i pomaku okvira od 2,80 mm (međukatni pomak 0,17%). Pri horizontalnoj sili od 71 kN u zidanom ispunu pojavljujusepukotine koje se protežu u dijagonalnom smjeru ispuna. Način sloma zidanog ispuna isti je kao i kod prva dva ispitana okvira s ispunom od porobetonskih blokova.

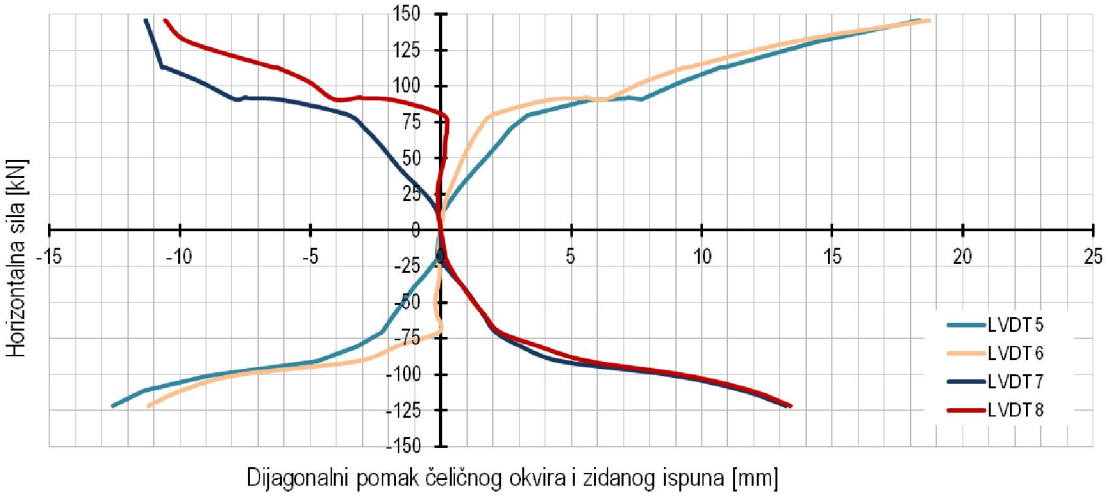
Produljenje dijagonale čeličnog okvira pri najvećoj horizontalnoj sili iznosilo je 18,71 mm (relativna deformacija od 6,98 ‰ u odnosu na početnu duljine dijagonale neopterećenog okvira), a skraćenje 11,29 mm (4,21 ‰). Produljenje dijagonale zidanog ispuna iznosilo je 18,36 mm (7,51 ‰), dok je skraćenje 10,55 mm (4,32 ‰).

Kao i u prethodnim dvama ispitanim čeličnim okvirima s ispunom od porobetonskih blokova i okvir OY-3 pretrpioje plastične deformacije pri dnu stupa, slika 4.56. Izmjerene deformacije pri dnu stupa, pri vrhu stupa i na gredi redom iznose: 0,209 %, 0,093 % i 0,127 %.

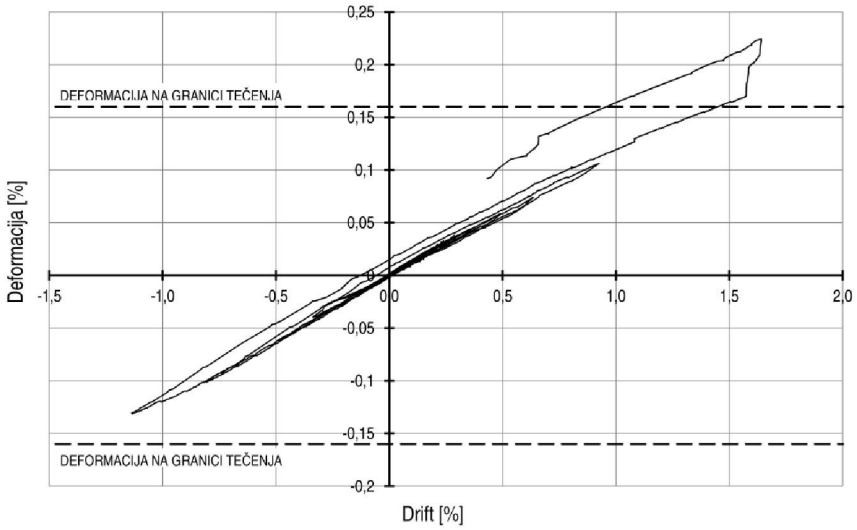
Početna krutost modela OY-3 iznosila je 17,50 kN/mm.



Slika 4.54 – Histerezna petlja za okvir OY-3



Slika 4.55 – Pomaci dijagonala – okvir OY-3



Slika 4.56 – Deformacije pri dnu stupa – okvir OY-3

Čelični okvir s kombiniranim ispunom od glinenih i porobetonskih blokova – OGY-1

Okvir s kombiniranim ispunom OGY-1, kod kojega je promjer rupe u oslabljenim *Ytong* blokovima zidanim uz stupove čeličnog okvira bio 53 mm, imao je nosivost od 106 kN s pripadnim pomakom od 15,22 mm (međukatni pomak 0,94 %). Maksimalni horizontalni pomak okvira s kombiniranim ispunom iznosio je 15,27 mm, a silaje pri tom pomaku iznosila 101 kN.

Kao što je i planirano, sve pukotine nalazile su se u slabijim *Ytong* blokovima, dok na glinenom dijelu ispuna nije bilo pukotina. Prva pukotina nastala je pri horizontalnoj sili od 39 kN., pomaku od 1,63 mm, odnosno međukatnom pomaku od 0,10 %.

Okvir OGY-1 ispitivan je cikličkom silom do 90 kN u koracima od 10 kN, a nakon što je primijećeno značajno raspucavanje oslabljenih porobetonskih elemenata, primijenjen je režim kontrole pomaka. Svi

modeli serije OGY-i ispitivani su približno do vrijednosti međukatnog pomaka od 1,0 %, a ispitivanja su tada prekinuta jer je bilo očigledno da samo čelični okvir preuzima horizontalno opterećenje.

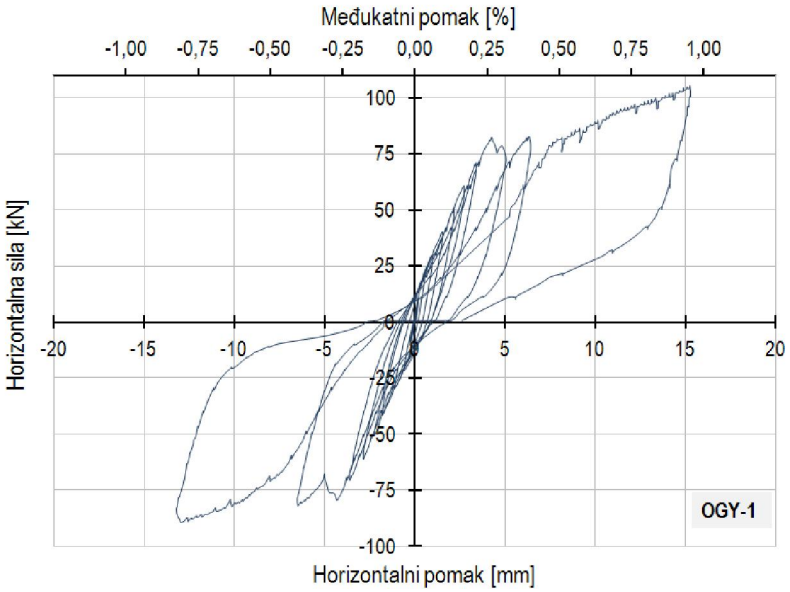
Pomaci dijagonala karakterističnisu za kombinirani ispun i razlikuju se od pomaka prethodno ispitivanih serija okvira sa zidanim ispunomod glinenih i porobetonskih blokova. Kod glinenog i porobetonskog ispuna protežu se po dvije „grane“ anvelopa pomaka dijagonala u svakom kvadrantu koordinatnog sustava, dok kod kombiniranog ispuna to nije slučaj, slika 4.58. Razlog ovome fenomenu leži u činjenici što se kod kombiniranog ispuna događalo potpuno drobljenje *Ytong* blokova uz stupove okvira pa je zidani ispun potpuno gubio svoju kompaktnost na način da je srednji dio zida od glinenih blokova ostao pukotinama odvojen od *Ytong* blokova na kojima su bili pričvršćeni kotačići preko kojih se mjerilo produljenje i skraćenje dijagonala (vidi sliku 4.32, b)). Ako se usporede slika 4.57 (koja prikazuje histereznu petlju za okvir OGY-1) i slika 4.58 (pomaci dijagonala, LVDT-6 i LVDT-8), može se uočiti kako se nagla promjena duljine dijagonale zidanog ispuna događa u trenutku popuštanja sustava čeličnog okvira s kombiniranim ispunom pri horizontalnoj sili od 79 kN.

Produljenje dijagonale zidanog ispuna u trenutku popuštanja sustava iznosilo je 0,44 mm (0,182 ‰), a skraćenje 1,37 mm (0,560 ‰).Produljenje dijagonale čeličnog okvira pri najvećoj izmjerenoj horizontalnoj sili iznosilo je 11,32 mm (4,22 ‰ početne duljine dijagonale na nedeformiranom okviru), dokje skraćenje dijagonale iznosilo 11,11 mm (4,15 ‰).

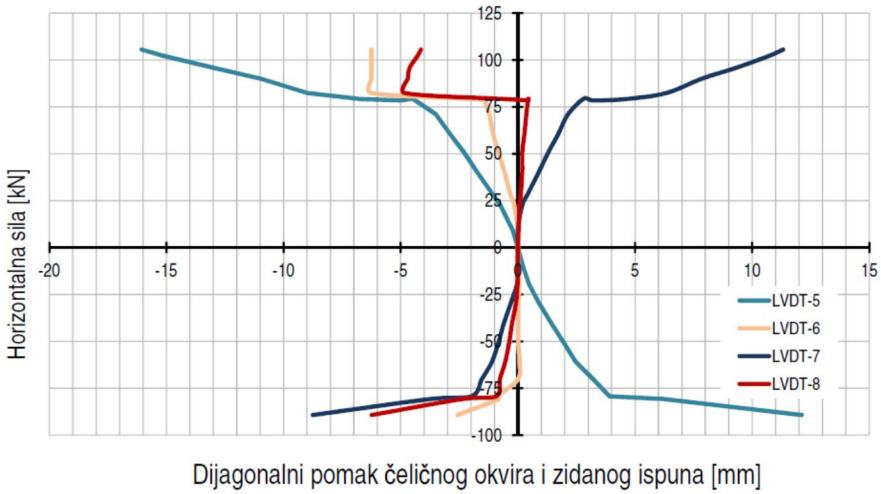
Najveći vertikalni pomak okvira OGY-1u ravnini lijevoga stupa iznosi 1,15 mm, te 0,81 mm u ravnini desnoga stupa.

Pregledom deformacija kritičnih mjesta na čeličnom okviru može se uočiti da je čelični okvir ostao u elastičnom području. Najveće relativne deformacije izmjerene su pri dnu stupa i iznose 0,100 %. Pri vrhu stupa deformacija je bila 0,050 %, dok je na gredi izmjerena vrijednost deformacije od 0,089 %.

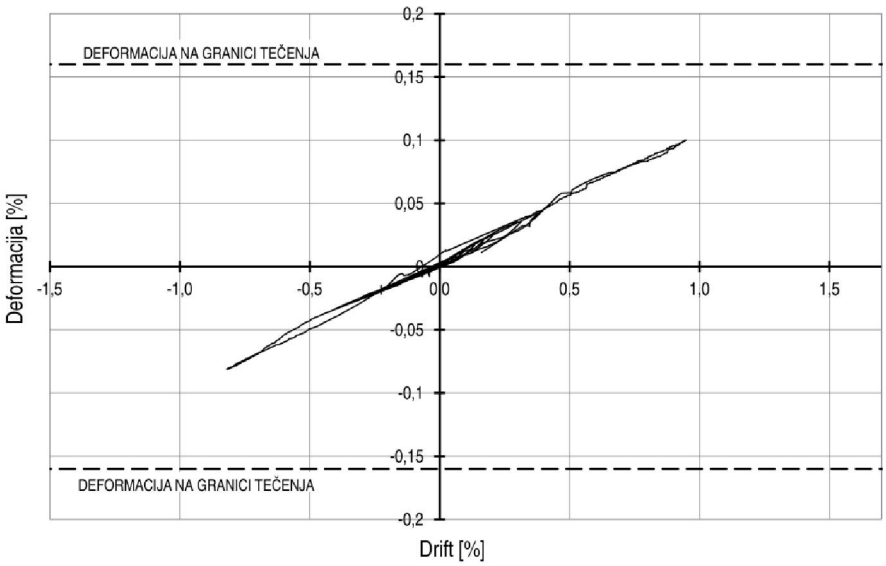
Početna krutost modela OGY-1je iznosila23,93 kN/mm.



Slika 4.57 – Histerezna petlja za okvir OGY-1



Slika 4.58 – Pomaci dijagonala – okvir OGY-1



Slika 4.59 – Deformacije pri dnu stupa – okvir OGY-1

Čelični okvir s kombiniranim ispunom od glinenih i porobetonskih blokova – OGY-2

Okvir OGY-2 (promjer rupe u Ytong bloku 73 mm) imao je nosivost od 93 kN. Zabilježen horizontalni pomak pri maksimalnoj horizontalnoj sili iznosioje17,05 mm, što je 1,06 % visine okvirne konstrukcije. Najveći pomak koji je ostvaren pri ispitivanju okvira OGY-2 iznosio je 17,15 mm (1,06 %), uz horizontalnu silu od 89 kN.

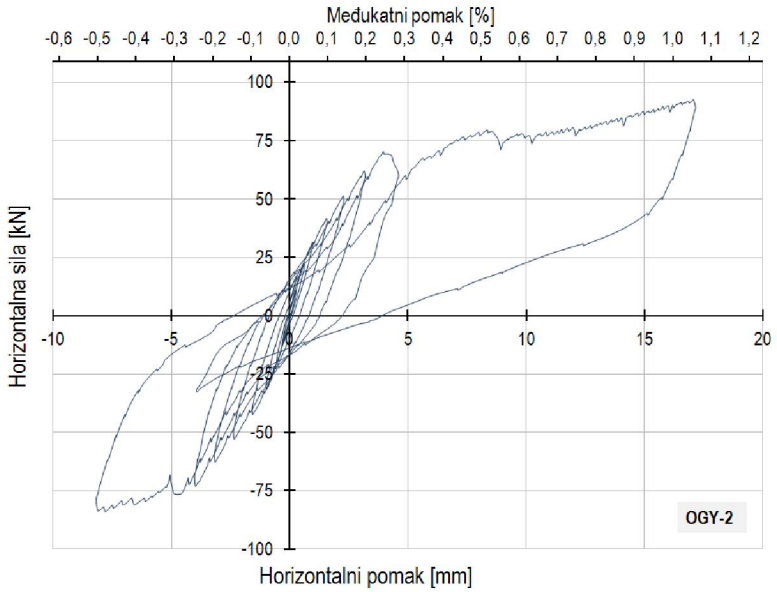
Prve pukotine kod okvira OGY-2 nastale su pri sili od 40 kN i pomaku od 1,72 mm (0,11 %). Uglavnom susve pukotine bile locirane na Ytong blokovima, dok su se u završnoj fazi ispitivanja pojavile i dvije pukotine u glinenim blokovima, ali samo na blokovima koji su bili u dodiru s Ytong blokovima.

U ravnini lijevoga stupa ispitivanog okvira s kombiniranim ispunom najveći izmjereni vertikalni pomak iznosi 0,85 mm, dok je kod desnog stupa vrijednost vertikalnog pomaka 0,80 mm.

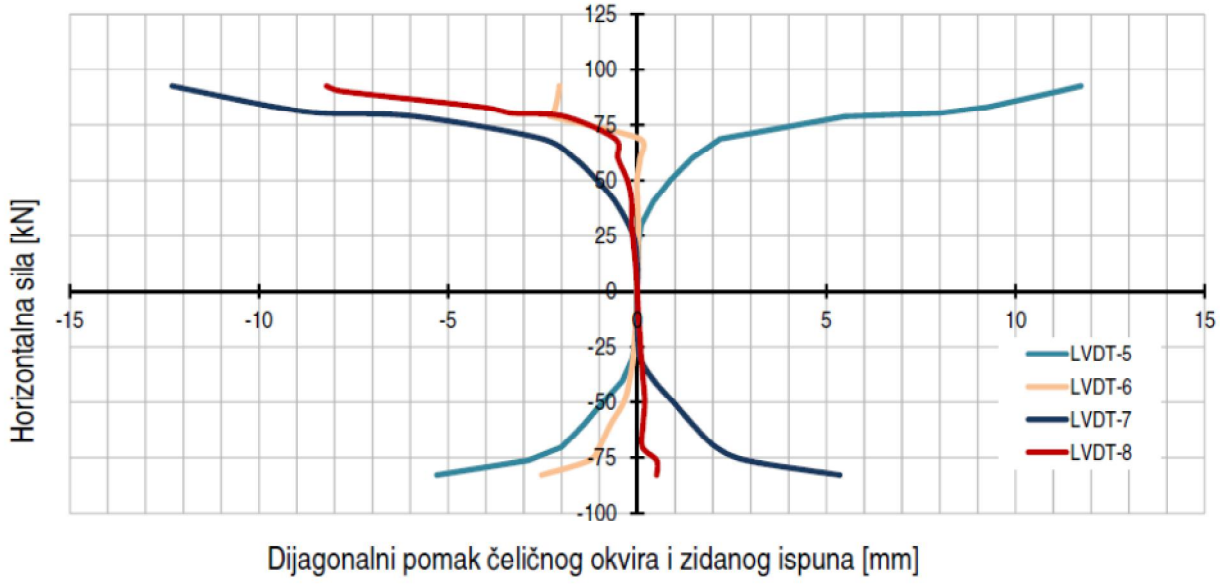
Pri sili popuštanja sustava od 69 kN, produljenje dijagonale zidanog ispuna iznosilo je 0,58 mm (0,24 ‰), dok je skraćenje dijagonale 0,07 mm (0,03 ‰). Produljenje dijagonale samoga čeličnog okvira pri najvećoj ostvarenoj horizontalnoj sili iznosilo je 12,29 mm (4,59 ‰), a skraćenje 11,72 mm (4,38 ‰).

Kod ovoga okvira najveća izmjerena deformacija nalazise na gredi i iznosi 0,116 %, pri dnu stupa izmjerena je neznatno manja vrijednost od 0,112 %, dok je pri vrhu stupa deformacija iznosila 0,061 %.

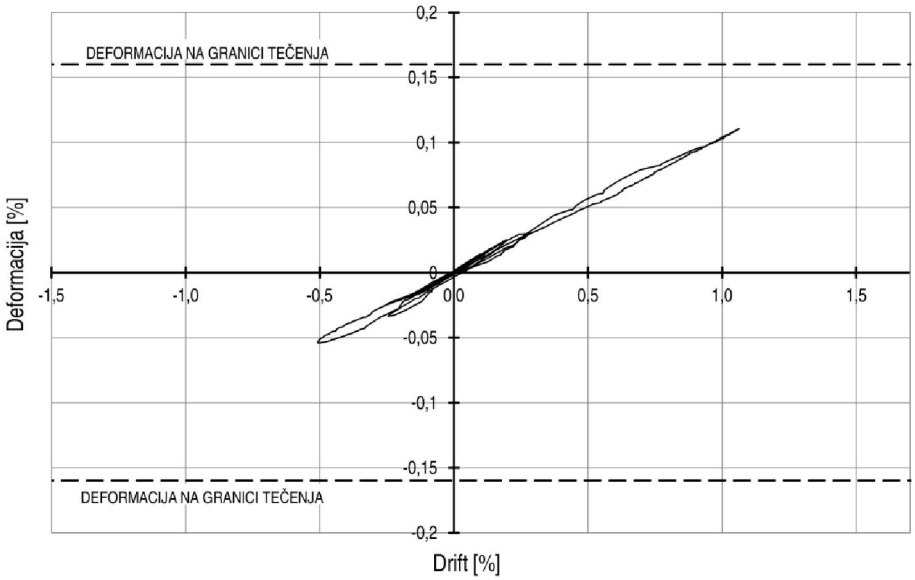
Početna krutost ovogamodela bilaje 23,26 kN/mm.



Slika 4.60 – Histerezna petlja za okvir OGY-2



Slika 4.61 – Pomaci dijagonala – okvir OGY-2



Slika 4.62 – Deformacije pri dnu stupa – okvir OGY-2

Čelični okvir s kombiniranim ispunom od glinenih i porobetonskih blokova – OGY-3

Okvir OGY-3, s najvećim promjerom rupe u *Ytong* bloku od 83 mm, dosegnuo je maksimalnu silu od 95 kN, uz horizontalni pomak i međukatni pomak od 17,04 mm, odnosno 1,06 %. Maksimalni pomak, koji je izmjeren pri horizontalnoj sili od 92 kN, iznosio je 17,16 mm (1,06 %).

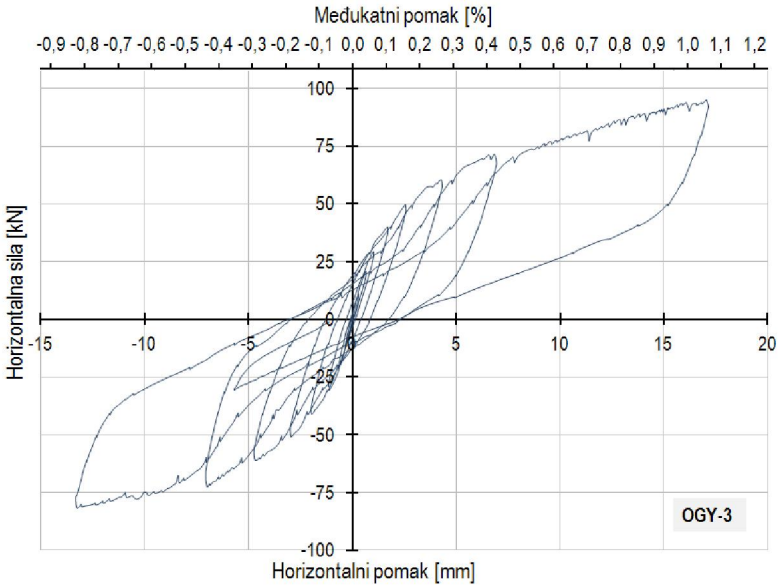
Vertikalni pomaci okvira u ravninama lijevoga i desnogastupa iznose 0,90 mm i 0,67 mm.

Nastanak prve pukotine događa se pri sili od 50 kN i pomaku od 2,57 mm (0,16 %). Slično kao i kod okvira OGY-2, glavnina pukotina nalazila se u *Ytong* blokovima; dok je samo jedna pukotina, koja se razvila u zadnjem redu blokova i išla kroz horizontalnu sljubnicu morta, bila u dijelu zida s glinenim elementima.

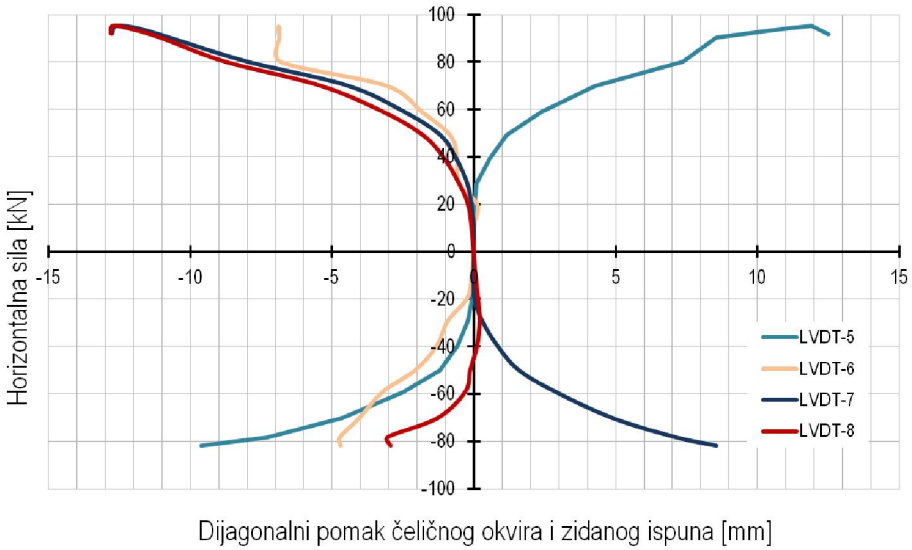
Kod okvira OGY-3, za razliku od prethodnih dvaju okvira s kombiniranim ispunom, nije moguće jasno detektirati pojavu popuštanja okvira jer je histerezna petlja prilično zaglađena te više liči na ponašanje okvira s jednolikim ispunom, slika 4.63. Ipak, ako se pogledaju dijagrami pomaka dijagonala, slika 4.64, može se uočiti „skretanje“ dijagonale zidanog ispuna pri prilično niskoj razini horizontalnog opterećenja od 20 kN. U tometrenutku izmjereno je produljenje dijagonale zidanog ispuna od 0,20 mm (0,08 ‰) i skraćenje od 0,11 mm (0,05 ‰). Na čeličnom okviru, pri maksimalnoj sili, izmjereno produljenje i skraćenje iznose 12,74 mm i 12,51 mm, što je 4,75 ‰ i 4,66 ‰ u odnosu na duljinu dijagonale u nedeformiranom stanju.

Izmjerene deformacije pri dnu i vrhu stupa, te na gredi redom iznose: 0,104 %, 0,071 % i 0,097 %. Dakle, kao i u prethodnim dvama slučajevima čeličnih okvira s kombiniranim ispunom, može se zaključiti kako čelični okvir nije pretrpio plastične deformacije.

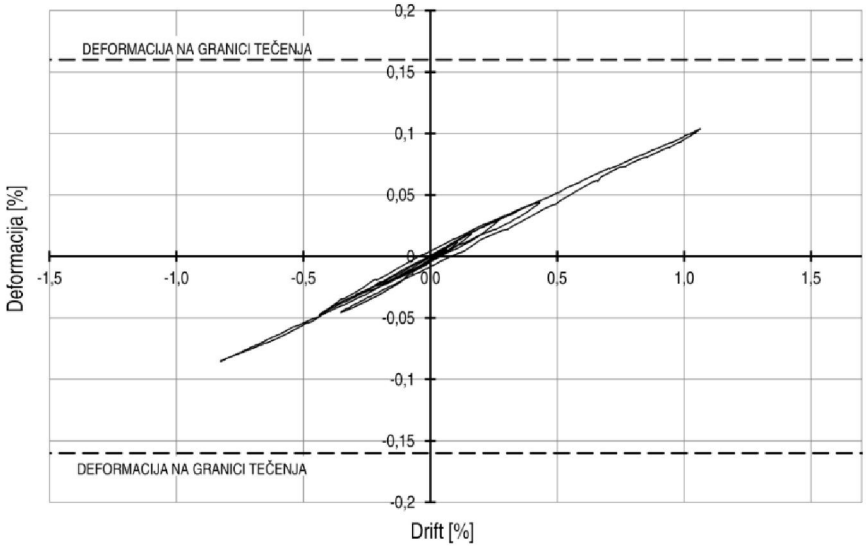
Krutost modela OGY-3 iznosila je 19,49 kN/mm.



Slika 4.63 – Histerezna petlja za okvir OGY-3



Slika 4.64 – Pomaci dijagonala – okvir OGY3

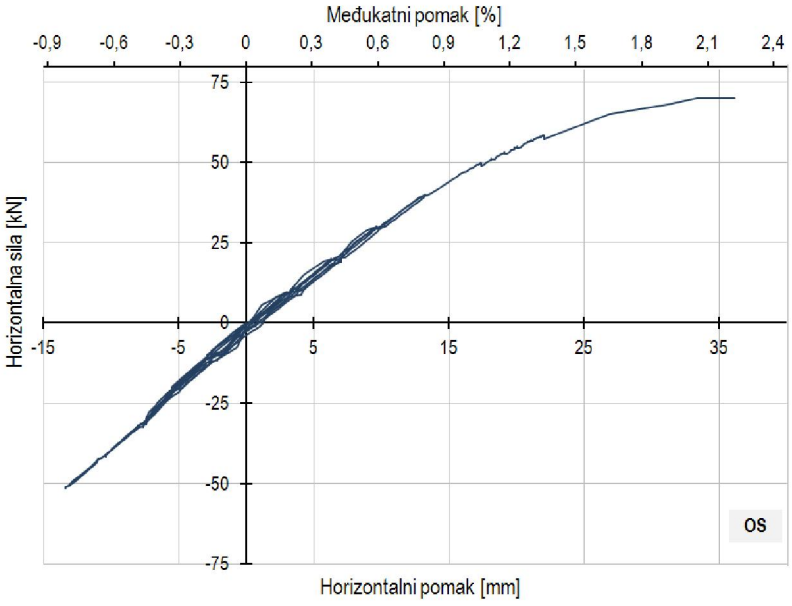


Slika 4.65 – Deformacije pri dnu stupa – okvir OGY-3

Važno je još jednom napomenuti kako su se pri izradi modela okvira s kombiniranim zidanim ispunom (OGY-i) za oslabljenje porobetonskih zidnih elemenata koristile rupe različitih promjera (53, 73 i 83 mm), pa se kod ovih modela ipak radi o trima različitim sustavima. Od ova tri sustava, prvi, s promjerom rupe u oslabljenim porobetonskim blokovima od 53 mm, pokazaoje ponašanje koje se željelo postići – u ranijim fazama opterećivanja sustav OGY-1 imao je povećanu krutost i nosivost na bočne sile (u odnosu na čelični okvir bez ispuna), a nakon dosezanja određenoga intenziteta opterećenja, pri kojem dolazi do potpunog raspucavanjaporobetonskih blokova, čelični okvir samostalno preuzima svo vanjsko opterećenje. Može se zaključiti kako su modeli OGY-2 i OGY-3 ipak imali prevelika oslabljenja porobetonskih blokova jer kod njih, pregledom histereznih petlji na slikama 4.60 i 4.63, trenutak raspucavanjaporobetonskih blokova nije bio toliko uočljiv. Za pretpostaviti je i da bi se daljnjim smanjenjem promjera rupe (promjer manji od 53 mm) u Ytong blokovima dobio sustav koji je sposoban preuzeti veća horizontalna opterećenja prije raspucavanja mekših elemenata u zidanom ispunu, a na taj bi se način onda u praktičnim slučajevima moglo „podešavati“ sustav za preuzimanje različitih razina horizontalnih opterećenja

Čelični okvir bez ispuna – OS

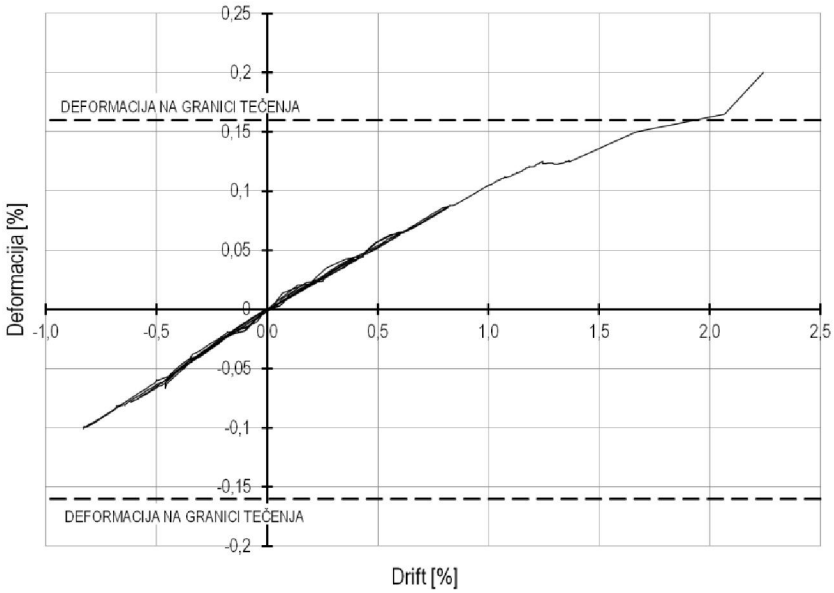
Čelični okvir bez ispuna ispitivan je radi usporedbe kako bi se odredio doprinos ispuna u nosivosti i krutosti. Ovaj ispitivani okvir prethodno je bio dio sustava OGY-3, a odabran je za ispitivanje jer su na njemu izmjerene najmanje vrijednosti relativnih deformacija, odnosno zato što kod njega nije bilo plastifikacije čeličnoga materijala. Maksimalna izmjerena sila koju je mogao preuzeti sam čelični okvir iznosila je 70 kN, uz maksimalni pomak od 36,15 mm, što iznosi 2,24 % međukatnog pomaka.



Slika 4.66 – Histerezna petlja za okvir OS

Produljenje dijagonale čeličnoga okvira pri maksimalnom opterećenju iznosi 27,13 mm, a skraćenje 24,04 mm, što od početne duljine dijagonale u promilima iznosi 10,12 ‰ i 8,97 ‰. Vertikalni pomaci u ravnini lijevoga i desnoga stupa iznose 0,89 mm i 1,52 mm. Okvir je pretrpio plastične deformacije, a najveća izmjerena deformacija nalazi se pri dnu stupa i iznosi 0,20 % (slike 4.67 i 4.68), dok je pomak pri vrhu stupa 0,08 %, a na gredi 0,13 %.

Ispitivanje modela OS prekinuto je zbog ograničenja mjerenja horizontalnih pomaka, te uočenih plastifikacija na stupovima konstrukcije.



Slika 4.67 – Deformacije pri dnu stupa – okvir OS

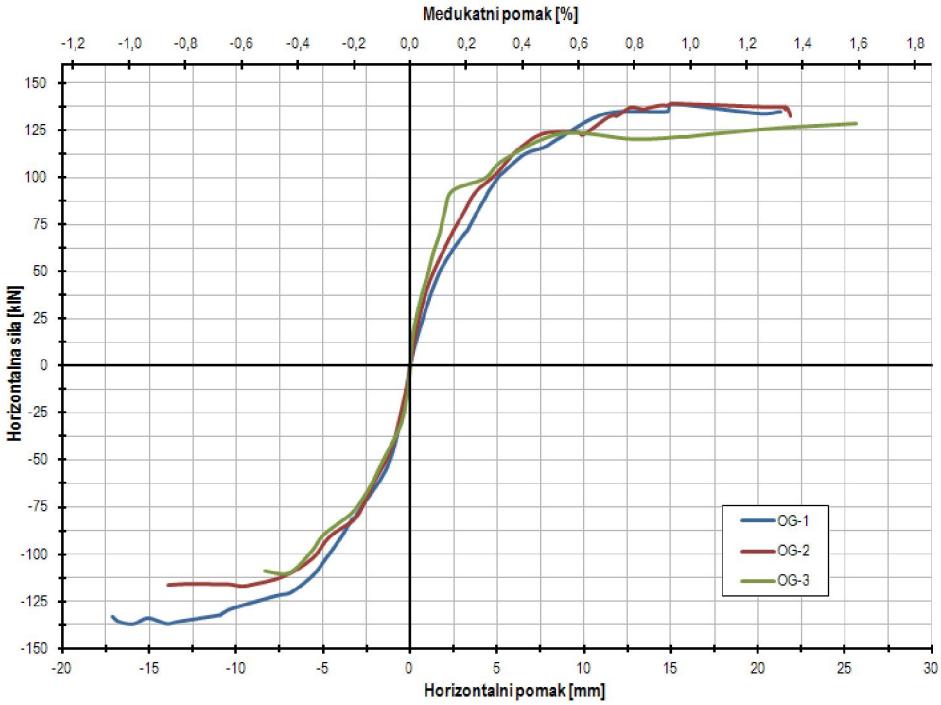
Slika 4.68 – Plastifikacija čeličnog stupa

4.8.7. Sumarni pregled rezultata ispitivanja

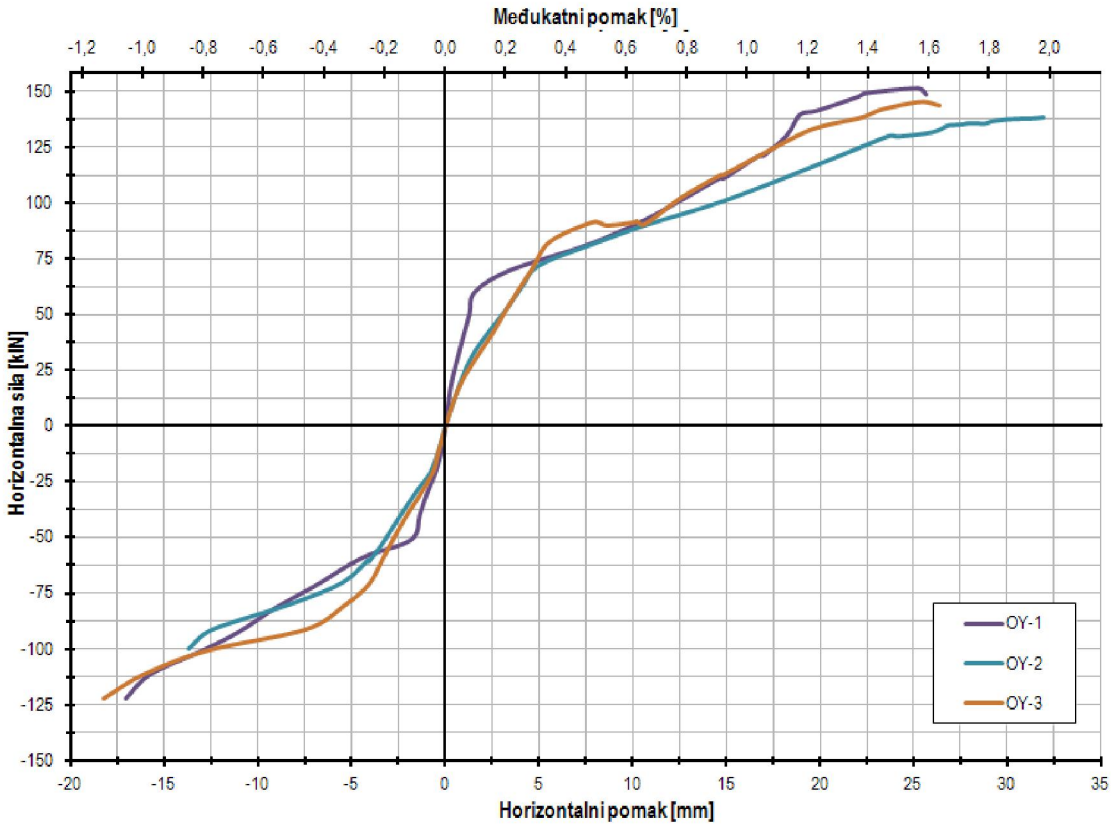
Ovdje ćemo i sumarno prikazati još neke rezultate ispitivanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom: u tablici 4.11 sumarno su dane najvažnije karakteristike ponašanja ispitivanih okvira, zatim su prikazane histerezne ovojnice (anvelope), fotografije i crteži oštećenja, odnosno rasporeda pukotina ispitivanih sustava, potom promjene njihovih sekantnih krutosti i podatci o trošenju energije.

Tablica 4.11 – Rezultati ispitivanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom i okvira bez ispuna

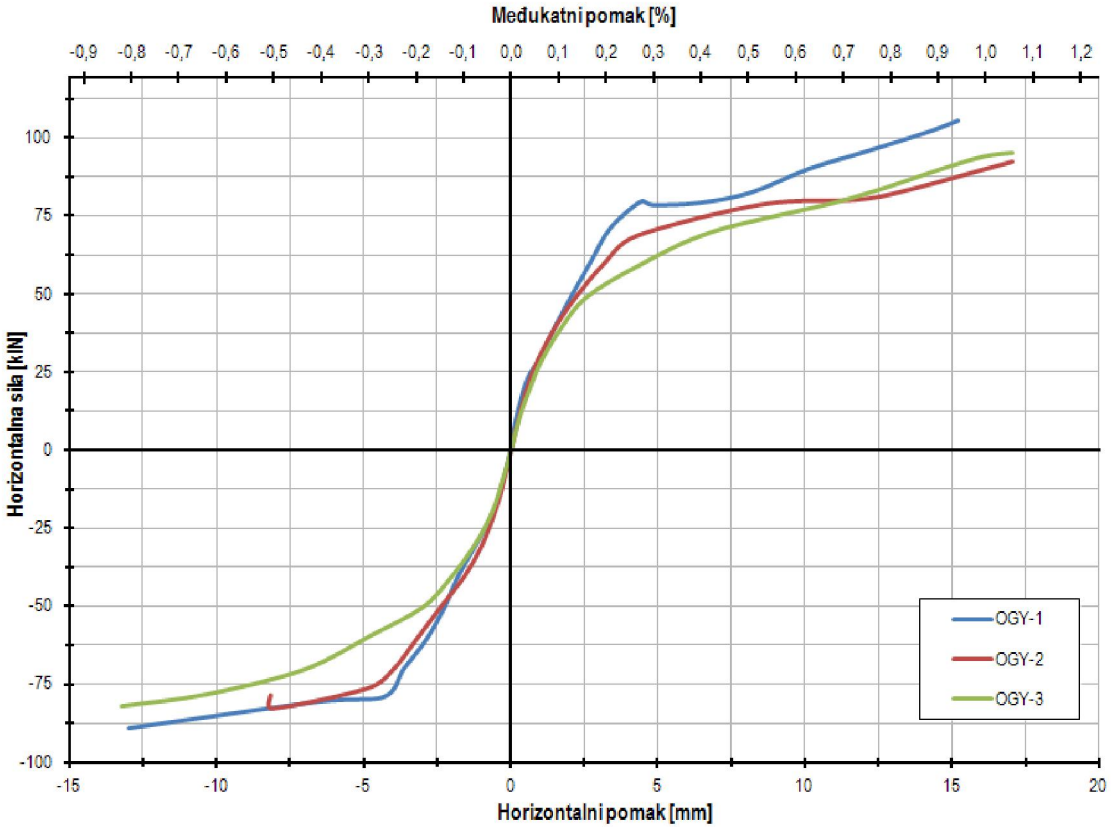
Uzorak	Krutost [kN/mm]	Pojava prve pukotine			Maksimalna sila			Maksimalni pomak		
		Sila [kN]	Pomak [mm]	Međukatni pomak [%]	Sila [kN]	Pomak [mm]	Međukatni pomak [%]	Sila [kN]	Pomak [mm]	Međukatni pomak [%]
OG-1	32,07	59	1,84	0,11	139	15,07	0,93	135	21,33	1,32
OG-2	27,89	70	2,51	0,16	139	15,12	0,94	132	21,87	1,36
OG-3	34,00	51	1,50	0,09	128	23,80	1,48	124	24,20	1,50
OY-1	26,93	54	2,01	0,12	152	26,29	1,63	149	26,83	1,66
OY-2	15,07	51	3,39	0,21	139	30,31	1,88	130	30,73	1,91
OY-3	17,50	49	2,80	0,17	146	25,32	1,57	139	26,47	1,64
OGY-1	23,93	39	1,63	0,10	106	15,22	0,94	101	15,27	0,95
OGY-2	23,26	40	1,72	0,11	93	17,05	1,06	89	17,15	1,06
OGY-3	19,49	50	2,57	0,16	95	17,04	1,06	92	17,16	1,06
OS	3,37	-	-	-	70	33,34	2,07	70	36,15	2,24



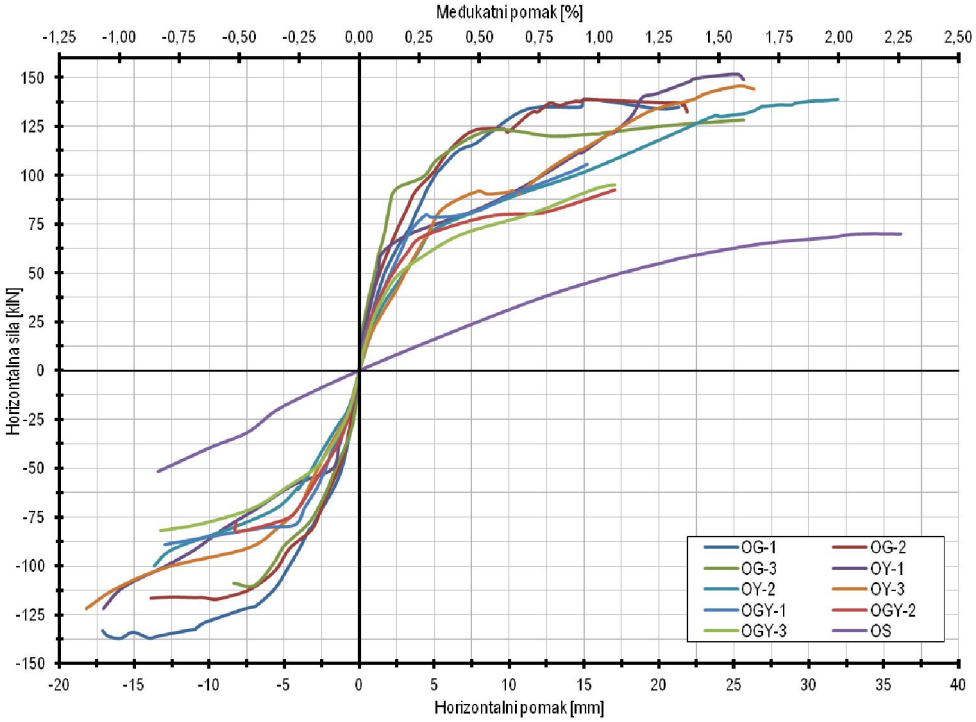
Slika 4.69– Histerezna ovojnica čeličnih okvira s ispunom od šupljih glinenih blokova (serija OG-i)



Slika 4.70 – Histerezna ovojnica čeličnih okvira s ispunom od porobetonskih blokova (serija OY-i)



Slika 4.71 – Histerezna ovojnica čeličnih okvira s kombiniranim ispunom (serija OGY-i)



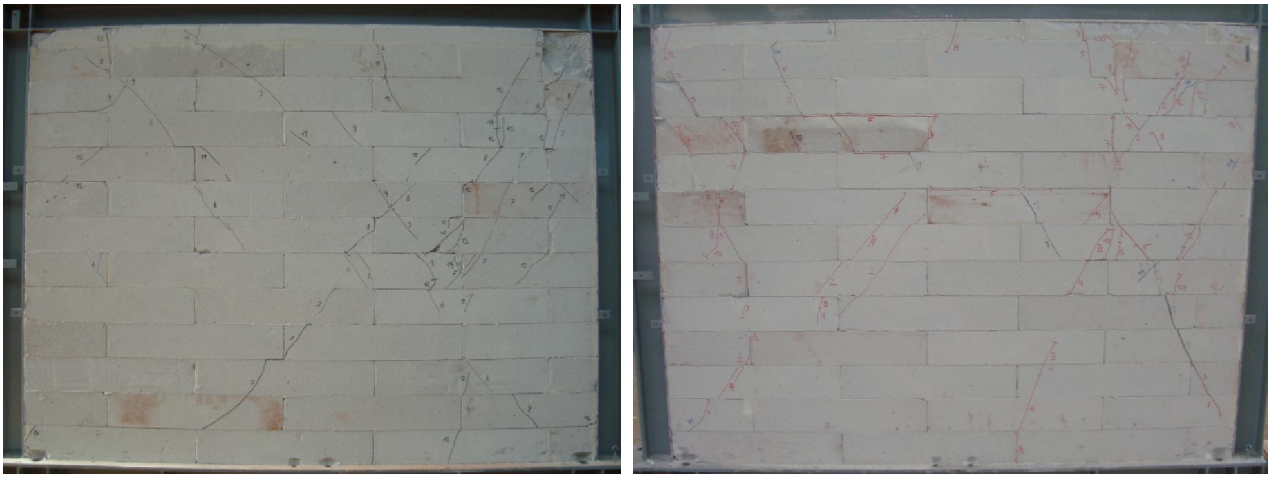
Slika 4.72 – Histerezne ovojnicesvih ispitivanih sustava

a) b)

Slika 4.73 – Oštećenja okvira sa zidanim ispunom: a) okvir OG-1, b) okvir OG-2

a) b)

Slika 4.74 – Oštećenja okvira sa zidanim ispunom: a) okvir OG-3, b) okvir OY-1



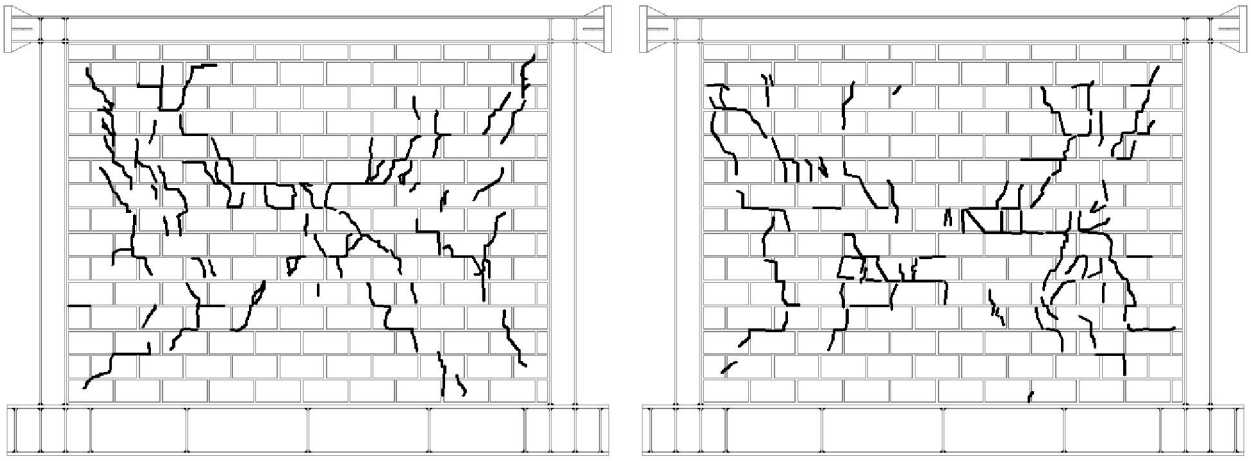
a) b)

Slika 4.75 – Oštećenja okvira sa zidanim ispunom: a) okvir OY-2, b) okvir OY-3

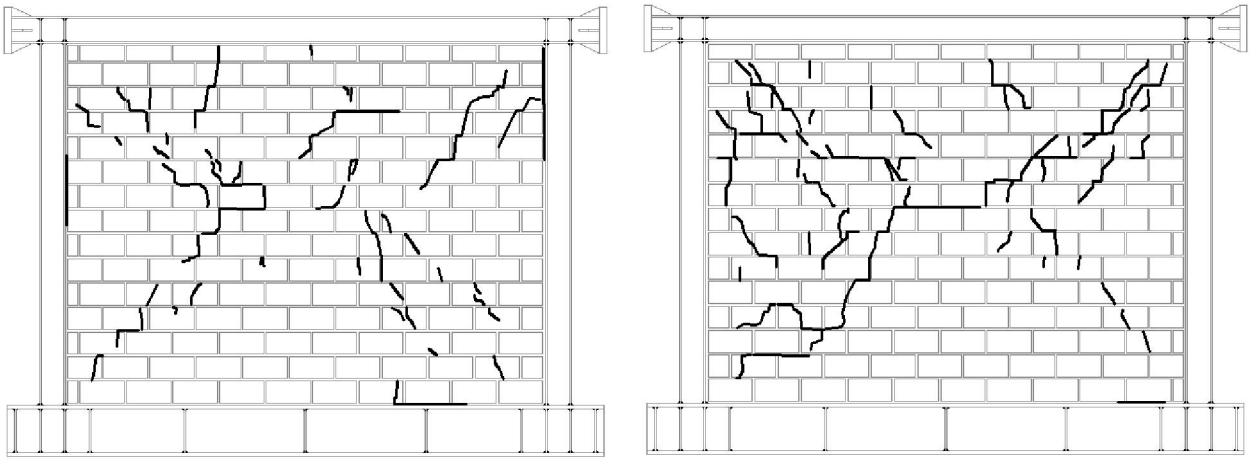
Slika 4.76 – Oštećenja okvira sa zidanim ispunom – OGY-1

Slika 4.77– Oštećenja okvira sa zidanim ispunom – OGY-2

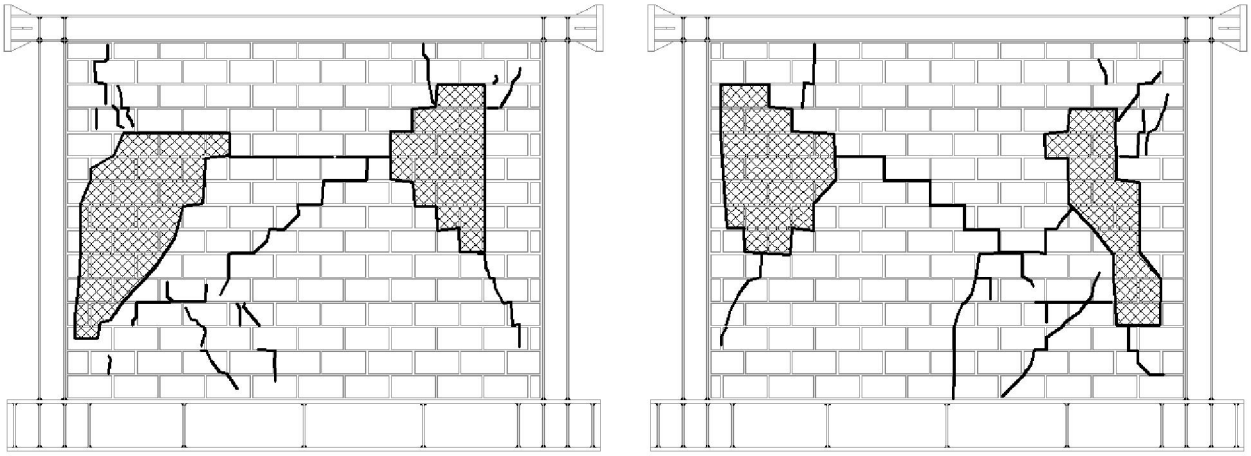
Slika 4.78– Oštećenja okvira sa zidanim ispunom – OGY-3



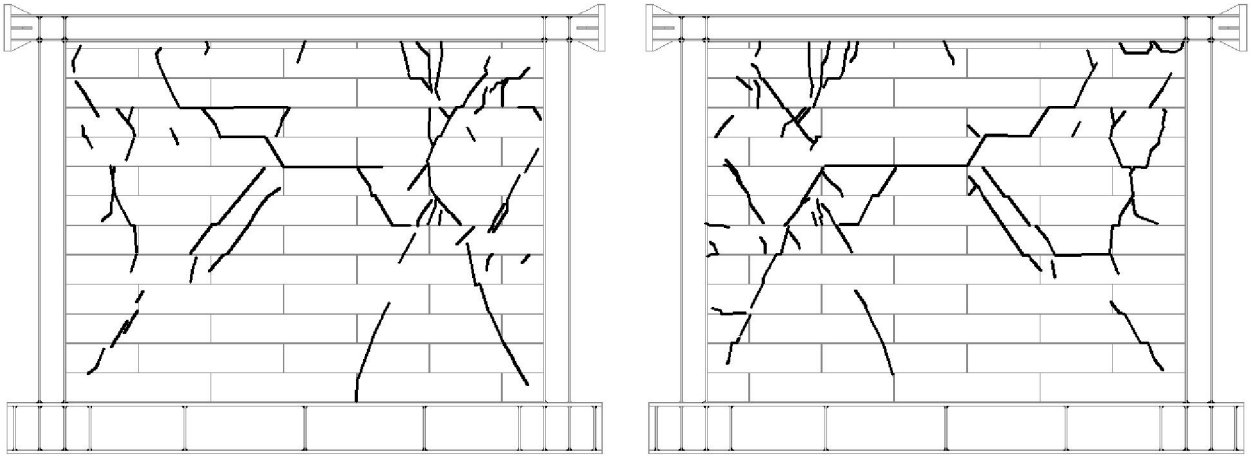
Slika 4.79 – Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OG-1



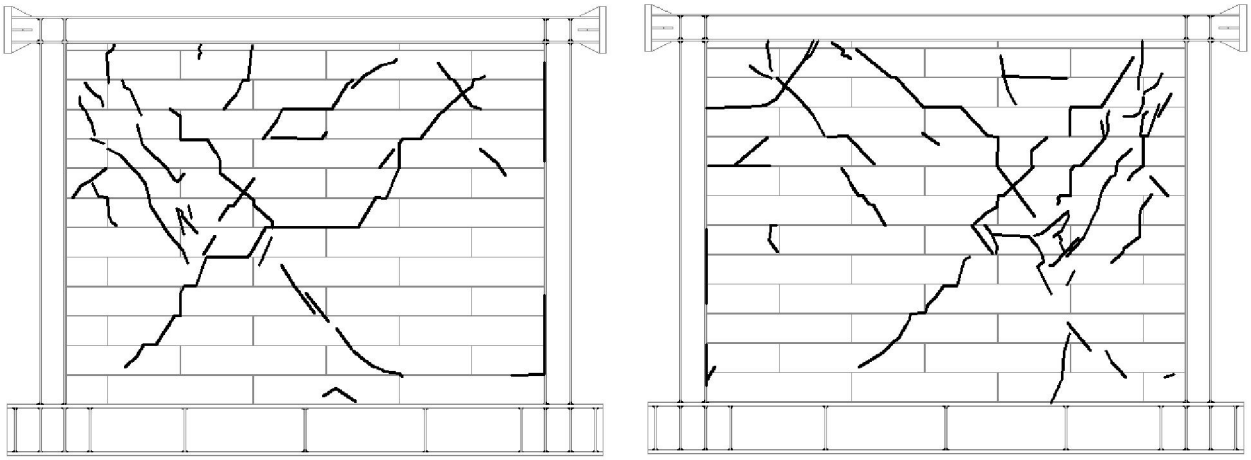
Slika 4.80 – Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OG-2



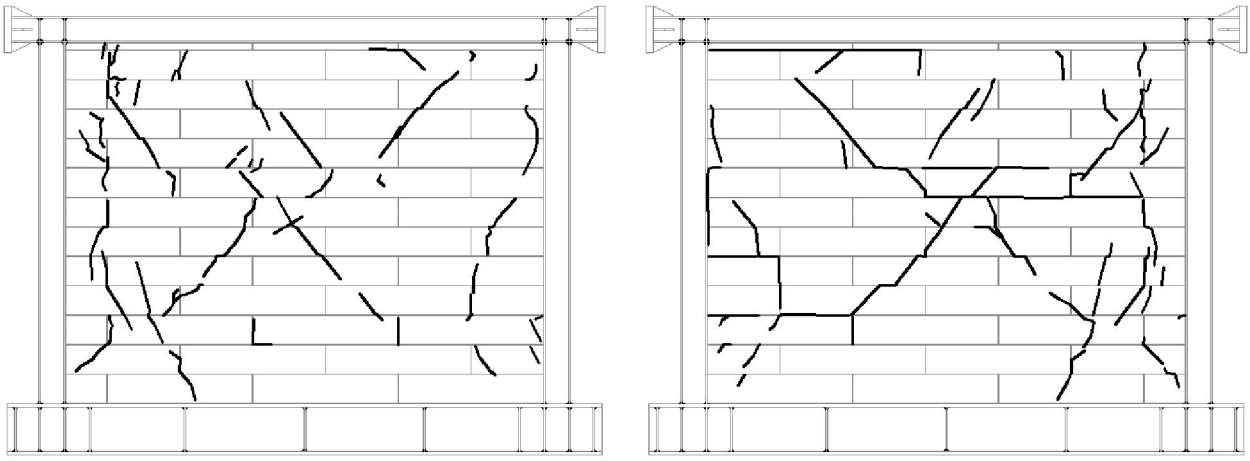
Slika 4.81– Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OG-3



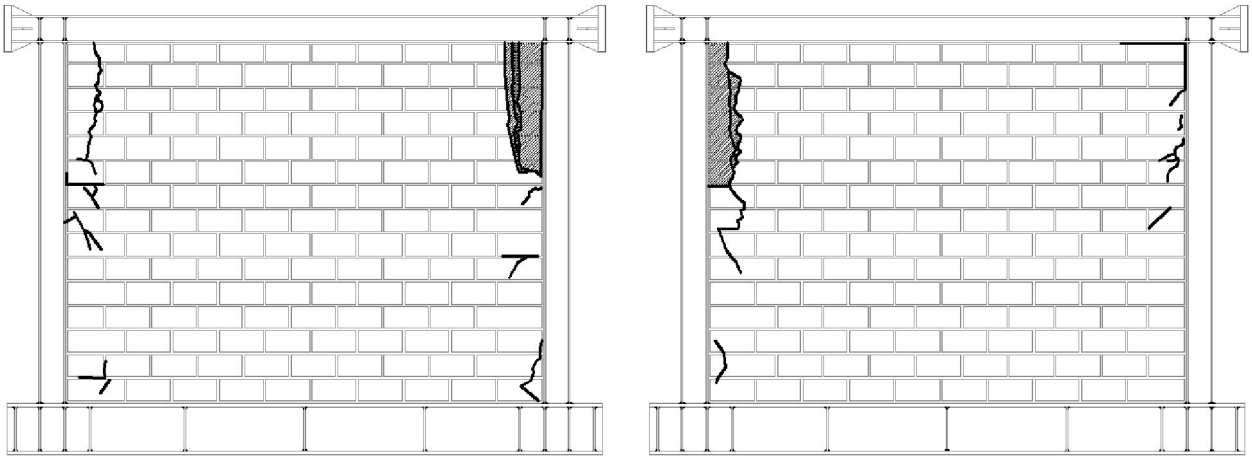
Slika 4.82 – Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OY-1



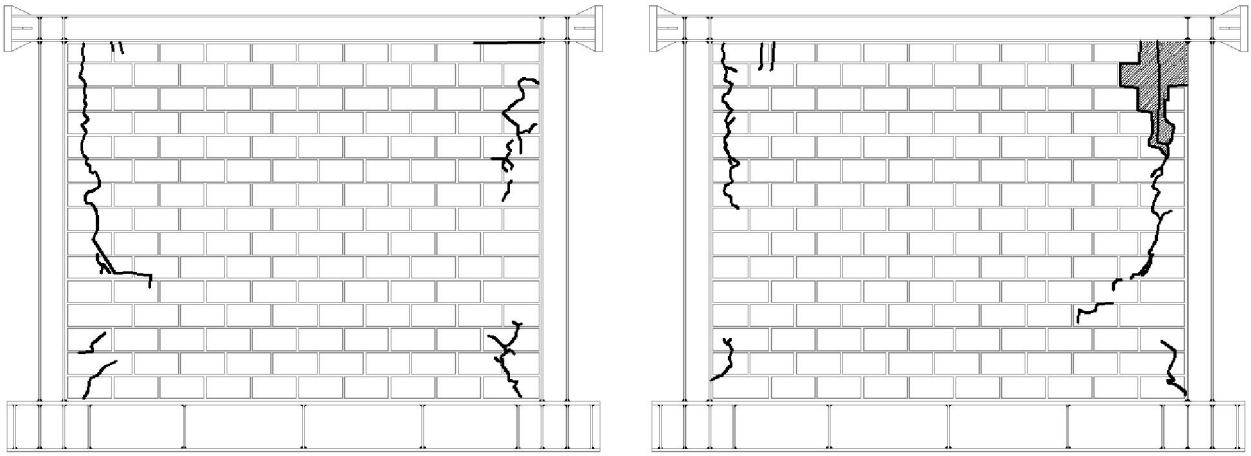
Slika 4.83 – Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OY-2



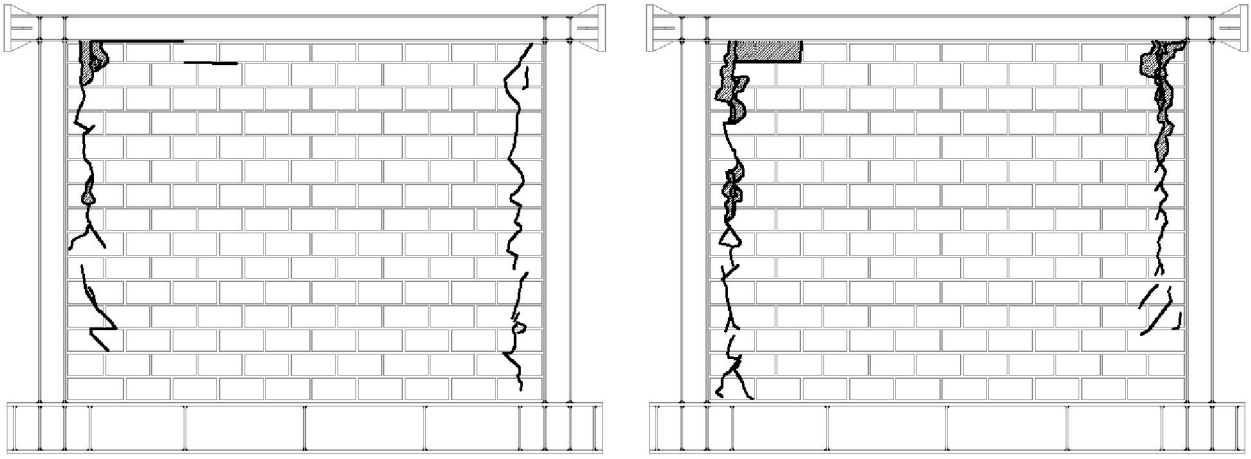
Slika 4.84 – Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OY-3



Slika 4.85 – Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OGY-1



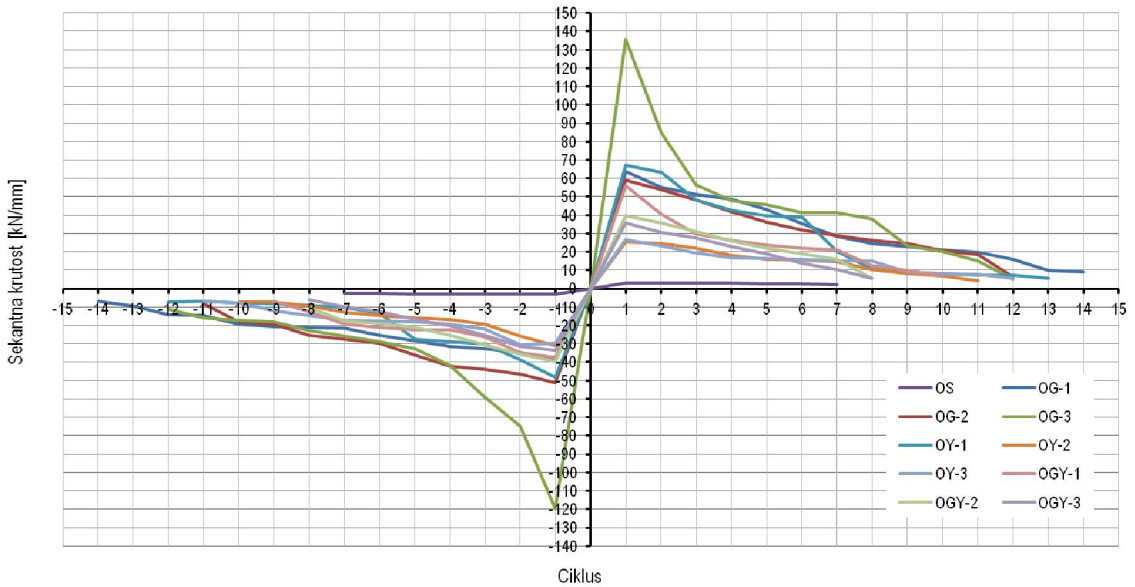
Slika 4.86 – Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OGY-2



Slika 4.87 – Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OGY-3

Na slici 4.87 prikazane su promjene sekantne krutosti po ciklusima opterećivanja. Može se uočiti kako su najveće krutosti imali čelični okviri s ispunom od šupljih glinenih blokova, a najniže,serija uzoraka s ispunom od Ytong blokova (izuzev okvira OY-1 koji je imao veće vrijednosti u odnosu na ostala dva okvira iz serije OY-i). Promjene krutosti (i početna krutost) okvira s kombiniranim ispunom nalaze se u području između okvira serije OG-i i OY-i.

U tablicama od 4.12 do 4.13 dan je pregled trošenja energije ispitivanih okvira po ciklusima. Dijagramhisterezne petlje svakoga ciklusa može se pogledati u prilogu na kraju ovoga rada. Gledajući ukupno, najveće trošenje energije ostvareno je u čeličnim okvirima s ispunom od šupljih glinenih blokova, potom slijede okviri s ispunom od porobetonskih blokova, dok je najmanje energije disipirano u okvirima s kombiniranim ispunom. Ako se usporedi trošenje energije pri određenim vrijednostima međukatnog pomaka, tablica 4.14, može se primijetiti kako se okviri s kombiniranim ispunom, pri manjim međukatnim pomacima (0,40 %), nalaze između serija OG-i i OY-i .



Slika 4.88 – Promjena sekantne krutosti ispitivanih čeličnih okvira sa zidanim ispunom

Tablica 4.12 – Trošenje energije čeličnih okvira s ispunom od glinenih blokova (OG-i)

	OG-1		OG-2		OG-3	
CIKLUS	ENERGIJA [kNmm]	Drift [%]	ENERGIJA [kNmm]	Drift [%]	ENERGIJA [kNmm]	Drift [%]
1	2,06	0,01	1,52	0,01	1,13	0,01
2	9,62	0,03	5,15	0,03	5,01	0,02
3	19,67	0,05	14,65	0,04	13,19	0,03
4	36,84	0,06	31,26	0,06	34,11	0,05
5	75,63	0,09	60,59	0,09	65,46	0,08
6	115,28	0,13	110,55	0,12	122,68	0,11
7	176,76	0,18	166,43	0,16	142,82	0,14
8	226,02	0,22	229,25	0,20	181,17	0,17
9	259,14	0,26	343,86	0,26	366,53	0,23
10	325,85	0,31	524,15	0,33	459,34	0,31
11	437,24	0,42	1040,60	0,62	484,38	0,38
12	818,99	0,51	1632,08	1,27	1056,95	0,57
13	989,99	0,90	-	-	1752,07	1,59
14	2365,97	1,09	-	-	-	-
Σ	**5859,06**		**4160,09**		**4684,84**	
prosječna vrijednost: 4901,33 kNmm						

Tablica 4.13 – Trošenje energije čeličnih okvira s ispunom od porobetonskih blokova (OY-i)

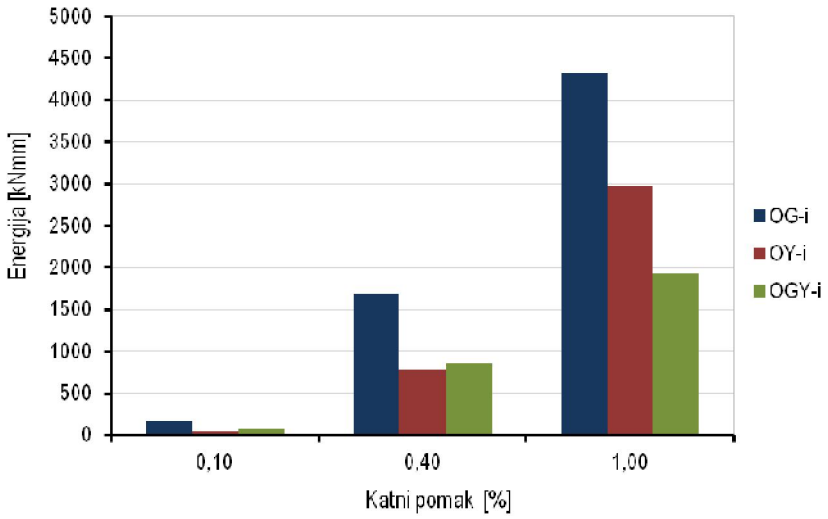
	OY-1		OY-2		OY-3	
CIKLUS	ENERGIJA [kNmm]	Drift [%]	ENERGIJA [kNmm]	Drift [%]	ENERGIJA [kNmm]	Drift [%]
1	0,63	0,01	3,05	0,02	3,17	0,03
2	4,86	0,03	8,02	0,05	8,56	0,05
3	18,38	0,05	30,53	0,09	31,67	0,09
4	27,52	0,07	80,91	0,15	75,92	0,14
5	36,23	0,10	121,17	0,20	103,24	0,18
6	119,16	0,19	145,01	0,25	130,91	0,22
7	297,84	0,32	200,21	0,32	159,88	0,27
8	481,75	0,52	447,63	0,50	296,77	0,34
9	531,08	0,67	632,96	0,72	476,70	0,55
10	593,82	0,81	688,07	0,89	722,44	0,79
11	698,43	0,95	1885,29	1,98	974,08	1,03
12	773,37	1,06	-	-	1384,34	1,57
13	1698,33	1,59	-	-	-	-
Σ	**5281,40**		**4242,85**		**4367,68**	
prosječna vrijednost: 4630,64 kNmm						

Tablica 4.14 – Trošenje energije čeličnih okvira s kombiniranim ispunom (OGY-i)

	OGY-1		OGY-2		OGY-3	
CIKLUS	ENERGIJA [kNmm]	Drift [%]	ENERGIJA [kNmm]	Drift [%]	ENERGIJA [kNmm]	Drift [%]
1	0,72	0,01	1,29	0,02	1,27	0,02
2	7,48	0,03	4,83	0,04	5,22	0,04
3	25,34	0,06	16,13	0,06	19,47	0,07
4	58,61	0,10	41,45	0,10	60,81	0,11
5	80,02	0,14	92,73	0,14	124,05	0,17
6	104,76	0,17	147,50	0,20	262,30	0,28
7	134,82	0,22	239,65	0,26	450,42	0,43
8	399,08	0,40	1115,20	0,78	1101,66	0,94
9	631,00	0,66	-	-	-	-
10	653,42	0,94	-	-	-	-
Σ	**2095,25**		**1658,78**		**2025,20**	
prosječna vrijednost: 1926,41 kNmm						

Tablica 4.15– Usporedba disipacije energije pri određenim vrijednostima katnih pomaka

Katni pomak [%]	ENERGIJA [kNmm]		
	OG-i	OY-i	OGY-i
0,10	166,19	57,54	80,87
0,40	1682,45	783,76	867,19
1,00	4317,31	2974,66	1926,41



Slika 4.89 – Trošenje energije pri određenim vrijednostima katnih pomaka

4.9. Komentar na dobivene rezultate

Laboratorijsko istraživanje ponašanja čeličnih okvira (jedno polje – jedan kat) s različitim vrstama zidanog ispuna provedeno je na ukupno devet uzoraka, od kojih su tri bila s ispunom od šupljih glinenih blokova, tri s ispunom od porobetonskih blokova i tri s kombiniranim ispunom od glinenih i porobetonskih blokova. Uz toje, dodatno provedeno i ispitivanje čeličnoga okvira bez ispuna.

Funkcioniranje sustava okvira OG-iuobičajeno je za tu vrstu konstrukcija i usporedivo s rezultatima istraživanja drugih istraživača – karakteristična je povećana krutost i znatno veća nosivost u odnosu na čiste čelične okvire te „glatki“ oblik ovojnice histereze. Karakteristični način otkazivanja nosivosti ovoga sustava bio je dijagonalno raspucavanje te prekoračenje tlačne čvrstoće ziđa uz ispadanje ispuna od glinenih blokova.

Okviri sustava OY-i evidentnosu„mekši“, no u konačnici postižu nešto veću nosivost u odnosu na sustave s glinenim ispunom, unatoč ranijem raspucavanju ispun ipak ostaje kompaktan te na taj način čak ijače „aktivira“ čelični okvir,koji zbog toga više ulazi u plastično područje i troši svoje rezerve duktilnosti. Kod okvira OY-1 primijećeno je nešto drugačije ponašanje u samome početnom ciklusu, što se vjerojatno može objasniti većom početnom „utegnutošću“ samoga sustava u fazi početnih opterećenja, dok je kasnije ponašanje istovjetno s ponašanjem ostalih dvaju uzoraka te Pri tom je vrlo važno bilo popunjavanje prostora uz sami okvir, koje, zbog rezanja blokova na manje dimenzije, nije uvijek moglo biti jednako za sve uzorke. Kod sustava s Ytong ispunom uočenje kombinirani oblik gubitka nosivosti ispuna: uz dijagonalno raspucavanje (koje ipak intenzitetom nije bilo tako izraženo kao kod glinenih blokova) događalo se i izraženije klizanje po sljubnicama morta.
Primjetno je da su histereze za kombinirani sustav OGY-i oblikom nešto drugačije, a posebno se to odnosi na histereze za sustav OGY-1, i takvo je histerezno ponašanje nešto manje izraženo, ali ipak vidljivo kod sustava OGY-2, dok je histerezno ponašanje okvira OGY-3 donekle slično ponašanju okvira OY-i uz znatno manje granično opterećenje. Razlika u obliku histerezne petlje i graničnog opterećenja kod ovoga sustava uvjetovana je već ranije spomenutim različitim karakteristikama prošupljenih porobetonskih blokova koji su ugrađivani uz rubne dijelove okvira (za oslabljenja porobetonskih blokova korištenasu tri različita promjera rupa D = 53, 73 i 83 mm).

Sustav OGY-1, kod kojega su ugrađeni porobetonski elementi s rupom promjera D=53 mm,najbolje pokazuje oblik ponašanja koji se želio dobiti: u prvome dijelu rada sustava iskorištena je veća krutost i

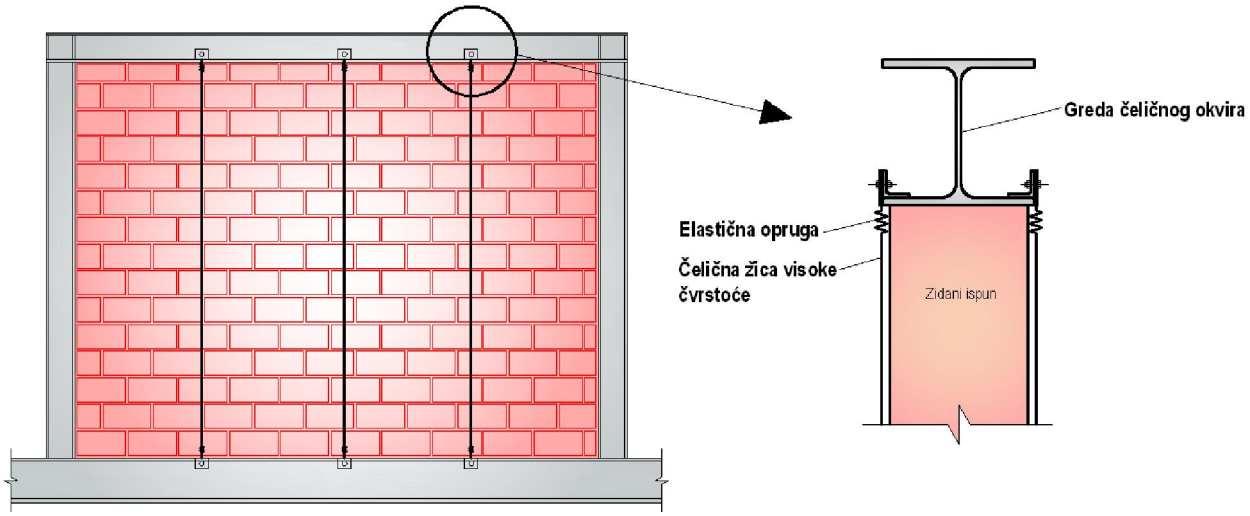
povećana nosivost sustava (u odnosu na čisti čelični okvir) za preuzimanje određene razine opterećenja (koje bi se za stvarne uvjete odredilo tako da odgovara uobičajenom ponašanju zgrade pri uporabnim opterećenjima i opterećenju vjetrom), da bi nakon dosezanja intenziteta vanjskoga opterećenja došlo do raspucavanjaoslabljenoga područja uz okvir, a na taj način i „oslobađanja“ čeličnoga okvira za daljnje preuzimanje opterećenja fleksijskim djelovanjem. Taj se efekt može dobro uočiti promatrajućipromjene sekantne krutosti sustava po sekvencijalnim ciklusima opterećivanja, iz čega je vidljivo kako su se nakon određenog povećanja opterećenja sekantne krutosti sustava OGY-i, koje su prvotno bile između sustava OG-i i OY-i, postupno približavale onima iz sustava OY-i, ali uz dvije bitne razlike - čelični okvir, još uvijek,se nalazio u elastičnom području, a i središnji dio zidanog ispuna ostao je potpuno sačuvan (što je također bila namjera).

Također, usporedba prosječnih maksimalnih sila i početnih krutosti dobro ukazuje na način funkcioniranja trećeg sustava OGY:

- OG-i: P_{lim}= 135 kN, K = 31,3 kN/mm,
- OY-i: P_{lim} =146 kN, K = 19,8 kN/mm,
- OGY-i: P_{lim} =98 kN, K = 22,2 kN/mm.

Potrebno je napomenuti kako je vrijednost početne krutosti modela OGY-i zapravo srednja vrijednost početne krutosti triju različitih sustava jer su promjeri rupa kojima se izvodilo oslabljenje porobetonskih elemenatarazličiti za sva tri uzorka iz serije OGY-i. Treba primijetitii da je kod okvira OGY-3 promjer rupe očito bio prevelik za konkretne uvjete opterećenja, te je prerano došlo do popuštanja prošupljenoga ispuna od porobetonskih blokova uz okvir stoga se sustav zapravo ponašao sličnije sustavima serije OY-i (ali s nešto većom krutošću u početku rada i manjom graničnom silom).

Dobiveni rezultati eksperimenata ukazuju kako postoji mogućnost primjene konstrukcijski prilično jednostavnoga zahvata, koji za cilj ima ograničenje štete nastale od potresa na način da se čelični okviri pri većim intenzitetima opterećenja oslobode u toj fazi, uglavnom nepovoljnog, djelovanja zidanog ispuna i nastave iskorištavati svoje duktilne rezerve, ali i samogaispuna, koji uslijed toga može ostati većim dijelom sačuvan. Naravno, tu valja voditi računa o pridržavanju srednjegadijela zidanog ispuna kako se ne bi prevrnuo izvan ravnine okvira, budući da se na određenom dijelu izgubila veza s okvirnom konstrukcijom. Ovu je pojavu moguće konstrukcijski prevenirati npr. ugradnjom vertikalnih zatega od tanjih žica veće nosivosti u trećinama ili četvrtinama raspona okvira, a koje bi se dovoljno elastično (npr. pomoću opruga dovoljnedeformabilnosti i krutosti koje bi omogućile nesmetan rad čeličnog okvira) pričvrstile za pojasnice čeličnih greda i kasnije ožbukale, što ne ometa značajnije radni proces jer se to radi nakon završetka zidanja ispuna (s obje strane zida). Prijedlog konstrukcijske mjere za preveniranje ispadanja kombiniranog zidanog ispuna izvan ravnine prikazan je slikom 4.90.



Slika 4.90 – Prijedlog sustava za pridržavanje kombiniranog zidanog ispuna od ispadanja izvan ravnine

5. NUMERIČKO MODELIRANJE OKVIRA SA ZIDANIM ISPUNOM

5.1. Uvod

Modeliranje utjecaja zidanog ispuna na okvirnu konstrukciju danas se uglavnom provodi metodom konačnih elemenata, i to na sljedeće načine:

- Izdvojeno modeliranje okvira - utjecaj zidanog ispuna na ponašanje okvira u potpunosti se zanemaruje te se okvir dimenzionira na prijem ukupnog (i horizontalnog) opterećenja bez obzira na postojanje ispune;
- Linearni model sa zamjenskim dijagonalama - ispun se modelira pomoću štapnih elemenata u vidu zamjenskih dijagonala koje spajaju nasuprotne vrhove okvira; geometrijske i mehaničke karakteristike dijagonala određuju se pojednostavljenim postupcima te se pretpostavlja neograničeno linearno ponašanje;
- Nelinearni model sa zamjenskim dijagonalama – razliku u odnosu na prethodno navedeni model čini pretpostavljeno ponašanje zamjenskih dijagonala kojima se modelira utjecaj zidanog ispuna, a koje je kod ovih modela nelinearno; nelinearnost se uvodi u vidu nelinearnih «opruga» kojima je moguće definirati različite karakteristike odnosa «sila-pomak»;
- Modeli ekvivalentnog okvira – modeli pogodni za analizu zidanih ispuna s otvorima u kojima se sustav idealizira jednodimenzionalnim štapnim elementima koji su na svojim krajevima apsolutno kruti, dok se srednji dio elemenata modelira kao nelinearan;
- Kontinuirani ravninski modeli - zidani ispun modelira se ravninskim elementima, ali je veza sa štapnim elementima okvira kontinuirana, tj. čvorovi okvira i zida imaju zajedničke pomake. Ovakvi modeli daju nerealne rezultate proračuna pa kao takvi nisu dopušteni za korištenje u praksi;
- Diskontinuirani ravninski modeli - zidani ispun modelira se ravninskim elementima, no u modelu postoje zasebni čvorovi za svaku od komponenata kompozitne konstrukcije (okvir i ispun) – uvode se posebni, tzv. *kontaktni elementi* koji mogu simulirati stvarnu situaciju u modelu – pri vlačnim naprezanjima kontakt se između elemenata razdvaja, dok se pri tlačnim naprezanjima mogu uzeti u obzir i eventualne penetracije između materijala koji su u kontaktu.

Neki od navedenih modela mogu biti vrlo blizu ili čak, na strani nesigurnosti. Problemi nastaju pri procjeni ponašanja kompozitnoga sustava pri velikim deformacijama.

U radu je modeliranje zidnog ispuna provedeno na više načina: korištenjem štapnih modela s jednom zamjenskom dijagonalom, štapnih modela s više zamjenskih dijagonala, štapnih elemenata za modeliranje stupova i greda čeličnog okvira i makromodelom zidanog ispuna, koji postoji u programskom paketu (*SeismoStruct*), te korištenjem metode konačnih elemenata s uporabom kontaktnih elemenata (diskontinuirani ravninski mikro model).

5.2. Modeliranje zidanog ispuna zamjenskim dijagonalama

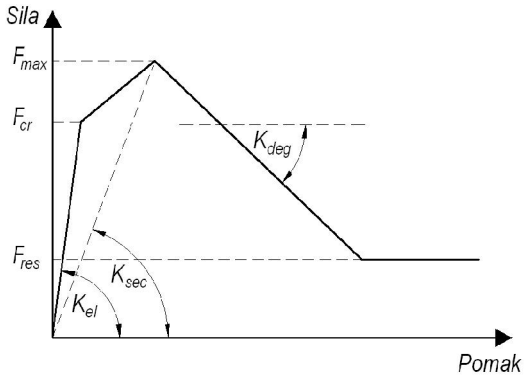
Trenutno važeće norme ne propisuju niti jednu metodu za analitičko modeliranje zidanoga ispuna u okvirnim konstrukcijama. Općenito govoreći, mikro-modeliranje pomoću metode konačnih elemenata zahtijeva snažna računala i puno vremena što ju čini nepraktičnom za globalnu analizu konstrukcija s ispunom, s druge strane, metode temeljene na ekvivalentnim zamjenskim dijagonalama omogućuju brzu i dovoljno preciznu procjenu početne krutosti i nosivosti okvira sa zidanim ispunom na bočne sile. Zidani ispun može se modelirati koristeći model s jednom ili više zamjenskih dijagonala, a očito je da se složenost i ogroman trud potreban za ove modele, proporcionalno povećava s brojem elemenata koji opisuju zidani ispun (zamjenskih dijagonala).

5.2.1. Modeliranje zidanog ispuna jednom dijagonalom

Kako je već ranije spomenuto, zidani ispun najjednostavnije je modelirati s jednom ili više zamjenskih dijagonala, pri čemu se linearnim proračunima može točno procijeniti početna krutost sustava, ali ne i njegova nosivost. Ponašanje zidanog ispuna u nelinearnim proračunima kod ovih modela može se opisati odgovarajućim anvelopama nosivosti ispuna, (tzv. *backbone* krivuljama) konstruiranima prema stvarnom histereznom ponašanju ispuna. Pri tome je najjednostavnija primjena bilinearnog dijagrama, ali mogu se koristiti i složeniji modeli koji uključuju realnije ponašanje ispuna te sadrže i degradirajuće dijelove dijagrama, slika 5.1, [46].

Nelinearne karakteristike pri modeliranju unose se pomoću bezdimenzijskih „nelinearnih zglobova“ čije je ponašanje moguće definirati proizvoljnom nelinearnom funkcijom, dok je u većini inženjerskih programa (npr. ROBOT, SAP2000 i sl.) također, moguće lokalno uključiti nelinearno ponašanje preko tzv. nelinearnih

zglobova (eng. *nonlinear hinges*) ili nelinearnih ležajeva. Takvim se pojednostavljenim nelinearnim modelima, uz najčešće prihvatljivo povećanje vremena trajanja proračuna, bitno povećava točnost procjene odziva, u odnosu na jednostavne linearne modele sa zamjenskom tlačnom dijagonalom, jer tlačno otkazivanje nosivosti nije jedini mogući oblik otkazivanja zidnoga ispuna.



Slika 5.1 – Anvelopa nosivosti zidnog ispuna prema [46]

Ovdje se ponašanje ispuna modelira nelinearno, odnosno ponašanje dijagonale definirano je anvelopom horizontalna sila - horizontalni pomak, kako je prikazano na slici 5.1.

Zamjenska dijagonala definira se stvarnom debljinom ispuna, u ovome slučaju to iznosi 120 mm, i širinom b_w koja je proračunata prema [33]:

$$b_w = 0{,}175(\lambda \cdot h_c)^{-0.4} \cdot r_w \tag{5.1}$$

$$\lambda = \left[\frac{E_{me} \cdot t_w \cdot \sin 2\theta}{4E_{fe} \cdot I_{col} \cdot h_w} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{5.2}$$

gdje je:
- h_c - visina stupa okvira,
- r_w - duljina zamjenske dijagonale,
- E_{me} - modul elastičnosti zidanog ispuna,
- t_w - debljina zidanog ispuna,
- θ - kut nagiba zamjenske dijagonale,
- E_{fe} - modul elastičnosti materijala okvira,
- I_{col} - moment inercije stupa okvira,
- h_w - visina zidanog ispuna,
- λ - parametar kojim se uzima u obzir odnos krutosti zidanog ispuna i čeličnog okvira.

Prvi, elastični dio anvelope ponašanja zidanog ispuna, odgovara linearnom elastičnom ponašanju ispuna do pojave prve pukotine pri čemu se krutost računa prema izrazu, [46, 53]:

$$K_{el} = \frac{G_w \cdot A_w}{h_w} \tag{5.3}$$

gdje je: G_w - elastični modul posmika zidanog ispuna,

A_w - površina poprečnog presjeka zidanog ispuna.

Sila F_{cr} predstavlja posmičnu nosivost zidanoga ispuna pri pojavi pukotina, te ju je moguće odrediti kao umnožak posmične čvrstoće τ_{cr} i površine poprečnog presjeka zidanog ispuna A_w:

$$F_{cr} = \tau_{cr} \cdot A_w \tag{5.4}$$

Druga „grana“ anvelope nosivosti proteže se od točke prve pukotine do maksimalne nosivosti zidanog ispuna F_{max}, te se, prema [46], može procijeniti na:

$$F_{\max} = 1{,}30 \cdot F_{cr} \tag{5.5}$$

Koeficijent 1,30 općenito ovisi o vrsti ispuna, a navedena vrijednost prema [46] odnosila se na zidani ispun od keramičkog bloka. Sekantna krutost koja je povezana s nosivošću zida, odnosno silo F_{cr}, može se odrediti iz izraza:

$$K_{\sec} = \frac{E_{me} \cdot b_w \cdot t_w}{r_w} \cdot \cos^2 \theta \tag{5.6}$$

Treća grana anvelope nosivosti opisuje opadanje krutosti zidanog ispuna nakon maksimalne dosegnute sile, proteže se od točke koja opisuje nosivost zida do rezidualne nosivosti zida nakon sloma, a definirana je umnoškom elastične krutosti zidanog panela do pojave prve pukotine i parametra α:

$$K_{\deg} = \alpha \cdot K_{el} \tag{5.7}$$

U radu [46] sugerira se da parametar α može biti u intervalu između 0,005 i 0,10, pri čemu veće vrijednosti parametra odgovaraju vrlo krtom slomu.

Zadnja, horizontalna grana anvelope nosivosti predstavlja, prema [33], preostalu vrijednost nosivosti zidanoga ispuna i može procijeniti kao:

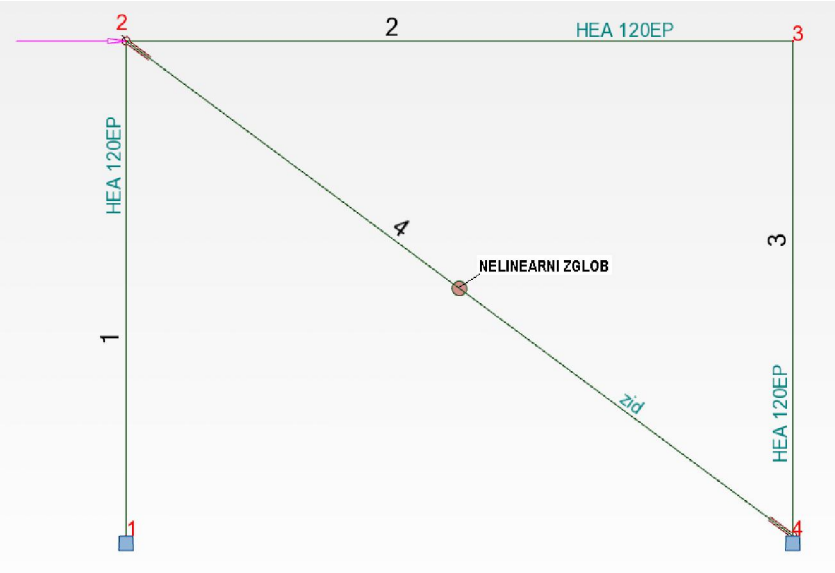
$$F_{res} = 0{,}30 \cdot F_{\max} \tag{5.8}$$

Bitno je napomenuti kako se gore napisani izrazi odnose na horizontalni smjer, te da ih je potrebno podijeliti s kosinusom kuta nagiba dijagonale ako se ponašanje zidanog ispuna pri modeliranju simulira dijagonalom (budući da je moguće koristiti i model s horizontalno postavljenom „oprugom“, odnosno nelinearnim zglobom).

Rezultati proračuna na modelima ispuna s jednom zamjenskom dijagonalom

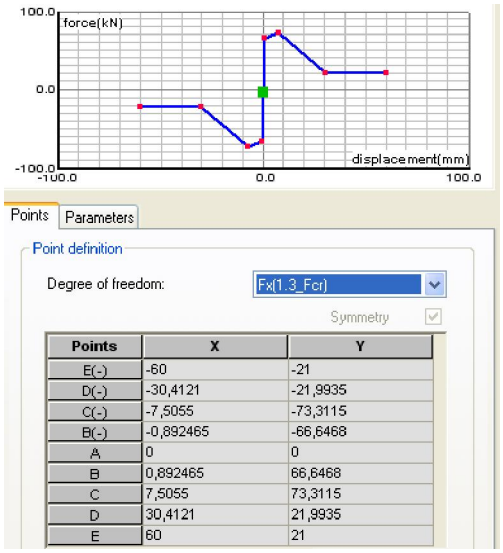
Pri modeliranju čeličnih okvira sa zidanim ispunom pomoću zamjenskih dijagonala korišten je programski paket *Autodesk Robot Structural Analysis*, [67].

Stupovi i grede okvira (čelični profili HEA 120) modelirani su štapnim elementima s uključenom materijalnom nelinearnošću. Čelični materijal modeliran je kao elastičan-idealno plastičan s granicom popuštanja f_y=337 N/mm^2 i modulom elastičnosti E_{fe}=210 000 N/mm^2, kako je utvrđeno eksperimentalnim ispitivanjem (vidi poglavlje 4.4) Proračun modela rađen je metodom postupnog guranja (eng. *pushover*) uz primjenu sile u gornjem lijevom kutu čeličnoga okvira (čvor 2 na slici 5.2) do sloma konstrukcije.



Slika 5.2 – Štapni model s jednom zamjenskom dijagonalom

Oslonci u modelima (slika 5.2, čvorovi 1 i 4), kao i veza stup-greda (čvorovi 2 i 3), modelirani su kao nepopustljivi. Zamjenska dijagonala (element broj 4 na slici 5.2), kojom se simulirao utjecaj zidanog ispuna na odgovor sustava, zglobno je povezana s elementima okvira, te su joj karakteristike anvelope nosivosti pripisane nelinearnom zglobu. Nelinearni zglob definiran je u formatu sila-pomak, a primjer načina zadavanja prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3 – Zadavanje nelinearnog zgloba - *Autodesk Robot Structural Analysis*

Cilj je u sljedeći poglavljima kalibrirati opisane modele u odnosu na dobivene eksperimentalne rezultate iz ispitivanja čeličnih okvira s glinenim, porobetonskim i kombiniranim ispunom.

5.2.1.1. Čelični okviri s ispunom od šupljih glinenih blokova

Pri proračunu anvelope nosivosti zamjenske dijagonale korišteni su eksperimentalni rezultati dobiveni na malim uzorcima ziđa.

Mehaničke karakteristike potrebne za proračun nosivosti, prema izrazima navedenim u točki 5.2. ovoga rada, su:

- modul elastičnosti zidanog ispuna E_{me} = 4600 N/mm^2 (točka 4.5.1.)
- posmična čvrstoća τ_{cr} = 0,227 N/mm^2 (točka 4.7.)
- modul elastičnosti čeličnog materijala E_{fe} = 210 000 N/mm^2 (točka 4.4.)

Posmična čvrstoća usvojena je kao najmanja vrijednost od triju vrijednosti iz dvaju provedenih eksperimenata koji su opisani u točkama 4.6. i 4.7. prethodnog poglavlja.

Modul posmika zidanog ispuna pretpostavljen je kao 40% vrijednosti od modula elastičnosti, [35, 41] pa prema tome njegova vrijednost iznosi:

$$G_w = 0{,}40 \cdot E_{me} = 0{,}40 \cdot 4600 = 1840 \text{ N/mm}^2$$

Geometrijske karakteristike sustava su:

- visina čeličnoga stupa okvira h_c = 1613 mm
- visina zidanoga ispuna h_w = 1556 mm
- moment tromosti presjeka čeličnog stupa I_{col} = 6 062 000 mm^4
- duljina zamjenske dijagonale r_w = 2583 mm
- debljina zidanoga ispuna t_w = 120 mm
- duljina zidanoga ispuna L_w = 2062 mm
- kut nagiba zamjenske dijagonale θ = 37,04°

Prema izrazima 5.1 i 5.2., širina tlačne dijagonale b_w iznosi:

$$\lambda = \left[\frac{E_{me} \cdot t_w \cdot \sin 2\theta}{4E_{fe} \cdot I_{col} \cdot h_w}\right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{4600 \cdot 120 \cdot \sin(2 \cdot 37{,}04)}{4 \cdot 210000 \cdot 6062000 \cdot 1556}\right]^{\frac{1}{4}} = 0{,}00286$$

$$b_w = 0{,}175(\lambda \cdot h_w)^{-0{,}4} \cdot r_w = 0{,}175(0{,}00286 \cdot 1556)^{-0{,}4} \cdot 2583 = 245{,}21 \text{ mm}$$

Površina poprečnog presjeka zidanog ispuna iznosi:

$$A_w = t_w \cdot L_w = 120 \cdot 2062 = 247440 \text{ mm}^2$$

Elastična krutost zidanog ispuna, do pojave prve pukotine, računa se prema izrazu 5.3:

$$K_{el} = \frac{G_w \cdot A_w}{h_w} = \frac{1840 \cdot 247440}{1556} = 292602 \text{ N/mm} = 292{,}60 \text{ kN/mm}$$

Sila pri pojavi prve pukotine i maksimalna sila koju može preuzeti zidani ispun, proračunate prema izrazima 5.4 i 5.5, iznose:

$$F_{cr} = \tau_{cr} \cdot A_w = 0{,}227 \cdot 247440 = 56172 \text{ N} = 56{,}17 \text{ kN}$$

$$F_{\max} = 1{,}30 \cdot 56{,}17 = 73{,}02 \text{ kN}$$

Sekantna krutost kojom je definiran pomak sustava pri maksimalnoj sili je:

$$K_{\sec} = \frac{E_{me} \cdot b_w \cdot t_w}{r_w} \cdot \cos^2 \theta = \frac{4600 \cdot 245{,}21 \cdot 120}{2583} \cdot \cos^2 37{,}04 = 33388 \text{ N/mm} = 33{,}39 \text{ kN/mm}$$

Za proračun degradirajuće krutosti ispuna nakon dosezanja maksimalne sile usvojena je vrijednost parametra α od 0,01, koji se pokazao kao najprihvatljiviji s obzirom na postavljeni cilj modeliranja, pa je:

$$K_{\deg} = -\alpha \cdot K_{el} = -0{,}01 \cdot 292{,}60 = -2{,}93 \text{ kN/mm}$$

Potrebno je naglasiti da su koeficijenti, kojima se određuju vrijednosti maksimalne sile koju zidani ispun može preuzeti (u ovom slučaju 1,30) i degradirajuće krutosti (α=0,01), ključni parametri na osnovu kojih se vrši kalibracija.

Preostala nosivost zidanog ispuna jednaka je:

$$F_{res} = 0{,}30 \cdot F_{\max} = 0{,}30 \cdot 73{,}02 = 21{,}91 \text{ kN}$$

Iz geometrije anvelope nosivosti, slika 5.1, odnosno poznatih vrijednosti karakterističnih sila i nagiba njenih pojedinih „grana“, uvjetovanih proračunatim krutostima, moguće je izračunati i odgovarajuće pomake:

$$u_{el} = \frac{F_{cr}}{K_{el}} = \frac{70{,}37}{292{,}60} = 0{,}192 \text{ mm}$$

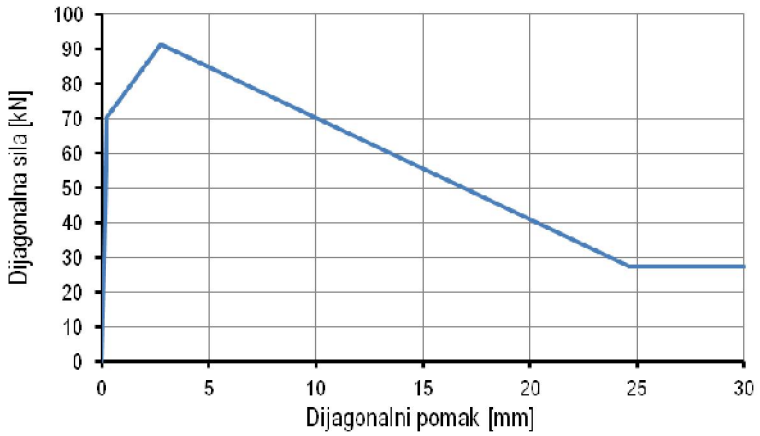
$$u_s = \frac{F_{\max}}{K_{\sec}} = \frac{73{,}02}{33{,}39} = 2{,}187 \text{ mm}$$

$$u_r = u_s + \frac{F_{res} - F_{\max}}{K_{\deg}} = 2{,}187 + \frac{21{,}91 - 73{,}02}{-2{,}93} = 19{,}657 \text{ mm}$$

Konačno, kako je već ranije navedeno, proračunate vrijednosti otpornosti i pripadnih im pomaka odnose se na horizontalni smjer zidanog ispuna pa se vrijednosti dijele s kosinusom kuta nagiba zamjenske dijagonale kako bi se dobile vrijednosti otpornosti i pripadnih pomaka u smjeru dijagonale. Vrijednosti sila i pripadnih pomaka u dijagonalnom smjeru iznose:

- sila i pripadni pomak pri pojavi prve pukotine $F_{cr} = 70{,}37$ kN $u_{cr} = 0{,}240$ mm
- maksimalna sila i pripadni pomak $F_{\max} = 91{,}48$ kN $u_m = 2{,}740$ mm
- rezidualna nosivost i pripadni pomak $F_{res} = 27{,}44$ kN $u_r = 24{,}625$ mm

Na slici 5.4 prikazana je anvelopa nosivosti zidanog ispuna u smjeru dijagonale, a u tablici 5.1 sumarno su dani svi njeni glavni parametri.



Slika 5.4 – Anvelopa nosivosti zidanog ispuna od šupljih glinenih blokova

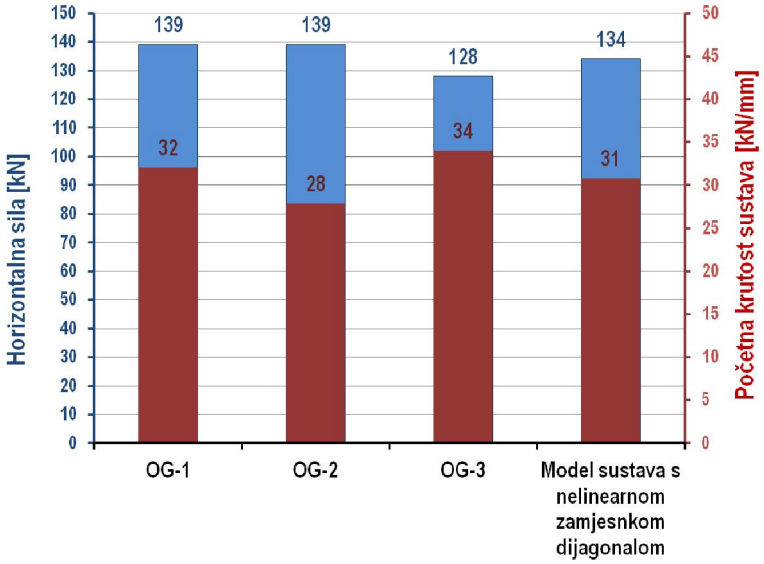
Tablica 5.1 – Parametri anvelope nosivosti za zidani ispun od glinenih blokova

λ [-]	b_w -	K_{el} [kN/mm]	K_{sec} [kN/mm]	K_{deg} [kN/mm]	F_{cr} [kN]	F_{max} [kN]	F_{res} [kN]	u_{cr} [mm]	u_m [mm]	u_r [mm]
0,00286	245,21	292,60	33,39	2,93	70,37	91,48	27,44	0,240	2,740	24,625

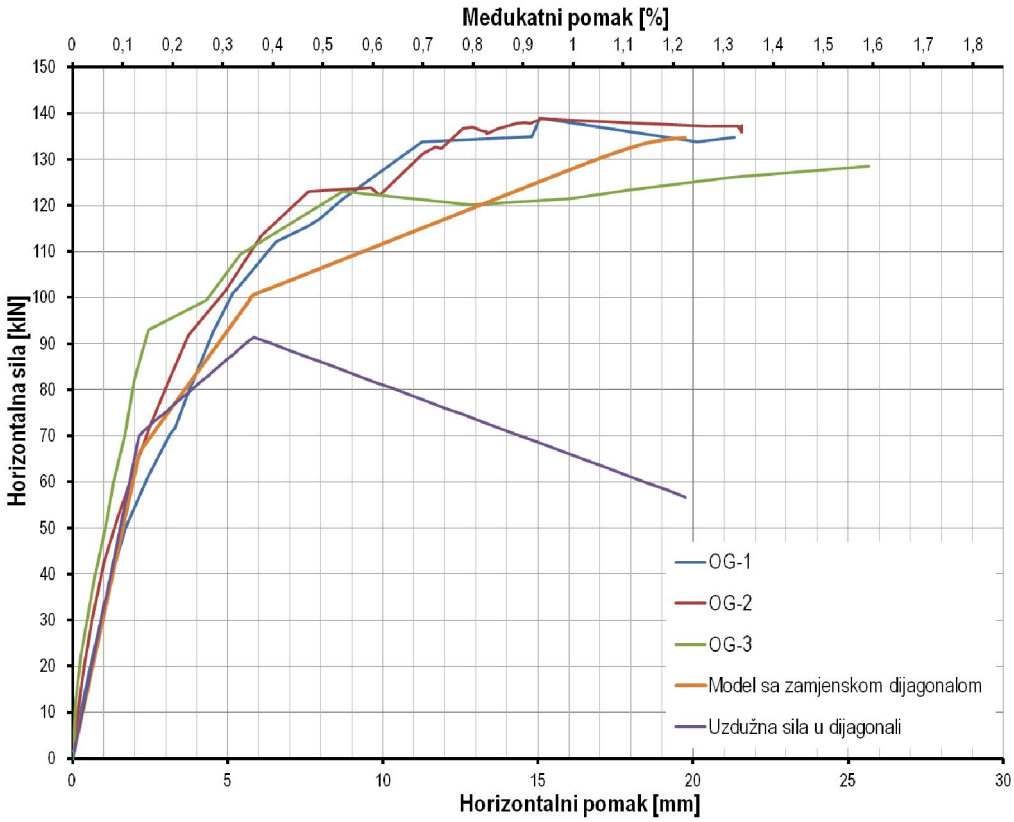
Dobivena anvelopa ponašanja zamjenske dijagonale u obliku nelinearnog zgloba, kako je prethodno objašnjeno, korištena je kako bi se definiralo ponašanje zidanog ispuna pri opterećenju. Dijagonala je modelirana sa svojom stvarnom debljinom od 120 mm, te proračunatom širinom od 245,21 mm (tablica

5.1), a posebno je definiram materijal za zid kojemu su pripisane mehaničke karakteristike zidanog ispuna, budući da npr. modul elastičnosti znatno utječe na odgovor sustava.

U nastavku su dani rezultati proračuna modela sa zamjenskom dijagonalom te usporedba s ispitivanim čeličnim okvirima s glinenim zidanim ispunom (OG-i).



Slika 5.5 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OG-i i modela sustava sa zamjenskom dijagonalom



Slika 5.6 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i model sa zamjenskom dijagonalom

Na slici 5.5 usporedno su prikazane eksperimentalno utvrđene te numerički dobivene nosivosti na horizontalne sile i početne krutosti, odnosno krutosti prije pojave pukotina, ispitivanih čeličnih okvira s ispunom od šupljih glinenih blokova i nosivost dobivena modeliranjem sustava u programskom paketu *Autodesk Robot Structural Analysis.*

Slika 5.6 prikazuje odgovor modela čeličnoga okvira sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova u obliku horizontalna sila – horizontalni pomak čvora 2 (slika 5.2), te vrijednost sile u zamjenskoj dijagonali. Na slici se može uočiti dobro poklapanje početne krutosti modela i ispitivanih uzoraka, kao i poklapanje granične nosivosti, dok se nešto veća odstupanja mogu primijetiti u području jače degradacije nosivosti tlačne zamjenske dijagonale.

Prosječna nosivost ispitivanih čeličnih okvira sa zidanim ispunom od glinenih blokova iznosi 135 kN, a nosivost dobivena proračunom na modelu s nelinearnom zamjenskom dijagonalom iznosi 134 kN (odstupanje 1 %). U pogledu početne krutosti sustava nema odstupanja u numeričkim i eksperimentalnim rezultatima - kod modela s dijagonalom, početna krutost je iznosila 31 kN/mm, a isto toliko iznosi i prosječna vrijednost krutosti dobivena ispitivanjem okvira serije OG-i.

5.2.1.2. Čelični okviri s ispunom od porobetonskih blokova

Kao i u slučaju ispuna od glinenih blokova, i za zidani ispun od porobetonskih blokova, za proračun parametara zamjenske dijagonale uzete su mehaničke karakteristike dobivene ispitivanjem tlačne čvrstoće zidnih prizmi od porobetonskih blokova, dijagonalnim vlačnim ispitivanjem i ispitivanjem čeličnoga materijala od kojega su napravljeni elementi okvira:

- modul elastičnosti zidanog ispuna E_{me} = 1200 N/mm^2 (točka 4.5.1.)
- posmična čvrstoća τ_{cr} = 0,240 N/mm^2 (točka 4.7.)
- modul elastičnosti čeličnoga materijala E_{fe} = 210 000 N/mm^2 (točka 4.4.)

Posmična čvrstoća usvojena je kao manja od dvije vrijednosti iz tablice 4.10.

Modul posmika zidanog ispuna od porobetonskih blokova iznosi:

$$G_w = 0{,}40 \cdot E_{me} = 0{,}40 \cdot 1200 = 480\ \text{N/mm}^2$$

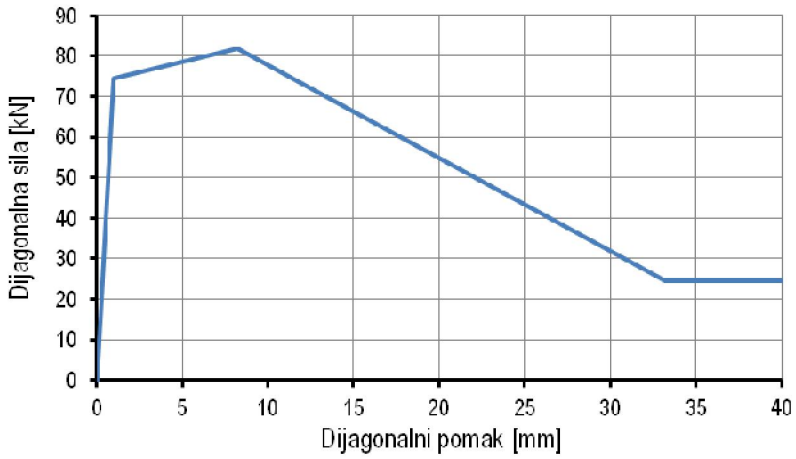
Geometrijske karakteristike čeličnog okvira i zidanog ispuna istovjetne su onima iz prethodne točke ovoga poglavlja, kao i način proračuna parametara anvelope nosivosti, te će ovdje biti prikazane samo konačne vrijednosti krutosti zidanog ispuna, proračunatih sila i pripadnih pomaka, kao i širine zamjenske dijagonale.

Kroz kalibraciju numeričkog modela određena su dva ključna parametra koji utječu na ponašanje sustava, pa tako koeficijent kojim je definirana vrijednost maksimalne sile koju porobetonski zidani ispun može preuzeti iznosi 1,10 (F_{max}=1,10F_{cr}), a koeficijent degradirajuće krutosti α=0,03.

Vrijednosti sila, pomaka i krutosti anvelope nosivosti porobetonskog ispuna, proračunate uz gore navedene parametre, dane su u tablici 5.2, a na slici 5.7 prikazan je njen izgled.

Tablica 5.2 – Parametri anvelope nosivosti za zidani ispun od glinenih blokova

λ [-]	b_w -	K_{el} [kN/mm]	K_{sec} [kN/mm]	K_{deg} [kN/mm]	F_{cr} [kN]	F_{max} [kN]	F_{res} [kN]	u_{cr} [mm]	u_m [mm]	u_r [mm]
0,00204	280,48	76,33	9,96	2,29	74,40	81,84	24,55	0,975	8,215	33,231

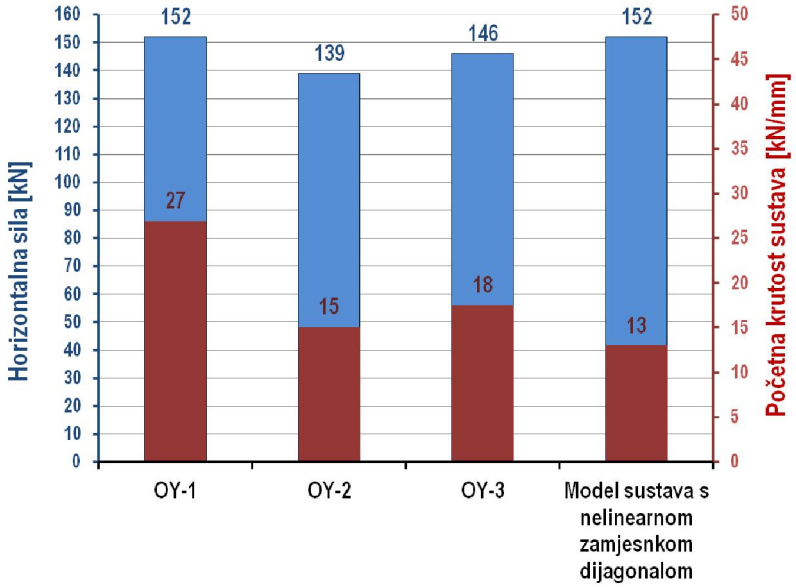


Slika 5.7 – Anvelopa nosivosti zidanog ispuna od porobetonskih blokova

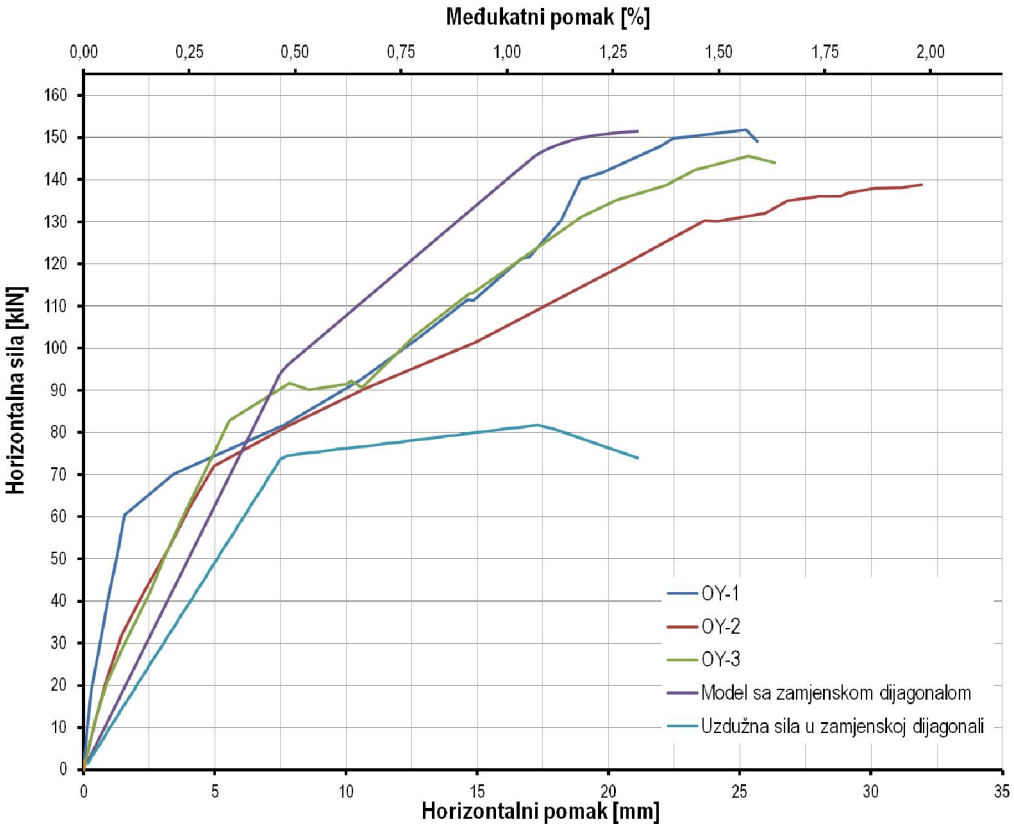
Na slici 5.8 prikazani su odnosi nosivosti i krutosti modela sa zamjenskom dijagonalom i rezultata provedenih ispitivanja okvira serije OY-i, a na slici 5.9 usporedno su dani dijagrami sila - pomak numeričkoga modela i ispitivanih okvira.

Prosječna nosivost ispitivanih okvira iznosila je 146 kN uz prosječnu početnu krutost od 20 kN/mm. Kako se može vidjeti na slici 5.8, maksimalna horizontalna sila koju je mogao preuzeti numerički model iznosi 152 kN, dok je vrijednost početne krutosti iznosila 13 kN/mm,stoga se može zaključiti da model precjenjuje nosivost sustava za 4 %, a podcjenjuje početnu krutost za čak 34 % u odnosu na prosječne vrijednosti dobivene ispitivanjem stvarnih uzoraka. Razliku u početnim krutostima ipak treba uzeti relativno s obzirom na ranije komentiranu činjenicu kako je ispitni uzorak OY-1 imao veliku početnu utegnutost, što je rezultiralo značajnijim porastom početne krutosti u odnosu na uzorke OY-2 i OY-3, a s kojima se numerički

rezultati ipak bolje podudaraju (razlika numeričkoga modela u odnosu na eksperimentalne rezultate modela OY-2 i OY-3 iznosi 21 %).



Slika 5.8 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela sustava sa zamjenskom dijagonalom



Slika 5.9 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OY-i i model sa zamjenskom dijagonalom

5.2.1.3. Čelični okviri s kombiniranim ispunom

Modeliranje sustava čeličnog okvira s kombiniranim ispunom od glinenih i porobetonskih blokova razlikuje se u odnosu na opisani postupak, a koji je primijenjen na modeliranje serija okvira OG-i i OY-i.
Kod ovoga modela za proračun širine zamjenske dijagonale korišten je modul elastičnosti glinenog zidanog ispuna jer je to bio dominantan dio zidanog ispuna, te je i duljina zidanog ispuna L_w uzeta samo za glineni dio zida.
Također i kod anvelope nosivosti nije korišten trilinearni dijagram s rezidualnom nosivošću, kako je to bio slučaj kod glinenog i porobetonskog ispuna, nego bilinearni s rezidualnom nosivošću jer je iz ispitivanja bilo evidentno kako se pukotine šire okomito kroz dio zida izrađen od porobetonskih prošupljenih blokova, te je i maksimalna nosivost zidanog ispuna proračunata iz vertikalne tlačne čvrstoće prošupljenih porobetonskih blokova (tablica 4.2). Uz tako proračunatu maksimalnu silu korišten je izraz 5.6 za sekantnu krutost zidanog ispuna kako bi se odredio pripadajući pomak. Rezidualna nosivost zidanog ispuna pretpostavljena je kao 10% od maksimalne nosivosti zidanog ispuna, dok je parametar α iznosio 0,03.

Širina zamjenske tlačne dijagonale, proračunata prema gore opisanome principu, korištenjem modula elastičnosti od E_{me} =4600 N/mm^2, uz duljinu ispuna L_w=1682 mm, te s istim vrijednostima modula elastičnosti čeličnoga materijala, visinom ispuna i momentom inercije poprečnog presjeka kao i u slučaju glinenih i porobetonskih blokova, iznosi:

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me}\cdot t_w \cdot \sin 2\theta}{4E_{fe}\cdot I_{col}\cdot h_w}\right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{4600\cdot 120\cdot \sin(2\cdot 42{,}77)}{4\cdot 210000\cdot 6062000\cdot 1556}\right]^{\frac{1}{4}} = 0{,}00289$$

$$b_w = 0{,}175(\lambda_1 \cdot h_w)^{-0{,}4}\cdot r_w = 0{,}175(0{,}00289\cdot 1556)^{-0{,}4}\cdot 2291 = 216{,}72 \text{ mm}$$

Prosječna tlačna čvrstoća prošupljenih porobetonskih blokova iznosila je 1,92 N/mm^2, a maksimalna nosivost zidanog ispuna proračunata je tako da se ova vrijednost množila s površinom poprečnog presjeka tlačne dijagonale i dijelila s kosinusom kuta zamjenske dijagonale.
Površina poprečnog presjeka tlačne dijagonale, te maksimalna tlačna sile koju dijagonala može preuzeti iznose:

$$A_d = t_w \cdot b_w = 120\cdot 216{,}72 = 26006{,}4 \text{ mm}^2$$

$$F_{\max} = \frac{26006{,}4\cdot 1{,}92}{\cos 42{,}77} = 68{,}02 \text{ kN}$$

Sekantna krutost pri maksimalnoj sili je:

$$K_{\sec} = \frac{E_{me}\cdot b_w \cdot t_w}{r_w}\cdot \cos^2\theta = \frac{4600\cdot 216{,}72\cdot 120}{2583}\cdot \cos^2 42{,}77 = 28133 \text{ N/mm} = 28{,}13 \text{ kN/mm}$$

Pomak pri maksimalnoj sili je:

$$u_m = \frac{\frac{F_{\max}}{K_{\sec}}}{\cos\theta} = \frac{\frac{68,20}{28,13}}{\cos 42,77°} = 2,418 \text{ mm}$$

Rezidualna nosivost zidanog ispuna i pripadajući pomak iznose:

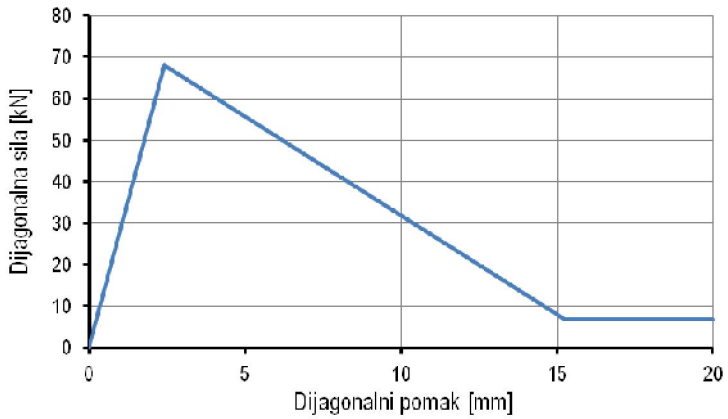
$$F_{res} = \frac{0,10 \cdot F_{\max}}{\cos\theta} \frac{0,10 \cdot 68,02}{\cos 42,77°} = 6,80 \text{ kN}$$

$$u_r = \frac{u_s + \frac{F_{res} - F_{\max}}{K_{\deg}}}{\cos\theta} = \frac{1,775 + \frac{6,80 - 68,02}{-4,77}}{\cos 42,77°} = 15,24 \text{ mm}$$

U tablici 5.3 dane su vrijednosti parametara anvelope nosivosti, a njen izgled prikazan je na slici 5.10.

Tablica 5.3 – Parametri anvelope nosivosti za zidani ispun od glinenih blokova

λ_1 [-]	b_w -	K_{sec} [kN/mm]	K_{deg} [kN/mm]	F_{max} [kN]	F_{res} [kN]	u_m [mm]	u_r [mm]
0,00289	216,72	28,13	4,77	68,02	6,80	2,418	15,242

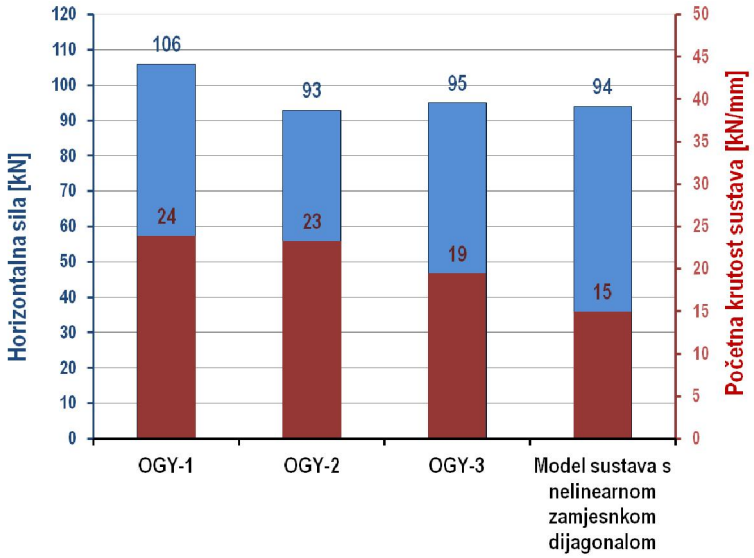


Slika 5.10 – Anvelopa nosivosti kombiniranog zidanog ispuna

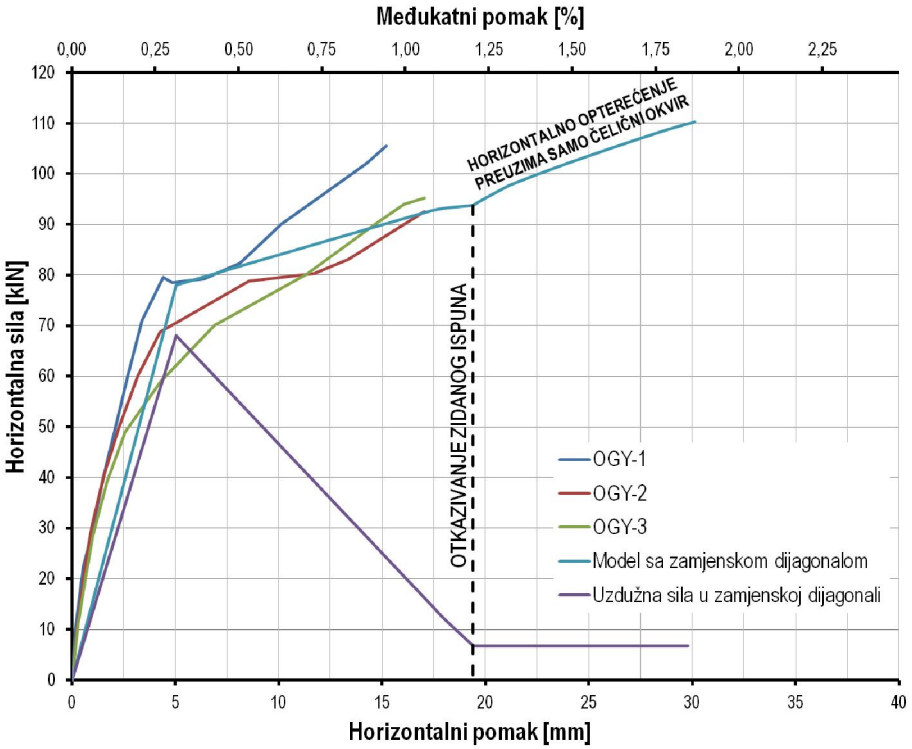
Rezultati proračuna pokazuju kako je nosivost numeričkog modela od 94 kN nešto manja (4 %) od prosječne vrijednosti nosivosti okvira s kombiniranim ispunom dobivenih ispitivanjem koja iznosi 98 kN, dok su odstupanja u krutosti nešto veća i iznose 32 %, slika 5.11. Ovdje, također, usporedbu početnih krutosti treba shvatiti relativno, budući da su modeli OGY-i različiti sustavi jer imaju različite veličine oslabljenja porobetonskih elemenata, a kako je pri proračunima korištena srednja vrijednost tlačne čvrstoće prošupljenih blokova - za usporedbu bi najpogodniji bio model OGY-2. Prema dijagramu na slici 5.12 može se dobro uočiti zajedničko djelovanje okvira i zidanog ispuna do sile od 94 kN, te nakon otkazivanja

nosivosti ispuna ponovni porast horizontalne sile koju je preuzeo samo čelični okvir, što je i bila svrha ovoga koncepcijskoga rješenja.

Kalibracijom numeričkoga modela pokušala se dobiti nosivost na horizontalne sile koja odgovara prosječnoj vrijednosti nosivosti iz eksperimentalnog ispitivanja modela OGY-i, no ovdje ilustrirani postupak ne bi bilo teško primijeniti i za pojedinačne modele.



Slika 5.11 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela sustava sa zamjenskom dijagonalom

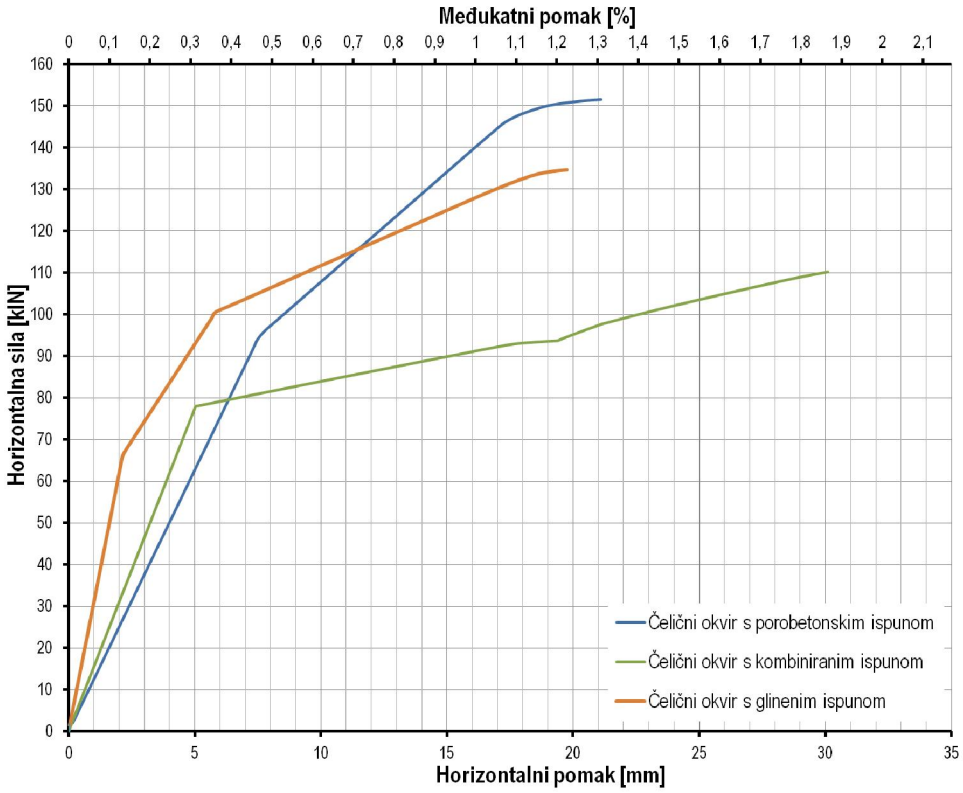


Slika 5.12 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OGY-i i model sa zamjenskom dijagonalom

5.2.1.4. Zaključno o modelima s jednom zamjenskom dijagonalom

Na slici 5.13 prikazani su rezultati proračuna svih modeliranih numeričkih modela čeličnih okvira s glinenim, porobetonskim i kombiniranim ispunom. Sukladno eksperimentalnim rezultatima, na slici se može uočiti da najveću nosivost na horizontalnu silu ima model s porobetonskim ispunom (152 kN), model s glinenim ispunom ima otpornost na horizontalne sile 12 % manju u odnosu na model s porobetonskim ispunom (134 kN), dok je otpornost na horizontalne sile modela s kombiniranim zidanim ispunom manja za 39 % u odnosu na model s porobetonskim ispunom, odnosno 30 % manja s obzirom na model s glinenim ispunom. Što se tiče početne krutosti, najveća je zabilježena kod sustava s glinenim ispunom (31 kN/mm), a najmanja kod modela okvira s porobetonskim ispunom (13 kN/mm). Numerički model okvira s kombiniranim ispunom ima početnu krutost od 15 kN/mm.

Usporedbom oblika anvelope nosivosti promatranih sustava može se primijetiti da model s kombiniranim sustavom ima izrazito bilinearno ponašanje uz jasno uočljiv slom zidanog ispuna i aktiviranje samoga čeličnoga okvira u prijenosu opterećenja. Primjetno je kako je sustav s kombiniranim ispunom duktilniji u odnosu na sustave s glinenim i porobetonskim zidnim ispunom.

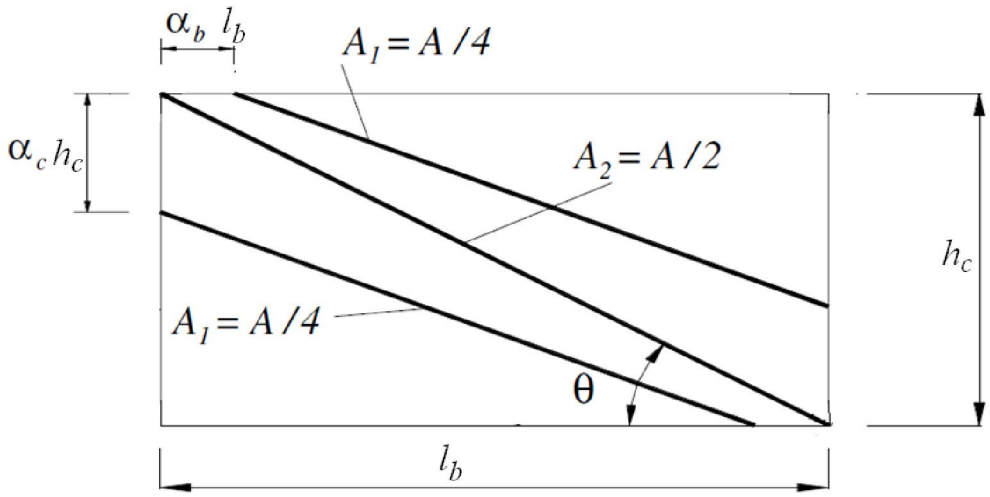


Slika 5.13 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak numeričkih modela s jednom zamjenskom dijagonalom

5.2.2. Modeliranje zidanog ispuna s tri dijagonale

Postoji više različitih makro-modela kojima je moguće predvidjeti nelinearno ponašanje okvira sa zidanim ispunom, od kojih je jedan pokazan u prethodnome poglavlju ovoga rada. Još jedan od jednostavnijih pa stoga i popularnijih modela predložio je *El-Dakhakhni* [28], čiji se model sastoji od okvirne konstrukcije i triju zamjenskih dijagonala kojima se simulira doprinos zidanog ispuna u pogledu krutosti i nosivosti sustava, ali i bolje opisuje ponašanje. Ovo je poglavito moguće jer više dijagonala omogućuje uzimanje u obzir određenih učinaka koje nije moguće uključiti u model s jednom dijagonalom, primjerice efekt kratkoga stupa, a što je postalo jasno iz dosadašnjih istraživanja – model s jednom dijagonalom nije dovoljan za obuhvaćanje svih utjecaja.

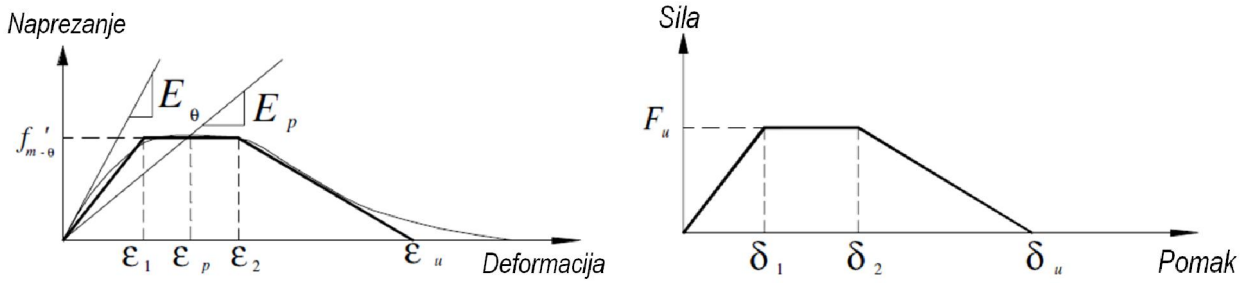
Model s jednom dijagonalom relativno dobro predviđa globalno ponašanje sustava (početnu krutost i nosivost), ali s druge strane model s tri dijagonale, uz to, puno točnije procjenjuje prijenos sila u okvirne elemente i bolje opisuje lokalno otkazivanje nosivosti u elementima okvira uz tlačno otkazivanje dijagonala. Nakon razvoja tlačne dijagonale u zidanom ispunu uslijed bočnih sila, formira se određeno područje ispuna koje je fizički u kontaktu s gredama i stupovima okvira (sudjelujuća širina). Ovo kontaktno područje, koje se može učinkovito modelirati koristeći model s tri dijagonale, odgovorno je za raspodjelu velike krutosti zidanog ispuna na veće područje greda i stupova; time je spriječen brzi slom zidanog ispuna pri povećanju bočnih sila. Osim toga, o spomenutom kontaktnom području ovisi i lokalni posmični slom greda i stupova, što model s tri dijagonale može obuhvatiti na znatno primjereniji način u odnosu na model sa samo jednom zamjenskom dijagonalom. Iz svega ovoga moguće je zaključiti kako je model s tri dijagonale podobniji od modela s jednom dijagonalom jer uključuje više bitnih parametara ove konstrukcije.



Slika 5.14 – Model s tri zamjenske dijagonale

Na slici 5.14 prikazani su položaji i pripadne površine poprečnih presjeka zamjenskih dijagonala. Nakon proračuna ukupne površine poprečnih presjeka svih dijagonala *A*, izraz (5.9), srednjoj dijagonali (koja spaja nasuprotne kutove okvirne konstrukcije), pripisuje se pola ukupne površine ($A_2=A/2$), dok na preostale dvije dijagonale otpada po četvrtina ukupne površine ($A_1=A/4$).

Anvelopa nosivosti dijagonala prikazana je na slici 5.15.



a) b)

Slika 5.15 – Pojednostavljeni tri-linearni dijagram (a) naprezanje – deformacija za zidani ispun (b) sila – pomak za ekvivalentne dijagonale

Ukupna površina poprečnog presjeka zamjenske dijagonale, računa se prema izrazu, [28]:

$$A = \frac{(1-\alpha_c)\cdot\alpha_c\cdot h_c\cdot t_w}{\cos\theta} \tag{5.9}$$

gdje je: h_c - visina stupa okvira,

t_w - debljina zidanog ispuna,

α_c - omjer kontaktne duljine i visine stupa,

θ - kut nagiba srednje zamjenske dijagonale.

U radu [22] pokazano je da se u elementima čeličnih okvira, s betonskim ili zidanim ispunom, područja u kojima se javljaju najveći momenti savijanja razvijaju na krajevima kontaktnih područja stupova i greda, te se njihova udaljenost od spojeva stup-greda može odrediti prema izrazima:

$$\alpha_c\cdot h_c = \sqrt{\frac{2\left(M_{pj}+\beta_c M_{pc}\right)}{\sigma_c\cdot t_w}} \le 0{,}4h_c \tag{5.10}$$

$$\alpha_b\cdot l_b = \sqrt{\frac{2\left(M_{pj}+\beta_b M_{pb}\right)}{\sigma_b\cdot t_w}} \le 0{,}4l_b \tag{5.11}$$

gdje je: M_{pj} - minimalna plastična nosivost na savijanje stupa, grede ili priključka,

M_{pc} i M_{pb} - plastična nosivost na savijanje stupa odnosno grede čeličnog okvira,

σ_c i σ_b - normalno naprezanje na kontaktu između zidanog ispuna i stupa, odnosno grede,

β_c i β_b - omjer najvećeg dosegnutog elastičnog momenta u stupu u odnosu na M_{pc}, odnosno omjer najvećeg dosegnutog elastičnog momenta u gredi u odnosu na M_{pb}

α_b - omjer kontaktne duljine i visine grede,

l_b - duljina grede.

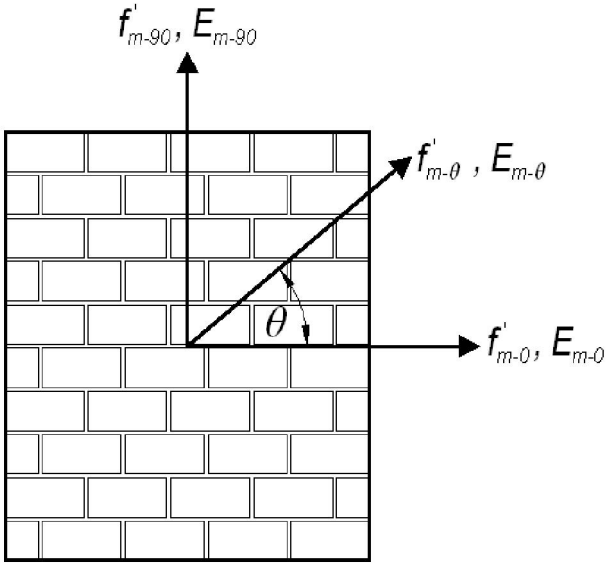
Važno je napomenuti kako duljina kontaktnoga područja nije uvijek ista, te da se mijenja s vanjskim opterećenjem okvira.

U radu [22] je predloženo da se vrijednosti parametara σ_c, β_c, σ_b i β_b uzmu sa svojim maksimalnim vrijednostima, koje vrijede u trenutku otkazivanja nosivosti zidanog ispuna i imaju oznake σ_{c0}, β_{c0}, σ_{b0} i β_{b0}. Na temelju analize, metodom konačnih elemenata, dokazano je da se vrijednosti parametara β_{c0} i β_{b0} mogu uzeti u iznosu od 0,2, a za vrijednost σ_c preporuča se uzeti vrijednost tlačne čvrstoće zidanog ispuna u horizontalnom smjeru f'_{m-0}, odnosno za σ_b tlačnu čvrstoću panela u vertikalnom smjeru f'_{m-90}, slika 5.16.

Uvođenjem ovih pojednostavljenja u izraze (5.10) i (5.11) dobiva se

$$\alpha_c \cdot h_c = \sqrt{\frac{2\left(M_{pj} + 0{,}2M_{pc}\right)}{f'_{m-0} \cdot t_w}} \leq 0{,}4h_c \tag{5.12}$$

$$\alpha_b \cdot l_b = \sqrt{\frac{2\left(M_{pj} + 0{,}2M_{pb}\right)}{f'_{m-90} \cdot t_w}} \leq 0{,}4l_b \tag{5.13}$$



Slika 5.16 – Ortotropni model zidanog ispuna

Zbog anizotropije zidanog ispuna preporuča se modul elastičnosti izračunati u dijagonalnome smjeru, slika 5.16, prema izrazu:

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{\cos^4\theta}{E_0} + \frac{\sin^4\theta}{E_{90}} + \frac{\cos^2\theta \cdot \sin^2\theta}{\left(B^{2B}\right)0{,}2 \cdot \sqrt{E_0 \cdot E_{90}}} \tag{5.14}$$

pri čemu je:

$$B = \frac{E_{90}}{E_0} \tag{5.15}$$

Budući da se ne mijenja samo modul elastičnosti, potrebno je proračunati i tlačnu čvrstoću u dijagonalnom smjeru prema izrazima:

$$f'_{m-\theta} = \frac{E_\theta}{\alpha} \tag{5.16}$$

gdje je:

$$\alpha = \frac{E_{90}}{f'_{m-90}} \tag{5.17}$$

U [22] preporučuje se vrijednost sekantnog modula elastičnosti E_p, slika 5.15 a), uzeti kao 50 % vrijednosti početnog modula elastičnosti:

$$E_p = 0{,}5 \cdot E_\theta \tag{5.18}$$

Ako su nam poznate vrijednosti sekantnog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće zidanog ispuna u dijagonalnom smjeru, tada nije problem odrediti pripadnu deformaciju ε_p.

Umjesto korištenja paraboličnog odnosa naprezanje-deformacija za zidani ispun može se uvesti pojednostavljenje u obliku trilinearnog dijagrama (debela linija na slici 5.15 a)), što je jednostavnije i pogodnije za praktične proračune.

Ako nema preciznijih podataka za ostale deformacije na dijagramu u [28] predlaže se koristiti sljedeće vrijednosti:

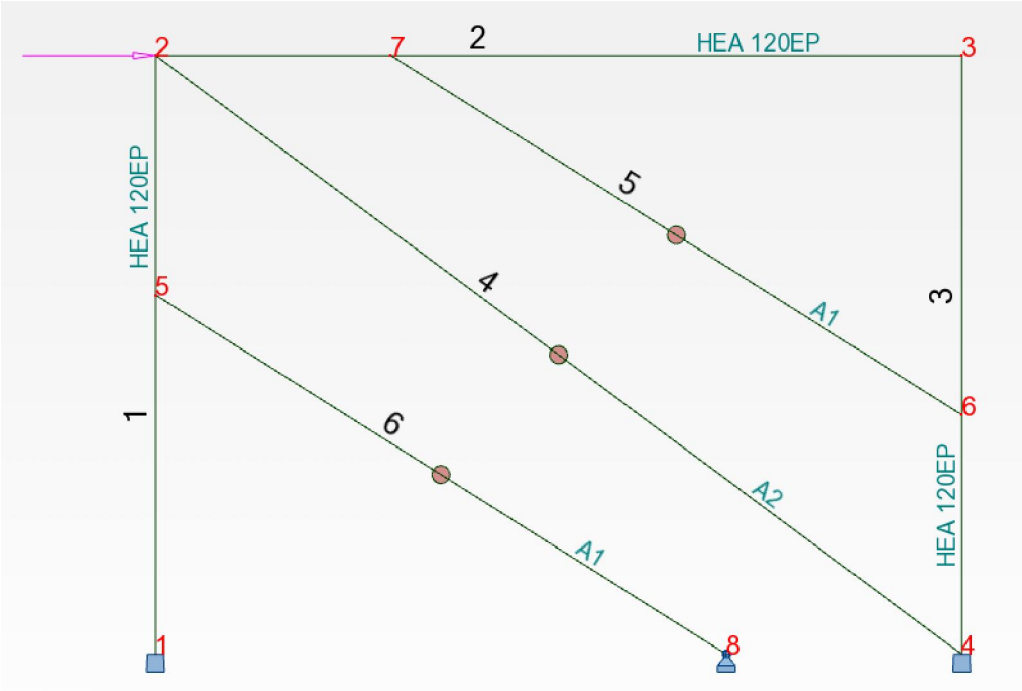
$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_p - 0{,}001 \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_p + 0{,}001 \\ \varepsilon_u &= 0{,}01 \end{aligned} \tag{5.19}$$

Ako su nam poznate vrijednosti naprezanja i deformacija, anvelopu ponašanja zidanog ispuna u formatu sila-pomak, slika 5.15 b), moguće je dobiti tako da se tlačna čvrstoća u dijagonalnome smjeru izmnoži s površinom pojedine dijagonale, a deformacije se izmnože s duljinom svake dijagonale, zanemarujući male razlike u nagibima srednje i vanjskih zamjenskih dijagonala.

Rezultati proračuna na modelima ispuna s jednom zamjenskom dijagonalom

Kao i slučaju modela s jednom zamjenskom dijagonalom i kod modela s tri zamjenske dijagonale korišten je programski paket *Autodesk Robot Structural Analysis*, [67].

Stupovi i grede okvira, te kvaliteta čeličnoga materijala kao i njegovo elasto-plastično ponašanje, modelirani su na isti način kao i kod modela s jednom dijagonalom, a primijenjen je i isti način nanošenja opterećenja. Na slici 5.17 prikazan je izgled modela s oznakama korištenih čeličnih profila, brojevima čvorova i štapnih elemenata, te položajima nelinearnih zglobova.



Slika 5.17 – Štapni model s tri zamjenske dijagonale

Budući da se radi o modelu prve etaže konstrukcije te se zamjenska dijagonala označena brojem 6 na slici 5.17 ne oslanja na gredu niže etaže, na njenom desnom kraju postavljen je nepomični zglobni ležaj, a sve ostale dijagonale na svojim su krajevima zglobno povezane s okvirnom konstrukcijom.

Nelinearni zglobovi i ovdje su definirani u formatu sila-pomak, te se nalaze u sredini raspona svih dijagonala.

5.2.2.1. Čelični okviri s ispunom od šupljih glinenih blokova

Kako je opisano u prethodnoj točki, za definiranje ukupne površine poprečnog presjeka zamjenske dijagonale potrebno je odrediti kontaktne duljine na gredi i stupovima okvira koja ovisi o njihovoj plastičnoj

otpornosti na savijanje te mehaničkim karakteristikama zidanog ispuna, tj. njegovoj tlačnoj čvrstoći u horizontalnom i vertikalnom smjeru.

Plastična nosivost stupa i grede proračunata je prema eksperimentalno utvrđenoj granici popuštanja čeličnog materijala od kojeg je okvir bio izrađen (točka 4.4) i korištenjem geometrijskih karakteristika čeličnog profila HEA 120:

$$M_{y,pl,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 119500 \cdot 337 = 40271500 \ Nmm$$

Ova vrijednost usvojena je i za otpornost na savijanje priključka stup-greda čeličnoga okvira M_{pj}, jer je ovaj priključak izveden kao nepopustljiv. Ovo je konzervativna procjena, budući da se može pretpostaviti i veća nosivost priključka na savijanje.

Tlačna čvrstoća zidanog ispuna u vertikalnom smjeru f'_{m-90} uzeta je iz ispitivanja, točka 4.5.1, i iznosi 2,0 N/mm^2, dok je tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru f'_{m-0} pretpostavljena kao 50% od vertikalne čvrstoće. Geometrijske karakteristike čeličnog okvira, kao i zidanog ispuna, jednake su onima iz točke 5.2.1.1.

Omjeri kontaktne duljine između stupa i zidanog panela i visine stupa, te kontaktne duljine na gredi i duljine grede redom iznose:

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{\frac{2\left(M_{pj} + 0{,}2M_{pc}\right)}{f'_{m-0} \cdot t_w}}}{h_c} = \frac{\sqrt{\frac{2\left(40271500 + 0{,}2 \cdot 40271500\right)}{1{,}0 \cdot 120}}}{1613} = 0{,}556 > 0{,}4 \rightarrow \alpha_c = 0{,}4$$

$$\alpha_b = \frac{\sqrt{\frac{2\left(M_{pj} + 0{,}2M_{pb}\right)}{f'_{m-90} \cdot t_w}}}{l_b} = \frac{\sqrt{\frac{2\left(40271500 + 0{,}2 \cdot 40271500\right)}{2{,}0 \cdot 120}}}{2176} = 0{,}292 < 0{,}4 \rightarrow \alpha_b = 0{,}292$$

Ako se pomoću koeficijenata α_c i α_b proračunaju kontaktne duljine, onda one iznose redom za stup i gredu:

$$\alpha_c \cdot h_c = 0{,}40 \cdot 1613 = 645{,}20 \text{ mm}$$

$$\alpha_b \cdot l_b = 0{,}292 \cdot 2176 = 636{,}19 \text{ mm}$$

Ukupna površina poprečnog presjeka zamjenskih dijagonala, prema izrazu (5.9), iznosi:

$$A = \frac{\left(1 - \alpha_c\right) \cdot \alpha_c \cdot h_c \cdot t_w}{\cos\theta} = \frac{\left(1 - 0{,}4\right) \cdot 0{,}4 \cdot 1613 \cdot 120}{\cos 37{,}04°} = 58197 \text{ mm}^2$$

Kako je rečeno ranije, ukupna površina dijagonale dijeli se na tri dijagonale od kojih na srednju dijagonalu A_2 otpada polovina ukupne površine, a na vanjske dijagonale A_1 po četvrtina od ukupne površine poprečnog presjeka zamjenske dijagonale:

$$A_1 = \frac{A}{4} = \frac{58197}{4} = 14549 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = \frac{A}{2} = \frac{58197}{2} = 29099 \text{ mm}^2$$

Modul elastičnosti u dijagonalnom smjeru, proračunat prema izrazima (5.14) i (5.15), uz korištenje eksperimentalno dobivenog modula elastičnosti u vertikalnom smjeru od E_{90}=4600 N/mm^2, te modulom elastičnosti u horizontalnom smjeru pretpostavljenom kao 50% vrijednosti modula u vertikalnom smjeru E_0=2300 N/mm^2, iznosi:

$$B = \frac{E_{90}}{E_0} = \frac{4600}{2300} = 2{,}0$$

$$E_\theta = \frac{1}{\frac{\cos^4 37{,}04}{2300} + \frac{\sin^4 37{,}04}{4600} + \frac{\cos^2 37{,}04 \cdot \sin^2 37{,}04}{\left(2^{2\cdot 2}\right) 0{,}2 \cdot \sqrt{2300 \cdot 4600}}} = 4399 \ \text{N/mm}^2$$

Tlačna čvrstoća u dijagonalnom smjeru iznosi:

$$\alpha = \frac{E_{90}}{f'_{m-90}} = \frac{4600}{2{,}0} = 2300$$

$$f'_{m-\theta} = \frac{E_\theta}{\alpha} = \frac{4399}{2300} = 1{,}91 \ \text{N/mm}^2$$

Sekantni modul elastičnosti E_p, prema (5.18):

$$E_p = 0{,}5 \cdot E_\theta = 0{,}5 \cdot 4399 = 2199{,}5 \ \text{N/mm}^2$$

Deformacija pri sekantnom modulu elastičnosti iznosi:

$$\varepsilon_p = \frac{f'_{m-\theta}}{E_p} = \frac{1{,}91}{2199{,}5} = 0{,}00087$$

a ostale deformacije su pretpostavljene kao:

$$\varepsilon_1 = 0{,}00087 - 0{,}0005 = 0{,}00037$$
$$\varepsilon_2 = 0{,}00087 + 0{,}0005 = 0{,}00137$$
$$\varepsilon_u = 0{,}01$$

Duljine vanjskih dijagonala iznose 1819 mm, dok je duljina unutarnje dijagonale koja spaja dva nasuprotna kuta čeličnog okvira 2709 mm, pa se množenjem ovih duljina s deformacijama dobivaju sljedeće vrijednosti pomaka:

- vanjske dijagonale:

$$\delta_1 = 0{,}00037 \cdot 1819 = 0{,}672 \text{ mm}$$
$$\delta_2 = 0{,}00137 \cdot 1819 = 2{,}491 \text{ mm}$$
$$\delta_u = 0{,}01 \cdot 1819 = 18{,}19 \text{ mm}$$

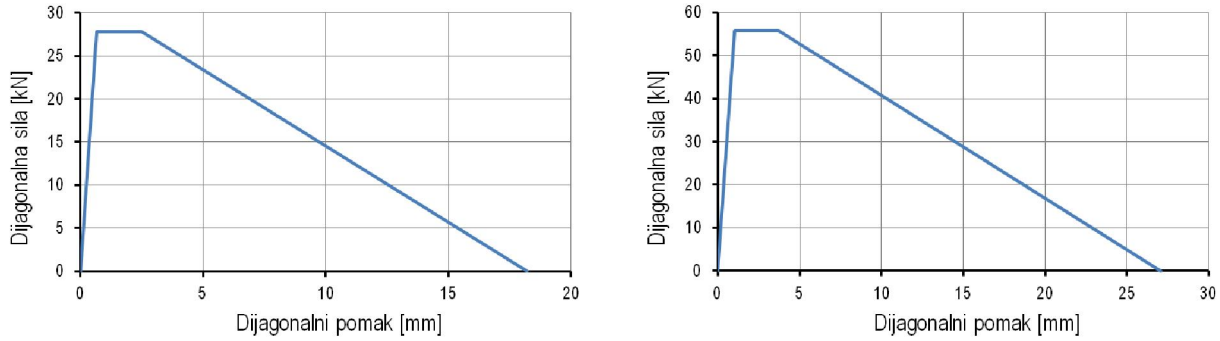
- unutarnja dijagonala:

$$\delta_1 = 0{,}00037 \cdot 2709 = 1{,}001 \text{ mm}$$
$$\delta_2 = 0{,}00137 \cdot 2709 = 3{,}710 \text{ mm}$$
$$\delta_u = 0{,}01 \cdot 2709 = 27{,}090 \text{ mm}$$

Vrijednost krajnje uzdužne sile koju dijagonale mogu preuzeti, kako je navedeno u uvodu ove točke, dobivaju se množenjem površine poprečnog presjeka pojedine dijagonale s tlačnom čvrstoćom u dijagonalnom smjeru:

- vanjske dijagonale: $F_u = 1{,}91 \cdot 14549 = 27{,}82$ kN
- unutarnja dijagonala: $F_u = 1{,}91 \cdot 29099 = 55{,}65$ kN

Na slici 5.18 prikazane su anvelope nosivosti zamjenskih dijagonala, dok su u tablici 5.4 dani glavni parametri anvelope nosivosti.



a) b)

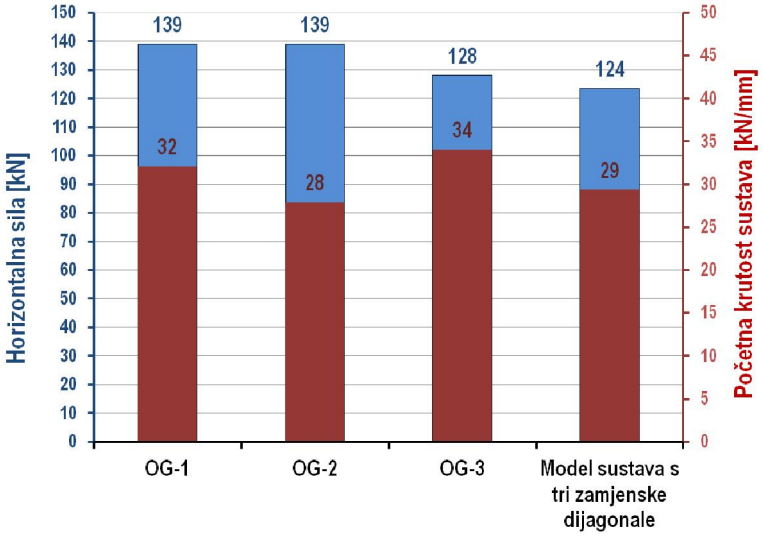
Slika 5.18 – Anvelope nosivosti ispuna od šupljih glinenih blokova: a) vanjske dijagonale, b) unutarnja dijagonala

Tablica 5.4 – Parametri anvelope nosivosti zidanog ispuna od glinenih blokova za model s tri dijagonale

E_θ [N/mm²]	f_θ [N/mm²]	Vanjske dijagonale					Unutarnja dijagonala				
		b_w [mm]	F_u [kN]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]	δ_u [mm]	b_w [mm]	F_u [kN]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]	δ_u [mm]
4399	1,91	121,24	27,82	0,672	2,491	18,190	242,49	55,65	1,001	3,710	27,090

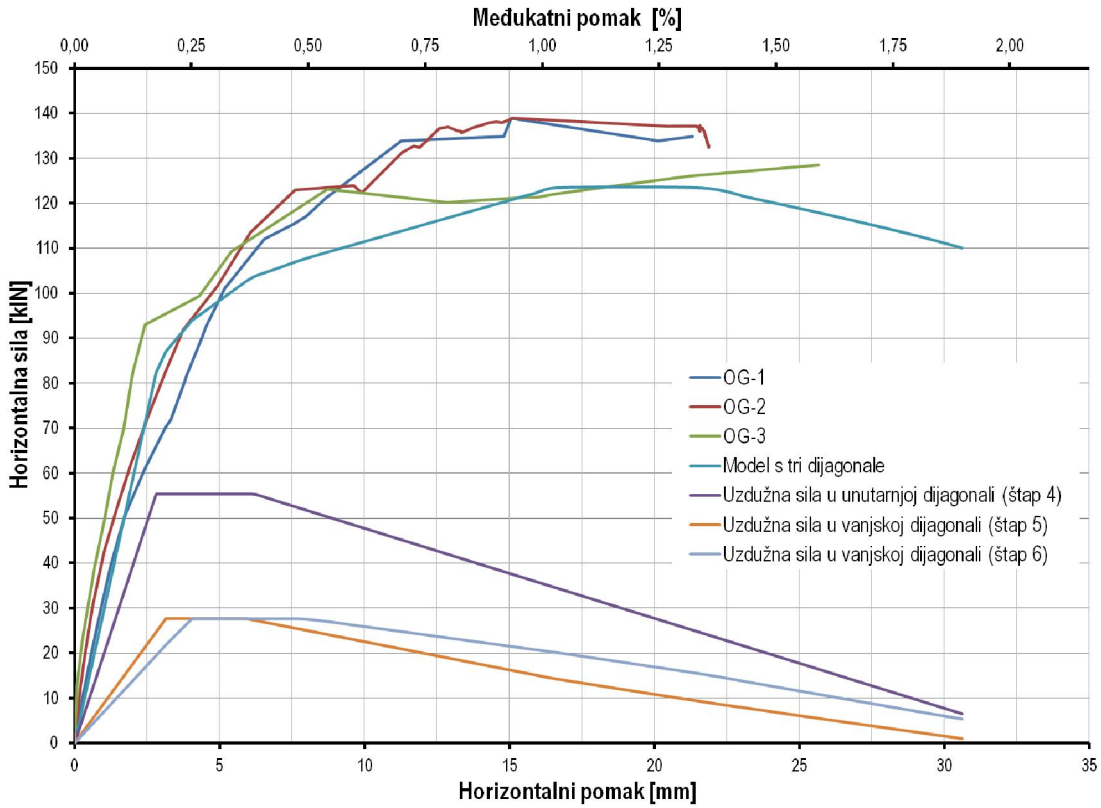
Rezultati proračuna, slika 5.19, pokazuju dobro poklapanje u početnoj krutosti eksperimentalnih rezultata i rezultata dobivenih na jednostavnom štapnom modelu u kojemu je ispun modeliran s trima zamjenskim

dijagonalama, te je početna krutost modela 6 % manja u odnosu na prosječnu vrijednost eksperimentalnih rezultata.



Slika 5.19 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OG-i i modela sustava s tri zamjenske dijagonale

Nosivost modela okvira s glinenim ispunom iznosila je 124 kN, što je za 9 % manje u odnosu na eksperimentalne rezultate. Na slici 5.20 prikazan je odnos horizontalni pomak – horizontalna sila modela s tri dijagonale, te uzdužne sile u dijagonalama (za oznake dijagonala na dijagramu pogledati sliku 5.17).



Slika 5.20 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i model s tri zamjenske dijagonale

5.2.2.2. Čelični okviri s ispunom od porobetonskih blokova

Čelični okvir identičnih je geometrijskih i materijalnih karakteristika kao i u prethodnoj točki pa je za plastičnu otpornost na savijanje usvojena vrijednost:

$$M_{y,pl,Rd} = 40271500 \ Nmm$$

Tlačna čvrstoća zidanog ispuna od porobetonskih blokova u vertikalnom smjeru f'_{m-90}, točka 4.5.1, iznosi 1,21 N/mm^2, a tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru f'_{m-0} iznosi 0,61 N/mm^2.

Omjeri kontaktne duljine između stupa i zidanog panela i visine stupa, te kontaktne duljine na gredi i duljine grede, te kontaktne duljine na stupu i gredi redom iznose:

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{\frac{2\left(M_{pj}+0{,}2M_{pc}\right)}{f'_{m-0}\cdot t_w}}}{h_c} = \frac{\sqrt{\frac{2\left(40271500+0{,}2\cdot 40271500\right)}{0{,}61\cdot 120}}}{1613} = 0{,}714 > 0{,}4 \rightarrow \alpha_c = 0{,}4$$

$$\alpha_b = \frac{\sqrt{\frac{2\left(M_{pj}+0{,}2M_{pb}\right)}{f'_{m-90}\cdot t_w}}}{l_b} = \frac{\sqrt{\frac{2\left(40271500+0{,}2\cdot 40271500\right)}{1{,}21\cdot 120}}}{2176} = 0{,}374 < 0{,}4 \rightarrow \alpha_b = 0{,}374$$

$$\alpha_c \cdot h_c = 0{,}40\cdot 1613 = 645{,}20 \ \text{mm}$$

$$\alpha_b \cdot l_b = 0{,}374\cdot 2176 = 814{,}66 \ \text{mm}$$

Ukupna površina poprečnog presjeka zamjenskih dijagonala, te površine poprečnog presjeka pojedinih dijagonala iznose:

$$A = \frac{\left(1-\alpha_c\right)\cdot\alpha_c\cdot h_c\cdot t_w}{\cos\theta} = \frac{\left(1-0{,}4\right)\cdot 0{,}4\cdot 1613\cdot 120}{\cos 37{,}04^\circ} = 58197 \ \text{mm}^2$$

$$A_1 = \frac{A}{4} = \frac{58197}{4} = 14549 \ \text{mm}^2$$

$$A_2 = \frac{A}{2} = \frac{58197}{2} = 29099 \ \text{mm}^2$$

Modul elastičnosti u dijagonalnom smjeru proračunat korištenjem eksperimentalnih rezultata prema izrazima (5.14) i (5.15) iznosi:

$$B = \frac{E_{90}}{E_0} = \frac{1200}{600} = 2{,}0$$

$$E_\theta = \frac{1}{\frac{\cos^4 37{,}04}{600} + \frac{\sin^4 37{,}04}{1200} + \frac{\cos^2 37{,}04\cdot\sin^2 37{,}04}{\left(2^{2\cdot 2}\right)0{,}2\cdot\sqrt{600\cdot 1200}}} = 1147 \ \text{N/mm}^2$$

Tlačna čvrstoća u dijagonalnom smjeru iznosi:

$$\alpha = \frac{E_{90}}{f'_{m-90}} = \frac{1200}{1,21} = 991,74$$

$$f'_{m-\theta} = \frac{E_\theta}{\alpha} = \frac{1147}{991,74} = 1,16 \ \text{N/mm}^2$$

Sekantni modul elastičnosti zidanog ispuna od porobetonskih blokova E_p i pripadna deformacija ε_p iznose:

$$E_p = 0,5 \cdot E_\theta = 0,5 \cdot 1147 = 537,73 \ \text{N/mm}^2$$

$$\varepsilon_p = \frac{f'_{m-\theta}}{E_p} = \frac{1,16}{991,74} = 0,00202$$

Deformacije pri popuštanju zidanog ispuna, pri degradaciji nosivosti te krajnja deformacija pretpostavljene su kao:

$$\varepsilon_1 = 0,00202 - 0,0018 = 0,00022$$
$$\varepsilon_2 = 0,00202 + 0,0018 = 0,00382$$
$$\varepsilon_u = 0,01$$

Duljine vanjskih dijagonala iznose 1670 mm, a unutarnja dijagonala ima duljinu od 2709 mm pa su vrijednosti pomaka:

- vanjske dijagonale:

$$\delta_1 = 0,00022 \cdot 1670 = 0,362 \ \text{mm}$$
$$\delta_2 = 0,00382 \cdot 1670 = 6,374 \ \text{mm}$$
$$\delta_u = 0,01 \cdot 1670 = 16,70 \ \text{mm}$$

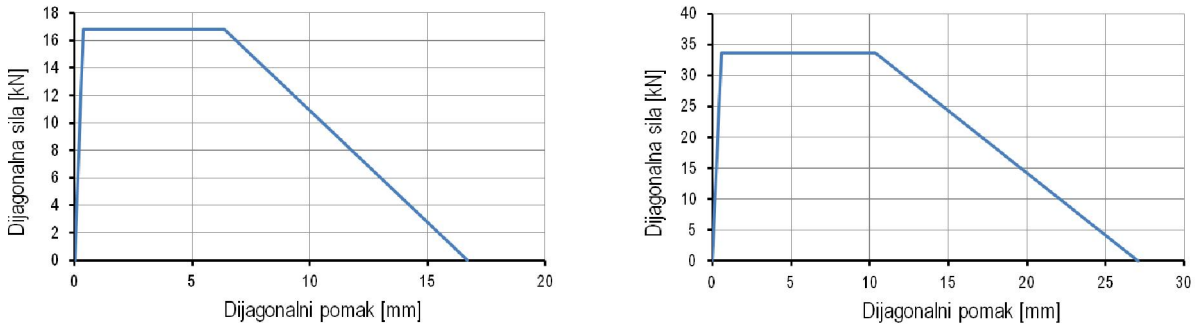
- unutarnja dijagonala:

$$\delta_1 = 0,00022 \cdot 2709 = 0,587 \ \text{mm}$$
$$\delta_2 = 0,00382 \cdot 2709 = 10,339 \ \text{mm}$$
$$\delta_u = 0,01 \cdot 2709 = 27,09 \ \text{mm}$$

Vrijednost uzdužne sile koju dijagonale mogu preuzeti iznose:

- vanjske dijagonale: $F_u = 1,16 \cdot 14549 = 16,83$ kN
- unutarnja dijagonala: $F_u = 1,16 \cdot 29099 = 33,67$ kN

Slikom 5.21 prikazane su anvelope nosivosti zamjenskih dijagonala, a tablica 5.5 sadrži osnovne parametre anvelope nosivosti za zidani ispun od porobetonskih blokova.



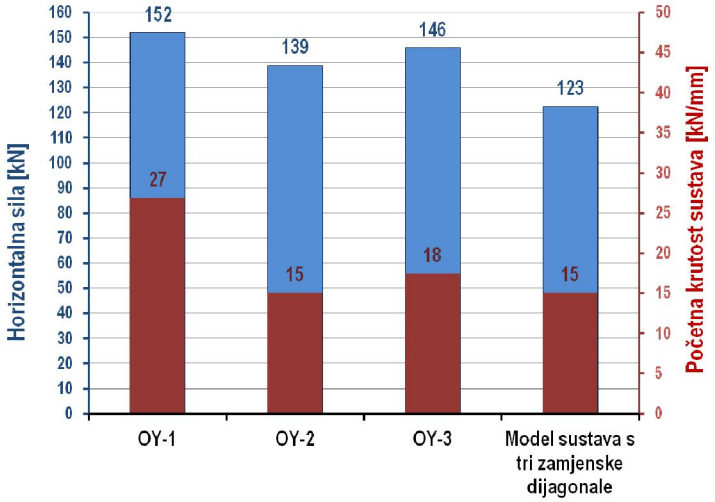
a) b)

Slika 5.21 – Anvelope nosivosti ispuna od porobetonskih blokova: a) vanjske dijagonale, b) unutarnja dijagonala

Tablica 5.5 – Parametri anvelope nosivosti zidanog ispuna od porobetonskih blokova modela s tri dijagonale

E_θ [N/mm^2]	f_θ [N/mm^2]	Vanjske dijagonale					Unutarnja dijagonala				
		b_w [mm]	F_u [kN]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]	δ_u [mm]	b_w [mm]	F_u [kN]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]	δ_u [mm]
1147	1,16	121,24	16,83	0,362	6,374	16,700	242,49	33,67	0,587	10,339	27,090

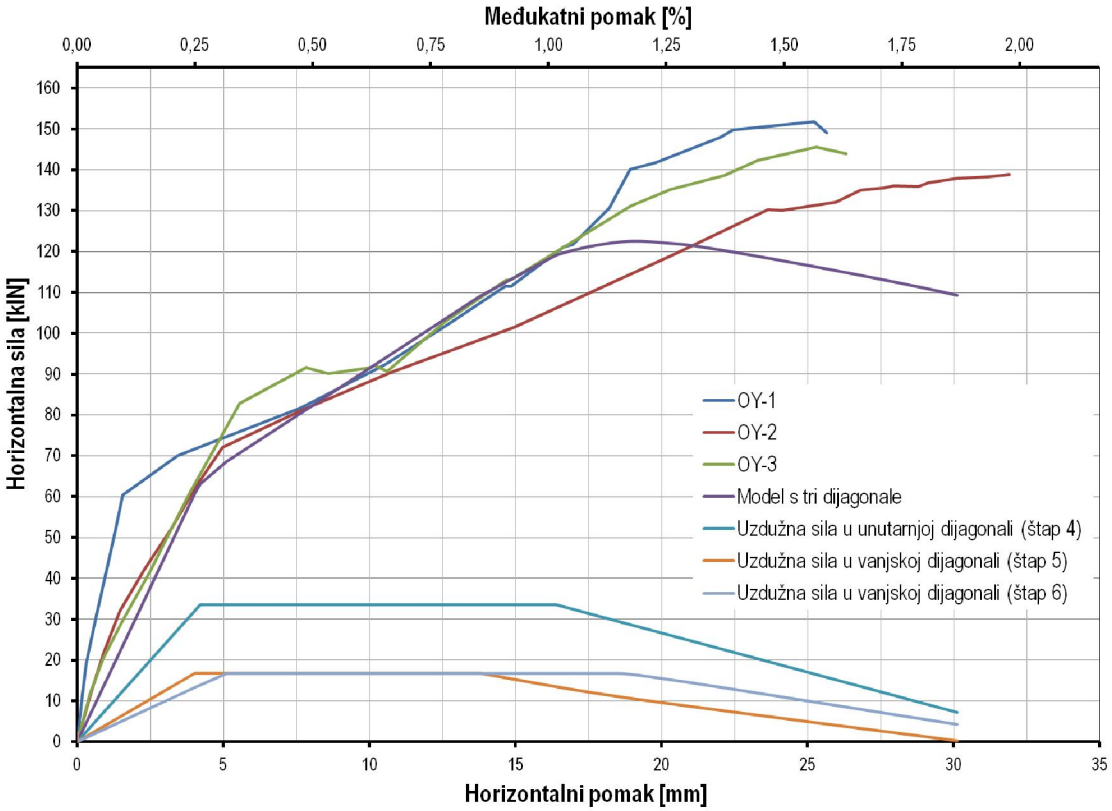
Na slikama 5.22 i 5.23 prikazani su rezultati proračuna modela s tri zamjenske nelinearne dijagonale usporedno s eksperimentalnim rezultatima.



Slika 5.22 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela sustava s tri zamjenske dijagonale

Maksimalna sila koju je model s dijagonalama mogao preuzeti iznosi 123 kN, što je 16 % manje u odnosu na prosječnu vrijednost dobivenu na stvarnim modelima okvira s porobetonskim ispunom. Usporedbom prosječne početne krutosti dobivene eksperimentalno (a koja iznosi 20 kN/mm) s početnom krutošću na modelu s tri dijagonale (15 kN/mm) dolazi se do razlike od 24 %. Ako se uspoređuju numerički rezultati s

eksperimentalnim rezultatima modela OY-2 i OY-3, iz već ustanovljenoga razloga – sustav OY-1 zbog početne utegnutosti ima nešto drugačije ponašanje u odnosu na prethodno spomenuta dva modela, tada odstupanja u početnoj krutosti i nosivosti na horizontalnu silu iznose 10 % i 14 %.



Slika 5.23 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i model s tri zamjenske dijagonale

Na slici 5.23, na kojoj je prikazan odgovor modela konstrukcije u formatu horizontalna sila – horizontalni pomak, može se uočiti dobro poklapanje rezultata modela sustava s eksperimentalnim rezultatima u početnoj i srednjoj fazi opterećivanja, dok su odstupanja značajnija pri procjeni maksimalne nosivosti sustava.

5.2.2.3. Čelični okviri s kombiniranim ispunom

Kao i slučaju modeliranja zidanog ispuna s jednom dijagonalom, točka 5.2.1.3., i kod modela s tri dijagonale korišten je bilinearni dijagram anvelope nosivosti kombiniranog zidanog ispuna, pri čemu su za vertikalnu i horizontalnu tlačnu nosivost korištene srednje vrijednosti eksperimentalnih rezultata dobivenih ispitivanjem prošupljenih zidnih elemenata od porobetona (tablica 4.2). Prema tome, vertikalna tlačna čvrstoća $f_{m-90}^{'}$ iznosi 1,92 N/mm^2, a tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru $f_{m-0}^{'}$ iznosi 0,54 N/mm^2. Za

modul elastičnosti usvojena je eksperimentalna vrijednost dobivena ispitivanjem zidnih prizmi od glinenih blokova E=4600 N/mm^2.

Uz jednake geometrijske i materijalne karakteristike čeličnog okvira, prema izrazima (5.12) i (5.13), dobiju se sljedeće vrijednosti kontaktnih duljina na gredi i stupu:

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{\frac{2\left(M_{pj} + 0{,}2M_{pc}\right)}{f'_{m-0} \cdot t_w}}}{h_c} = \frac{\sqrt{\frac{2\left(40271500 + 0{,}2 \cdot 40271500\right)}{0{,}54 \cdot 120}}}{1613} = 0{,}756 > 0{,}4 \rightarrow \alpha_c = 0{,}4$$

$$\alpha_b = \frac{\sqrt{\frac{2\left(M_{pj} + 0{,}2M_{pb}\right)}{f'_{m-90} \cdot t_w}}}{l_b} = \frac{\sqrt{\frac{2\left(40271500 + 0{,}2 \cdot 40271500\right)}{1{,}92 \cdot 120}}}{2176} = 0{,}297 < 0{,}4 \rightarrow \alpha_b = 0{,}297$$

$$\alpha_c \cdot h_c = 0{,}40 \cdot 1613 = 645{,}20 \text{ mm}$$

$$\alpha_b \cdot l_b = 0{,}297 \cdot 2176 = 646{,}72 \text{ mm}$$

Prema izrazu (5.9), ukupna površina poprečnog presjeka zamjenske dijagonale, te površine poprečnog presjeka pojedinih dijagonala iznose:

$$A = \frac{\left(1-\alpha_c\right) \cdot \alpha_c \cdot h_c \cdot t_w}{\cos\theta} = \frac{\left(1-0{,}4\right) \cdot 0{,}4 \cdot 1613 \cdot 120}{\cos 37{,}04°} = 58197 \text{ mm}^2$$

$$A_1 = \frac{A}{4} = \frac{58197}{4} = 14549 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = \frac{A}{2} = \frac{58197}{2} = 29099 \text{ mm}^2$$

Izračunom prema izrazima od (5.14) do (5.17) dobiva se modul elastičnosti u dijagonalnom smjeru E_θ=4399 N/mm^2, te tlačna čvrstoća u dijagonalnom smjeru od f_θ=1,84 N/mm^2.

Maksimalne uzdužne sile koju dijagonale mogu preuzeti, proračunate prema tlačnoj čvrstoći u dijagonalnom smjeru, iznose:

- vanjske dijagonale: $F_u = 1{,}84 \cdot 14549 = 26{,}71$ kN
- unutarnja dijagonala: $F_u = 1{,}84 \cdot 29099 = 53{,}42$ kN

Preostala nosivost zidanog ispuna pretpostavljena je kao 10% maksimalne vrijednosti uzdužne sile.

Uzdužne deformacije dijagonala pri maksimalnoj sili i pri rezidualnoj nosivosti usvojene su kao u slučaju proračuna modela s jednom dijagonalom (točka 5.2.1.3.) te iznose: ε_m=0,00089 i ε_r=0,0056 pa se izračunom, s obzirom na duljine pojedinih dijagonala, dobivaju sljedeće vrijednosti pomaka:

- vanjske dijagonale:

$$\delta_m = 0{,}00089 \cdot 1811 = 1{,}612 \text{ mm}$$

$$\delta_r = 0{,}0056 \cdot 1811 = 10{,}188 \text{ mm}$$

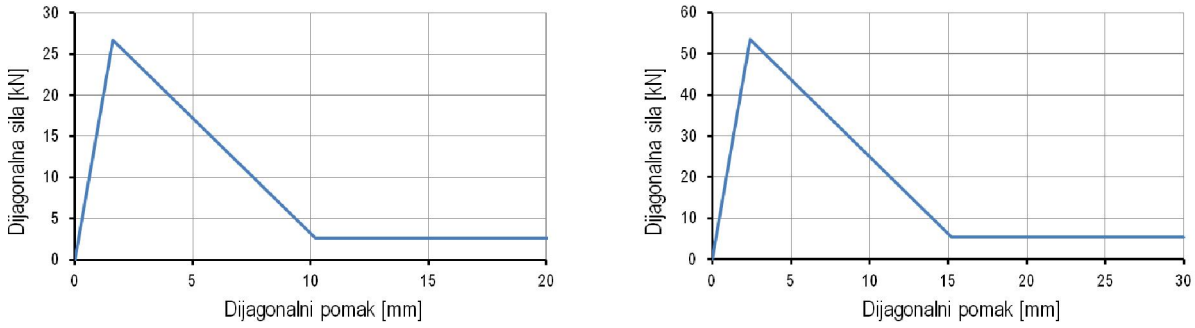
- unutarnja dijagonala:

$$\delta_m = 0{,}00089 \cdot 2709 = 2{,}411 \text{ mm}$$
$$\delta_r = 0{,}0056 \cdot 2709 = 15{,}240 \text{ mm}$$

U tablici 5.6 dani su podatci o parametrima anvelopa nosivosti, koje su prikazane na slici 5.24.

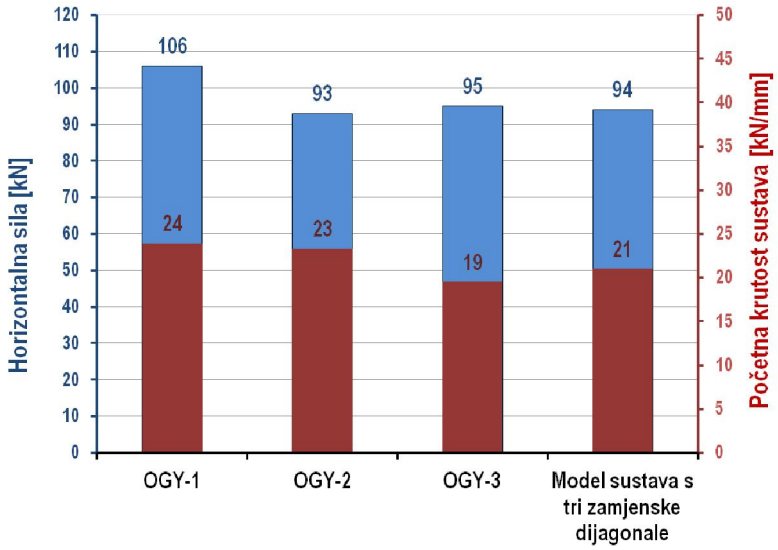
Tablica 5.6 – Parametri anvelope nosivosti kombiniranog zidanog ispuna modela s tri dijagonale

E_θ [N/mm²]	f_θ [N/mm²]	Vanjske dijagonale				Unutarnja dijagonala			
		b_w [mm]	F_u [kN]	δ_m [mm]	δ_r [mm]	b_w [mm]	F_u [kN]	δ_m [mm]	δ_r [mm]
4399	1,84	121,24	26,71	1,611	10,188	242,49	53,42	2,411	15,240



a) b)

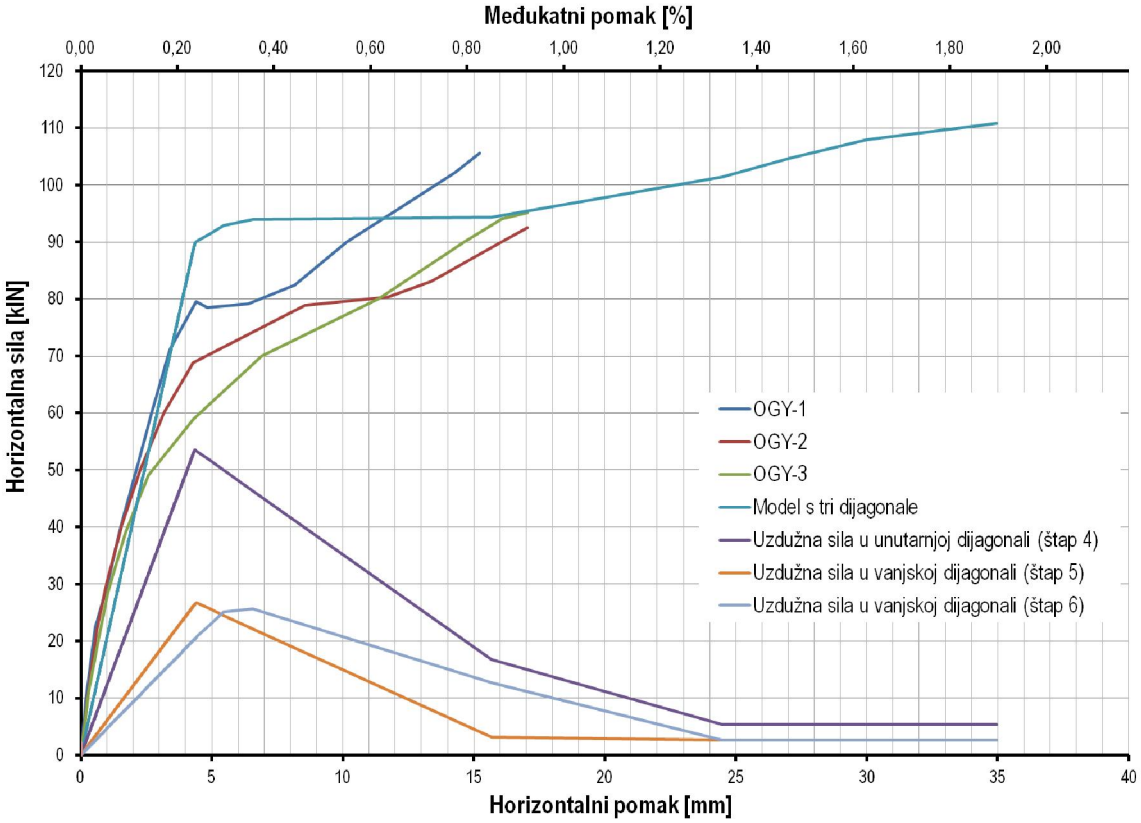
Slika 5.24 – Anvelope nosivosti kombiniranog zidanog ispuna: a) vanjske dijagonale, b) unutarnja dijagonala



Slika 5.25 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela sustava s tri zamjenske dijagonale

Rezultati proračuna, slika 5.25, modela s tri nelinearne dijagonale daju nosivost od 94 kN pri pomaku koji odgovara otkazivanju unutarnje dijagonale, što iznosi 4 % odstupanja od prosječne vrijednosti nosivosti

okvira s kombiniranim ispunom dobivenih ispitivanjem. Početna krutost modela iznosila je 21 kN/mm, što čini razliku od 5 % u odnosu na eksperimentalne rezultate.



Slika 5.26 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OGY-i i model s tri zamjenske dijagonale

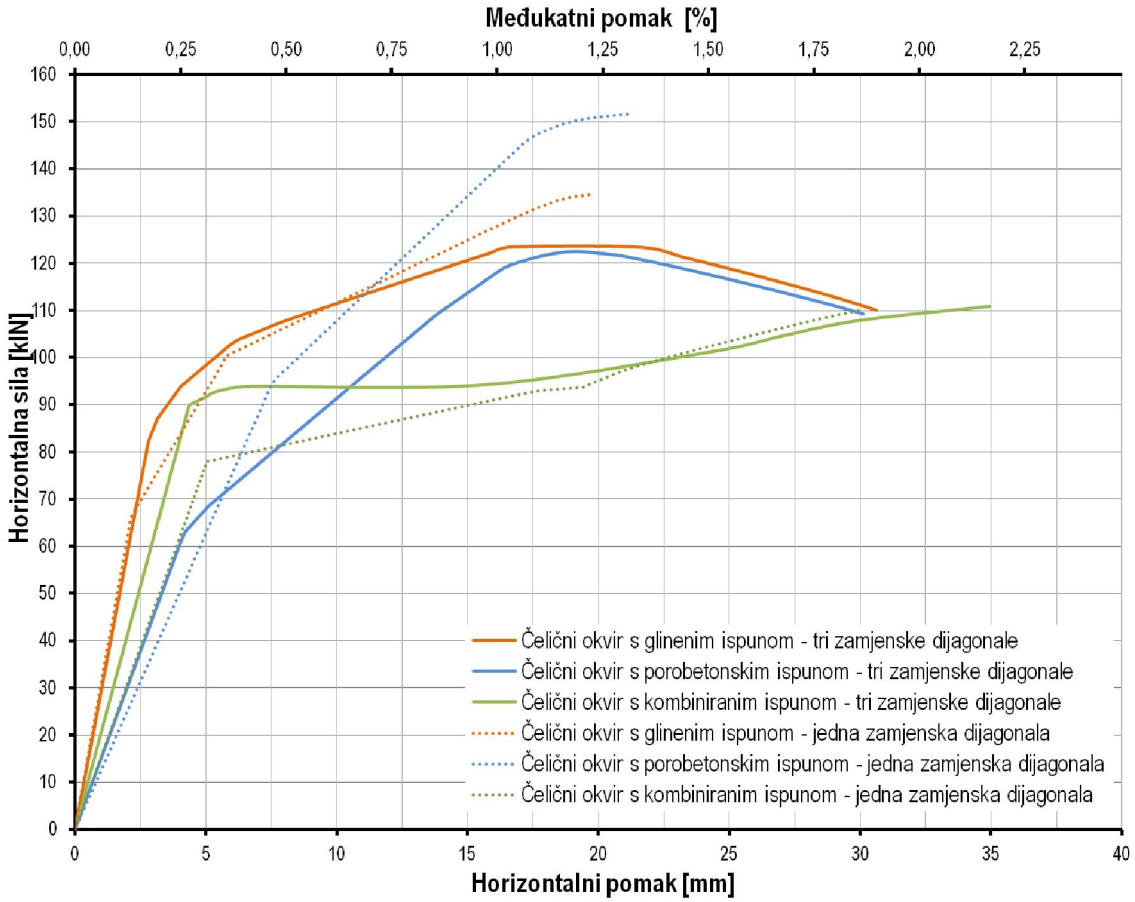
Na dijagramu sila – pomak, slika 5.26, može se uočiti dobro podudaranje u početnoj krutosti i nosivosti modela i eksperimentalnih rezultata, a značajnija odstupanja u ponašanju uočljiva su nakon popuštanja unutarnje dijagonale pa sve do sloma zidanoga ispuna.

5.2.2.4. Zaključno o modelima s trima zamjenskim dijagonalama

Rezultati proračuna numeričkih modela s jednom i trima zamjenskim dijagonalama usporedno su prikazani slikom 5.27. Modeli čeličnoga okvira s glinenim i porobetonskim ispunom imaju približno jednake otpornosti na horizontalne sile (124 kN i 123 kN) i maksimalne horizontalne pomake, dok se sustav s kombiniranim ispunom pokazao kao najduktilniji, ali s manjim kapacitetom nosivosti.

Početna krutost sustava s glinenim ispunom približno je dvostruko veća u odnosu na model s porobetonskim ispunom (29 kN/mm i 15 kN/mm), dok se početna krutost modela s kombiniranim ispunom nalazi između ove dvije granične vrijednosti (21 kN/mm), što odgovara eksperimentalnim rezultatima ispitivanih fizikalnih modela.

Usporedbom modela s tri dijagonale (pune crte na slici 5.27) može se uočiti zaglađeniji oblik anvelopne krivulje u odnosu na modele s jednom dijagonalom (isprekidane crte na slici 5.27), osim kod modela s kombiniranim ispunom koji se slično ponaša kao i model s jednom dijagonalom, odnosno dijagram horizontalna sila – horizontalni pomak bi-linearan je.
Modeli okvira s glinenim i porobetonskim ispunom s trima zamjenskim dijagonalama imaju manju otpornost na horizontalne sile u odnosu na modele s jednom dijagonalom, a anvelope sustava s jednom i trima dijagonalama, kod kombiniranoga ispuna, gotovo se preklapaju nakon otkazivanja ispuna. U oba načina modeliranja zidnoga ispuna, i s jednom i s trima dijagonalama, najveći pomaci dobiveni su kod modela s kombiniranim ispunom.



Slika 5.27 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak numeričkih modela s jednom i tri zamjenske dijagonale

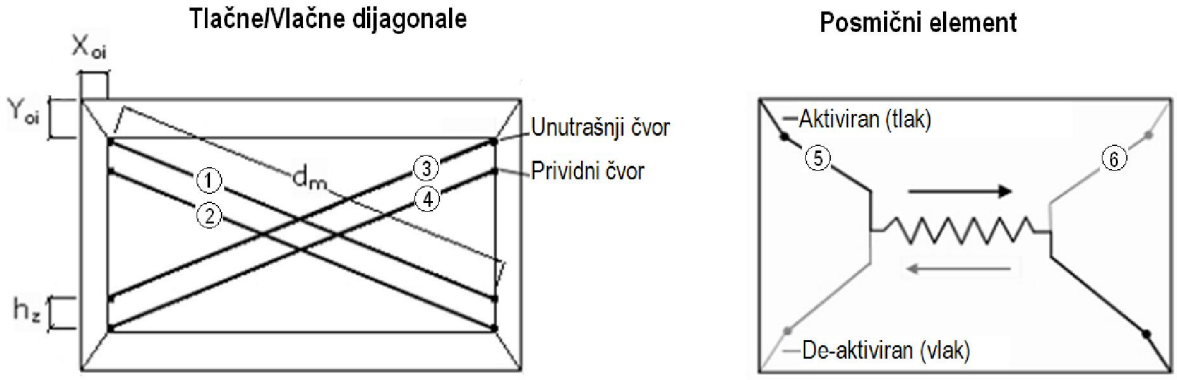
5.3. Modeliranje zidnog ispuna makro-elementom

Za modeliranje zidnog ispuna s jednim makro-elementom korišten je računalni program *SeismoStruct*, [66], koji ima implementiran model ponašanja zidanog ispuna. Računalnim programom *SeismoStruct* moguće je predvidjeti ponašanje prostornih ili ravninskih okvirnih konstrukcija, sa ili bez zidnih ispuna, pri djelovanju dinamičkih ili statičkih opterećenja uzimajući u obzir i materijalne i geometrijske nelinearnosti.

U nastavku ovoga poglavlja daje se opis modela zidanoga ispuna i elemenata okvira u programu *SeismoStruct*, te glavnih parametara kojima je potrebno definirati ponašanje zidanog ispuna.

5.3.1. Model zidanog ispuna - neelastični panel element

Panel element s četirima čvorovima za modeliranje nelinearnog odziva ispuna u okvirnim konstrukcijama prvobitno je programirao i razvio Crisafulli [47], a u SeismoStruct implementiran je 2005. godine. Svaki panel zapravo, predstavlja šest dijagonala; svaki od dijagonalnih smjerova ima dva paralelna elementa za prijenos uzdužnog opterećenja preko dva dijagonalno suprotna kuta, a ima i dva elementa za prijenos posmika s vrha na dno panela, slika 5.28. Opterećenje se prenosi samo preko dijagonale koja je u tlaku, tako da „aktivacija" dijagonala ovisi o deformaciji panela. Histerezno ponašanje dijagonalnih i posmičnih elemenata panela definira se zasebno (točke 5.3.1.1. i 5.3.1.2.).
Kao što se može vidjeti na slici 5.28, četiri unutarnja čvora koriste se kako bi se uzele u obzir stvarne točke kontakta između okvira i zidanog panela (tj. na ovaj se način pri proračunima u obzir uzimaju stvarne dimenzije elemenata okvira, odnosno širina stupova i visina grede), a četiri *„prividna"* čvora u modelu služe kako bi se uzela u obzir duljina kontakta (h_z) između okvira i ispuna. Sve unutarnje sile prenose se na četiri čvora (koji trebaju biti zadani u slijedu obrnuto od smjera kretanja kazaljke na satu) u kojima je element spojen s okvirom.



Slika 5.28 – Panel element – tlačne/vlačne i posmične dijagonale

Kako bi se u potpunosti opisala ova vrsta elementa, potrebno je definirati sljedeće:

- Parametre ponašanja dijagonala - koriste se za određivanje modela histereznog ponašanja dijagonale zida, a nju se modelira s krivuljom odziva *„ispun_dijagonala“* (točka 5.3.1.2).

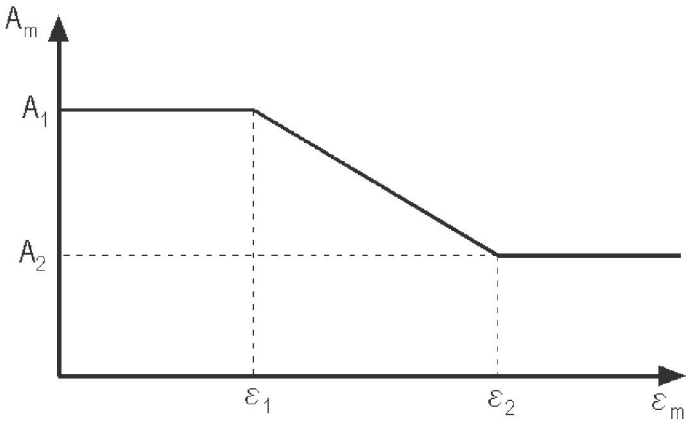
- Parametre ponašanja posmičnog elementa - koriste se za određivanje modela histereznog ponašanja posmične dijagonale zida, a nju se modelira s krivuljom odziva *„ispun_posmik“* (točka 5.3.1.1).

- Debljinu panela koji predstavlja ispunu (t) – može se uzeti kao jednaku širini opeke ili opečnog bloka od koje je zid načinjen (npr. 12 cm), ili kao jednaku širini opeke uz uzimanje u obzir debljine žbuke (npr. 12+2x1,5=15).

- Pomak izvan ravnine pri slomu – zadaje se u postotku od visine kata, a njegova svrha određivanje je trenutka deaktivacije elementa, odnosno trenutka kada zidani panel više ne doprinosi otpornosti niti krutosti konstrukcije - smatra se kako je do otkazivanja nosivosti zidanog ispuna došlo njegovim slomom izvan ravnine.

- Površina dijagonale (A_1) – određuje se kao umnožak debljine panela i širine ekvivalentne dijagonale (b_w), a ona se uobičajeno kreće u području od 10 % do 40 % od dijagonale panela ispune (d_m) – 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 (npr. [3], [4], [7]). Smyrou je u svome radu [48] sažeo te izraze, te predložio brzi način procjene vrijednosti širine ekvivalentne dijagonale b_w prema autorima [3] ili [4] u iznosu od 1/3 ili 1/4 od d_m.

- Reducirana površina dijagonale (A_2) – određuje se kao postotak od A_1, a uzima u obzir činjenicu da se uslijed raspucavanja zidanog panela duljina kontakta okvira i ispuna smanjuje kako se bočni pomaci povećavaju, utječući tako na površinu ekvivalentne dijagonale. Pretpostavlja se da se površina mijenja vrijednost linearno u funkciji osne deformacije dijagonale, slika 5.29, i to na takav način da se dvije deformacije, između kojih se ova izmjena odvija, definiraju kao ulazni podatci modela histereze dijagonale zida.



Slika 5.29 – Smanjenje površine ekvivalentne dijagonale uslijed pukotina

- Duljina kontakta između okvira i panela (h_z) – unosi se kao postotak od vertikalne visine panela, a njom se djelotvorno uzima u obzir udaljenost između unutrašnjih i „*prividnih*“ čvorova, slika 5.28. Razumni rezultati dobivaju se za vrijednosti od 1/3 do 1/2 stvarne duljine kontakta (z) koja se prema [5] definira kao $0.5 \cdot \pi \cdot \lambda^{-1}$, gdje je λ bezdimenzionalni parametar relativne krutosti čiji se proračun vrši pomoću izraza (5.2).

- Horizontalni i vertikalni odmak (*Xoi* i *Yoi*) - zadaje se kao postotak od horizontalne i vertikalne dimenzije zidanog panela, 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 zidanog ispuna.

- Udio krutosti dodijeljen posmiku (γ_s) - predstavlja udio krutosti panela (program ju sam računa) koji treba biti dodijeljen posmičnoj opruzi (uobičajeno se usvaja vrijednost 0,2 i 0,6). Drugim riječima, krutost dijagonale (K_A) i posmična krutost (K_S) računaju se na sljedeći način:

$$K_A = (1-\gamma_s) \cdot \frac{A_{ms} \cdot E_{me}}{2 \cdot d_m} \tag{5.20}$$

$$K_S = \gamma_s \cdot \frac{A_{ms} \cdot E_m}{d_m} \cdot \cos^2 \theta \tag{5.21}$$

- Specifična težina (γ)- predstavlja obujamsku težinu panela (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^3.

U dijaloškom okviru panela ispuna 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 bit će zamijenjeni 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 matrice prigušenja elementa.

Ranije spomenuta mogućnost određivanja trenutka aktivacije (ili deaktivacije) zadana je kroz vrste klase panela ispune. Zadane vrijednosti su 0,00 (za aktivaciju) i 1E20 (za deaktivaciju); ovo znači kako se panel ispune aktivira na početku analize (0,00) i da neće biti deaktiviran (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 zida ne bi bio praktičan zbog visoke razine složenosti i dugotrajnih proračuna.

2 - Doprinos krutosti okviru od zidanog ispuna uzima se u obzir tek nakon nanošenja početnih opterećenja, što znači da ispun ne pruža otpor gravitacijskim opterećenjima (njih uobičajeno preuzima okvir, koji se i modelira prvi).

3 – Pri proračunu okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom *pushover* analizom preporučuje se korištenje algoritma s kontrolom pomaka.

4 – Kada su u pitanju modeli koji teže velikoj točnosti, korisnicima se zbog činjenica da ispun uobičajeno nije kruto povezan s okvirom, preporučuje korištenje „*link*“ elemenata između okvira i čvorova panela ispuna.

5 – Korisnici bi trebali provjeriti premašuju li vrijednosti akceleracije izvan ravnine prag koji uzrokuje slom panela izvan ravnine (deaktivacija elementa panela ispuna može se podesiti na vrijeme koje je potrebno da se dostignu vrijednosti takvih ubrzanja).

5.3.1.1. Definiranje ponašanja zidnog ispuna pri djelovanju posmika – „*ispun_posmik“*

Kako je rečeno prije, ponašanje zidnoga ispuna pri posmiku definira se zadavanjem preko modela ponašanja *„ispun_posmik“* koji je implementiran u ovom računalnom programu.

Posmična čvrstoća može se izraziti kao zbroj početne posmične čvrstoće τ_0 (kohezijske čvrstoće) i umnoška koeficijenta trenja μ s vrijednošću normalne tlačne sile u smjeru okomitom na horizontalne sljubnice zidanog 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 τ_0 i μ moguće je procijeniti ispitivanjem na posmik ili pomoću izraza iz normi. Takve vrijednosti treba uzimati s oprezom jer se pomoću prve metode one precjenjuju, a prema drugoj se podcjenjuju.

Kako bi se opisalo ponašanje ispuna pri posmičnim naprezanjima, potrebno je odrediti četiri parametra:

- Početna posmična čvrstoća - τ_0

  Brojni istraživači ispitali su posmične čvrstoće različitih materijala na velikome broju uzoraka. Prema [49] ova vrijednost kreće se od 0,3 do 0,6 MPa. Prema [50] pokazalo se da se ova vrijednost obično kreće od 0,1 do 1,5 MPa, a prema [51] ovo je 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 - μ

  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 su vrijednost svrstavali u područje od 0,1 do 1,2. Prema [52] predlaže se uzimanje vrijednosti od 0,7 kao pouzdane donje granice (zaključak interpretacije rezultata eksperimenata širokog spektra materijala u kojima je uočeno da se vrijednost μ kreće između 0,7 i 0,85), a upravo je ta vrijednost usvojena u *SeismoStruct* (treba napomenuti da je znatno niža vrijednost od 0,3 namijenjena za dimenzioniranje, a ne za procjenu ponašanja, [50]).

- Maksimalna posmična čvrstoća - τ_{max}

  Ovo je najveće posmično naprezanje koje zidani panel može preuzeti, a ono ovisi o mehanizmu sloma (slom prekoračenjem posmične nosivosti, slom dijagonalnim vlačnim raspucavanjem, slom prekoračenjem tlačne čvrstoće) koji nastaje u zidanom ispunu. U nedostatku dodatnih i točnijih informacija može se pretpostaviti da je ova vrijednost jednaka zbroju τ_0 i umnoška μ 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 - α_S

  Ovaj empirijski parametar predstavlja omjer najvećeg posmičnoga naprezanja i prosječnog naprezanja u panelu, a vrijednost mu se kreće od 1,4 do 1,65, [47]. U *SeismoStruct*-u zadana vrijednost od 1,5 u najvećem broju slučajeva ne zahtijeva intervencije korisnika.

5.3.1.2. Definiranje ponašanja zidnog ispuna u dijagonalnom smjeru – „*ispun_dijagonala*“

Kako bi se u potpunosti opisalo ponašanje zidnoga ispuna u dijagonalnom smjeru potrebno je definirati 17 parametara:

- Početni (Youngov) modul elastičnosti - E_m

  S obzirom na to da je zidni 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 ($f_{m\theta}$). Prema [47] i [48] vrijednosti modula elastičnosti unutar su sljedećega područja: $400 \cdot f_{m\theta} < E_m < 1000 \cdot f_{m\theta}$. U *SeismoStruct*-u usvojena je vrijednost modula elastičnosti E_m od 1,6 GPa.

- Tlačna čvrstoća - $f_{m\theta}$

  Ova tlačna čvrstoća odnosi se na dijagonalnu nosivost zidanog panela te ne predstavlja uobičajenu tlačnu čvrstoću zida. Ako ne postoje eksperimentalni rezultati vrijednosti ovoga parametra, tada je najtočniji pristup proračun ove vrijednosti povezan sa svim mogućim mehanizmima sloma te je mjerodavno usvajanje najniže vrijednosti tlačne čvrstoće – to je otpornost koja odgovara najvjerojatnijem mehanizmu sloma panela ispune. Za četiri oblika sloma daju se četiri izraza:

  - slom dijagonalnim tlakom:

$$f_{m\theta} = \frac{0{,}6 \cdot f_{ws} + 0{,}3 \cdot \sigma_v}{\frac{b_w}{d_w}} \tag{5.22}$$

  - klizanje uslijed posmika:

$$f_{m\theta} = \frac{\left(1{,}2 \cdot \sin\theta + 0{,}45 \cdot \cos\theta\right) \cdot f_{wu} + 0{,}3 \cdot \sigma_v}{\frac{b_w}{d_w}} \tag{5.23}$$

– slom tlakom u uglovima:

$$f_{m\theta} = \frac{1{,}12 \cdot f_w^{'} \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{K_1 \cdot (\lambda h)^{-0.12} + K_2 \cdot (\lambda h)^{0.88}} \tag{5.24}$$

– slom tlakom u središtu panela:

$$f_{m\theta} = \frac{1{,}16 \cdot f_w^{'} \cdot \tan\theta}{K_1 + K_2 \cdot \lambda h} \tag{5.25}$$

gdje je f_{ws} posmična otpornost uslijed dijagonalnog tlaka, σ_v je okomito naprezanje uslijed gravitacijskih opterećenja (obično nula, jer zidani paneli u *Seismostruct-u* ne preuzimaju početna opterećenja), f_{wu} je otpornost na klizajući posmik, f'_w tlačna otpornost ziđa, h je međukatna visina. Treba napomenuti da f_{ws}, f_{wu} i f'_w treba odrediti ispitivanjem uzoraka zida.

Parametri K_1 i K_2 izraženi su u funkciji λh:

$$\begin{aligned} &\text{- ako je } \lambda h < 3{,}14 \text{, tada je } K_1 = 1{,}30 \text{ i } K_2 = -0{,}178 \\ &\text{- ako je } 3{,}14 < \lambda h < 7{,}85 \text{, tada je } K_1 = 0{,}707 \text{ i } K_2 = 0{,}01 \\ &\text{- ako je } \lambda h > 7{,}58 \text{, tada je } K_1 = 0{,}47 \text{ i } K_2 = 0{,}04 \end{aligned} \tag{5.26}$$

gdje je λ parametar koji uzima u obzir odnos krutosti zidanoga ispuna i čeličnoga okvira.

Područje vrijednosti tlačne čvrstoće $f_{m\theta}$ vrlo je veliko, a u *SeismoStruct*-u usvojena je zadana vrijednost od 1,0 MPa.

- Vlačna čvrstoća - f_t

  Vlačna čvrstoća predstavlja vlačnu čvrstoću zida ili vlačnu čvrstoću na kontaktu između okvira i zidanog panela. Njezina 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 - ε_m

  Ovaj parametar predstavlja deformaciju pri najvećem naprezanju i utječe, preko izmjene sekantne krutosti, na uzlaznu 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 *SeismoStruct* uvedena je zadana vrijednost od 0,0012 mm/mm.

- Granična (krajnja) deformacija - ε_{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, [47]; npr. za relativno velike vrijednosti (kao $20\varepsilon_m$) smanjenje tlačne čvrstoće postaje uglađenije, a analiza stabilnija. Zadana vrijednost je 0,024 mm/mm.

- Deformacija zatvaranja pukotina - ε_{cl}

  Ovaj parametar određuje deformaciju nakon koje se pukotine djelomično zatvaraju, pri čemu se dopušta razvoj tlačnih naprezanja. Njezina vrijednost može se kretati u intervalu od 0 do 0,003, [47]. Usvojena zadana vrijednost iznosi 0,004 mm/mm.

- Deformacija umanjenja površine dijagonale i deformacija reducirane površine dijagonale – ε_1 i ε_2

  Ove dvije deformacije povezane su s umanjenjem površine dijagonale, slika 5.29. Površina poprečnog presjeka dijagonale A_1 ostaje nepromijenjena sve do dosezanja uzdužne deformacije dijagonale ε_1, nakon čega se površina presjeka počinje linearno smanjivati do deformacije ε_2. Pri deformacijama jednakim i većim od ε_2, površina 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. Razumne vrijednosti ε_1 nalaze se u području od 0,0003 do 0,008, dok se vrijednosti ε_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, [47]. Svi su oni povezani 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, da čak i u slučajevima kada se vrši ciklička/dinamička analiza, samo tri parametra od navedenih ispod (γ_{un}, α_{ch}, ε_{x1}) imaju značajnu ulogu pri kvantificiranju sposobnosti trošenja energije ispuna (odnosno, ostalih šest parametara vjerojatno ne treba mijenjati).

  Empirijski faktori kalibracije krivulje su:

  - faktor krutosti rasterećenja (γ_{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 *SeismoStruct*-u je 1,5.
  - faktor deformacije ponovnog opterećenja (α_{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 je usvojena je vrijednost od 0,2.

- faktor infleksije deformacije (α_{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 *SeismoStruct*-u, čime se osigurava najveći kapacitet trošenja energije.
- faktor deformacija potpunog rasterećenja (β_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 2,0.
- faktor infleksije naprezanja (β_{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 *SeismoStruct*-u.
- faktor krutosti ponovnog opterećenja (γ_{plr}) – koristi se za određivanje krutosti pri ponovnom opterećivanju nakon što 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 *SeismoStruct*-u.
- faktor krutosti pri nultom naprezanju (γ_{plu}) 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. U SeismoStruct-u usvojena je vrijednost od 1,0.
- faktor krutosti plastičnog rasterećenja (ε_{x1}) – koristi se za određivanje tangentnog 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 *SeismoStruct*-u usvojena je vrijednost od 3,0.
- faktor deformacije ponavljajućeg ciklusa (ε_{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 1,4.

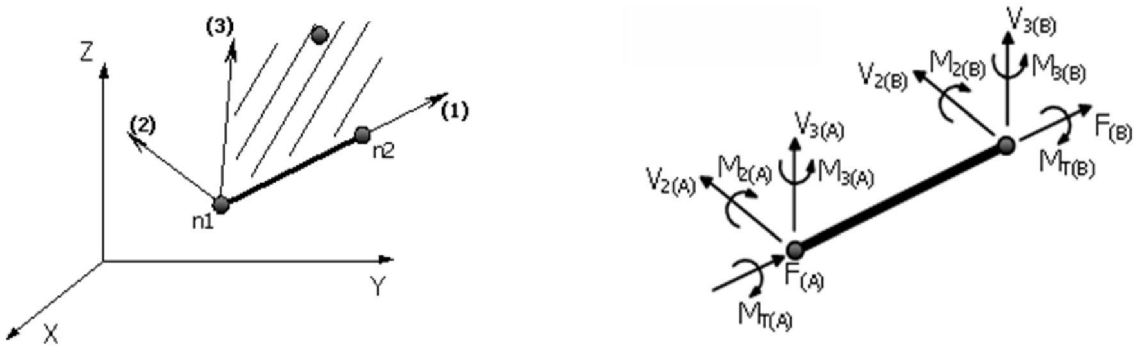
5.3.2. Neelastični elementi okvira – infrmDB, infrmFB

Ovo su 3D greda/stup elementi s kojima je moguće modelirati elemente prostornih okvirnih konstrukcija uzimajući u obzir geometrijske i materijalne nelinearnosti. Odnos naprezanje-deformacija na razini presjeka grede/stupa elemenata dobiva se integracijom nelinearnog jednoosnog odziva materijala pojedinih vlakana na koja je presjek podijeljen – na ovaj se način uzima u obzir širenje neelastičnosti duž elementa i po širini presjeka.

InfirmFB češće je korišten element jer ne zahtijeva diskretizaciju elementa, što osigurava znatno manju veličinu modela, a samim time i znatno bržu analizu, za razliku od elemenata *InfirmDB*. Osim toga, korištenje jednog elementa po konstrukcijskom elementu omogućuje dobivanje rezultata o rotacijama krajnjih čvorova elementa za provjeru konstrukcije na učinke potresa (npr. [34]). Kada se konstrukcijski element mora diskretizirati u dva ili više okvirnih elemenata (potrebno za *InfirmDB*) korisnik mora naknadno računati pomake/rotacije čvorova kako bi procijenio rotacije.

Za obje vrste elemenata potrebno je zadati broj vlakana koji čine presjek korišten pri proračunu ravnoteže na svakoj od integracijskih točaka elemenata. Idealni broj vlakana presjeka, dovoljan za dobar 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 naprezan. Za presjeke načinjene od jednog materijala, gruba procjena broja vlakana je 100, a za složenije presjeke izložene visokim razinama neelastičnosti, gruba procjena dostatnoga broja vlakana je 200 ili više - međutim, treba imati na umu da samo istraživanje osjetljivosti po principu slučaj po slučaj može biti osnova za određivanje optimalnog broja vlakana koji čine presjek.

Osim toga, za element *InfirmFB* treba odrediti i broj integracijskih presjeka. Obično je 4-5 presjeka dovoljno, 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.

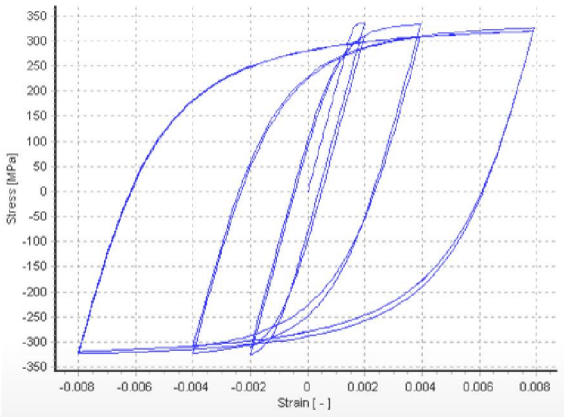


a) b)

Slika 5.30 – Štapni elementi: a) lokalne osi, b) oznake i smjerovi reznih sila

5.3.3. Rezultati proračuna na modelima s makro-elementom zidnog ispuna

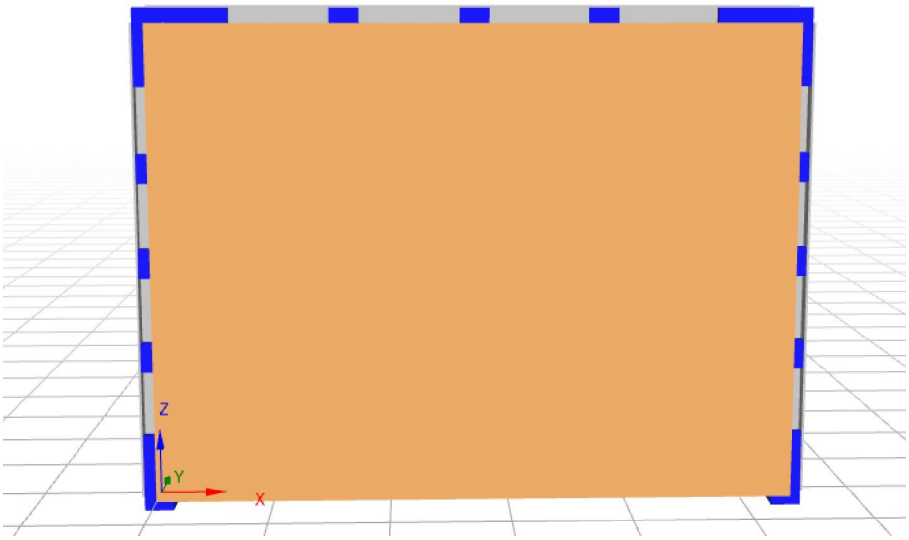
Pri izradi modela čeličnih okvira sa zidnim ispunom u računalnom programu *SeismoStruct* za čelični materijal korišten je histerezni model ponašanja *Menegotto-Pinto,* koji je pogodan za analize u kojima se predznak naprezanja mijenja (tlak/vlak), slika 5.31.



Slika 5.31 – Menegotto-Pinto model čeličnog materijala

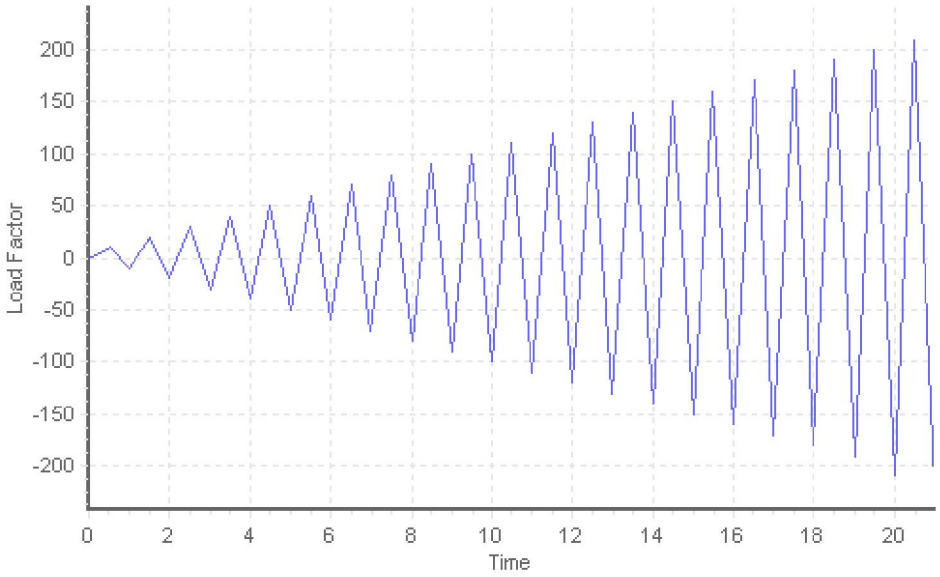
Čelični materijal definiran je granicom popuštanja u iznosu od f_y=337 N/mm^2 (srednja vrijednost iz eksperimentalnih istraživanja (točka 4.4.)), modulom elastičnosti od E=210 000 N/mm^2, pri čemu je za početak plastifikacije presjeka određena relativna deformacija od 0,16%, a slom na 20%. Stupovi i greda čeličnog okvira, s poprečnim presjecima od valjanih profila HEA 120, modelirani su neelastičnim elementima *infrmFB*, opisanima u poglavlju 5.3.2. Presjeci su podijeljeni u 100 vlakana, dok je broj integracijskih presjeka iznosio pet.

Čelični okvir, slika 5.32, osnih dimenzija *H*x*L*=1613x2176 mm oslonjen je na dva upeta ležaja pri dnu stupova, a priključci stup-greda modelirani su kao nepopustljivi.



Slika 5.32 – Izgled modela u SeismoStruct-u

Za tip analize konstrukcije odabrana je statička *time-history* analiza, u kojoj se nanesena opterećenja (sile, pomaci ili njihova kombinacija) mogu neovisno mijenjati u pseudo-vremenskoj domeni, tako da se nominalna opterećenja množe s faktorom opterećenja koji se zadaje funkcijom ovisnom o vremenu. Korištenjem ovoga tipa analize modeli ciklički opterećivani uz kontrolu pomaka, kako je prikazano na slici 5.33. Nominalni pomaci zadani su u ravnini grede okvira u iznosu od 1,5 mm.



Slika 5.33 – Opterećenje modela u *SeismoStruct-u*

5.3.3.1. Čelični okviri s ispunom od šupljih glinenih blokova

Za definiranje ponašanja zidanog ispuna u dijagonalnom smjeru korišteni su eksperimentalni podatci dobiveni istraživanjem na malim uzorcima ziđa, dok se za posmičnu dijagonalu pokazalo kako eksperimentalni rezultati iz posmičnih ispitivanja podcjenjuju vrijednost kuta unutarnjeg trenja, te je ovu vrijednost bilo nužno kalibrirati.

Širina ekvivalentne dijagonale izračunata je prema izrazu (5.1), te ona iznosi b_w=245 mm, uz parametar λ=0,00286, dok je njena duljina d_w=2583 mm.

Parametri K_1 i K_2 određeni su prema izrazu (5.26) u ovisnosti o umnošku $h\lambda$:

$$\lambda h = 0{,}00286 \cdot 1613 = 4{,}61 \rightarrow 3{,}14 < \lambda h < 7{,}85 \rightarrow K_1 = 0{,}707 \text{ i } K_2 = 0{,}01$$

Tlačna otpornost ziđa, kako je opisano u točki 5.3.1.2., uzeta je kao najmanja vrijednost od četiri moguća oblika sloma, prema izrazima (5.22) do (5.25).

Tako se uz prosječnu posmičnu otpornost uslijed dijagonalnog tlaka od f_{ws}=0,22 N/mm^2, otpornost na klizajući posmik f_{wu}=0,63 N/mm^2, te tlačnu čvrstoću ziđa od f'_w=2,0 N/mm^2, dobivaju sljedeće vrijednosti tlačnih otpornosti:

- slom dijagonalnim tlakom, izraz (5.22):

$$f_{m\theta} = \frac{0,6 \cdot f_{ws} + 0,3 \cdot \sigma_v}{\frac{b_w}{d_w}} = \frac{0,6 \cdot 0,22 + 0,3 \cdot 0}{\frac{245}{2583}} = 1,39 \ \text{N/mm}^2$$

- klizanje uslijed posmika, izraz (5.23):

$$f_{m\theta} = \frac{\left(1,2 \cdot \sin\theta + 0,45 \cdot \cos\theta\right) \cdot f_{wu} + 0,3 \cdot \sigma_v}{\frac{b_w}{d_w}}$$

$$= \frac{\left(1,2 \cdot \sin 37,04° + 0,45 \cdot \cos 37,04°\right) \cdot 0,63 + 0,3 \cdot 0}{\frac{245}{2583}} = 7,18 \ \text{N/mm}^2$$

- slom tlakom u uglovima, (5.24):

$$f_{m\theta} = \frac{1,12 \cdot f'_w \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{K_1 \cdot \left(\lambda h\right)^{-0.12} + K_2 \cdot \left(\lambda h\right)^{0.88}}$$

$$= \frac{1,12 \cdot 2,0 \cdot \sin 37,04° \cdot \cos 37,04°}{0,707 \cdot \left(0,00286 \cdot 1613\right)^{-0.12} + 0,01 \cdot \left(0,00286 \cdot 1613\right)^{0,88}} = 1,71 \ \text{N/mm}^2$$

- slom tlakom u središtu panela, (5.25):

$$f_{m\theta} = \frac{1,16 \cdot f'_w \cdot \tan\theta}{K_1 + K_2 \cdot \lambda h} = \frac{1,16 \cdot 2,0 \cdot \tan 37,04°}{0,707 + 0,01 \cdot 0,00286 \cdot 1613} = 2,31 \ \text{N/mm}^2$$

Stvarna duljina kontakta z između zidanog ispuna i stupa čeličnog okvira, te kontaktna duljina izražena kao postotak visine zidanog ispuna h_z za ovaj slučaj iznosi:

$$z = 0,5 \cdot \pi \cdot \lambda^{-1} = 0,5 \cdot \pi \cdot 0,00286^{-1} = 549,23 \ \text{mm}$$

$$h_z = \frac{z}{2,5 \cdot h_w} \cdot 100 = \frac{549,23}{2,5 \cdot 1556} \cdot 100 = 14,12 \ \%$$

Ovdje se može primijetiti kako je gore navedena duljina kontakta između zidanog ispuna i čeličnoga okvira 17 % manja u odnosu na kontaktnu duljinu od 645,20 mm, koja je proračunata za numerički model s tri zamjenske dijagonale (točka 5.2.2.1).

Horizontalni *Xoi* i vertikalni odmak *Yoi* zidanog ispuna od osi čeličnoga okvira izraženi su kao postotci od duljine/visine panela, uzimajući u obzir visinu čeličnog profila HEA 120, iznose:

$$X_{oi} = \frac{h}{2 \cdot L_w} \cdot 100 = \frac{114}{2 \cdot 2062} \cdot 100 = 2{,}76\,\%$$

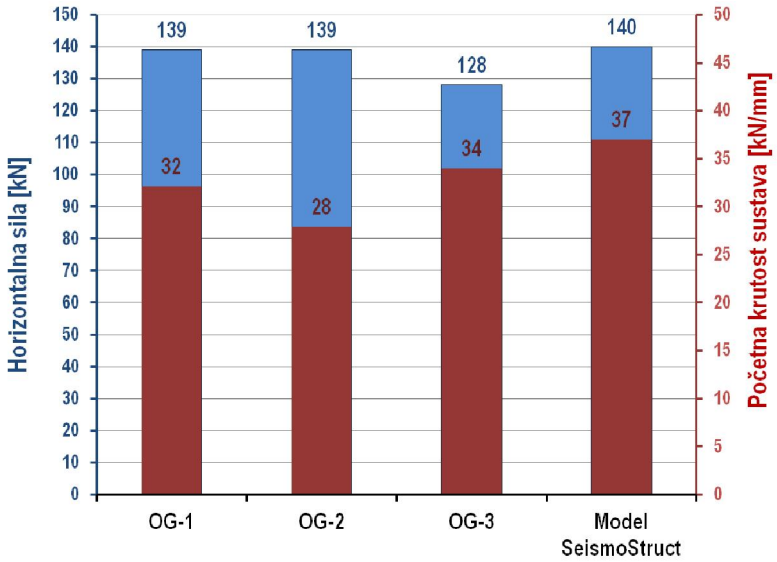
$$Y_{oi} = \frac{h}{2 \cdot h_w} \cdot 100 = \frac{114}{2 \cdot 1556} \cdot 100 = 3{,}66\,\%$$

U tablici 5.7 prikazani su osnovni parametri korišteni pri analizi čeličnog okvira s ispunom od šupljih glinenih blokova u računalnom programu *SeismoStruct*-u.

Tablica 5.7 – Parametri glinenog zidanog ispuna za ekvivalentne dijagonale

b_w [mm]	A_1 [mm^2]	A_2 [mm^2]	h_z [%]	E_m [N/mm^2]	f_m [N/mm^2]	f_t [N/mm^2]	ε_m [-]	ε_{ult} [-]	c [N/mm^2]	μ [-]	τ_{max} [N/mm^2]
245	29424	26482	14,12	4600	1,39	0,22	0,0012	0,01	0,70	0,80	1,00

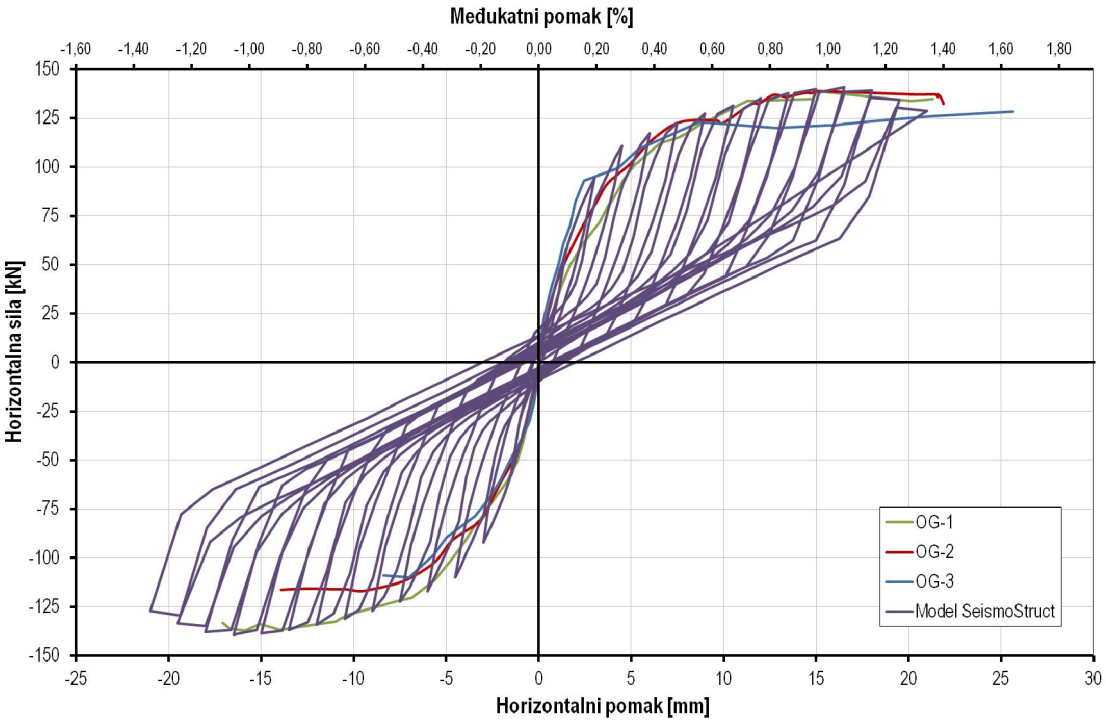
Slikom 5.34 prikazan je odnos nosivosti i početne krutosti numeričkog modela izrađenog u *SeismoStruct*-u i ispitivanih čeličnih okvira sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova (serija OG-i). Eksperimentalni rezultati daju prosječnu vrijednost nosivosti od 135 kN, dok je numeričkim modelom dobivena nosivost od 140 kN, što predstavlja razliku od 3%. Razlika u početnoj krutost veća je i iznosi 18 %, odnosno numeričkom analizom dobivena je vrijednost od 37 kN/mm, a prosječna vrijednost dobivena eksperimentalno iznosi 31 kN/mm.



Slika 5.34 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OG-i i modela izrađenog u *SesimoStruct*-u

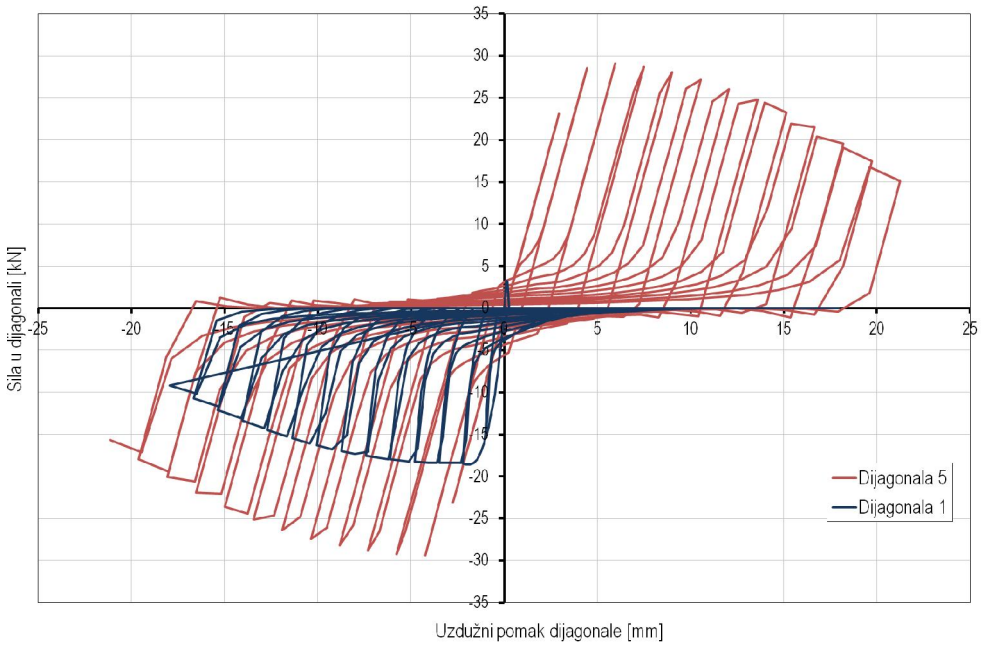
Na slici 5.35 prikazan je odnos horizontalne sile i horizontalnog pomaka u visini grede okvira za ispitivane uzorke serije OG-i i numeričkog modela. Može se primijetiti dobro poklapanje eksperimentalnih rezultata i

rezultata proračuna, pri čemu je početna krutost numeričkog modela bliža ispitanom uzorku OG-3, a nosivost modela gotovo je identična s uzorcima OG-1 i OG-2.



Slika 5.35 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i model iz *SeismoStruct*-a

Na slici 5.36 prikazane su sile u dijagonalama zidanog panela. Sile i pomaci u dijagonalama od 1 do 4 (slika 5.28) približno su iste, kao i u dijagonalama 5 i 6, pa su na slici zbog jasnijeg prikaza dane samo po jedna uzdužna (dijagonala 1) i jedna posmična dijagonala (dijagonala 5).



Slika 5.36 – Sile u dijagonalama glinenog zidanog ispuna iz modela u *SeismoStruct*-u

5.3.3.2. Čelični okviri s ispunom od porobetonskih blokova

Kao i u slučaju modeliranja glinenog ispuna, i ovdje su za ekvivalentne dijagonale korišteni eksperimentalni podatci dobiveni istraživanjem na malim uzorcima ziđa, a za posmičnu dijagonalu korišteni su podatci prema prospektu proizvođača, [44].

Parametar λ u slučaju zidanog ispuna od porobetonskih blokova iznosi 0,00204, čime se dobila širina dijagonale od b_w=281 mm i površina poprečnog presjeka dijagonale A_1=33658 mm^2.
Parametri K_1 i K_2 iznose:

$$\lambda h = 0{,}00204 \cdot 1613 = 3{,}30 \;\rightarrow\; 3{,}14 < \lambda h < 7{,}85 \;\rightarrow K_1 = 0{,}707 \text{ i } K_2 = 0{,}01$$

Uz prosječnu posmičnu čvrstoću dobivenu dijagonalnim tlačnim ispitivanjem uzoraka zidova od f_{ws}=0,24 N/mm^2, otpornost na klizajući posmik f_{wu}=0,30 N/mm^2, te tlačnu čvrstoću ziđa od f'_w=1,21 N/mm^2, vrijednosti tlačnih otpornosti, prema izrazima od (5.22) do (5.25), iznose:

- slom dijagonalnim tlakom:

$$f_{m\theta} = \frac{0{,}6 \cdot f_{ws} + 0{,}3 \cdot \sigma_v}{\frac{b_w}{d_w}} = \frac{0{,}6 \cdot 0{,}24 + 0{,}3 \cdot 0}{\frac{281}{2583}} = 1{,}33 \;\; \text{N}/\text{mm}^2$$

- klizanje uslijed posmika:

$$f_{m\theta} = \frac{\left(1{,}2 \cdot \sin\theta + 0{,}45 \cdot \cos\theta\right) \cdot f_{wu} + 0{,}3 \cdot \sigma_v}{\frac{b_w}{d_w}}$$

$$= \frac{\left(1{,}2 \cdot \sin 37{,}04° + 0{,}45 \cdot \cos 37{,}04°\right) \cdot 0{,}30 + 0{,}3 \cdot 0}{\frac{281}{2583}} = 2{,}99 \;\; \text{N}/\text{mm}^2$$

- slom tlakom u uglovima:

$$f_{m\theta} = \frac{1{,}12 \cdot f'_w \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{K_1 \cdot \left(\lambda h\right)^{-0.12} + K_2 \cdot \left(\lambda h\right)^{0.88}}$$

$$= \frac{1{,}12 \cdot 1{,}21 \cdot \sin 37{,}04° \cdot \cos 37{,}04°}{0{,}707 \cdot \left(0{,}00204 \cdot 1613\right)^{-0.12} + 0{,}01 \cdot \left(0{,}00204 \cdot 1613\right)^{0{,}88}} = 1{,}02 \;\; \text{N}/\text{mm}^2$$

- slom tlakom u središtu panela:

$$f_{m\theta} = \frac{1{,}16 \cdot f'_w \cdot \tan\theta}{K_1 + K_2 \cdot \lambda h} = \frac{1{,}16 \cdot 1{,}2 \cdot \tan 37{,}04°}{0{,}707 + 0{,}01 \cdot 0{,}00204 \cdot 1613} = 1{,}43 \;\; \text{N}/\text{mm}^2$$

Kontaktna duljina između zidanog ispuna i čeličnog okvira je:

$$z = 0{,}5 \cdot \pi \cdot \lambda^{-1} = 0{,}5 \cdot \pi \cdot 0{,}00204^{-1} = 768{,}25 \text{ mm}$$

$$h_z = \frac{z}{2{,}5 \cdot h_w} \cdot 100 = \frac{768{,}25}{2{,}5 \cdot 1556} \cdot 100 = 19{,}75\ \%$$

Horizontalni *Xoi* i vertikalni odmak *Yoi* zidanog ispuna od osi čeličnog okvira jednaki su kao i u prethodnom slučaju modela okvira s glinenim ispunom jer ovise samo o geometriji elemenata okvira i redom iznose: 2,76 % i 3,66 %.

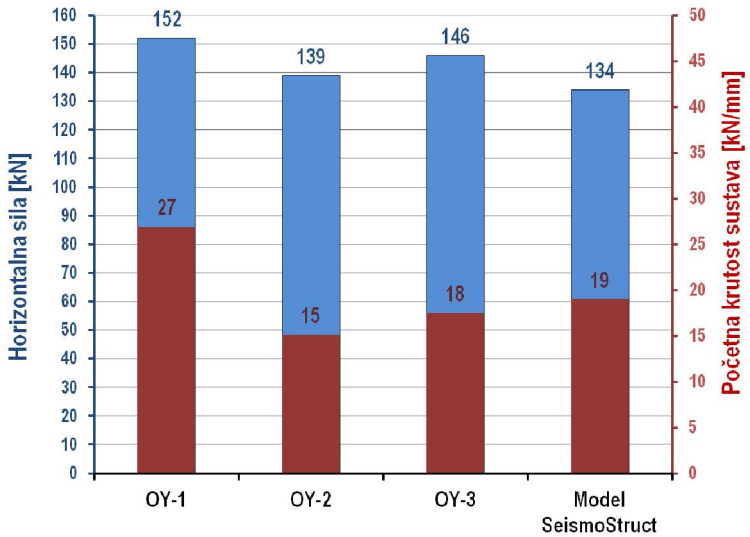
U tablici 5.8 nalaze se parametri zidanog ispuna od porobetonskih blokova za makro-model panela u *SeismoStruct*-u.

Tablica 5.8 – Parametri porobetonskog zidanog ispuna za ekvivalentne dijagonale

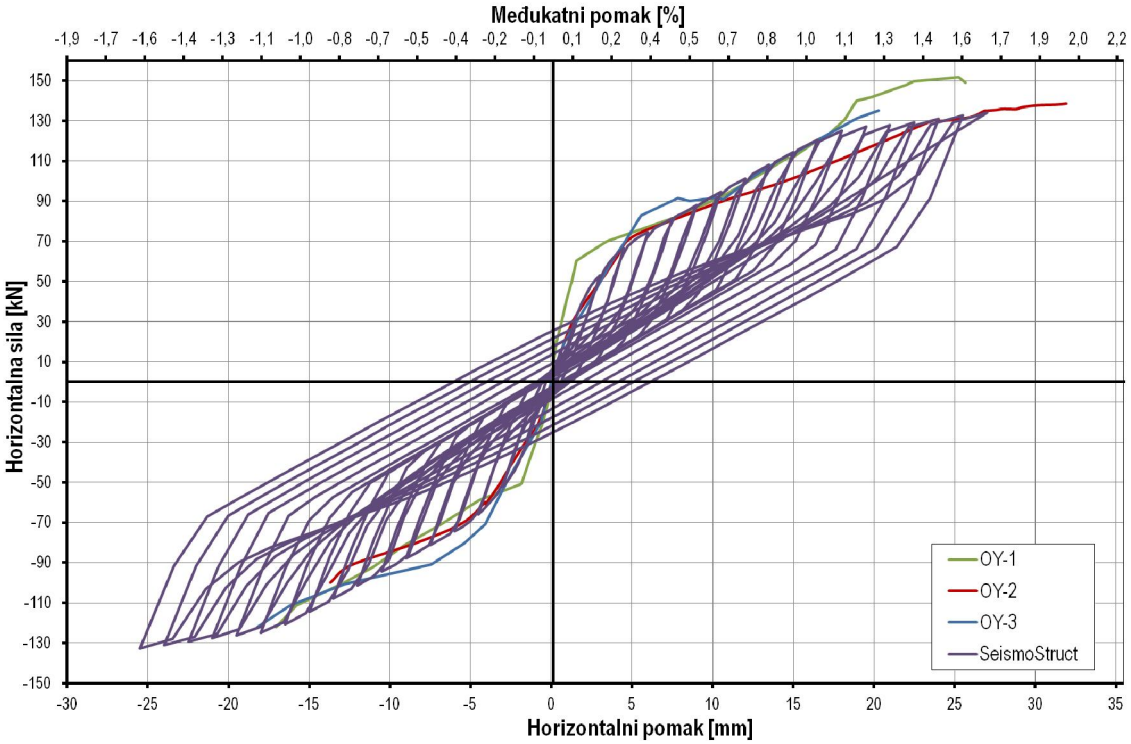
b_w [mm]	A_1 [mm^2]	A_2 [mm^2]	h_z [%]	E_m [N/mm^2]	f_m [N/mm^2]	f_t [N/mm^2]	ε_m [-]	ε_{ult} [-]	c [N/mm^2]	μ [-]	τ_{max} [N/mm^2]
281	33658	30292	19,75	1200	1,02	0,24	0,002	0,08	0,30	0,35	1,20

Slikama od 5.37 do 5.39 prikazani su rezultati proračuna modela čeličnog okvira s ispunom od porobetonskih blokova izrađenog u *SeismoStruct*-u.

Maksimalna sila koju je dostigao numerički model iznosi 134 kN, što je 8 % manje u odnosu na stvarne ispitivane modele serije OY-i. Početna krutost dobivena modeliranjem u SeismoStruct-u za 4 % manja je od prosječne izmjerene vrijednosti, odnosno iznosi 19 kN/mm.



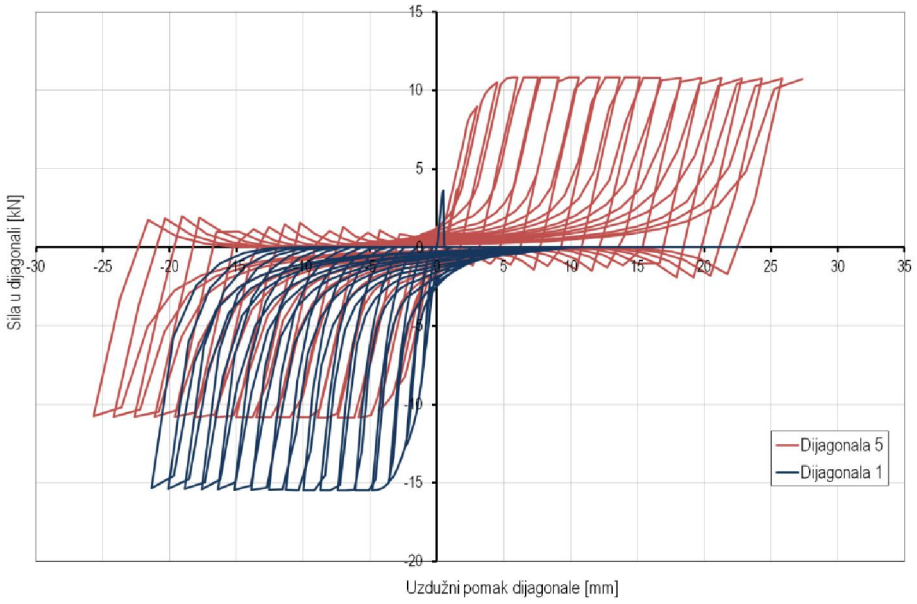
Slika 5.37 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela izrađenog u *SesimoStruct*-u



Slika 5.38 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OY-i i model iz *SeismoStruct*-a

Na dijagramu horizontalna sila - horizontalni pomak, slika 5.38, može se primijetiti dobro poklapanje histerezne petlje numeričkog modela s anvelopama ispitivanih čeličnih okvira s ispunom od porobetonskih blokova.

Najveća sila u dijagonali 1 iznosila je 15,48, a u posmičnoj dijagonali 5, vrijednost maksimalne dostignute sile iznosi 10,84 kN, slika 5.39.



Slika 5.39 – Sile u dijagonalama glinenog zidanog ispuna iz modela u *SeismoStruct*-u

5.3.3.3. Čelični okviri s kombiniranim ispunom

Pri modeliranju kombiniranoga zidanog ispuna korištena je srednja vrijednost modula elastičnosti ziđa od porobetonskih i glinenih zidanih uzoraka koja iznosi E=2900 N/mm^2.

Širina zamjenske dijagonale i parametar λ, uz identične geometrijske i materijalne karakteristike čeličnoga okvira kao i u prethodnim slučajevima, proračunati s navedenom vrijednošću modula elastičnosti, iznose b_w=257 mm i λ= 0,00255.

Umnožak parametra λ, koji opisuje odnos krutosti okvira i zidnog ispuna i visine stupa čeličnog okvira h daju vrijednost od 4,11, pa su K_1 i K_2 u istome intervalu, kako što je to bio slučaj kod glinenoga i porobetonskog ispuna, te redom iznose: 0,707 i 0,01.

Duljine kontakta z i h_z između kombiniranog zidanog ispuna i stupa čeličnog okvira iznose:

$$z = 0{,}5 \cdot \pi \cdot \lambda^{-1} = 0{,}5 \cdot \pi \cdot 0{,}00255^{-1} = 616{,}17 \text{ mm}$$

$$h_z = \frac{z}{2{,}5 \cdot h_w} \cdot 100 = \frac{616{,}17}{2{,}5 \cdot 1556} \cdot 100 = 15{,}84\ \%$$

Za vlačnu čvrstoću zidnog ispuna f_t, kao mjerodavna, usvojena je vrijednost iz ispitivanja glinenih zidova, te ona iznosi 0,22 N/mm^2, dok tlačna čvrstoća nije izračunavana preko izraza od (5.22) do (5.25), nego je za tlačnu čvrstoću usvojena prosječna vrijednost tlačne čvrstoće prošupljenih porobetonskih blokova u horizontalnom smjeru, koja iznosi 0,55 N/mm^2.

Horizontalni i vertikalni odmak zidanog ispuna od osi čeličnoga okvira (*Xoi* i *Yoi*) jednaki su kao i u prethodnim slučajevima analiziranih okvira s glinenim, odnosno porobetonskim ispunom.

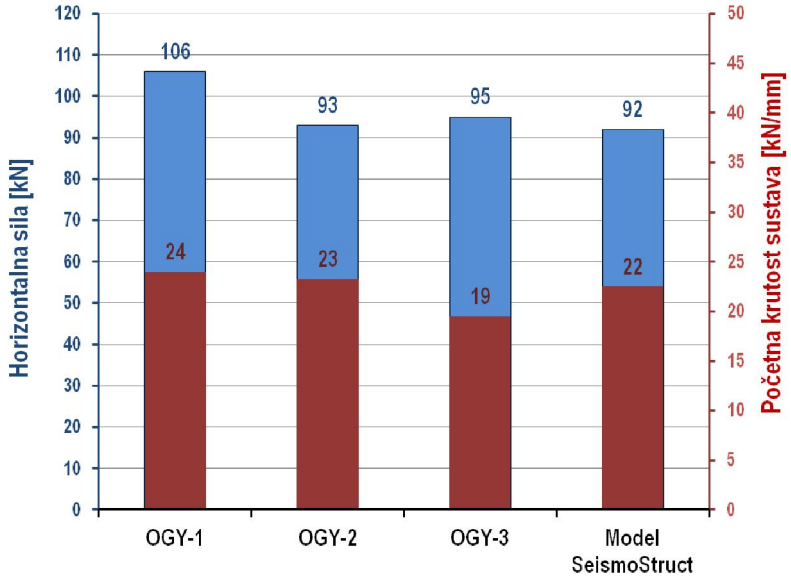
U tablici 5.9 prikazani su osnovni parametri korišteni pri analizi čeličnoga okvira s kombiniranim ispunom od šupljih glinenih i porobetonskih blokova.

Tablica 5.9 – Parametri glinenoga zidanog ispuna za ekvivalentne dijagonale

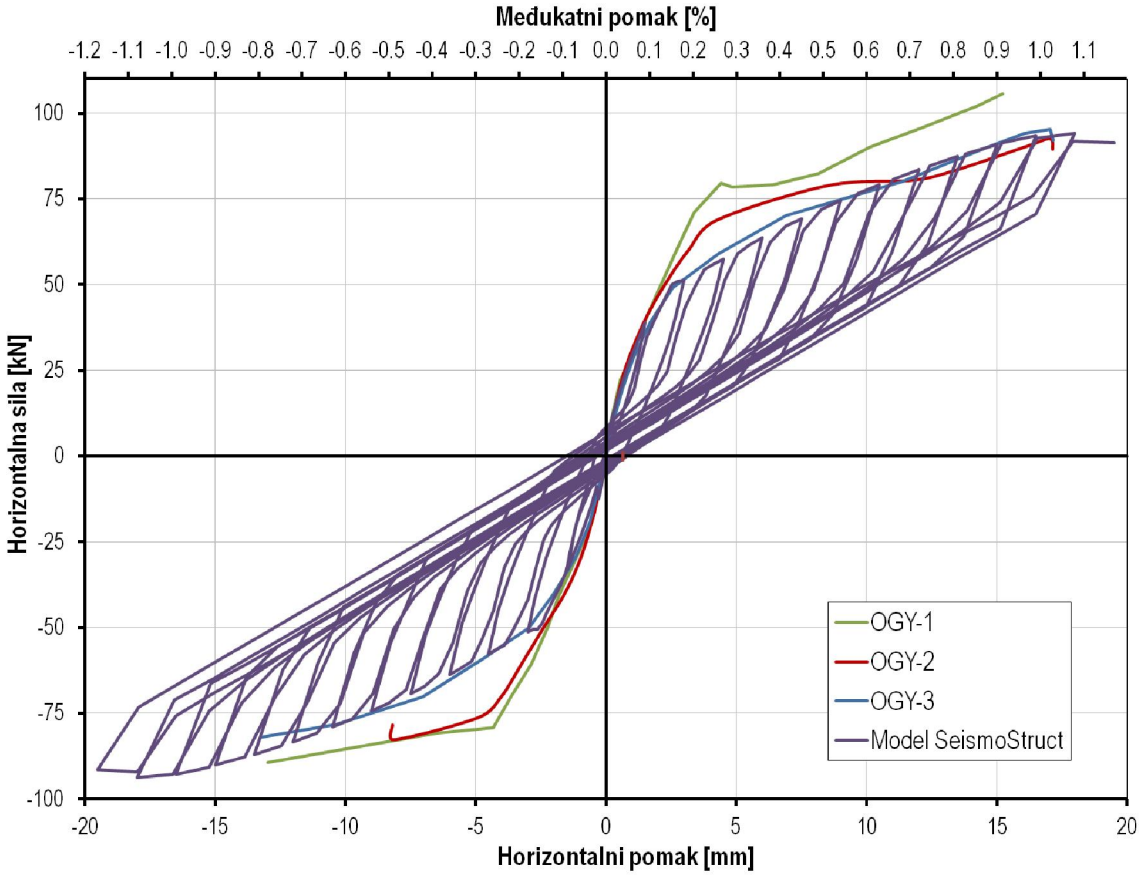
b_w [mm]	A_1 [mm^2]	A_2 [mm^2]	h_z [%]	E_m [N/mm^2]	f_m [N/mm^2]	f_t [N/mm^2]	ε_m [-]	ε_{ult} [-]	c [N/mm^2]	μ [-]	τ_{max} [N/mm^2]
257	30815	27734	15,84	2900	0,55	0,22	0,001	0,08	0,70	0,80	1,20

Nosivost numeričkog modela iznosi 92 kN, a početna krutost 22 kN/mm, slika 5.40. Ako se ove vrijednosti usporede s prosječnim vrijednostima dobivenim ispitivanjem čeličnih okvira s kombiniranim ispunom (serija OGY-i), dobiva se razlika u nosivosti od 6%, dok je početna krutost numeričkog modela jednaka prosječnoj

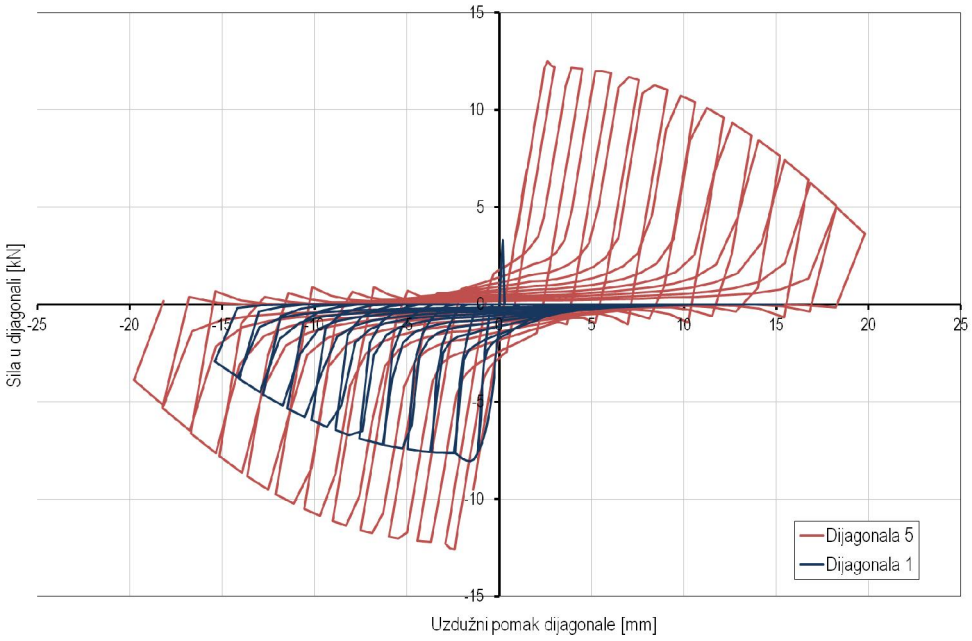
vrijednosti iz ispitivanja. Na slici 5.41 prikazana je histerezna petlja u formatu horizontalna sila – horizontalni pomak (u visini grede okvira) numeričkog modela čeličnoga okvira s kombiniranim zidnim ispunom izrađenoga u *SeismoStruct*-u, a slikom 5.42 prikazane su sile u dijagonalama panela.



Slika 5.40 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OGY-i i modela izrađenog u *SesimoStruct*-u



Slika 5.41 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OGY-i i model iz *SeismoStruct*-a



Slika 5.42 – Sile u dijagonalama kombiniranog zidanog ispuna iz modela u *SeismoStruct*-u

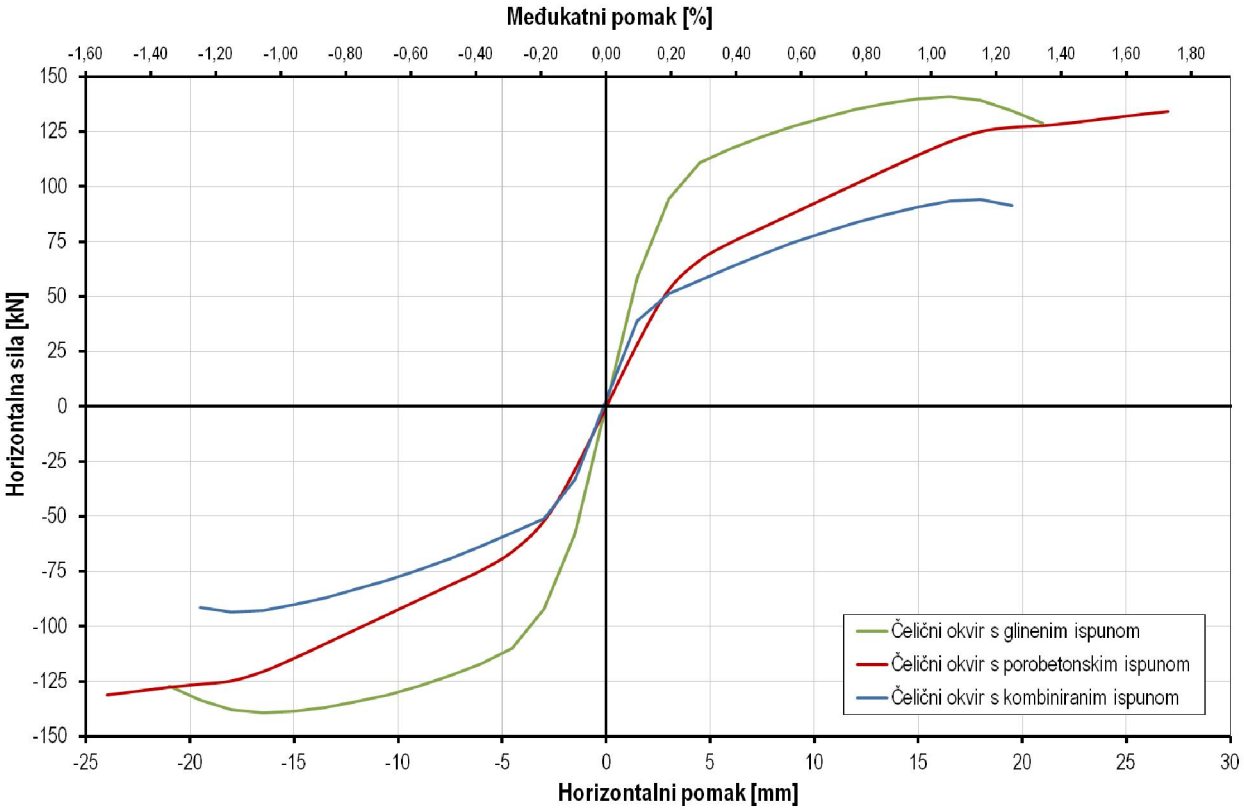
5.3.3.4. Zaključno o modelima izrađenim u *SeismoStruct*-u

Pri izradi modela čeličnih okvira s ispunima od glinenih i porobetonskih zidnih elemenata za definiranje ponašanja u dijagonalnom smjeru korišteni su eksperimentalni rezultati tlačnih i vlačnih čvrstoća, te modula elastičnosti. Za ponašanje ispuna pri posmičnim naprezanjima kod glinenih elemenata korištena je eksperimentalna vrijednost početne posmične čvrstoće i kalibrirana vrijednost kuta unutarnjeg trenja, a za porobetonski ispun upotrijebljeni su podatci prema prospektu proizvođača. Modeliranje čeličnoga okvira s kombiniranim ispunom zahtijevalo je nešto drugačiji pristup, zbog specifičnog ponašanja ove vrste ispuna, pa je tako za modul elastičnosti usvojena prosječna vrijednost modula elastičnosti glinenih i porobetonskih zidnih prizmi, a tlačna čvrstoća ispuna definirana je kao srednja vrijednost tlačne čvrstoće prošupljenih porobetonskih elemenata u horizontalnom smjeru jer taj način gubitka nosivosti jasno bio uočen pri eksperimentalnim ispitivanjima fizikalnih modela serije OGY-i.

Pokazalo se da, osim gore nabrojanih parametara, na rezultate proračuna najveći utjecaj ima definiranje početne i rezidualne površine zamjenske dijagonale, kao i pripadne deformacije pri kojima se događa smanjivanje površine (slika 5.29), kao i deformacija pri najvećem naprezanju te granična deformacija.

Slikom 5.43 prikazane su anvelope ponašanja čeličnih okvira s trima različitim vrstama ispuna iz koje je vidljivo kako najveću otpornost na horizontalne sile ima okvir s glinenim ispunom (140 kN), a najmanju okvir s kombiniranim ispunom (92 kN). Najmanju početnu krutost imao je model okvira s porobetonskim ispunom (19 kN/mm), a najveću model s glinenim ispunom (37 kN/mm), dok se početna krutost sustava s kombiniranim ispunom nalazi između ove dvije vrijednosti (22 kN/mm).

Oblici anvelopnih krivulja podudaraju se s eksperimentalnim rezultatima – anvelopa modela čeličnoga okvira s glinenim ispunom zaobljenija je u odnosu na anvelope modela s porobetonskim i kombiniranim ispunom.



Slika 5.43 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak numeričkih modela iz *SeismoStruct*-a

Iako modeliranje ovakvih tipova konstrukcija u programskom paketu *SeismoStruct* zahtijeva veći broj parametara u odnosu na modele sa zamjenskim dijagonalama, može se relativno brzo uz zadržavanje većine programom preporučenih vrijednsoti parametara, dobiti pouzdanija procjena ponašanja sustava. Upravo je zbog većega broja parametara, kojima se određuje ponašanje zidanog ispuna, lakše provesti kalibraciju numeričkih modela u ovome programskome paketu u odnosu na modele s dijagonalama kod kojih je „prostor“ pri kalibriranju prilično ograničen.

5.4. Modeliranje čeličnih okvira sa zidanim ispunom metodom konačnih elemenata

Modeliranje čeličnih okvira sa zidanim ispunom metodom konačnih elemenata provedeno je programskim paketom *ATENA 2D*, [64, 65]. Za zidni ispun korišteni su principi mikro-modeliranja, gdje se zidani elementi (blokovi) modeliraju kao zasebni elementi koji se u jednu cjelinu (zidani ispun) povezuju kontaktnim elementima. Za model materijala blokova korišten je *SBETA* model, namijenjen prvenstveno modeliranju betonskih konstrukcija, dok je za kontaktne elemente odabran Mohr-Coulombov model ponašanja. U nastavku je prikazan opis modela materijala *SBETA* i kontaktnih elemenata.

5.4.1. Koncept ponašanja modela materijala *SBETA*

Model materijala SBETA uključuje sljedeće karakteristike ponašanja betona:

- nelinearno ponašanje pri tlaku uključujući očvršćivanje i omekšavanje,
- pukotinsko stanje u vlaku temeljeno na nelinearnoj mehanici loma,
- kriterij sloma u dvoosnom stanju naprezanja,
- smanjenje tlačne čvrstoće nakon raspucavanja,
- efekt očvršćavanja pri vlaku,
- smanjenje posmične krutosti nakon raspucavanja,
- dvije vrste modela pukotina: pukotine “fiksnog” i “zarotiranog” smjera.

Pri modeliranju armirano-betonskih konstrukcija koristi se koncept *razmazane* (eng. smeared) armature koji pretpostavlja idealnu vezu između betona i armature. Proklizavanje veze ne može se direktno modelirati, osim ako se ono ne uzme u obzir prilikom zadavanja vlačnog očvršćavanja. Međutim, u mikro-modelima može se pojaviti relativno proklizavanje armature u odnosu na beton na određenoj duljini, ukoliko je došlo do raspucavanja ili drobljenja betona. Ovo odgovara stvarnome mehanizmu sloma veze u slučaju rebraste armature.

Armatura u oba načina zadavanja, razmazana ili diskretna, nalazi se u jednoosnom stanju naprezanja te je njezino ponašanje definirano više-linearnim dijagramom naprezanje-deformacija.

Matrica masa sastavlja se koristeći nelinearni elastični pristup. U ovome pristupu elastične konstante dobivaju se pomoću funkcije odnosa naprezanje-deformacija, što nazivamo ekvivalentnim jednoosnim zakonom. Ovaj pristup sličan je nelinearnom hipoelastičnom konstitutivnom modelu, jedino što se ovdje koriste drugačije zakonitosti za opterećivanje i rasterećivanje, što uzrokuje disipaciju energije pri

oštećivanju materijala. Ovaj pristup može se smatrati izotropnim modelom oštećenja s modulom rasterećenja koji predstavlja modul oštećenja.

5.4.1.1. Veza naprezanje-deformacija SBETA modela

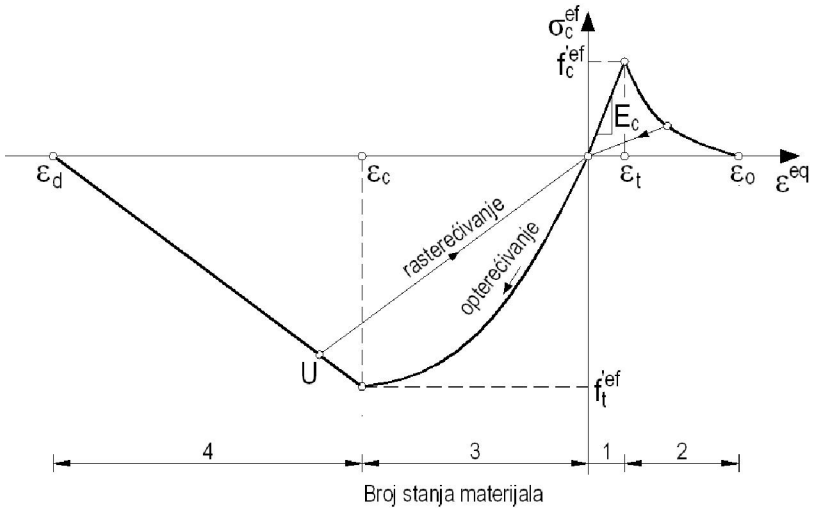
5.4.1.1.1. Ekvivalentna jednoosna zakonitost

Nelinearno ponašanje betona u dvoosnom stanju naprezanja opisano je korištenjem takozvanog efektivnog naprezanja σ_c^{ef} i ekvivalentne jednoosne deformacije ε^{eq}. Efektivno naprezanje u većini je slučajeva glavno naprezanje.

Ekvivalentna jednoosna deformacija uvedena je kako bi se eliminiralo Poissonov efekt u ravninskome stanju naprezanja.

$$\varepsilon^{eq} = \frac{\sigma_{ci}}{E_{ci}} \tag{5.27}$$

Ekvivalentna jednoosna deformacija može se promatrati kao deformacija do koje će doći pri naprezanju σ_{ci} u vlačnom testu s modulom elastičnosti E_{ci} povezano sa smjerom i. U ovoj pretpostavci, nelinearnost koja predstavlja oštećenje, uzrokovana je samo odgovarajućim naprezanjem σ_{ci}. Ekvivalentan jednoosni dijagram naprezanje-deformacija za beton, prikazan je na slici 5.44.



Slika 5.44 - Jednoosni dijagram naprezanje-deformacija za beton

Brojevi na dijagramu (broj stanja materijala) koriste se u rezultatima analize kako bi predočili stupanj oštećenja betona.

Rasterećenje je linearna funkcija do ishodišta. Primjer točke rasterećenja *U* prikazan je na slici 5.44. Zbog toga veza između naprezanja σ_c^{ef} i deformacije ε^{eq} nije jedinstvena i ovisi o povijesti opterećivanja. Promjena s opterećivanja na rasterećivanje nastaje kada inkrement efektivnog naprezanja promijeni svoj predznak. Ako dolazi do ponovnog opterećivanja, prati se linearni put rasterećenja dok ono ne stigne do točke *U* , koja je bila prethodna točka opterećenja. Tada se funkcija opterećenja nastavlja.

Vršne vrijednosti naprezanja u tlaku f'^{ef}_c i vlaku f'^{ef}_t računaju se prema dvoosnom stanju naprezanja. Zbog toga ekvivalentna jednoosna zakonitost naprezanje-deformacija odražava dvoosno stanje naprezanja.

Gore definirana veza naprezanje-deformacija koristi se za izračun modula elastičnosti za matricu krutosti materijala. Sekantni modul izračuna se pomoću izraza:

$$E_c^s = \frac{\sigma_c}{\varepsilon^{eq}} \tag{5.28}$$

On se koristi u konstitutivnim jednadžbama za izračun naprezanja za dano stanje deformacija.

Tangentni modul E_c^t koristi se u matrici materijala $\boldsymbol{D}_c$ za formiranje matrice krutosti elementa za iterativno rješenje. Tangentni modul nagib je krivulje naprezanje-deformacija pri određenoj deformaciji. Uvijek je pozitivan. U slučaju kada je nagib krivulje manji od minimalne vrijednosti E_{min}^t , vrijednost tangentnog modula uzima se kao $E_c^t=E_{min}^t$. Ovo se događa u zonama omekšavanja i pri ekstremnim vrijednostima tlačnih naprezanja.

Detaljan opis zakonitosti naprezanje-deformacija dan je u sljedećem odlomku.

5.4.1.1.2. Vlak prije raspucavanja

Ponašanje betona u vlaku bez pukotina pretpostavlja se kao linearno elastično. E_c početni je modul elastičnosti betona, f'^{ef}_t efektivna je vlačna čvrstoća određena iz dvoosne funkcije sloma.

$$\sigma_c^{ef} = E_c \varepsilon^{eq}, \qquad 0 \le \sigma_c \le f_t'^{ef} \tag{5.29}$$

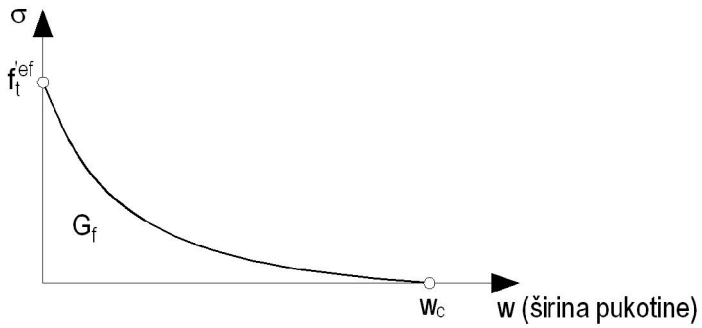
5.4.1.1.3. Vlak nakon raspucavanja

Koriste se dva tipa formulacija za širenje pukotina:

1) Model fiktivne pukotine temeljen na zakonu širenja pukotine i energiji loma. Ova formulacija prikladna je za modeliranje razvoja pukotine u betonu. Koristi se u kombinaciji sa zonom pukotine.
2) Odnos naprezanje-deformacija u određenoj točki materijala. Ova formulacija nije prikladna za uobičajene slučajeve razvoja pukotine u betonu i potrebno ju je koristiti samo u posebnim slučajevima.

U sljedećim odlomcima opisano je pet modela omekšavanja koje je moguće zadati u *SBETA* modelu ponašanja materijala.

(1) Eksponencijalna zakonitost širenja pukotine



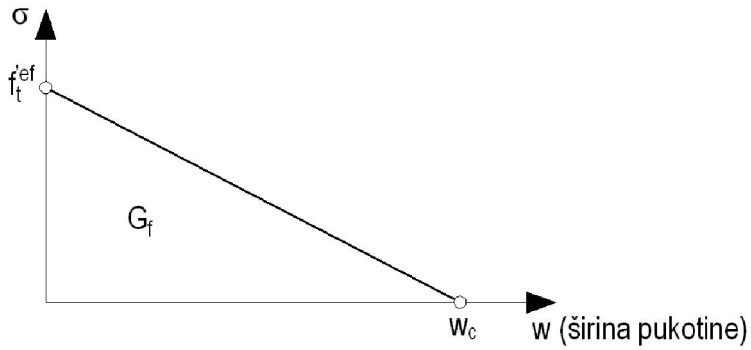
Slika 5.45 - Eksponencijalna zakonitost širenja pukotine

Funkcija širenja pukotine:

$$\frac{\sigma}{f_t'^{ef}} = \left\{1+\left(c_1\frac{w}{w_c}\right)^3\right\}\exp\left\{-c_2\frac{w}{w_c}\right\} - \frac{w}{w_c}\left(1+c_1^3\right)\exp\left(-c_2\right)$$
$$w_c = 5{,}14\frac{G_f}{f_t'^{ef}} \tag{5.30}$$

Gdje su w širina pukotine, w_c širina pukotine pri kojoj dolazi do potpunog iščezavanja naprezanja, σ normalno naprezanje u pukotini. Vrijednosti konstanti su kako slijedi, c_1=3, c_2=6,93. G_f je energija loma potrebna za stvaranje jedinične ploštine pukotine bez naprezanja, $f'_t{}^{ef}$ je efektivno vlačno naprezanje određeno pomoću funkcije loma.

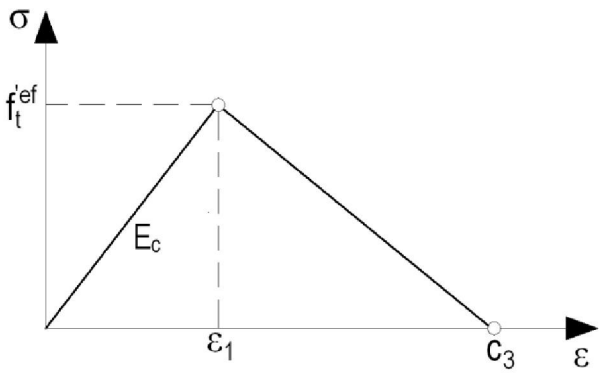
(2) Linearna zakonitost širenja pukotine



Slika 5.46 - Linearna zakonitost širenja pukotine

$$\frac{\sigma_c^{ef}}{f_t'^{ef}} = \frac{f_t'}{w_c}\left(w_c - w\right), \qquad w_c = \frac{2\cdot G_f}{f_t'} \tag{5.31}$$

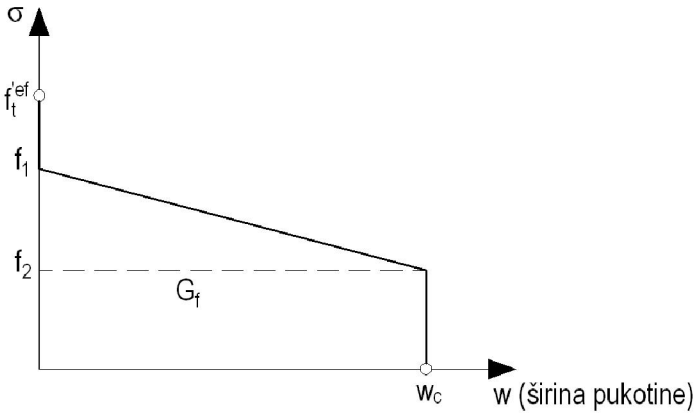
(3) Linearno omekšanje temeljeno na lokalnim deformacijama



Slika 5.47 - Linearno omekšanje temeljeno na deformacijama

Padajuća grana dijagrama naprezanje-deformacija definirana je s deformacijom c_3 koja odgovara nultom naprezanju (naprezanje potpuno iščezava).

(4) Model temeljen na energiji loma



Slika 5.48 - Model temeljen na energiji loma

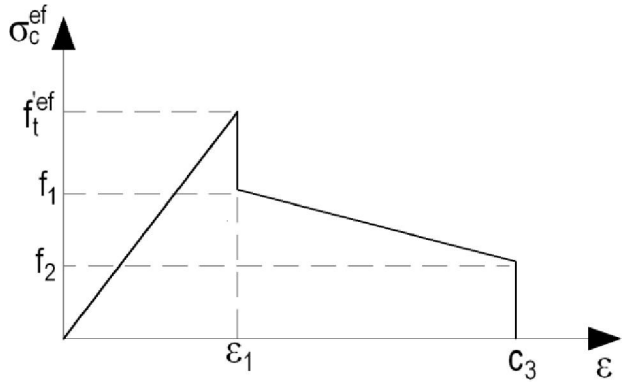
Parametri potrebni za definiranje ovoga modela mogu se odrediti prema sljedećim izrazima::

$$c_1 = \frac{f_1}{f_t'^{ef}} \tag{5.32}$$

$$c_2 = \frac{f_2}{f_t'^{ef}} \tag{5.33}$$

$$w_c = \frac{2G_f}{f_1 + f_2} \tag{5.34}$$

(5) Model temeljen na deformaciji



Slika 5.49 - Model temeljen na deformaciji

Parametri za ovaj model računaju se prema izrazima:

$$c_1 = \frac{f_1}{f_t'^{ef}} \tag{5.35}$$

$$c_2 = \frac{f_2}{f_t'^{ef}} \tag{5.36}$$

Parametri c_1 i c_2 su relativne pozicije razina naprezanja, a c_3 je krajnja deformacija.

5.4.1.1.4. Tlak prije maksimalnog naprezanja

Zakonitost naprezanje-deformacija za model materijala *SBETA* u tlaku prikazana je na slici 5.50. Ova jednadžba omogućuje široki spektar oblika krivulja, od linearne do zaobljene, i prikladna je kako za normalne, tako i za betone visoke čvrstoće.

$$\sigma_c^{ef} = f_c'^{ef} \frac{kx - x^2}{1 + (k-2)x}, \quad x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}, \quad k = \frac{E_0}{E_c} \tag{5.37}$$

gdje je:

σ_c^{ef} – tlačno naprezanje betona,

f'^{ef}_c – efektivna tlačna čvrstoća betona

x – normalizirana deformacija,

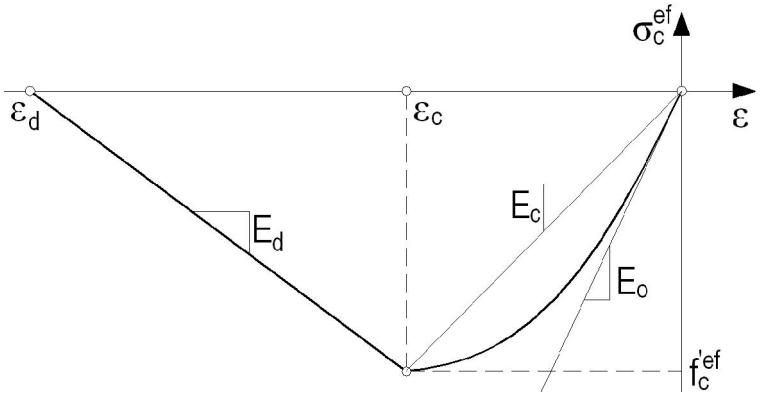
ε – deformacija,

ε_c – deformacija pri vršnom naprezanju f'^{ef}_c,

k – parametar oblika,

E_0 – početni modul elastičnosti,

E_c – sekantni modul elastičnosti pri vršnom naprezanju, $E_c = \frac{f_c'^{ef}}{\varepsilon_c}$



Slika 5.50 - Dijagram naprezanje-deformacija *SBETA* modela izloženog tlačnim naprezanjima

Parametar *k* u izrazu (5.37) može imati bilo koju pozitivnu vrijednost veću ili jednaku 1 (Primjer: *k*=1 linearna ovisnost, *k*=2 parabola). Kao posljedica prethodne pretpostavke promatra se raspodijeljeno oštećenje prije dostizanja vršnog naprezanja Ovo je suprotno lokaliziranome oštećenju koje nastaje nakon vršnog opterećenja.

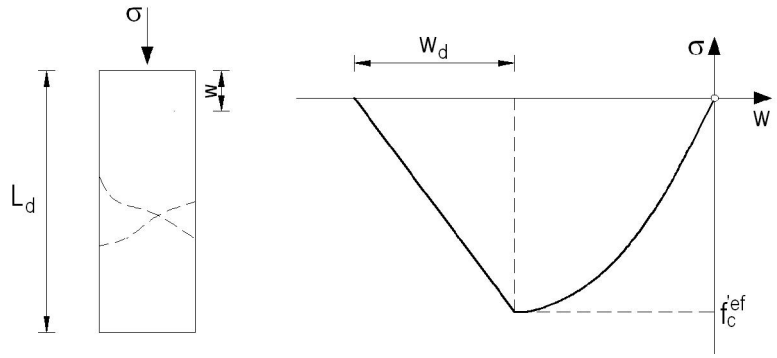
5.4.1.1.5. Tlak nakon maksimalnog naprezanja

Zakonitost omekšavanja u tlaku je linearno padajuća. Postoje dva modela omekšanja deformacija u tlaku: jedan temeljen na disipiranoj energiji, a drugi temeljen na lokalnom omekšanju deformacije.

1) Model fiktivne tlačne ravnine

Model fiktivne tlačne ravnine temelji se na pretpostavci kako je tlačni slom lokaliziran u ravnini okomitoj na smjer glavnih tlačnih naprezanja. Sve tlačne deformacije i disipacije energije, nastale nakon vršne vrijednosti, lokalizirane su u ovoj ravnini. Pretpostavljeno je kako su deformacije neovisne o veličini konstrukcije. Ova pretpostavka analogna je teoriji fiktivne pukotine u vlaku, gdje su oblik zakonitosti nastanka pukotine i energija loma definirani i uzimaju se u obzir kao materijalne karakteristike.

U slučaju tlaka, krajnja točka krivulje omekšanja definirana je pomoću plastične deformacije w_d. Na ovaj način, indirektno je definirana energija potrebna za nastanak jedinične ploštine ravnine sloma. Vrijednost w_d=0,5 mm koristi se kao uobičajena pri definiranju omekšanja u tlaku.



Slika 5.51 - Zakonitost omekšanja deformacija u tlaku

Zakonitost omekšanja preslikava se s fiktivne ravnine sloma, slika 5.51. na odnos naprezanje-deformacija, dobiven za odgovarajući volumen kontinuiranog materijala, slika 5.50. Nagib dijela dijagrama naprezanje-deformacija, koji predstavlja omekšanje, definira se s dvije točke: kao vršna vrijednost dijagrama pri maksimalnom naprezanju i kao granica tlačne deformacije ε_d pri naprezanju jednakom nuli. Ovo naprezanje izračunato je pomoću plastične deformacije w_d i zone pukotine L'_d prema sljedećem izrazu:

$$\varepsilon_d = \varepsilon_c + \frac{w_d}{L'_d} \tag{5.38}$$

Prednost ove formulacije je smanjena ovisnost o veličini mreže konačnih elemenata.

2) Zakonitost omekšanja u tlaku temeljena na deformaciji

Nagib zakonitosti omekšanja definiran je koristeći modul elastičnosti omekšanja E_d. Ova formulacija ovisna je o veličini mreže konačnih elemenata.

5.4.2. Model ponašanja kontaktnog elementa

Kontaktni element koristi se za simulaciju kontakta između dvaju materijala, kao na primjer, veze između dvaju betonskih segmenata ili kontakata između temelja i betonske konstrukcije. Materijal kontaktnoga elementa temeljen je na Mohr-Coulombovom kriteriju uz ograničenje vlačnih naprezanja. Veza za općeniti trodimenzionalni slučaj dana je kroz trenje na kontaktnim površinama i relativnog klizanja te deformaciji pri kojoj dolazi do otvaranja veze.

$$\begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tt} & 0 & 0 \\ 0 & K_{tt} & 0 \\ 0 & 0 & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta u \end{Bmatrix} \tag{5.39}$$

Za dvodimenzionalne probleme drugi red i stupac zanemaruju se.

Početna ploha sloma odgovara Mohr-Coulombovom kriteriju, izrazi (5.40) do (5.42), s elipsoidom u području vlaka. Nakon što naprezanja prekorače ovaj uvjet, ploha se steže u rezidualnu plohu koja odgovara suhome trenju.

$$\sigma \le 0: \quad |\tau| \le c - \sigma \cdot \phi, \tag{5.40}$$

$$0 < \sigma \le f_t: \quad \tau = \tau_0 \sqrt{1 - \frac{(\sigma - \sigma_c)^2}{(f_t - \sigma_c)^2}}, \qquad \tau_0 = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_c^2}{(f_t - \sigma_c)^2}}}, \quad \sigma_c = -\frac{f_t^2 \phi}{c - 2 f_t \phi} \tag{5.41}$$

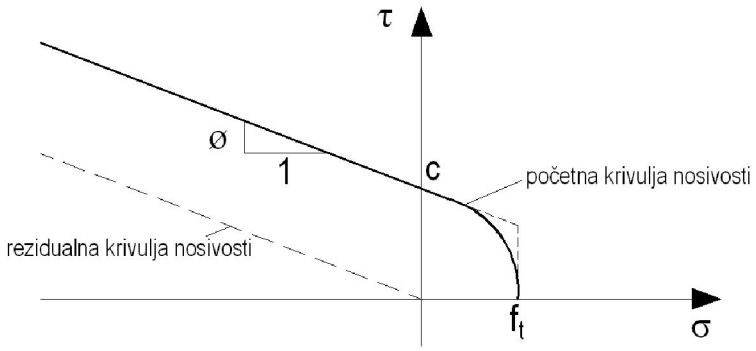
$$\sigma > f_t: \quad \tau = 0 \tag{5.42}$$

U vlaku, uvjet sloma zamijenjen je elipsoidom koja vertikalnom tangentom siječe os normalnih naprezanja pri vrijednosti f_t, a os posmičnih naprezanja pri vrijednosti c (kohezija) s tangentom jednakom $-\phi$.

Parametri kontaktnoga elementa ne mogu biti zadani proizvoljno, postoje određene ovisnosti parametara. Pri zadavanju parametara potrebno je zadovoljiti sljedeće zakonitosti:

$$\begin{aligned} &f_t < \frac{c}{\phi}, && f_t < c \\ &c > 0, && f_t > 0, && \phi > 0 \end{aligned} \tag{5.43}$$

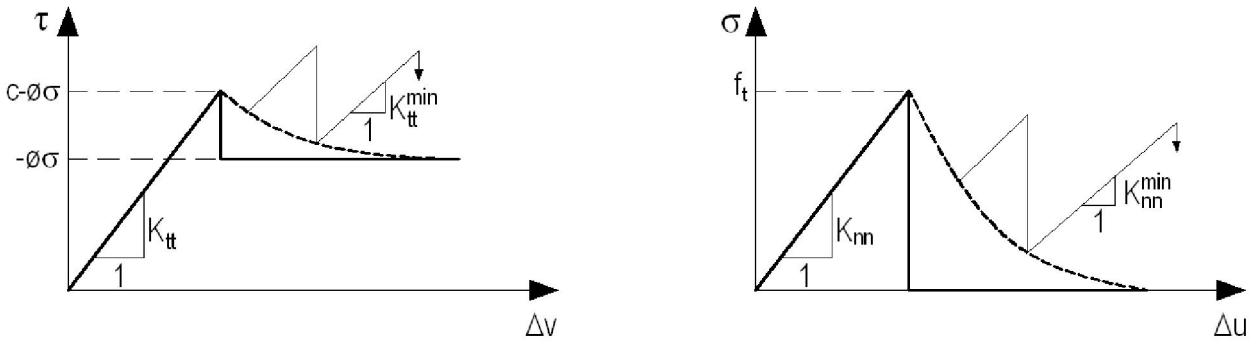
Preporučeno je parametre c, f_t, ϕ uvijek uzeti veće od nule. U slučajevima kada nema vlačne sile ili kohezije, preporučuje se zadati nekakve vrlo male vrijednosti.



Slika 5.52 – Model ponašanja kontaktnog elementa

U općenitom trodimenzionalnom slučaju τ se izračunava prema izrazu:

$$\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \tag{5.44}$$



a) b)

Slika 5.53 - Tipični modeli ponašanja kontaktnog elementa pri posmiku (a) i vlaku (b)

K_{nn} i K_{tt} predstavljaju početnu elastičnu normalnu i posmičnu krutost. Za kontaktne elemente s debljinom jednakom nuli vrijednosti ovih krutosti odgovaraju velikome broju. Preporučuje se ne uzimati jako velike vrijednosti jer u suprotnom može doći do numeričke nestabilnosti. Preporučuje se procijeniti veličinu krutosti prema sljedećim izrazima:

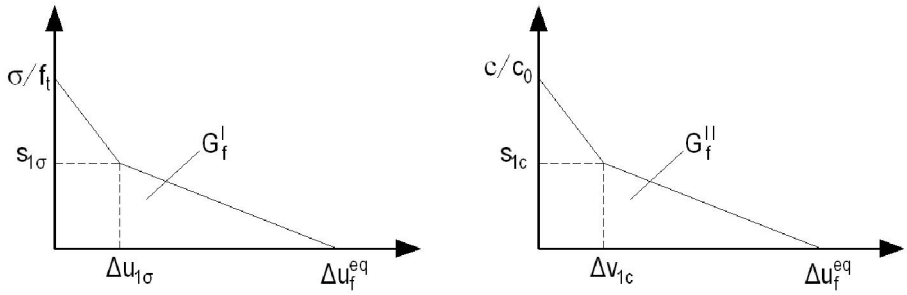
$$K_{nn} = \frac{E}{t}, \qquad K_{tt} = \frac{G}{t} \tag{5.45}$$

gdje su E i G minimalni elastični, odnosno posmični moduli elastičnosti materijala koji okružuju kontaktni element. t je debljina kontaktne zone, a njegova vrijednost može se izabrati na temelju stvarnoga stanja. Na primjer, za mort između opeka ova vrijednost je oko 10 do 20 mm. Nasuprot ovome, može se pretpostaviti izmjera koja se može zanemariti u odnosu na veličinu konstrukcije. Na primjer, za analizu brana, gdje je izmjera brane najčešće reda veličine stotinjak metara, debljina kontaktne zone može se pretpostaviti oko 0,5 m. Prihvatljivo je zbog numeričkih razloga da krutost bude 10 puta veća od krutosti okolnih konačnih elemenata.

Postoje još dvije dodatne krutosti koje je potrebno definirati. Na slici 5.53 označene kao K_{nn}^{min} i K_{tt}^{min}. Koriste se samo zbog numeričkih razloga nakon sloma elementa kako bi se očuvale pozitivne vrijednosti globalnoga sustava jednadžbi. Teorijski, nakon sloma kontaktnog elementa krutost kontakta trebala bi pasti na nulu, što znači da globalna krutost postaje neodrediva. Ove minimalne krutosti trebale bi biti oko 1000 puta manje od početnih normalnih i pomičnih krutosti K_{nn} i K_{tt}.

Moguće je definirati zakonitosti za vlačno i posmično omekšavanje proizvoljnim više-linearnim zakonom. Primjeri takvih zakona dani su na slici 5.54. Slika prikazuje bilinearnu zakonitost omekšavanja. Točka loma može se odrediti iz:

$$s_1 = \frac{f_t}{4}, \; v_1 = 0{,}75\frac{G_F}{f_t} \tag{5.46}$$



Slika 5.54 - Primjer zakonitosti omekšavanja za vlak i koheziju

Zakonitost ovisi o ekvivalentnom nelinearnom relativnom pomaku kontaktnog elementa:

$$\text{za 3D elemente: } \Delta u_{eq}{}^{f} = \sqrt{\Delta u_f{}^2 + \Delta v_{f1}{}^2 + \Delta v_{f2}{}^2} \tag{5.47}$$

$$\text{za 2D elemente: } \Delta u_{eq}{}^{f} = \sqrt{\Delta u_f{}^2 + \Delta v_f{}^2} \tag{5.48}$$

Gdje su Δu_f i Δv_{fi} neelastične komponente relativnoga pomaka kontaktnog elementa na temelju njihove dekompozicije u elastični i nelinearni dio, tj. pukotinski dio.

$$\Delta u = \Delta u_e + \Delta u_f \tag{5.49}$$

$$\Delta v_i = \Delta v_i + \Delta v_{fi} \tag{5.50}$$

Ovakav pristup omogućava degradaciji u posmiku utjecaj na vlačnu čvrstoću i obratno. Na primjer, kada je kontaktni element oštećen u posmiku, vlačna čvrstoća također je smanjena. Tipično ponašanje modela kontaktnog elementa sa zakonitošću omekšanja prikazano je na slici 5.53 s točkastom linijom. Uobičajeno ponašanje, kada nema zakonitosti omekšanja, dano je kao krto s trenutnim smanjenjem vlačne čvrstoće na nulu. Ponašanje je prikazano na slici 5.53 punom linijom.

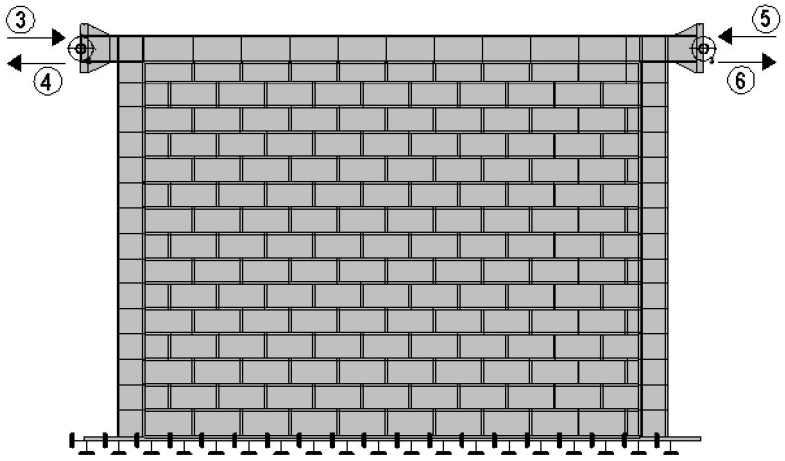
Kada korisnik definira zakonitost omekšanja za kontaktni element, preporučuje se da zakonitost omekšanja za koheziju uvijek bude duktilnija od one za vlačnu čvrstoću, tj. kohezija bi trebala biti veća nego vlačna čvrstoća u bilo kojem trenutku tijekom cijeloga procesa omekšanja.

5.4.3. Rezultati proračuna metodom konačnih elemenata

Kao i u prethodnim modelima i načinima modeliranja, čelik je i ovdje modeliran s granicom popuštanja f_y=337 N/mm^2, modulom elastičnosti od E=210 000 N/mm^2 i Poissonovim koeficijentom ν=0,30. Za njegovo ponašanje izabran je elastični-idealno plastični model.

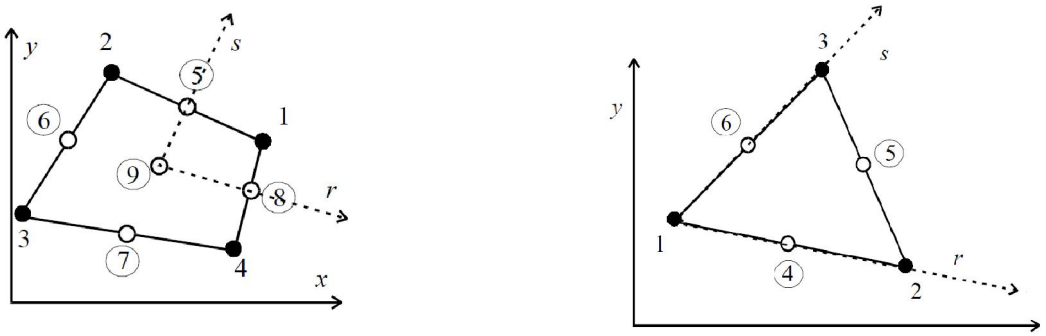
Za opterećenje je korištena kontrola pomaka, a svi rezultati dobiveni su cikličkom analizom na način da je okvir prvo guran u jednu stranu, vraćen u početni položaj, te potom za isti iznos pomaka guran u drugu stranu, nakon čega slijedi ponavljanje postupka uz povećanje konačne vrijednosti pomaka u odnosu na prethodni ciklus opterećivanja. Za rješavanje sustava nelinearnih jednadžbi odabrana je metoda Newton-Raphson.

Kako bi se izbjegle koncentracije naprezanja, u modelu su napravljeni prepusti grede preko stupova te je modelirana i ploča debljine 20 mm, preko koje se opterećenje unosilo u okvir sa zidanim ispunom, slika 5.55. Također, na spojevima stupova i grede (čelični profili HEA 120) modelirana su i poprečna ukrućenja debljine 8 mm. Numerički model izrađen na ovaj način potpuno je isti eksperimentalno ispitanom fizikalnom modelu.



Slika 5.55 – Model čeličnog okvira sa zidanim ispunom izrađen programskom paketu u *ATENA 2D*

U modelu prikazanom na slici 5.55, nije modelirana cijela ležajna greda, koja se sastojala od profila HEB 220, nego samo njena gornja pojasnica (debljine t_f=16,0 mm i širine b=220 mm) na koju su postavljeni nepomični ležajevi cijelom njenom duljinom zbog nepotrebnog usložnjavanja ionako složenoga modela. U numeričkom modelu svaki zidni element (glineni šuplji blok ili porobetonski blok) modeliran je zasebno pomoću plošnih konačnih elemenata i modela materijala *SBETA*. Pri izradi modela čeličnih okvira sa zidanim ispunom korišteni su četverostrani konačni elementi s devet čvorova i trostrani konačni elementi sa šest čvorova. U programskom paketu ATENA 2D ovi elementi nazivaju se *CCIsoQuad* i *CCIsoTriangle*, a prikazani su na slici 5.56.



a) CCIsoQuad b) CCIsoTriangle

Slika 5.56 – Konačni elementi korišteni pri modeliranju čeličnih okvira sa zidanim ispunom

Bitno je naglasiti kako su modelirana dva tipa kontaktnih elemenata kojima su se modelirale reške morta – od kojih je jedan korišten za povezivanje zidnih elemenata u jednu cjelinu – zidani ispun, a drugim se definiralo ponašanje na kontaktu između stupova/greda čeličnog okvira i zidanog ispuna, a čije su mehaničke karakteristike (u smislu vlačne čvrstoće, kohezijske čvrstoće i kuta u unutarnjeg trenja) slabije od prethodne vrste kontaktnih elemenata.

Opterećenja i rubni uvjeti na numeričkome modelu u programskom paketu *ATENA 2D* definiraju se „slučajevima opterećenja“, te se potom međusobno kombiniraju u posebnom dijaloškom okviru kao koraci analize, a pri tome treba paziti da se, npr. u svakome koraku analize, osim vanjskih opterećenja, koja mogu i ne moraju u svakom koraku djelovati na model, moraju nalaziti i „slučajevi opterećenja“ kojima su zadani uvjeti oslanjanja modela jer u protivnom sustav ne bi bio stabilan i proračun ne bi bio izvršen. Potrebno je napomenuti kako vlastitu težinu sustava treba zadati u samo jednome koraku analize, najčešće prvom, jer ako se zadaje u više koraka program će automatski svaki put povećavati intenzitet ovoga djelovanja za isti iznos te će se na taj način dobiti nerealni rezultati proračuna.
U modelima je bilo sadržano ukupno šest „slučajeva opterećenja“: prvi slučaj (1) predstavljao je zadavanje ležajeva na modeliranoj pojasnici ležajne grede, drugim slučajem (2) u obzir je uzeta vlastita težina sustava, dok su se preostala četiri slučaja (3, 4, 5 i 6) odnosila na unos opterećenja u čelični okvir sa zidanim ispunom, odnosno na zadavanje pomaka na čeličnim pločama postavljenima na krajevima grede. Opterećivanje numeričkoga modela izrađenog u *ATENI* izvršeno je na slijedeći način: nakon što je okvir slučajem opterećenja 3, slika 5.55, pomaknut za određenu vrijednost pomaka u desnu stranu (u koracima analize definirano kao: 1,2,3) primjenjivan je slučaj opterećenja 4 kako bi se okvir s ispunom vratio u početni položaj (1,4), a zatim je isto ponovljeno sa slučajevima 5 (1,5) i 6 (1,6) za istu vrijednost pomaka, ali u suprotnome smjeru. Ovako primijenjeno nanošenje opterećenja predstavlja jedan ciklus. Pomaci su zadavani u koracima od po 0,1 mm.

U nastavku se daju parametri korištenih modela materijala i rezultati proračuna čeličnih okvira s glinenim, porobetonskim i kombiniranim zidanim ispunom.

5.4.3.1. Čelični okviri s ispunom od šupljih glinenih blokova

Za numeričke modele čeličnih okvira sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova korištene su vrijednosti parametara prikazane u tablici 5.10. Kontaktni elementi, kojima se pojedinačni zidni elementi spajaju u zidni ispun, u tablici nazvani su „kontaktni elementi – ziđe“, a kontaktni elementi na spoju čeličnog okvira i zidanog ispuna nose ime „kontaktni elementi – okvir“. Osim ova dva modela ponašanja materijala u tablici 5.10 prikazani su i parametri za čelični materijal i zidne elemente, odnosno glinene blokove.

Tablica 5.10 – Vrijednosti parametara komponenti čeličnoga okvira s glinenim zidanim ispunom za model u ATENA-i

Komponenta	Parametar	Vrijednost
Čelični materijal	E	210 000 N/mm^2
	f_y	337 N/mm^2
	μ	0,30
Zidni elementi	E	4600 N/mm^2
	μ	0,10
	f_t	0,50 N/mm^2
	f_c	9,0 N/mm^2
	ε_c	0,002
Kontaktni elementi - ziđe	K_{nn}	400000 MN/m^3
	K_{tt}	20000 MN/m^3
	c	0,60 N/mm^2
	f_t	0,30 N/mm^2
	$tg\alpha$	1,0
Kontaktni elementi - okvir	K_{nn}	400000 MN/m^3
	K_{tt}	20000 MN/m^3
	c	0,12 N/mm^2
	f_t	0,10 N/mm^2
	$tg\alpha$	0,20

U tablici 5.10 značenje oznaka je sljedeće:

E - modul elastičnosti čeličnoga materijala ili zidnoga elementa,

f_y - granica popuštanja čeličnoga materijala,

μ - Poissonov koeficijent čeličnoga materijala ili zidnoga elementa,

f_c - tlačna čvrstoća zidnoga elementa,

f_t - vlačna čvrstoća zidnoga elementa ili kontaktnoga elementa,

ε_c - deformacija pri tlačnoj čvrstoći zidnoga elementa,

K_{nn} - normalna elastična krutost kontaktnih elemenata,

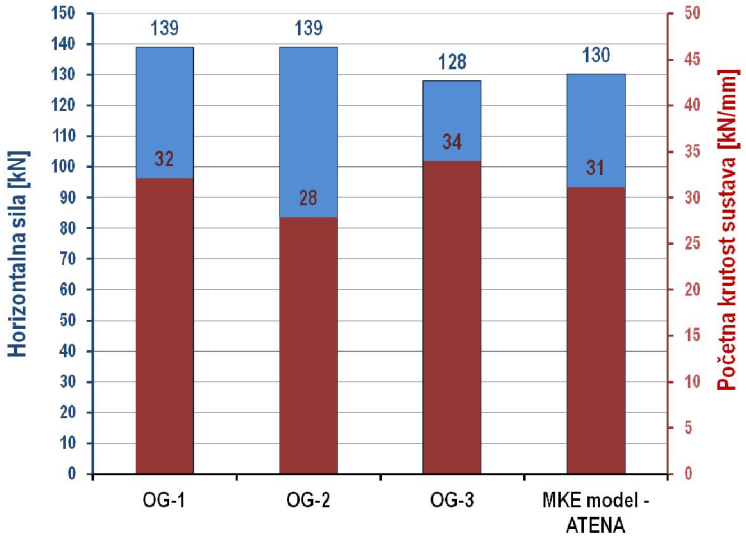
K_{tt} - elastična posmična krutost kontaktnih elemenata,

c - kohezijska čvrstoća,

$tg\alpha$ - kut unutarnjega trenja zidanog ispuna.

Kako je prikazano na slici 5.57, nosivost numeričkoga modela čeličnoga okvira s glinenim zidanim ispunom izrađenog u programskom paketu ATENA 2D iznosila je 130 kN. Ako se dobivena nosivost usporedi s prosječnom vrijednosti nosivosti iz rezultata eksperimentalnih istraživanja čeličnih okvira s glinenim ispunom (serija OG-i), dobiva se odstupanje od 4 %. Maksimalni horizontalni pomak u visini čelične grede okvira iznosio je 31,99 mm, što iznosi 1,98 % katnog pomaka.

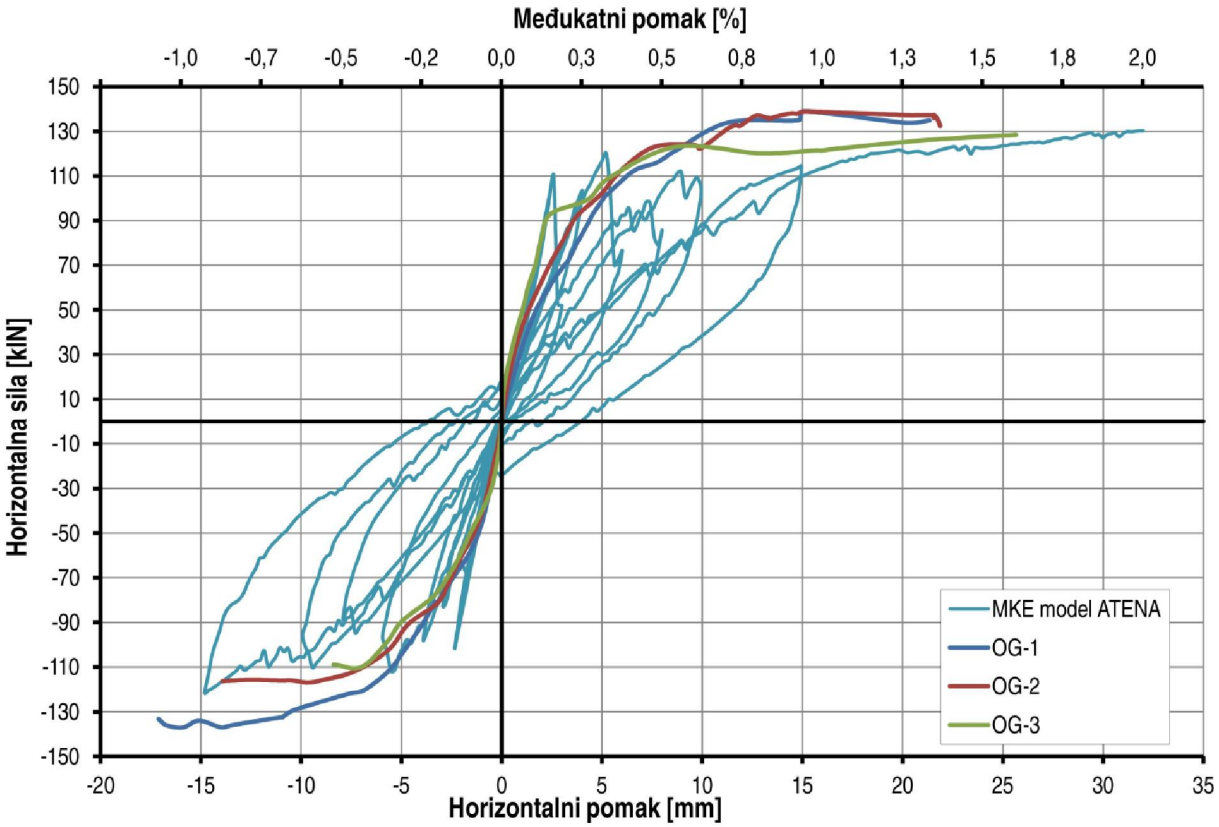
Početna krutost numeričkog modela iznosi 31 kN/mm, što je razlika od 1 % u odnosu na prosječnu eksperimentalnu vrijednost fizikalnih modela.



Slika 5.57 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OG-i i modela iz programskog paketa *ATENA 2D*

Na slici 5.58 prikazan je odnos horizontalna sila – horizontalni pomak modela iz *ATENA*-e usporedno s eksperimentalnim rezultatima prikazanim u vidu histerezne ovojnice. Na slici se može uočiti dobro

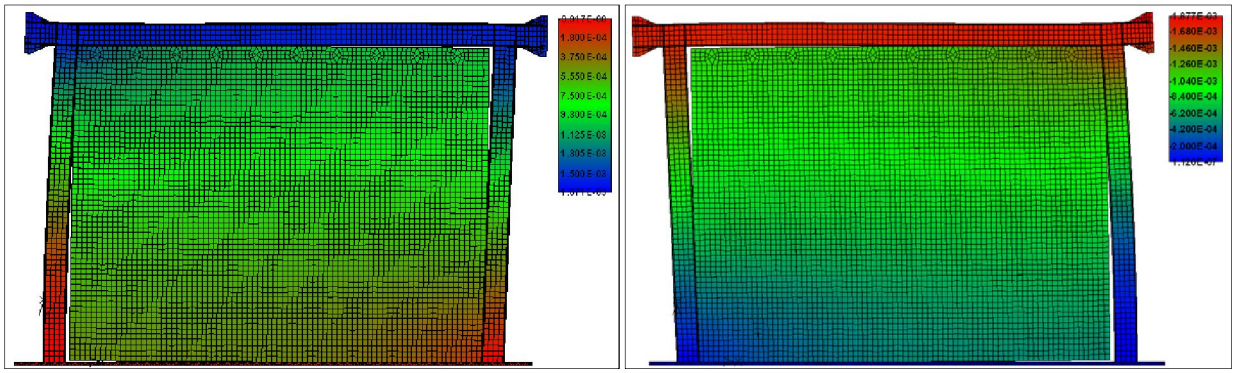
poklapanje u početnoj krutosti numeričkoga modela s eksperimentalnim podatcima. Histerezna petlja ima odstupanja, odnosno daje nešto manje vrijednosti horizontalne sile, u području horizontalnih pomaka od 5 do 15 mm, tj u rasponu međukatnog pomaka 0,31 % do 93 %. Također, na slici se može uočiti i da numerički model daje veće vrijednosti horizontalnih pomaka u odnosu na fizikalne modele serije OG-i.



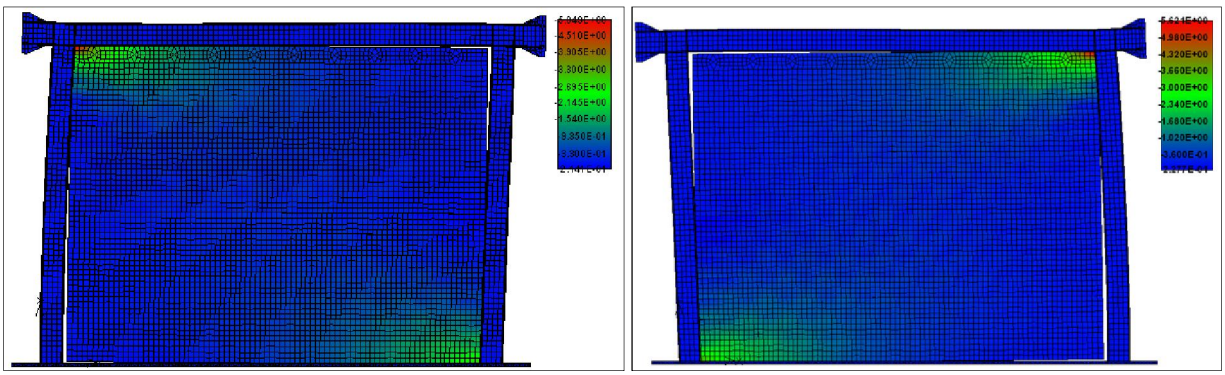
Slika 5.58 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i modela *ATENA 2D*

U nastavku će se rezultati proračuna numeričkoga modela iz programskog paketa *ATENA 2D* uspoređivati za katne pomake od 0,10 %; 0,50 %; 1,0 % i „pri slomu“, kako bi se dobio što bolji uvid u relativno ponašanje pojedinih modela.

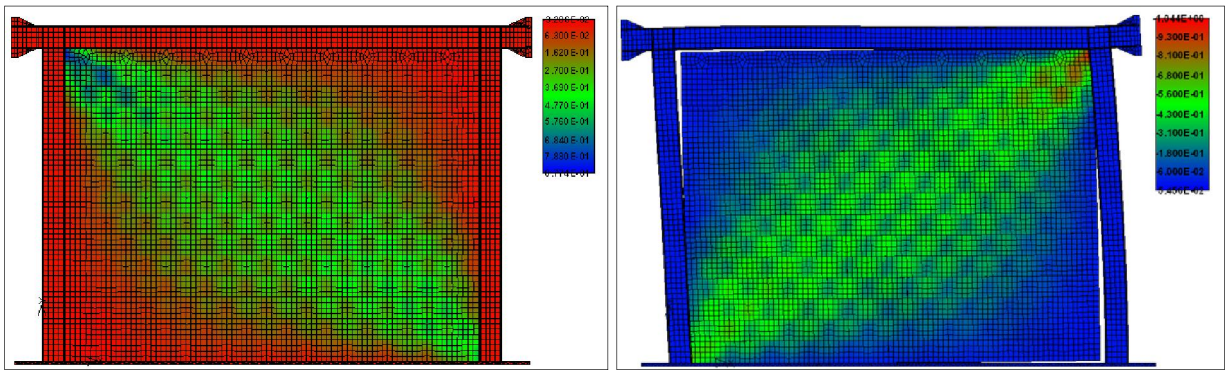
Slikama 5.59 do 5.61 grafički su prikazane vrijednosti horizontalnih pomaka, te normalnih i posmičnih naprezanja čeličnoga okvira s glinenim zidanim ispunom pri katnom pomaku od 0,10 % za pozitivne cikluse (slike lijevo) i negativne cikluse (slika desno). Pozitivnim ciklusima smatraju se ciklusi u kojima je okvir s ispunom „poguran“ u desno, odnosno ima pozitivne vrijednosti horizontalnih pomaka, te isto tako i pozitivne vrijednosti horizontalne sile. Pri ovoj vrijednosti katnoga pomaka, i u pozitivnom i u negativnom ciklusu, horizontalna sila u visini grede čeličnoga okvira iznosila je 66 kN. Prema slici 5.60, odnosno normalnim naprezanjima u zidanom ispunu može se primijetiti kako je stvaranje tlačne dijagonale u zidnome ispunu u početnoj fazi jer se značajnija naprezanja ne šire cijelom površinom zidnog ispuna, nego su koncentrirana u nasuprotnim kutovima okvirne konstrukcije. Pri ovome katnom pomaku nisu zabilježene pukotine u zidnome ispunu.



Slika 5.59 – Horizontalni pomaci čeličnog okvira s glinenim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,10 %



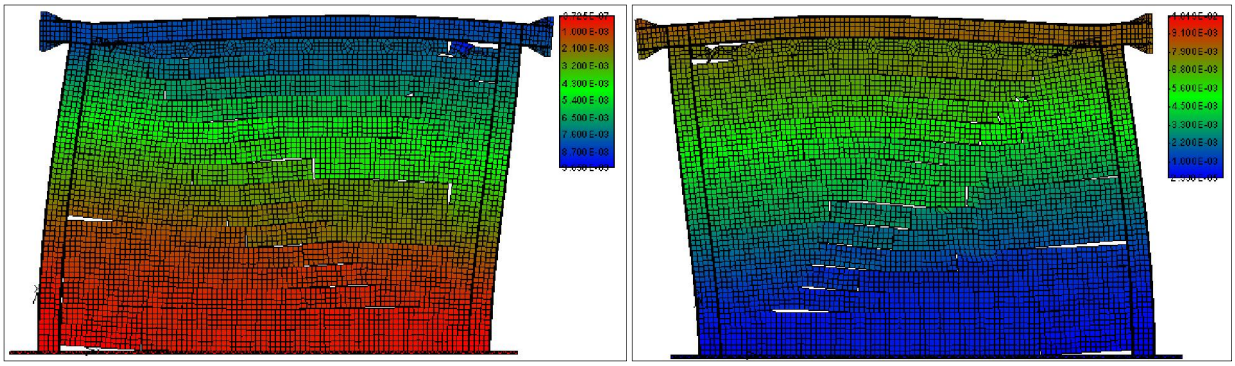
Slika 5.60 – Normalna naprezanja u glinenom zidnome ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %



Slika 5.61 – Posmična naprezanja u glinenom zidanome ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %

Pomaci čeličnoga okvira s glinenim ispunom pri katnom pomaku od 0,50 % , za pozitivne i negativne cikluse, prikazani su na slici 5.62. Ako se pomaci konstrukcije dovoljno skaliraju, može se primijetiti kako se zidni ispun ne ponaša homogeno te da su nastala odvajanja među zidnim elementima, osobito u sredini zidnog panela.

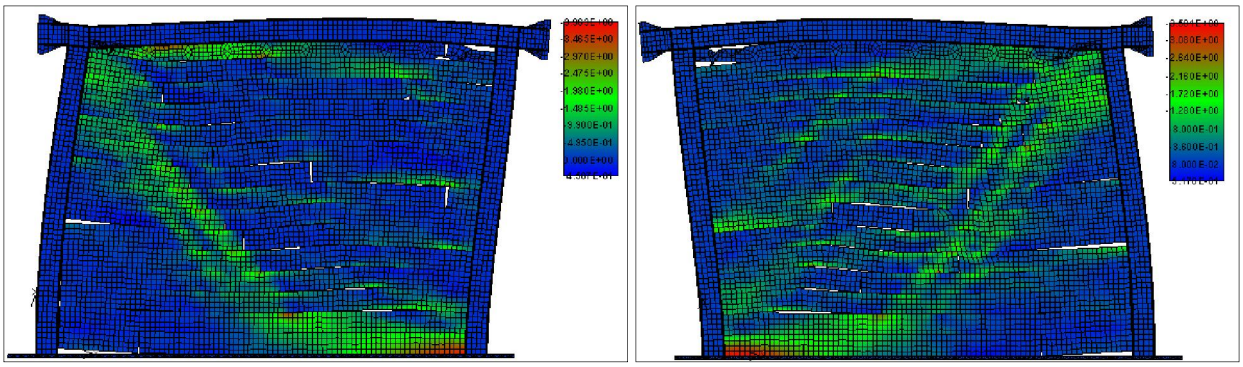
Horizontalna sila koju okvir preuzima pri katnom pomaku od 0,50 % iznosi 102 kN u pozitivnom ciklusu, odnosno 89 kN u negativnome ciklusu. Kako sile više nisu jednake u pozitivnom i negativnom ciklusu, može se zaključiti da je zidani ispun pretrpio oštećenja te da se više ne nalazi u elastičnome području.



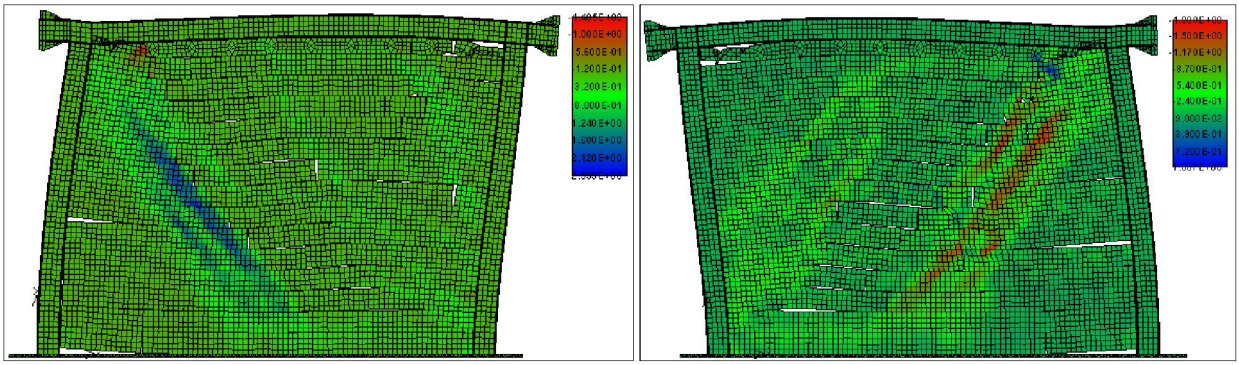
Slika 5.62 – Horizontalni pomaci čeličnog okvira s glinenim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,50 %

Iz grafičkih prikaza normalnih i posmičnih naprezanja, danih na slikama 5.63 i 5.64, može se uočiti da je tlačna dijagonala pri ovome katnom pomaku potpuno razvijena, ali da se ne širi u smjeru nasuprotnih kutova okvira, nego je njezin nagib nešto strmiji zbog oštećenja srednjega dijela zidanog ispuna koji više nije u stanju preuzeti i prenijeti opterećenje.

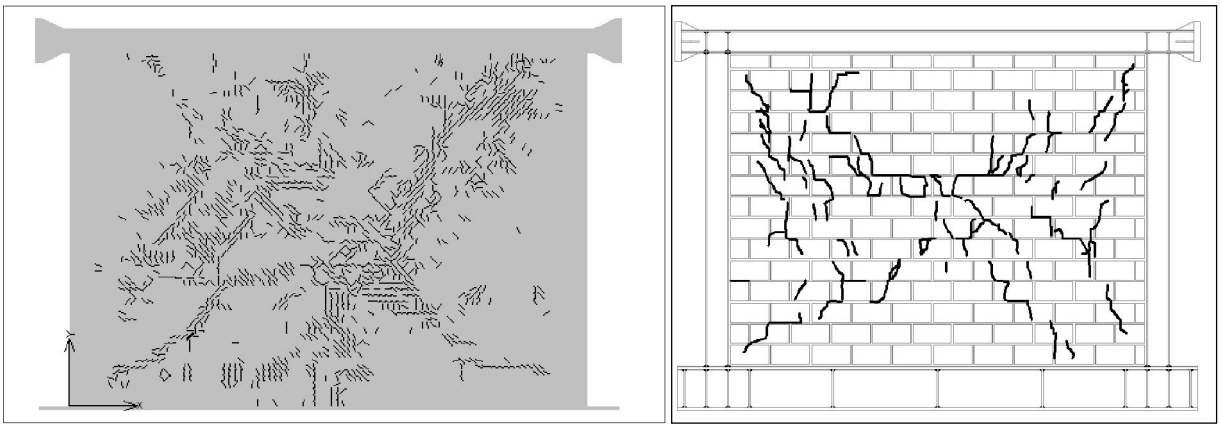
Ako se promotre slike 5.65 a) i b) koje prikazuju raspored pukotina MKE modela čeličnoga okvira s glinenim zidanim ispunom izrađenog u programskom paketu *ATENA 2D* i eksperimentalnog uzorka OG-1, mogu se uočiti sličnosti u ponašanju numeričkoga i fizikalnoga modela s aspekta razvoja dijagonalnih pukotina.



Slika 5.63 – Normalna naprezanja u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %



Slika 5.64 – Posmična naprezanja u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %

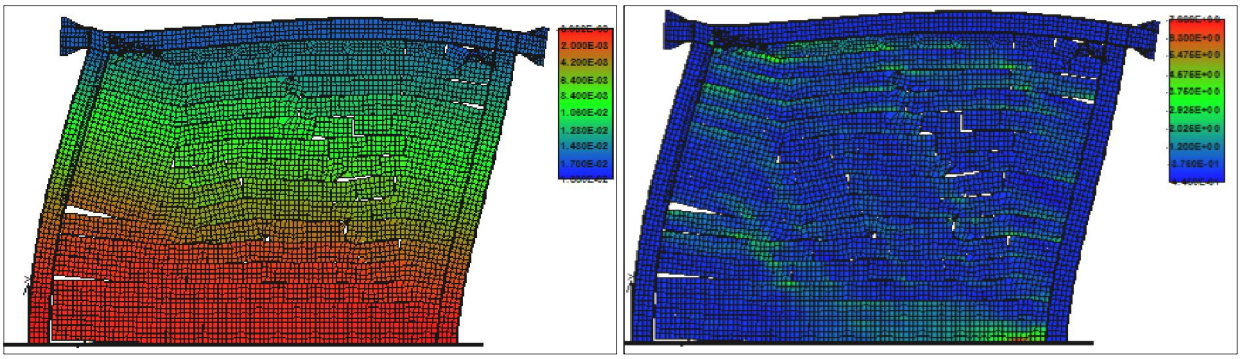


a) b)

Slika 5.65 – Raspored pukotina: a) model okvira s glinenim zidanim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,50 %, b) raspored pukotina ispitnog uzorka OG-1

Horizontalni pomaci sustava, normalna i posmična naprezanja, te prikaz pukotina u zidanom ispunu pri katnom pomaku čeličnoga okvira s glinenim ispunom od 1,0 %, prikazani su slikama 5.66 i 5.67. U ovoj fazi čelični okvir s glinenim ispunom guran je samo u desnu stranu do sloma sustava, što je bio slučaj i prilikom provedbe eksperimenata pa zbog toga postoje podatci samo za pozitivan ciklus.

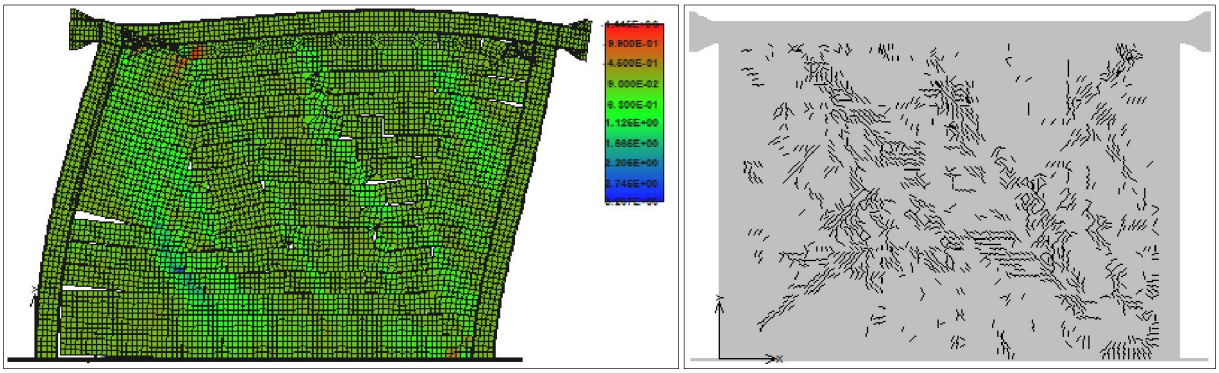
Pri katnom pomaku od 1,0 % vrijednost zabilježene horizontalne sile u visini grede čelične okvirne konstrukcije iznosila je 114 kN. Iz spomenutih slika može se zaključiti kako je zidani ispun od glinenih zidanih elemenata pretrpio značajna oštećenja, te da glavninu vanjskoga opterećenja preuzima čelični okvir.



a) b)

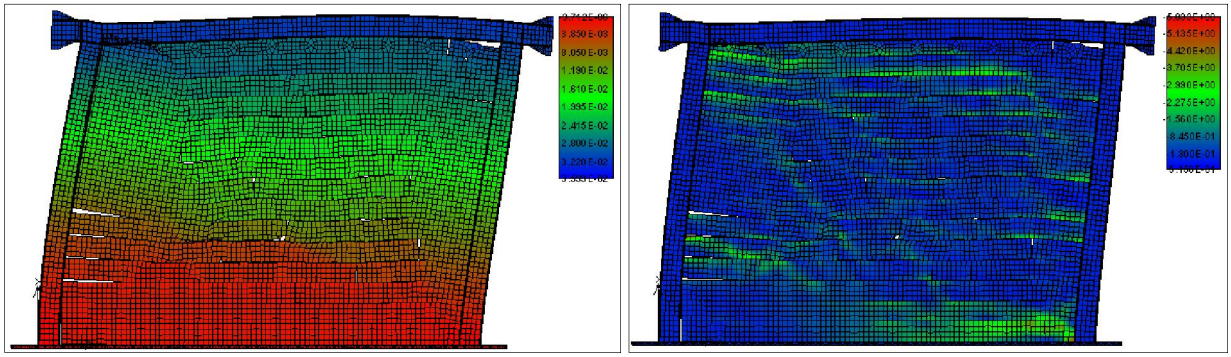
Slika 5.66 – Horizontalni pomaci čeličnog okvira (a) i normalna naprezanja (b) u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %

Slikama 5.68 i 5.69 prikazana su normalna i posmična naprezanja u zidanom ispunu, horizontalni pomaci sustava te raspored pukotina pri slomu sustava. Kako je već spomenuto ranije, iznos horizontalne sile koju je sustav mogao preuzeti iznosila je 130 kN, uz katni pomak od 1,98 %.



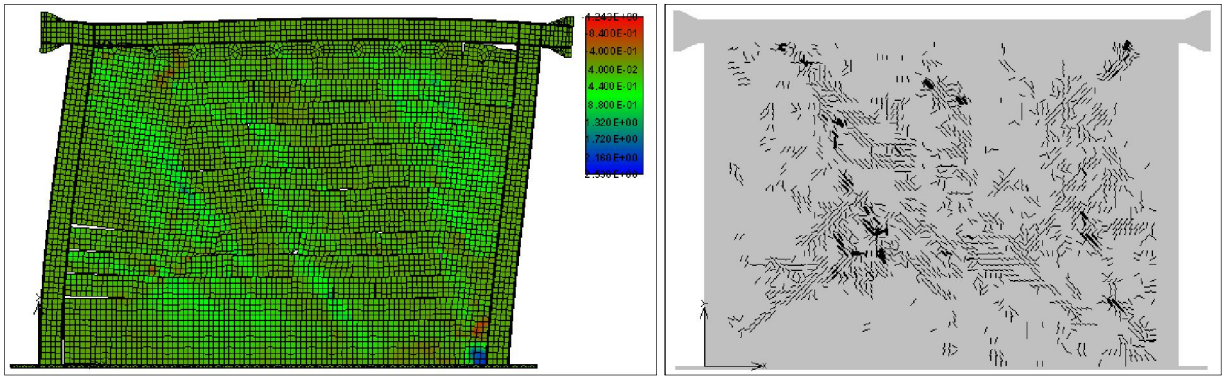
a) b)

Slika 5.67 – Posmična naprezanja (a) i raspored pukotina (b) u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %



a) b)

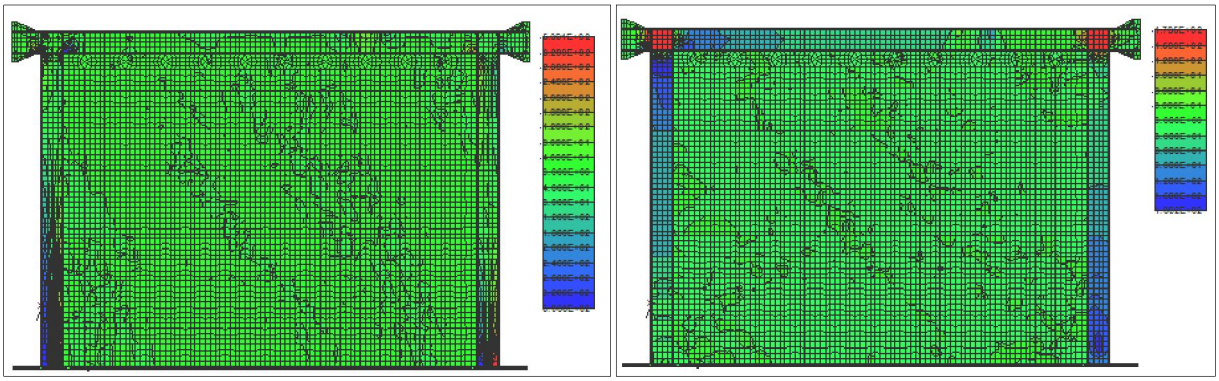
Slika 5.68 – Horizontalni pomaci okvira (a) i normalna naprezanja (b) u glinenom ispunu pri slomu



a) b)

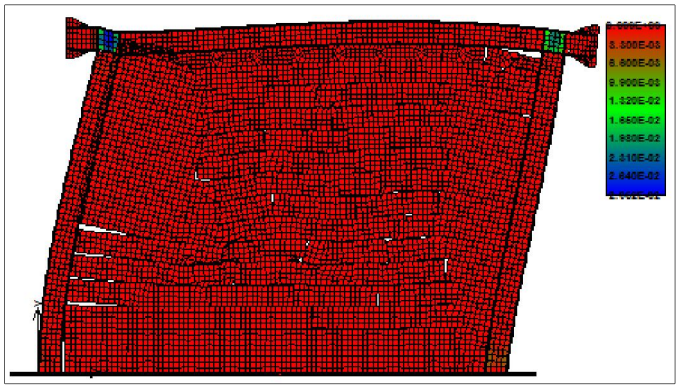
Slika 5.69 – Posmična naprezanja (a) i raspored pukotina (b) u glinenom ispunu pri slomu

Slikama 5.70 a) i b) prikazana su normalna i posmična naprezanja u čeličnome okviru, a slikom 5.71 plastificirana područja. Najveća oštećenja čelični okvir pretrpio je pri dnu desnoga stupa, te na hrptenom panelu spoja stup-greda.



a) b)

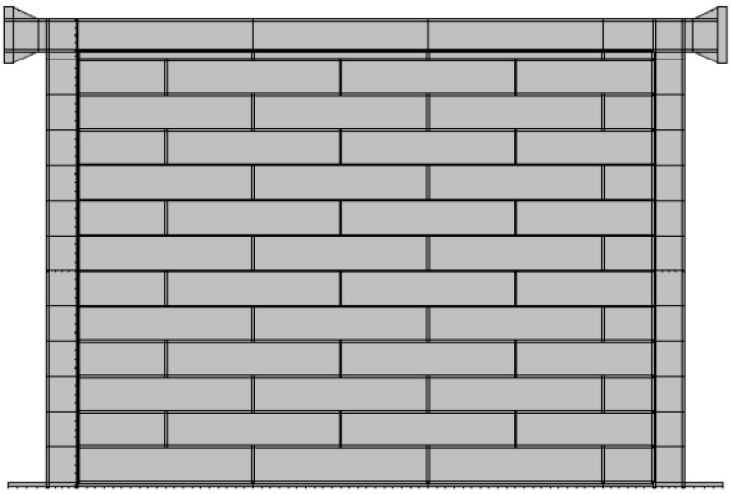
Slika 5.70 – Normalna (a) i posmična naprezanja (b) u čeličnom okviru pri slomu



Slika 5.71 – Plastične deformacije čeličnog okvira s glinenim zidanim ispunom pri slomu

5.4.3.2. Čelični okviri s ispunom od porobetonskih blokova

Izgled čeličnoga okvira s porobetonskim ispunom modeliranoga u programskom paketu *ATENA 2D* prikazan je na slici 5.72. Pri modeliranju korištene su dimenzije porobetonskih blokova l/h/t=625x90x125 mm identične kao i u fizikalnom modelu iz serije OY-i.



Slika 5.72 – Model čeličnog okvira sa ispunom od porobetonskih blokova u *ATENA 2D*

Tablicom 5.11 prikazani su glavni parametri modela materijala korištenih pri modeliranju. Čelik je identičnih mehaničkih karakteristika kao i kod čeličnih okvira s glinenim ispunom. Za zidne elemente korišten je *SBETA* model materijala, s modulom elastičnosti 1700 N/mm^2, tlačnom čvrstoćom od 4 N/mm^2, vlačnom čvrstoćom 1,0 N/mm^2 i Poissonovim koeficijentom od 0,15. Za deformaciju materijala pri tlačnoj čvrstoći usvojena je vrijednost od 0,0025.

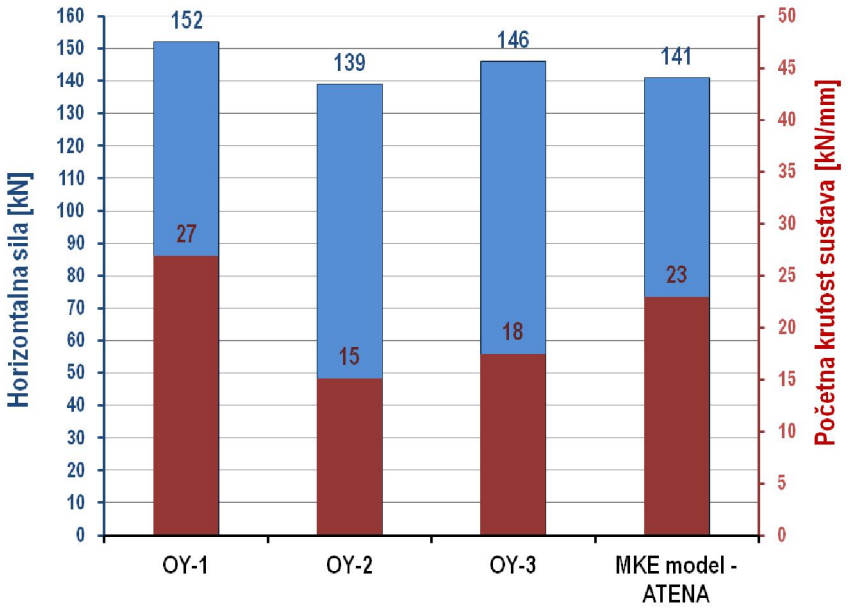
Za kontaktne elemente, kojima su zidni elementi povezani u zidani ispun („kontaktni elementi – ziđe“), korištene su niže vrijednosti kohezijske i vlačne čvrstoće u odnosu na model glinenog zidanog ispuna, uz veću vrijednost kuta unutarnjega trenja. Tako je za koheziju usvojena vrijednost od 0,22 N/mm^2, za vlačnu čvrstoću 0,25 N/mm^2, a za kut unutarnjega trenja vrijednost 1,10.

Tablica 5.11 – Vrijednosti parametara komponenti čeličnoga okvira s porobetonskim zidanim ispunom za model u ATENA-i

Komponenta	Parametar	Vrijednost
Čelični materijal	E	210 000 N/mm^2
	f_y	337 N/mm^2
	μ	0,30
Zidni elementi	E	1700 N/mm^2
	μ	0,15
	f_t	1,0 N/mm^2
	f_c	4,0 N/mm^2
	ε_c	0,0025
Kontaktni elementi - ziđe	K_{nn}	140000 MN/m^3
	K_{tt}	53000 MN/m^3
	c	0,22 N/mm^2
	f_t	0,25 N/mm^2
	$tg\alpha$	1,1
Kontaktni elementi - okvir	K_{nn}	140000 MN/m^3
	K_{tt}	53000 MN/m^3
	c	0,01 N/mm^2
	f_t	0,01 N/mm^2
	$tg\alpha$	0,10

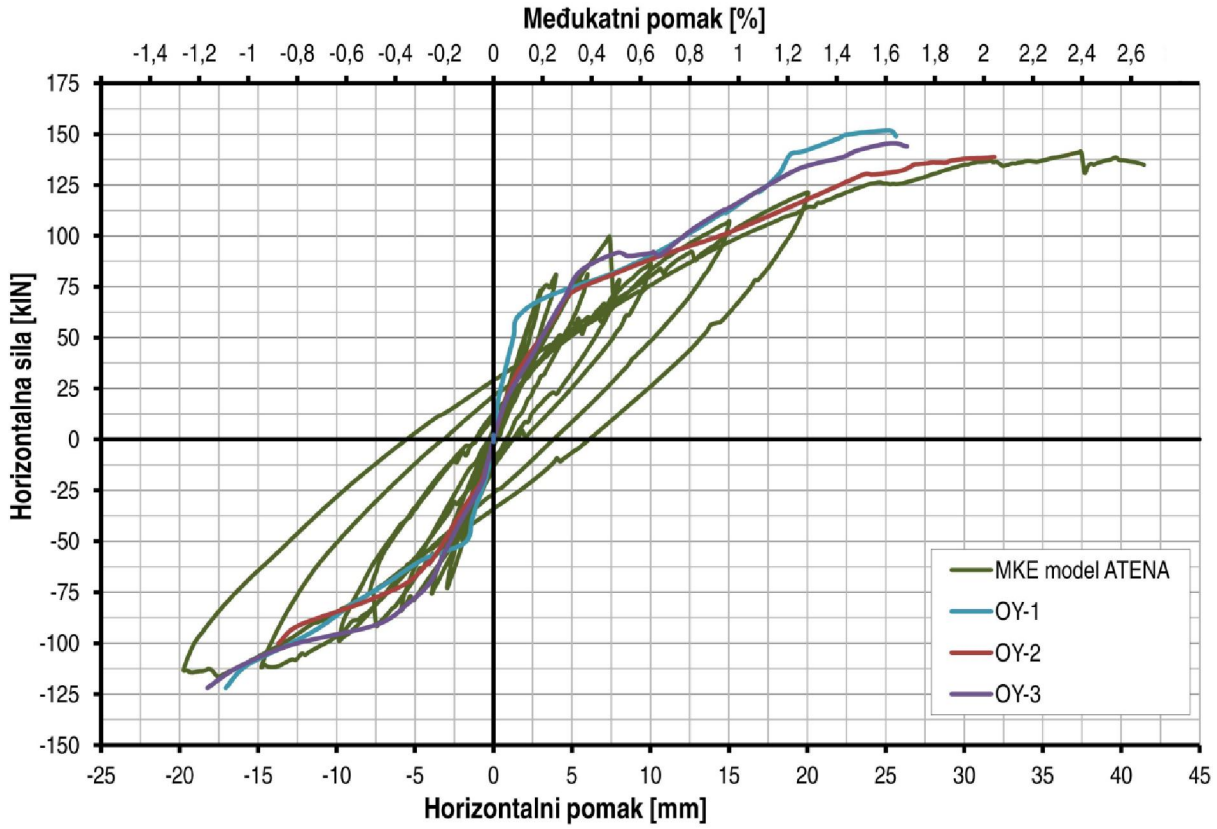
Parametrima modela materijala kontaktnih elemenata kojima je definirano ponašanje sustava na dodirnoj plohi zidanoga ispuna i čeličnoga okvira, također, su pripisane niže vrijednosti od onih kojima je definiran kontakt čeličnoga okvira s glinenim zidanim ispunom. Ovo se događa zbog toga što je prilikom ispitivanja fizikalnih modela čeličnih okvira s porobetonskim zidanim ispunom (serija OY-i) uočeno ranije odvajanje ove vrste zidanog ispuna od okvira, nego što je to bio slučaj kod okvira s glinenim zidanim ispunom.

Rezultati proračuna ovoga modela u *ATENA 2D* dani su grafikonom na slici 5.73. Maksimalna horizontalna sila, koju je model čeličnoga okvira s porobetonskim zidanim ispunom mogao preuzeti, iznosila je 141 kN. Horizontalni pomak u visini grede čeličnog okvira pri maksimalnoj sili iznosio je 37 mm (katni pomak 2,29 %), dok je najveći zabilježeni pomak 41 mm (2,54 %). U odnosu na prosječnu nosivost fizikalnih modela serije OY-i koja je iznosila 146 kN, nosivost numeričkog modela izrađenoga u programskom paketu *ATENA 2D* na horizontalnu silu manja je za 3 %.
Početna krutost modela iz *ATENA*-e iznosila je 23 kN/mm, a taj iznos je 16 % veći u odnosu na eksperimentalne podatke.



Slika 5.73 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela iz programskog paketa *ATENA 2D*

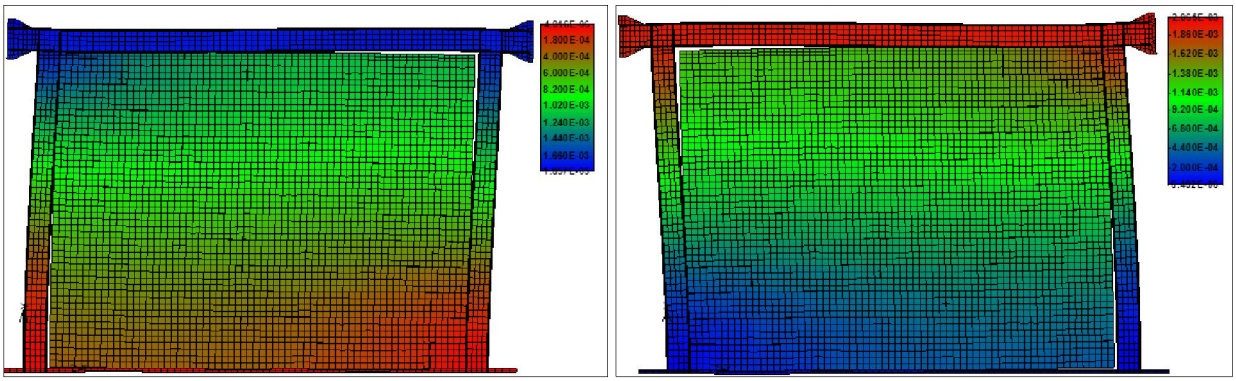
Histerezna petlja MKE modela čeličnoga okvira s porobetonskim zidanim ispunom prikazana je na slici 5.74 zajedno s anvelopama histereznih petlji ispitivanih fizikalnih modela OY-i. Može se zaključiti dobro poklapanje numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Razlike se pojavljuju u krajnjem dostignutom horizontalnom pomaku, pri čemu numerički model ima nešto veću mogućnost deformiranja u odnosu na eksperimentalne rezultate.



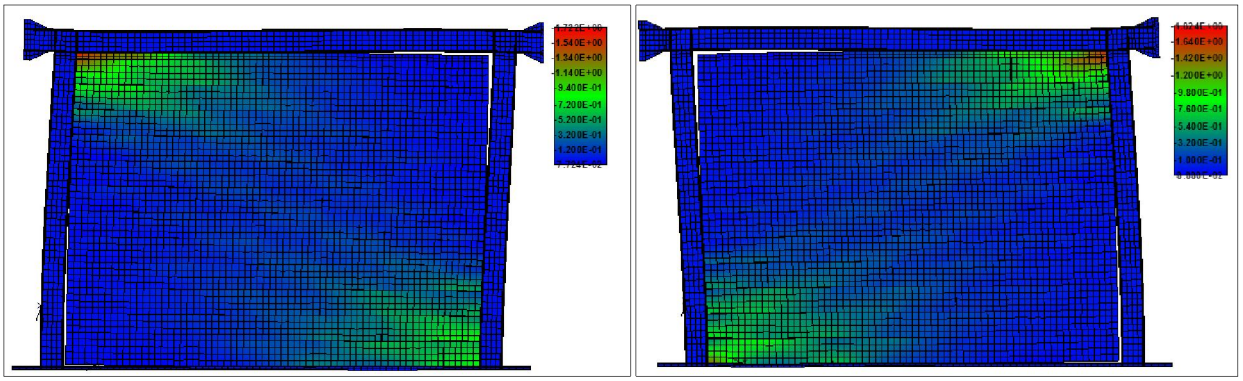
Slika 5.74 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OY-i i modela *ATENA 2D*

Horizontalni pomaci i naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu numeričkoga modela pri katnom pomaku od 0,10 %, za pozitivne i negativne cikluse opterećivanja, prikazani su slikama 5.75 do 5.77. Horizontalna sila, koja pri ovom pomaku djeluje na sustav, jednaka je za pozitivni i negativni ciklus i iznosi 44 kN. Kao i u slučaju glinenog zidanog ispuna, iz raspodjele normalnih naprezanja, može se primijetiti djelomično razvijena dijagonala i koncentracija naprezanja samo u kutovima ispuna.

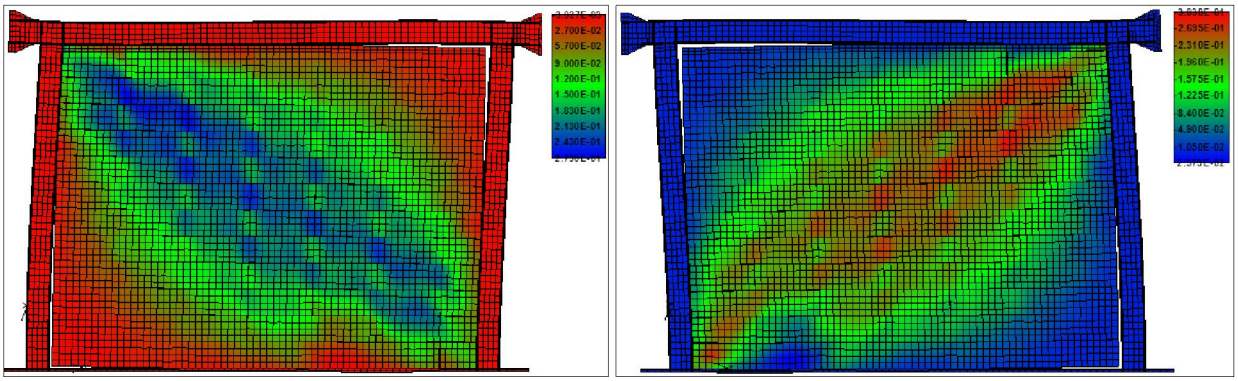
Pri katnom pomaku konstrukcije od 0,10 % nema oštećenja zidanog ispuna.



Slika 5.75 – Horizontalni pomaci okvira s porobetonskim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,10 %

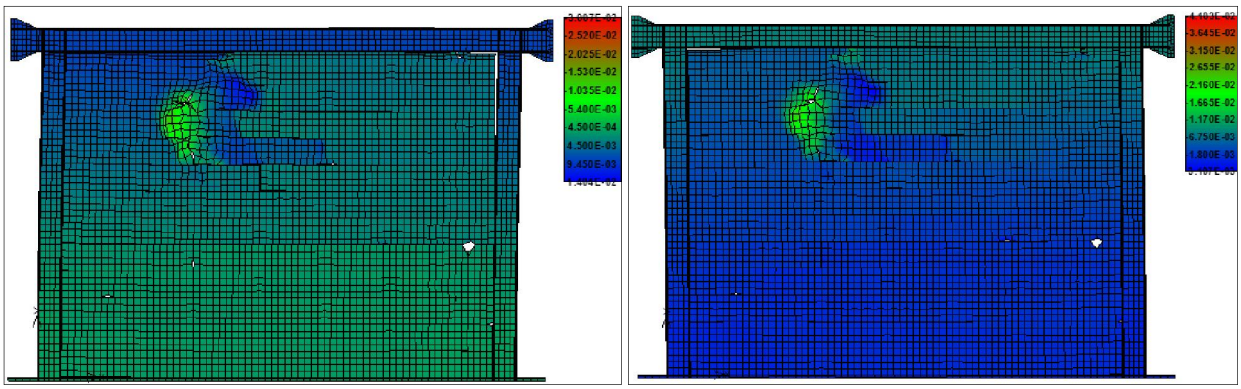


Slika 5.76 – Normalna naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %



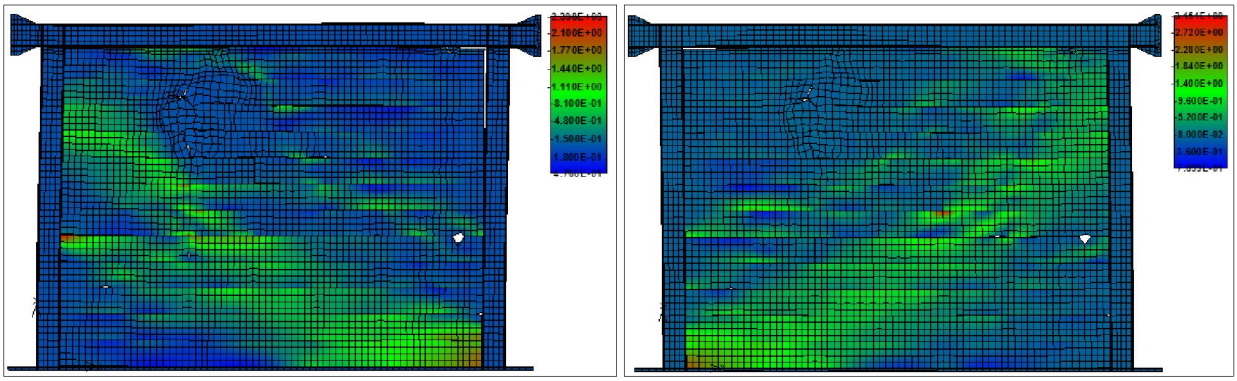
Slika 5.77 – Posmična naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %

Horizontalni pomaci MKE modela čeličnoga okvira s porobetonskim zidanim ispunom prikazani su slikom 5.78. Horizontalna sila pri vrijednosti katnoga pomaka od 0,50 % iznosi 88 kN za pozitivni ciklus opterećivanja i 76 kN za negativni.

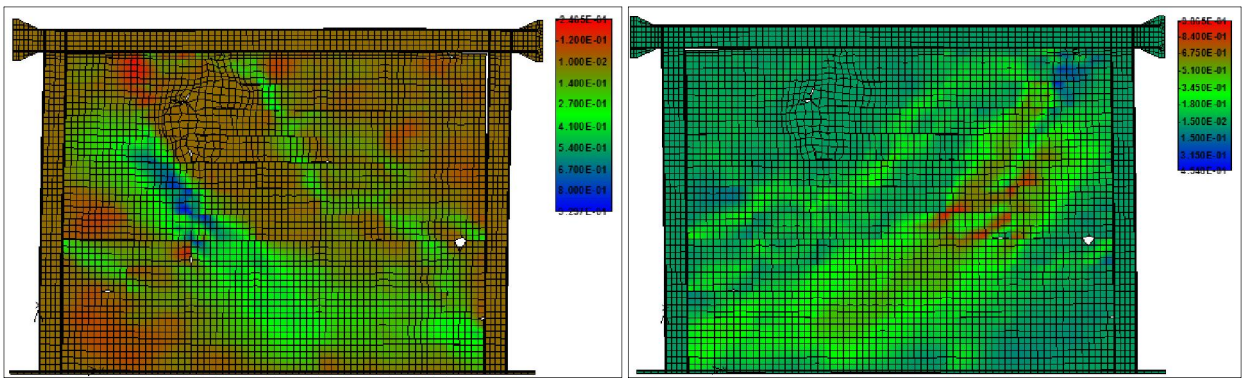


Slika 5.78 – Horizontalni pomaci okvira s porobetonskim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,50 %

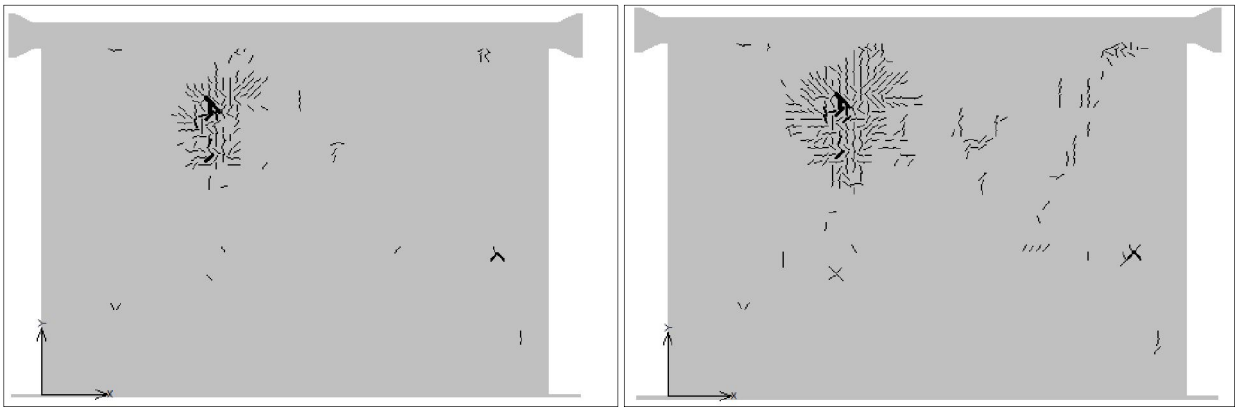
Normalna naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu prikazana su slikom 5.79, a slika 5.80 prikazuje posmična naprezanja. Na slikama se može primijetiti, kao i u slučaju glinenog ispuna, skretanje dijagonale, te razvijanje dvaju paralelnih dijagonala u pozitivnom ciklusu, što je posljedica otvaranja pukotina u gornjem lijevom kvadrantu zidanoga ispuna, slika 5.81.



Slika 5.79 – Normalna naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %

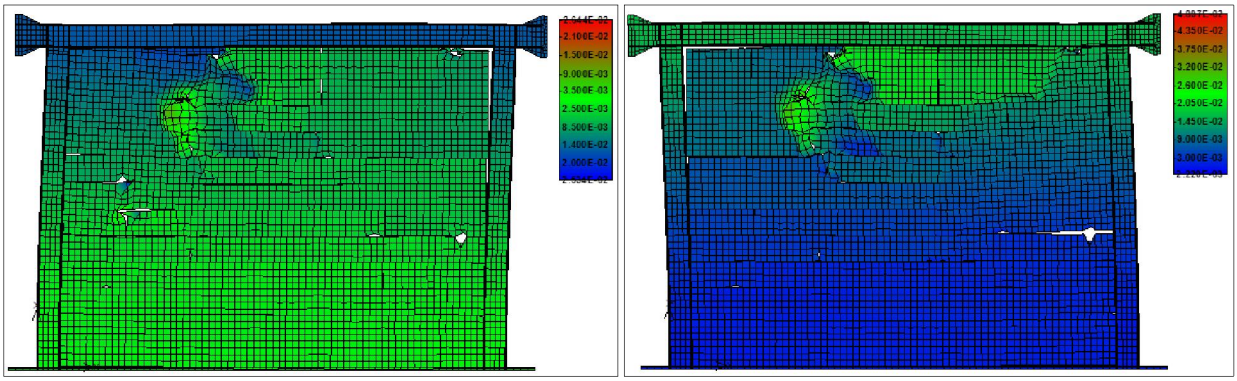


Slika 5.80 – Posmična naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %

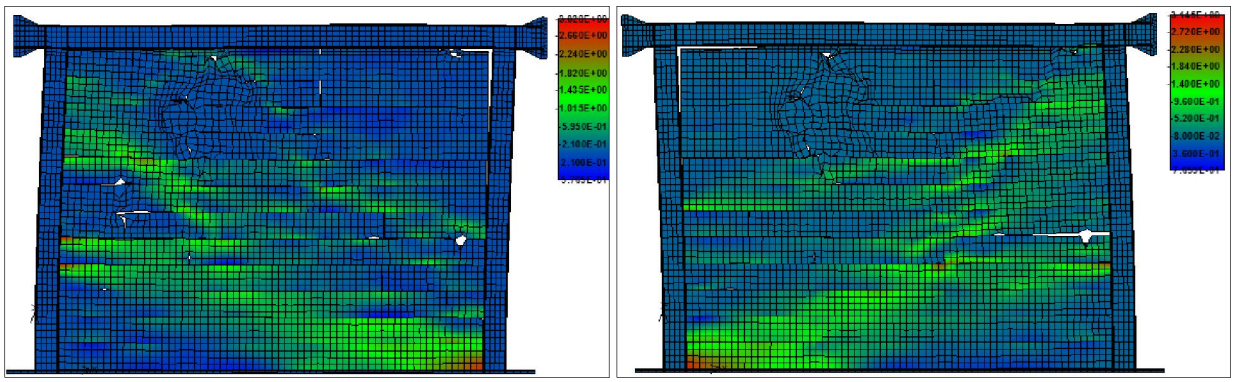


Slika 5.81 – Raspored pukotina u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %

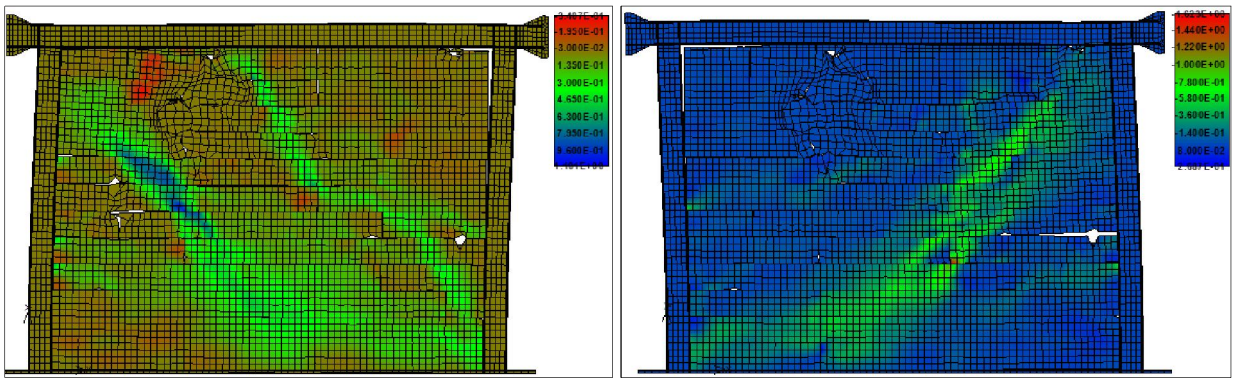
Pri međukatnom pomaku od 1,0 % porobetonski ispun pretrpio je značajna oštećenja. Horizontalna sila pri ovome pomaku u pozitivnom ciklusu opterećivanja iznosi 111 kN, a u negativnom ciklusu 107 kN. Primjetno je značajno klizanje zidnih elemenata po sljubnicama morta na visini nešto manjoj od polovine visine ispuna. Iz slike pukotina, slika 5.85, može se vidjeti da se, osim otvaranja horizontalnih pukotina pojavljuju i vertikalne pukotine, te kako dijagonalne pukotine nisu zastupljene u većoj mjeri, nego su koncentrirane, uglavnom, na desnoj strani zidanoga ispuna.



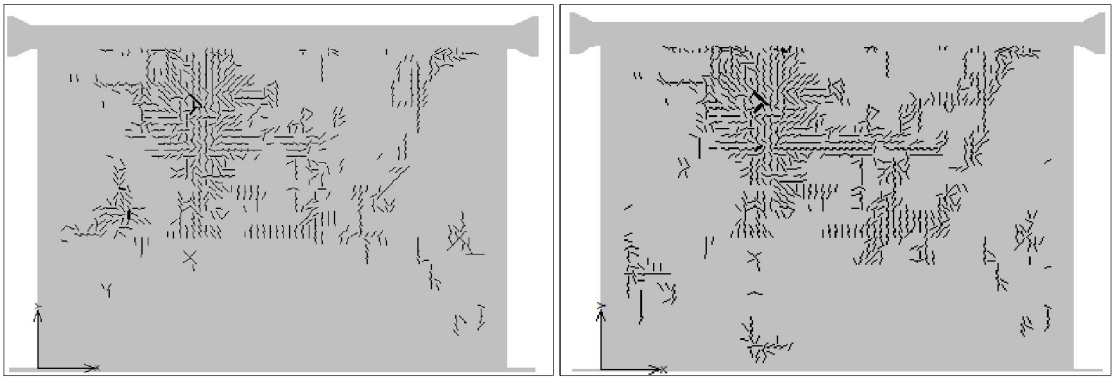
Slika 5.82 – Horizontalni pomaci okvira s porobetonskim ispunom pri međukatnom pomaku od 1,0 %



Slika 5.83 – Normalna naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %



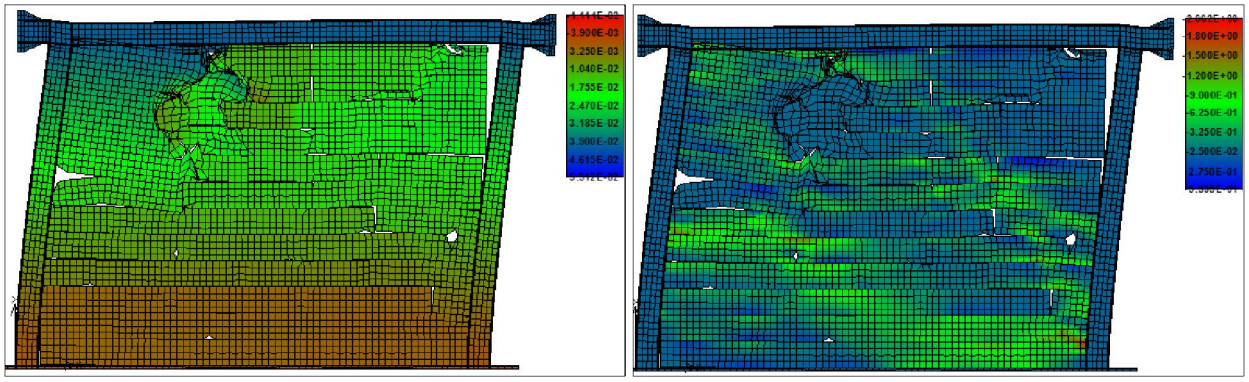
Slika 5.84 – Posmična naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %



Slika 5.85 – Raspored pukotina u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %

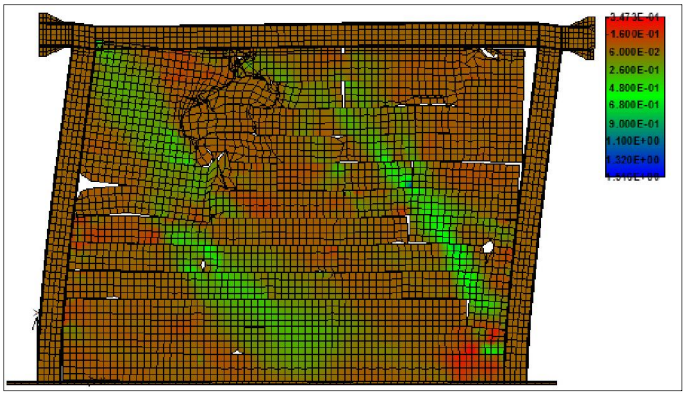
Horizontalni pomaci i normalna naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu „pri slomu“ prikazani su slikom 5.86 a) i b). Slom sustava nastupio je dosezanjem horizontalne sile od 141 kN. Iz prikaza normalnih (slika 5.86 b)) i posmičnih naprezanja (slika 5.87) može se primijetiti iščezavanje dijagonala, odnosno da je aktivirano područje, koje sudjeluje u prenošenju opterećenja, znatno smanjeno.

Slikom 5.88 prikazan je raspored pukotina MKE modela i ispitivanog fizikalnoga modela OY-1.

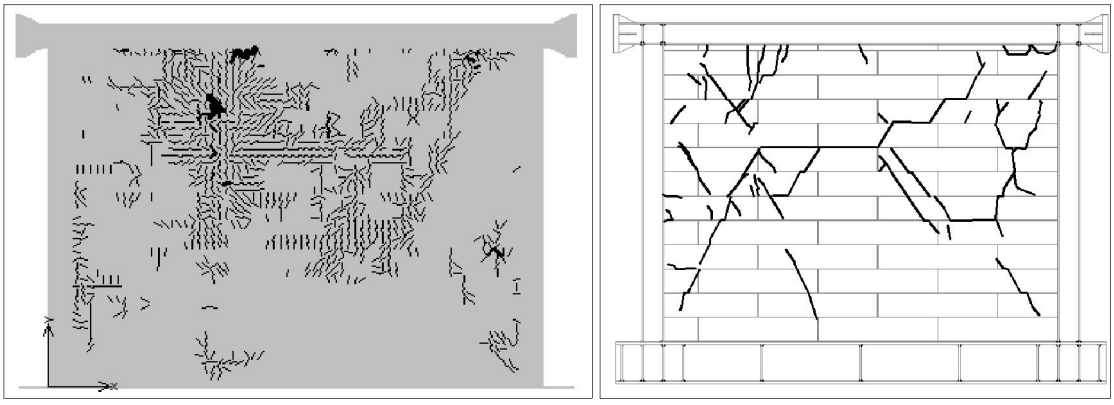


a) b)

Slika 5.86 – Horizontalni pomaci okvira (a) i normalna naprezanja (b) u porobetonskom ispunu pri slomu



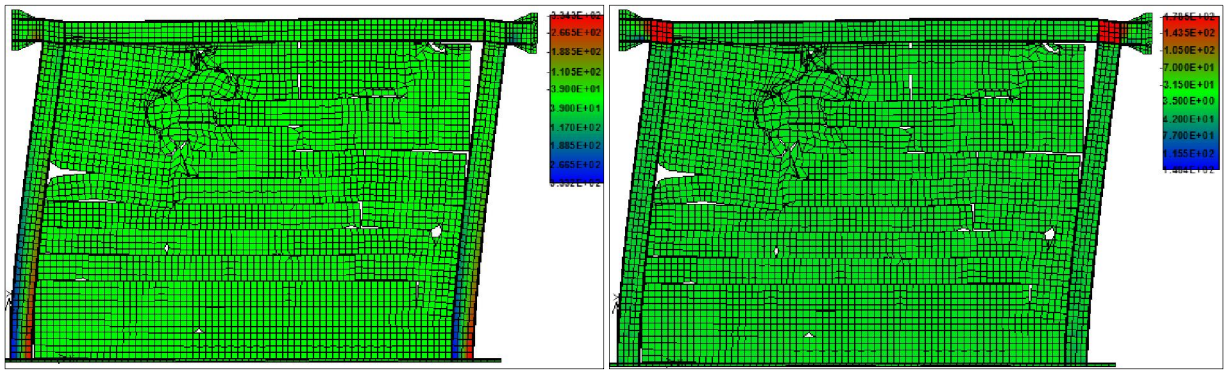
Slika 5.87 – Posmična naprezanja u porobetonskom ispunu pri slomu



a) b)

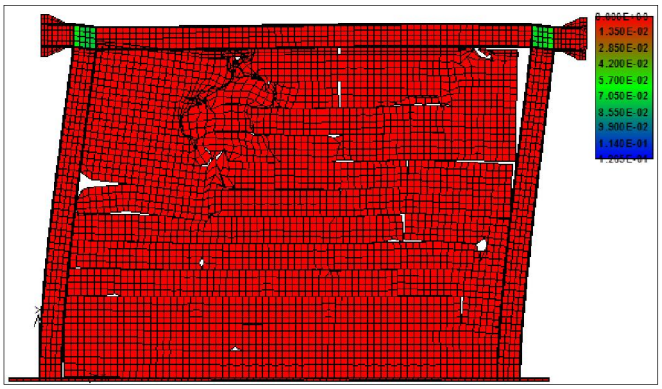
Slika 5.88 – Raspored pukotina: a) model okvira s porobetonskim zidanim ispunom pri slomu, b) raspored pukotina ispitnog uzorka OY-1

Na slikama 5.89 i 5.90 prikazana su normalna i posmična naprezanja te mjesta plastifikacije čeličnoga okvira. Kao i kod okvira s glinenim ispunom, i ovdje su plastificikacijom najviše zahvaćena područja hrpta grede na mjestima spajanja sa stupom.



a) b)

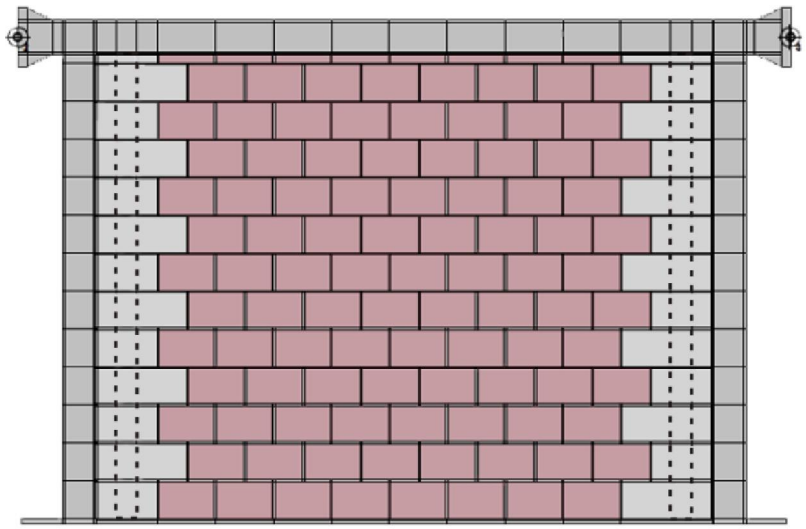
Slika 5.89 – Normalna (a) i posmična naprezanja (b) u čeličnom okviru pri slomu



Slika 5.90 – Plastične deformacije čeličnog okvira s porobetonskim zidanim ispunom pri slomu

5.4.3.3. Čelični okviri s kombiniranim zidanim ispunom

Slikom 5.91 prikazan je izgled modela čeličnoga okvira s kombiniranim ispunom u programskom paketu *ATENA 2D*. Na slici su različitim bojama označeni porobetonski dijelovi zidanog ispuna (siva boja) i glineni dio (crvena boja). U porobetonskom dijelu zida nalaze se oslabljenja, koja su na slici 5.91 prikazana iscrtkanom linijom, kako bi numerički model odgovarao stvarno ispitivanim uzorcima iz serije OGY-i. Oslabljenja su modelirana na način da je na njihovim mjestima debljina zida bila smanjena, pa je tako u ovome modelu debljina zida na mjestu oslabljenja 60 mm, dok je preostali dio zida debljine 120 mm.



Slika 5.91 – Model čeličnog okvira kombiniranim ispunom u *ATENA 2D*

Mehanička svojstva materijala glinenog ispuna odgovaraju onima opisanima u točki 5.4.3.1 ovoga rada, dakle, za glineni dio ispuna korištene su vrijednosti kalibriranoga modela čeličnoga okvira s glinenim zidanim ispunom. Tako je modul elastičnosti glinenih zidnih elemenata 4600 N/mm^2, tlačna čvrstoća 9,0 N/mm^2, vlačna čvrstoća 0,50 N/mm^2, Poissonov koeficijent 0,10.
Slična analogija vrijedi i za porobetonski ispun, uz napomenu, da je ovdje tlačna čvrstoća korigirana jer se s vrijednošću od 4,0 N/mm^2 dobivala precijenjena nosivost sustava na horizontalne sile, a kalibracija ovoga modela pokazala je kako se realniji rezultati dobivaju za vrijednost tlačne čvrstoće od 2,0 N/mm^2. Modul elastičnosti porobetonskih zidnih elemenata iznosi 1700 N/mm^2, vlačna čvrstoća 1,0 N/mm^2, a Poissonov koeficijent ima vrijednost 0,15.

Parametri kojima je definirano ponašanje kontaktnih elemenata obje grupe („kontaktni elementi – zid“ i „kontaktni elementi – okvir“) imaju iste vrijednosti kakve su bile i kod glinenoga zidanog ispuna. Dva su razloga zbog kojih je odabran ovaj pristup: prvi je taj što je cijeli zid bio zidan vapneno-cementnim mortom

te nije korišten tankoslojni mort proizvođača kako je to bilo u slučaju okvira s porobetonskim zidanim ispunom, a drugi je razlog taj što glineni zidni elementi sačinjavaju dominantan dio zida (približno 75 % ukupne površine kombiniranog zidanog ispuna izrađeno je od glinenih zidnih elemenata).

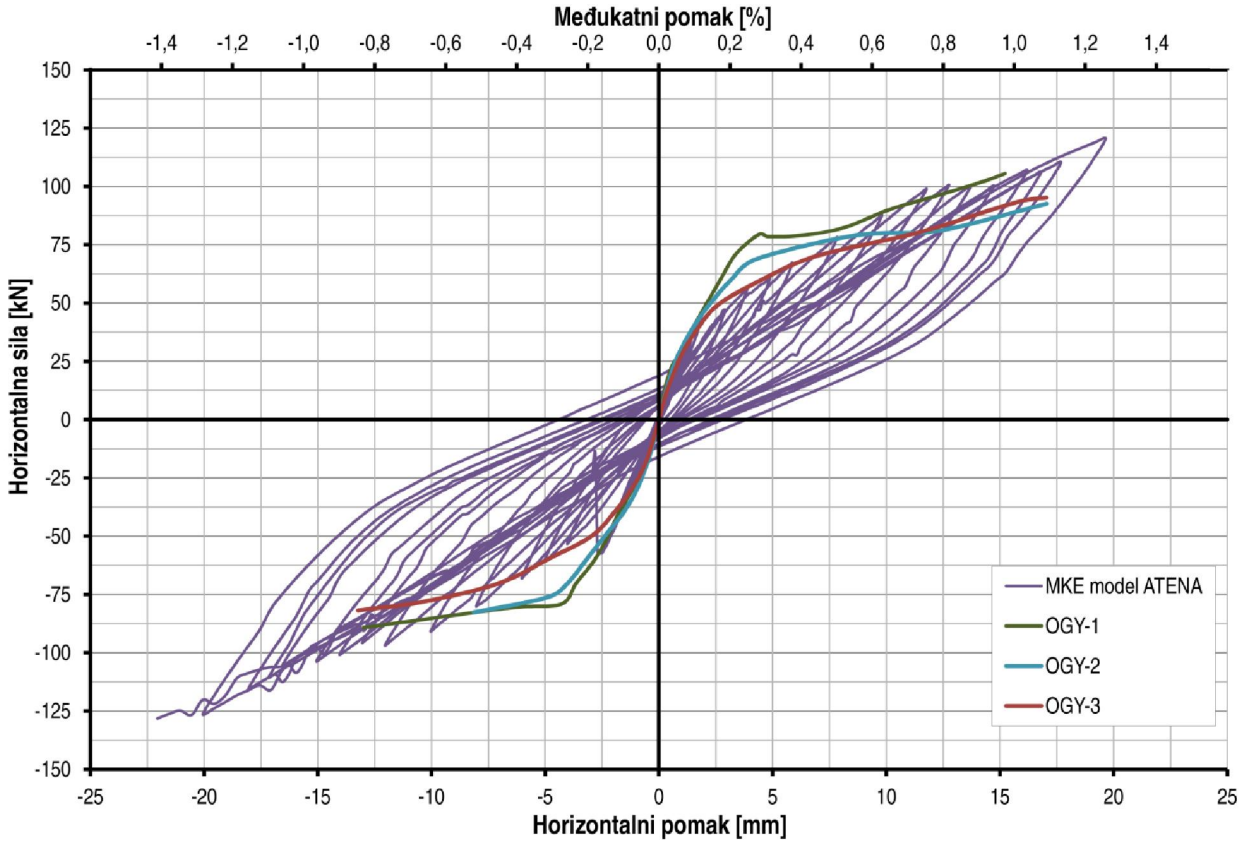
Tablicom 5.12 prikazani su glavni parametri koji definiranju ponašanje modela materijala, a koji su korišteni pri izradi numeričkoga modela čeličnoga okvira s kombiniranim zidanim ispunom.

Tablica 5.12 – Vrijednosti parametara komponenti čeličnog okvira s kombiniranim zidanim ispunom za model u ATENA-i

Komponenta		Parametar	Vrijednost
Čelični materijal		E	210 000 N/mm^2
		f_y	337 N/mm^2
		μ	0,30
Zidni elementi	Glineni ispun	E	4600 N/mm^2
		μ	0,10
		f_t	0,50 N/mm^2
		f_c	9,0 N/mm^2
		ε_c	0,002
	Porobetonski ispun	E	1700 N/mm^2
		μ	0,15
		f_t	1,0 N/mm^2
		f_c	2,0 N/mm^2
		ε_c	0,0025
Kontaktni elementi - ziđe		K_{nn}	400000 MN/m^3
		K_{tt}	20000 MN/m^3
		c	0,60 N/mm^2
		f_t	0,30 N/mm^2
		$tg\alpha$	1,0
Kontaktni elementi - okvir		K_{nn}	400000 MN/m^3
		K_{tt}	20000 MN/m^3
		c	0,12 N/mm^2
		f_t	0,10 N/mm^2
		$tg\alpha$	0,20

Kao i u prethodnim modelima izrađenim u *ATENA*-i, za opterećivanje je korištena kontrola pomaka i ciklička analiza. Korak u kojem su povećavani pomaci iznosi 0,10 mm.

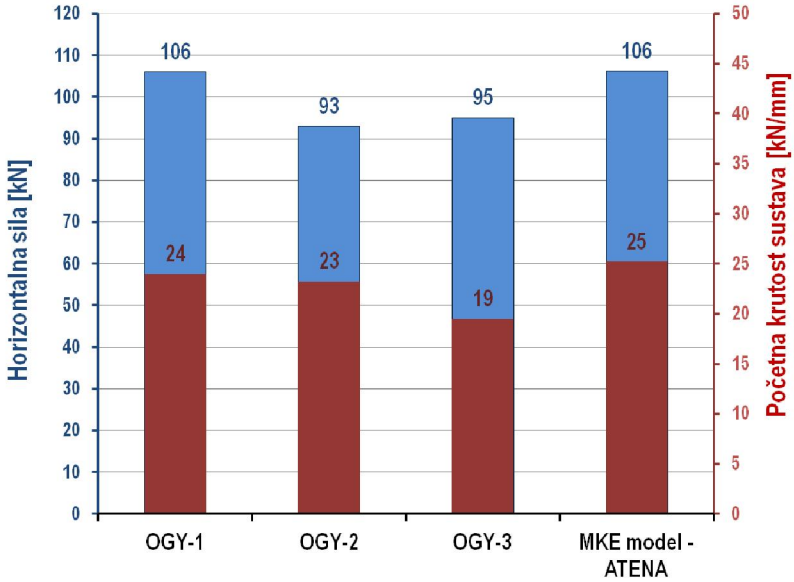
Kako se pri ispitivanju čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom opterećivanje okvira vršilo do 1,0 % katnog pomaka, nakon čega je primijećeno kako čelični okvir sam preuzima bočna opterećenja te nije bilo potrebe dalje opterećivati sustav, i ovdje će se nosivost numeričkoga modela usporediti s eksperimentalnim vrijednostima pri istome katnom pomaku.
Slikom 5.92 prikazana je histerezna petlja numeričkoga modela okvira s kombiniranim ispunom usporedno s eksperimentalno dobivenim anvelopama nosivosti serije uzoraka OGY-i.



Slika 5.92 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OY-i i modela *ATENA 2D*

Na slici se može uočiti dobro poklapanje numeričkih rezultata s krivuljom OGY-3 do katnog pomaka od 0,50 %, nakon čega je histerezna petlja bliže modelu OGY-1. Važno je primijetiti kako su vrijednosti horizontalnih sila u četiri uzastopna ciklusa, tj. pri horizontalnim pomacima od 12, 13, 14 i 15 mm, gotovo identične (iznose 99, 101, 101 i 100 kN), te da se nakon toga vrijednost horizontalne sile ponovo povećava. Ovaj fenomen posljedica je popuštanja porobetonskih zidanih elemenata kroz nekoliko ciklusa opterećivanja, a uočljiv je i kod ispitnog uzorka OGY-1, gdje se dogodio pri nešto manjem opterećenju i u samo dvama ciklusima (pogledati sliku 4.57).

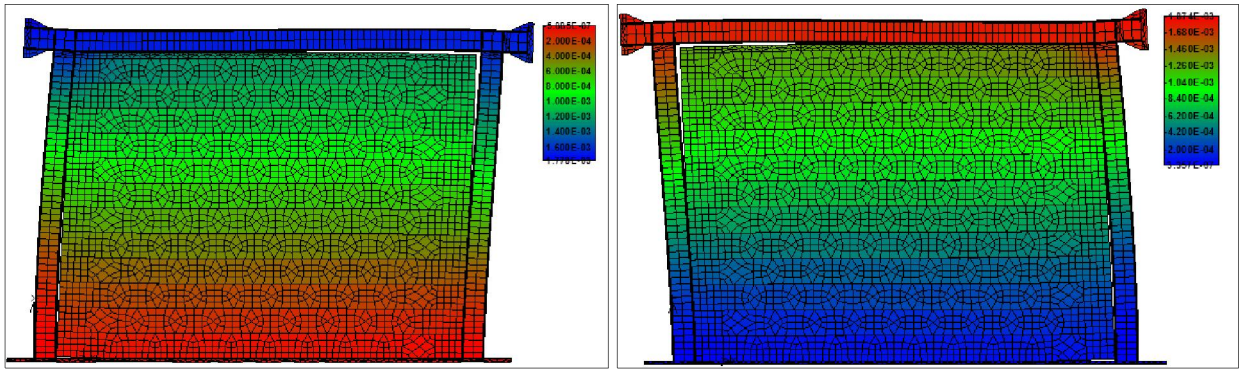
Na slici 5.93 prikazane su vrijednosti horizontalne sile pri katnom pomaku od 1,0 % i vrijednosti početne krutosti za eksperimentalne i numeričke rezultate.



Slika 5.93 – Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela iz programskog paketa *ATENA 2D*

Uspoređujući nosivost okvira s kombiniranim ispunom, dobivenu na modelu konačnih elemenata, može se zaključiti da je ona ista kao i kod uzorka OGY-1 i iznosi 106 kN. Odstupanje ove vrijednosti od prosječne vrijednosti nosivosti sva tri ispitana uzorka OGY-i iznosi 8 %. Početna krutost numeričkoga modela iznosi 25 kN/mm, što je za 15 % više nego što se dobilo ispitivanjem.

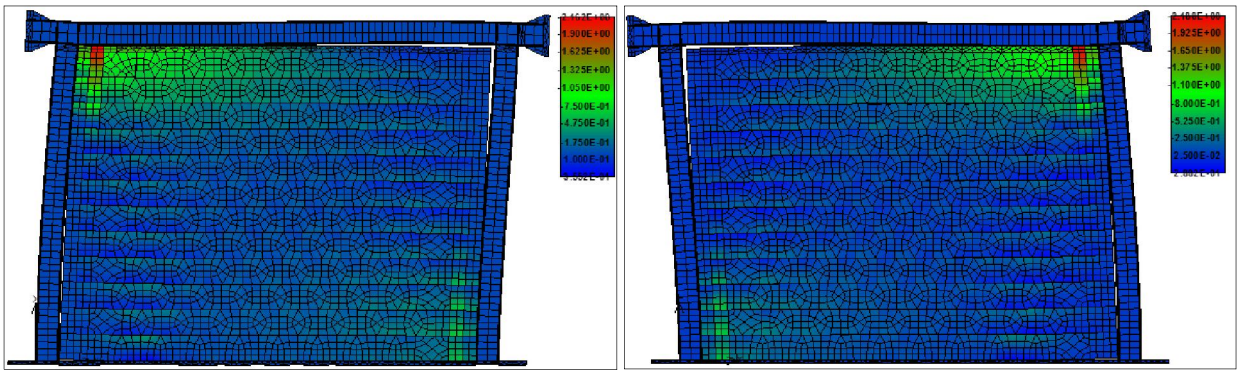
Slikama od 5.94 do 5.96 prikazani su horizontalni pomaci, te normalna i posmična naprezanja pri katnom pomaku okvira od 0,10 %. Vrijednost horizontalne sile pri katnom pomaku od 0,10 % iznosi 41 kN i za pozitivne i negativne cikluse opterećivanja.



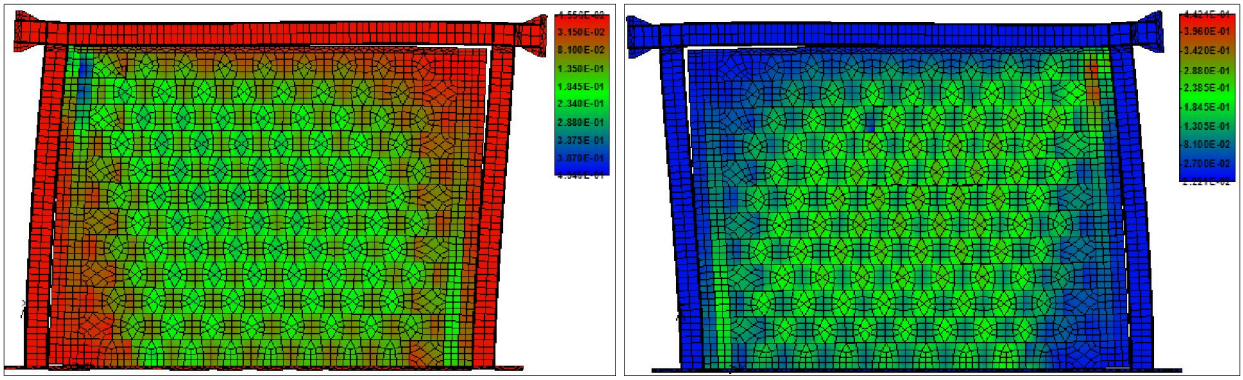
Slika 5.94 – Horizontalni pomaci okvira s kombiniranim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,10 %

Na slici 5.95, na kojoj su prikazana normalna naprezanja, može se uočiti koncentracija naprezanja na mjestima oslabljenja porobetonskog dijela ispuna. Vrijednosti ovih naprezanja bliske su tlačnoj čvrstoći

porobetonskih blokova, što ukazuje na brzu pojavu pukotina u nekom od vrlo bliskih ciklusa opterećivanja. Uspoređujući vrijednosti eksperimentalno dobivenih sila pri kojima su nastale prve pukotine (za OGY-1 prva pukotina je nastala pri 39 kN, za OGY-2 pri 40 kN, a za OGY-3 pri 50 kN) i sile od 41 kN na numeričkom modelu pri katnom pomaku od 0,10 %, može se zaključiti dobro podudaranje numeričkoga i fizikalnoga modela.



Slika 5.95 – Normalna naprezanja u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %

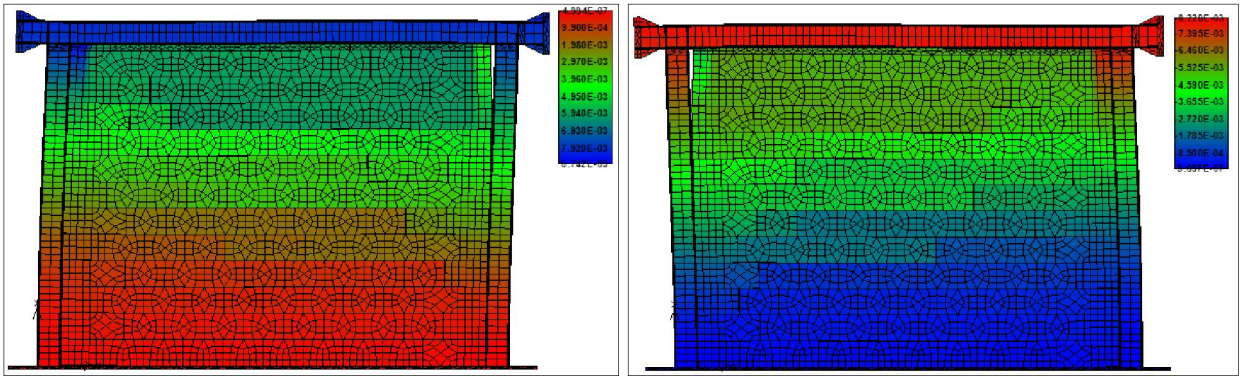


Slika 5.96 – Posmična naprezanja u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %

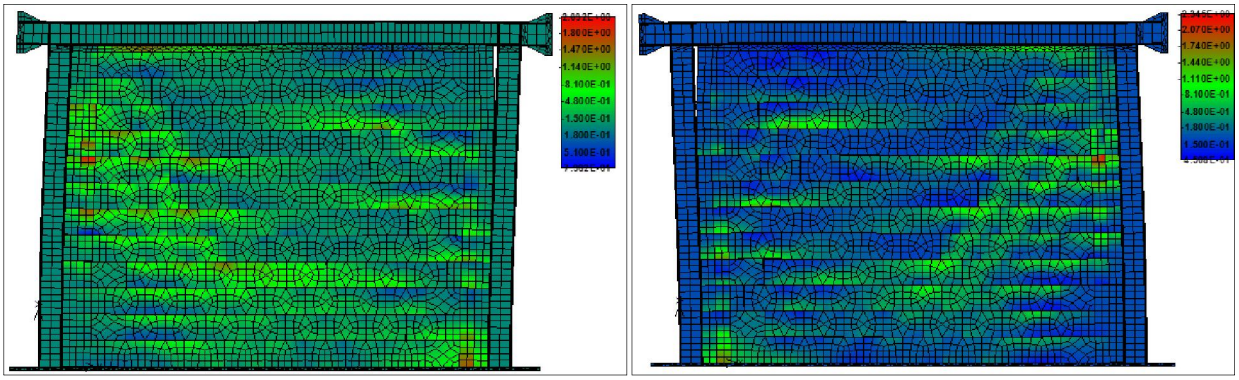
Slično raspodjeli normalnih naprezanja, može se primijetiti i koncentracija posmičnih naprezanja na mjestima oslabljenog porobetonskog ispuna, slika 5.96.

Pri horizontalnom pomaku okvira od 8,04 mm (0,50 % katnog pomaka) vrijednost horizontalne sile iznosi 73 kN za pozitivan ciklus opterećivanja i 71 kN za negativan ciklus, iz čega se može zaključiti kako je zidani ispun djelomično oštećen Do istoga se zaključka može doći i ako se pogledaju raspodjele naprezanja na slikama 5.98 i 5.99. Koncentracije posmičnih i normalnih naprezanja na oslabljenom dijelu porobetonskog ispuna nisu više locirane u samim kutovima ispuna, nego su se spustile nešto niže – približno na 2/3 visine stupa. Primijećeno je i kako se tlačna naprezanja ne pružaju dijagonalno iz kutova ispuna, nego se

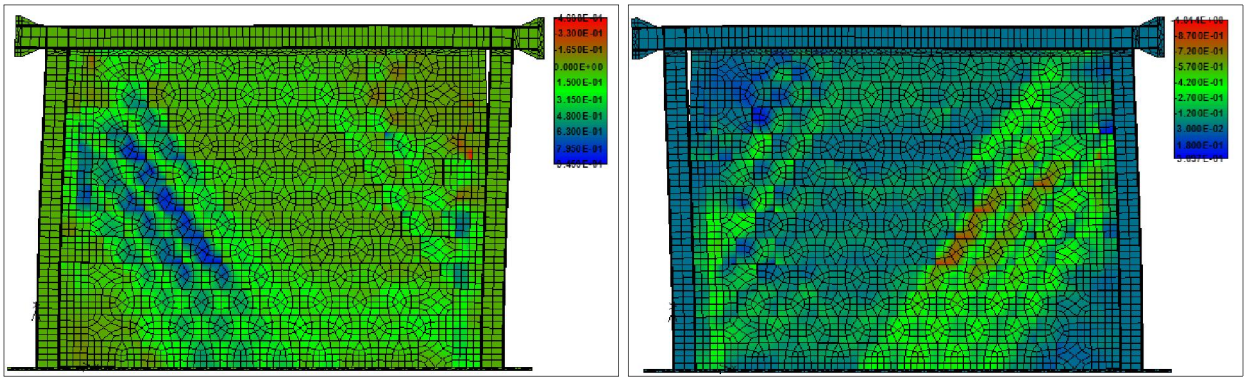
spuštaju s mjesta koncentracije naprezanja pod strmijim nagibom, kao što je to bio slučaj kod modela s glinenim i porobetonskim zidanim ispunom.



Slika 5.97 – Horizontalni pomaci okvira s kombiniranim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,50 %

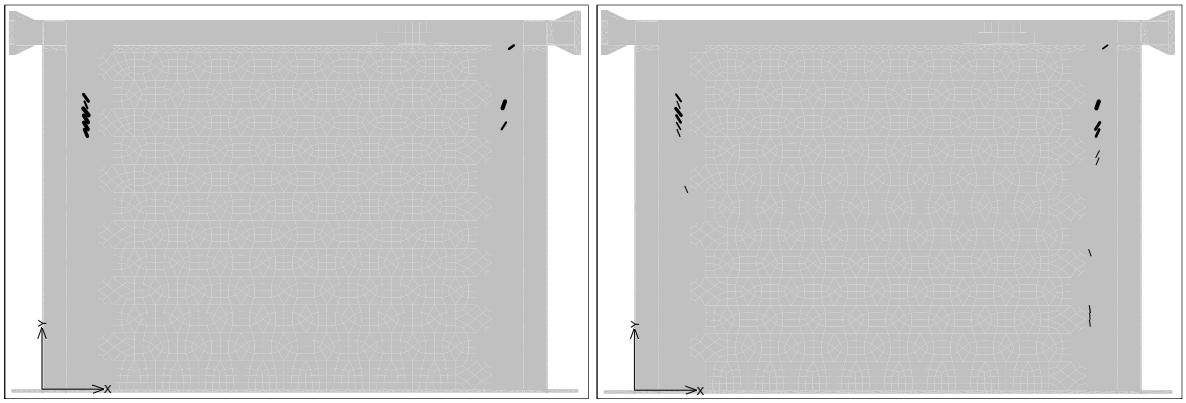


Slika 5.98 – Normalna naprezanja u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %

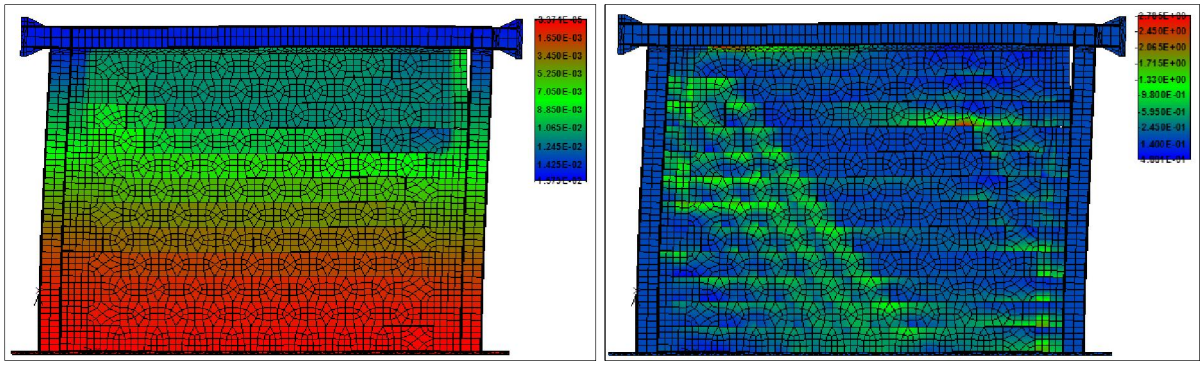


Slika 5.99 – Posmična naprezanja u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %

Pri katnome pomaku sustava od 0,50 % primijećene su pukotine u porobetonskim zidnim elementima zida, koje se protežu u vertikalnome smjeru i nalaze se na oslabljenom dijelu ovih blokova, što se može vidjeti na slici 5.100.



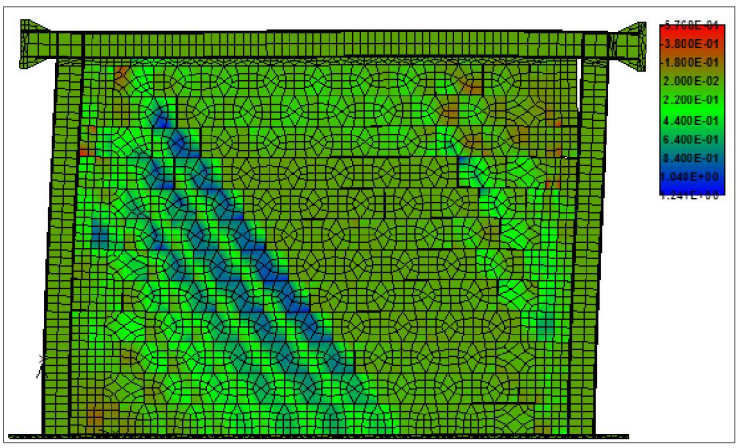
Slika 5.100 – Raspored pukotina u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %



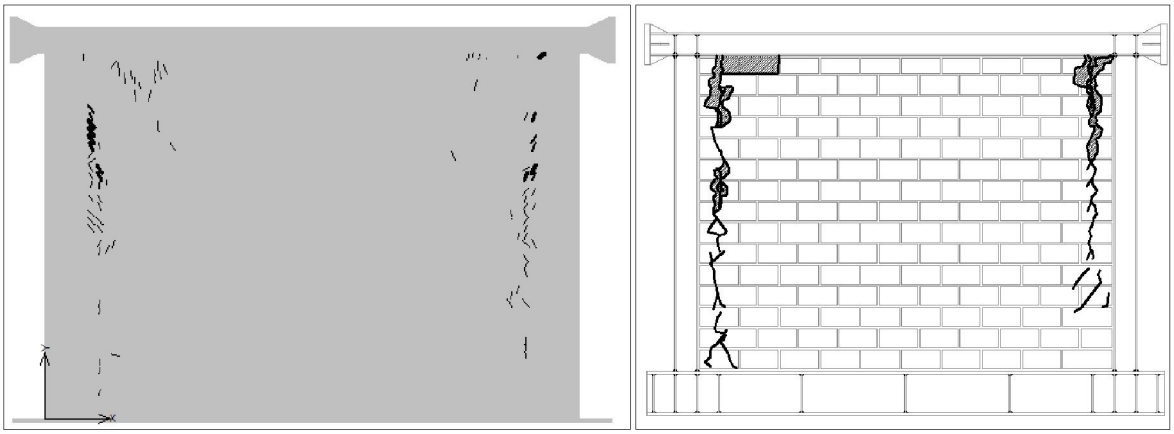
a) b)

Slika 5.101 – Horizontalni pomaci okvira (a) i normalna naprezanja (b) u kombiniranom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %

Slikom 5.101 b) prikazana su normalna naprezanja u kombiniranom zidanom ispunu, a slikom 5.102 posmična naprezanja. Iz ovih slika može se zaključiti kako je zidani ispun, još uvijek aktivan u prenošenju opterećenja, iako su se vertikalne pukotine proširile kroz oslabljeni dio porobetonskog ispuna, slika 5.103 b).

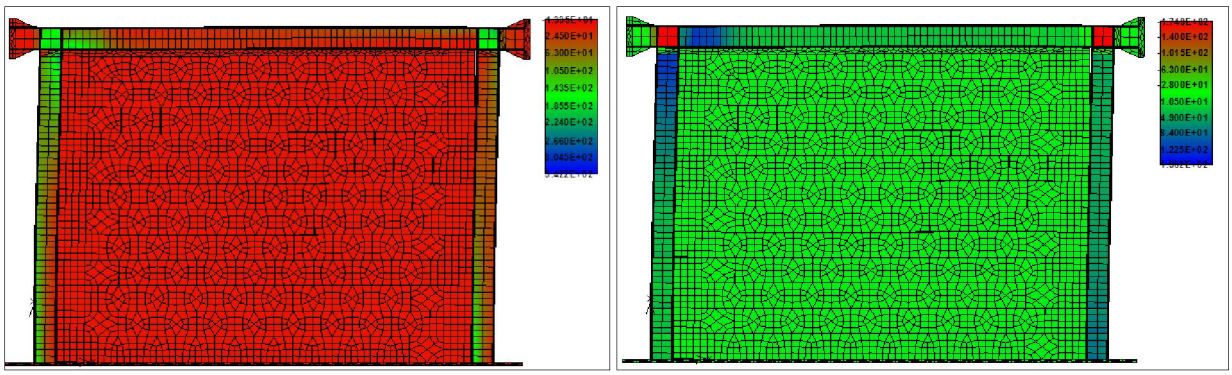


Slika 5.102 – Posmična naprezanja u porobetonskom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %



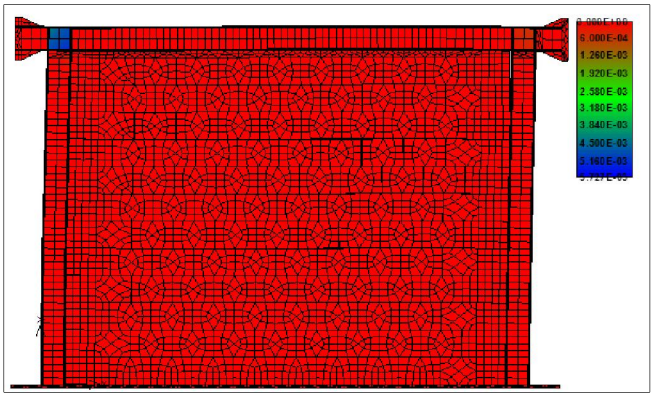
a) b)

Slika 5.103 – Raspored pukotina: a) model okvira s kombiniranim zidanim ispunom pri katnom pomaku od 1,0 %, b) raspored pukotina ispitnog uzorka OGY-3



a) b)

Slika 5.104 – Normalna (a) i posmična naprezanja (b) u čeličnom okviru pri međukatnom pomaku od 1,0 %



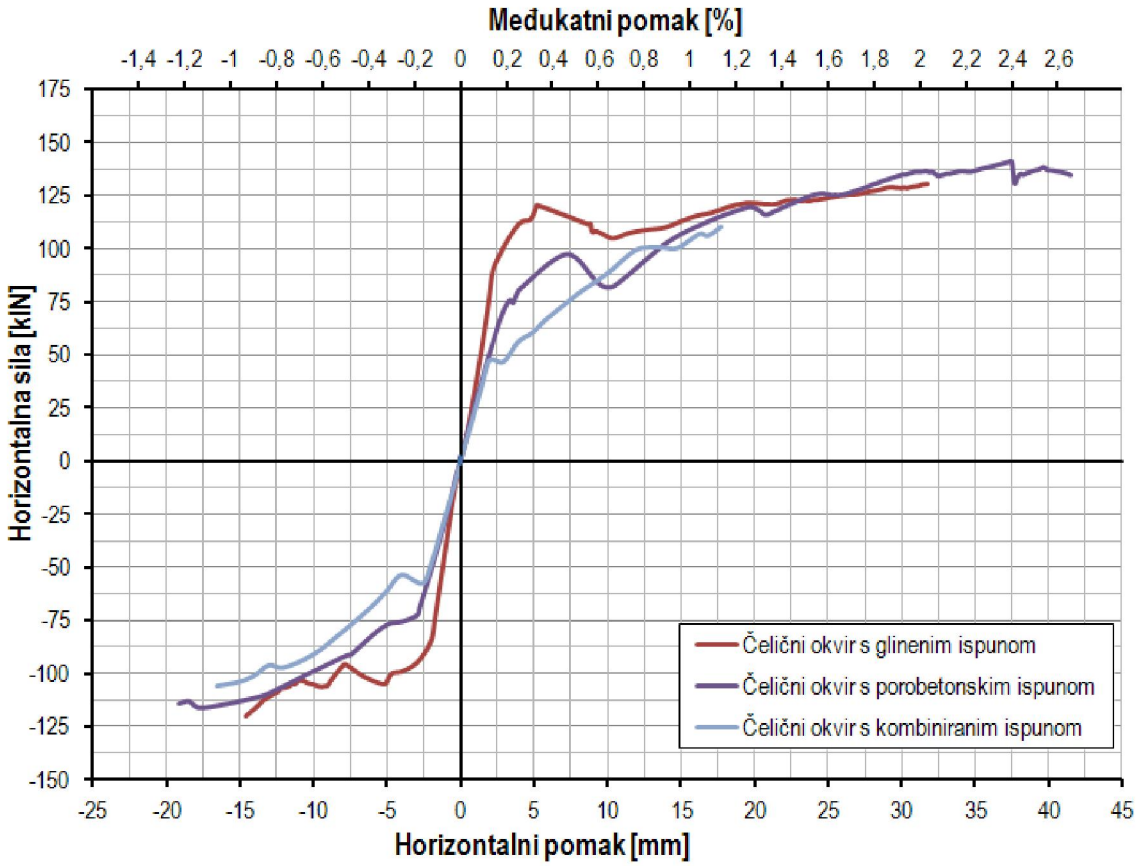
Slika 5.105 – Plastične deformacije čeličnog okvira s porobetonskim zidanim ispunom pri međukatnom pomaku od 1,0 %

Iz slike 5.105 vidi se da je područje spoja stupa i grede zahvaćeno plastifikacijom, iako pojedinačno gledajući normalna i posmična naprezanja, slika 5.104, nisu prekoračila granicu popuštanja, nego se plastifikacija dogodila uslijed interakcije ova dva naprezanja.

5.4.3.4. Zaključno o modelima izrađenim u *ATENI 2D*

Izrada i kalibracija numeričkih mikro-modela temeljenih na metodi konačnih elemenata zbog složenosti modela, broja parametara, te brzine proračuna zahtjevan je zadatak koji iziskuje puno vremena, pa je zbog toga nepraktičan za inženjersku primjenu gdje se traže brza i jednostavna rješenja. Poseban problem predstavlja slaba dostupnost opsežnih eksperimentalnih rezultata na osnovu kojih bi se mogla izvršiti kalibracija numeričkih modela, kako bi se s dovoljnom razinom pouzdanosti, mogli projektirati ovakvi kompozitni sustavi okvira sa zidanim ispunom.

Rezultati proračuna MKE modela okvira s glinenim, porobetonskim i kombiniranim ispunom kalibrirani na osnovu vlastitih eksperimentalnih istraživanja, detaljno objašnjeni u prethodnim točkama, prikazani su anvelopama nosivosti na slici 5.106. Za razliku od anvelopa nosivosti dobivenih proračunom modela sa zamjenskim dijagonalama i makro-elementom ispuna, anvelope dobivene na MKE modelima nisu tako pravilnoga oblika, zbog toga što se na njima očituju i promjene lokalnog karaktera (klizanje po sljubnicama morta, odvajanje ispuna od okvira, lokalna prekoračenja tlačnih i posmičnih čvrstoća itd.), a što je grubljim modelima nemoguće uzeti u obzir.



Slika 5.106 – Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak MKE modela iz *ATENA 2D*

Na gore prikazanoj slici može se vidjeti kako najveću otpornost na horizontalnu silu od 141 kN postiže model okvira s porobetonskim ispunom, što je za 8 % više nego model s glininenim zidanim ispunom, odnosno 25 % više, ako se promatra makimalna nosivost sustava s kombiniranim ispunom. Početne krutosti dobivene proračunom MKE modela s porobetonskim i kombiniranim ispunom slične su i iznose redom 23 i 25 kN/mm, dok je model s glinenim ispunom imao početnu krutost od 31 kN/mm. Navedeni rezultati u skladu su s ponašanjem ispitanih fizikalnih modela OG-i, OY-i i OGY-i.

Prednost MKE modela u odnosu na spomenute jednostavnije modele je u tome što se pregledom naprezanja, a osobito rasporeda pukotina, može dobro procjeniti način otkazivanja nosivosti sustava, što je za slučaj predmetnih modela obrađenih u ovome radu prikazano na slikama 5.65, 5.88, 5.103 iz kojih se može zaključiti dobro poklapanje numeričkih i eksperimentalnih rezultata.

5.5. Komentar rezultata

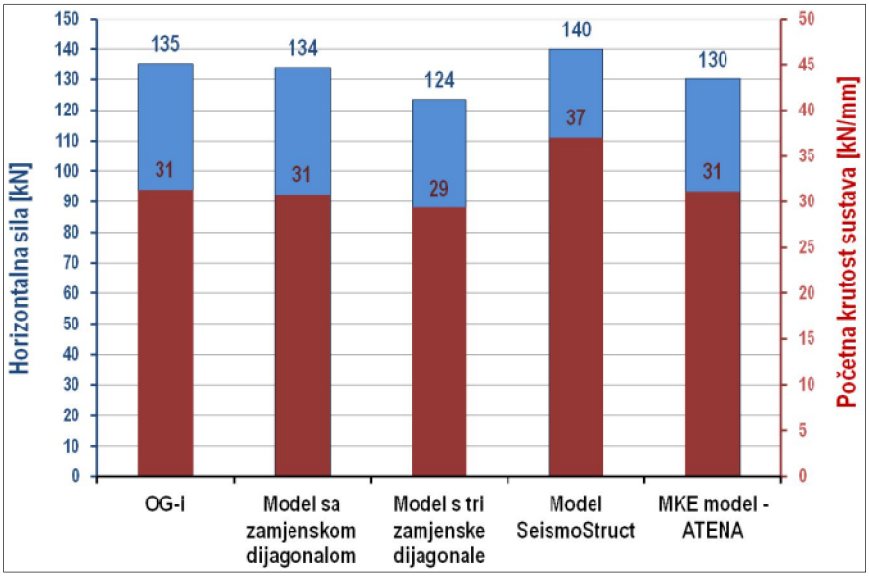
U ovome poglavlju prikazani su različiti načini modeliranja čeličnih okvira sa zidanim ispunom, i to, od jednostavnijih modela prema složenijima: primjenom štapnih modela u kojima se postojanje zidanog ispuna uzima u obzir pomoću zamjenskih dijagonala s nelinearnim zglobovima, zatim uporabom štapnih elementa i makro-modela zidanog ispuna, te je na kraju prikazano i modeliranje pomoću metode konačnih elemenata.
Kod jednostavnijih modela sa zamjenskom dijagonalom, u literaturi može se naći više različitih pristupa problemu procjene nosivosti i krutosti okvira s ispunom, a oni se očituju u pogledu broja dijagonala i proračuna anvelope nosivosti zidanog ispuna, [28, 46, 59].
Kako je pokazano i u ovome radu, ovakvim se modelima može, relativno brzo, dobiti uvid u početnu krutost i nosivost sustava čeličnih okvira sa zidanim ispunom, dok je kod mikro-modela potrebno poznavati više parametara za koje su nužni opsežni eksperimentalni rezultati ispitivanja ziđa. Primjena pojedinih modela ima svoju opravdanost u postavljenome cilju: modeli s dijagonalama pogodni su za rješavanje praktičnih problema; mikro-modeli izrađeni korištenjem konačnih elemenata presloženi su i zahtijevaju određenu razinu iskustva te kao takvi mogu poslužiti u znanstveno-istraživačke svrhe, a modeli kod kojih se za opisivanje ponašanja zidanoga ispuna koriste makro-elementi ugrađeni u programske pakete, nalaze se između prethodno spomenuta dva „ekstrema“.

Složenost modeliranja primjenom pojedinih modela očituje se u broju parametara koje je potrebno definirati kako bi se u potpunosti opisalo ponašanje zidanoga ispuna. U ovome radu je za definiranje ponašanja zidanog ispuna reprezentiranoga jednom dijagonalom, bilo potrebno definirati 5 parametara, za model s tri dijagonale 9, za makro-element zidanog ispuna u *SeismoStruct*-u 21, a pri korištenju metode konačnih elemenata, odnosno za mikro-model zidanog ispuna, 20 parametara. U potrebne parametre nisu ubrojeni oni koji proizlaze iz geometrije sustava, a bitno je napomenuti i prednost korištenja makro-modela iz *SeismoStruct*-a u vidu preporučenih vrijednosti određenih parametara, koje nije bilo potrebno mijenjati (trećina parametara je usvojena prema preporukama iz [66]).

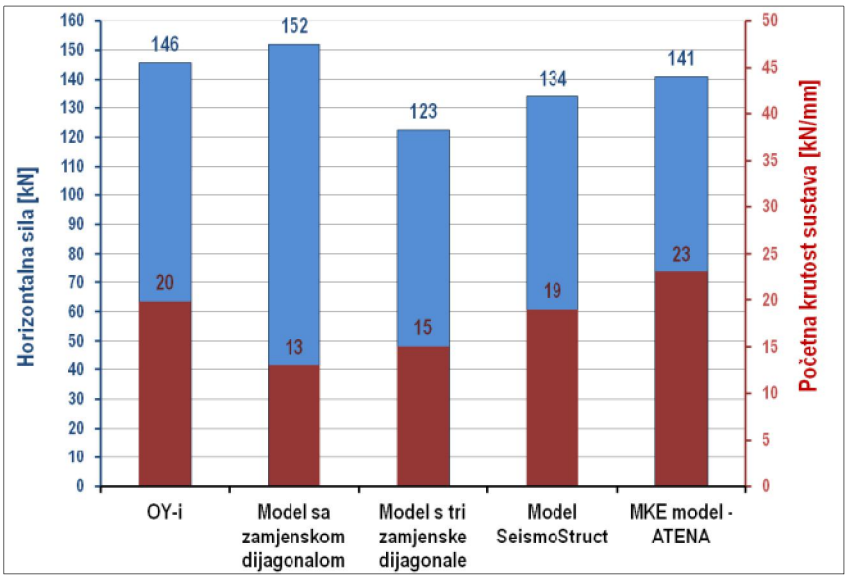
Na slikama 5.107 do 5.109 prikazane su srednje vrijednosti nosivosti na horizontalne sile i početne krutosti eksperimentalnih rezultata svih ispitivanih serija okvira s ispunom (OG-i, OY-i i OGY-i) usporedno s numeričkim rezultatima, dobivenim različitim načinima modeliranja zidanog ispuna.

Kod modeliranja čeličnih okvira s glinenim ispunom (OG-i), najbolje podudaranje u nosivosti sustava u odnosu na eksperimentalne, dao je model s jednom dijagonalom, potom slijedi MKE model iz *ATENA*-e, pa

model s makro-elementom zidanog ispuna iz programskog paketa SeismoStruct, te na kraju model s tri dijagonale. MKE model okvira s glinenim ispunom daje najbolju procjenu početne krutosti sustava, a model s makro-elementom zidanog ispuna, najlošiju. Interval pogrješki, kada se promatra maksimalna nosivost sustava, u rasponu je od 1 % do 9 %, a po pitanju početne krutosti interval pogrješke je od 1 % do 18 %.

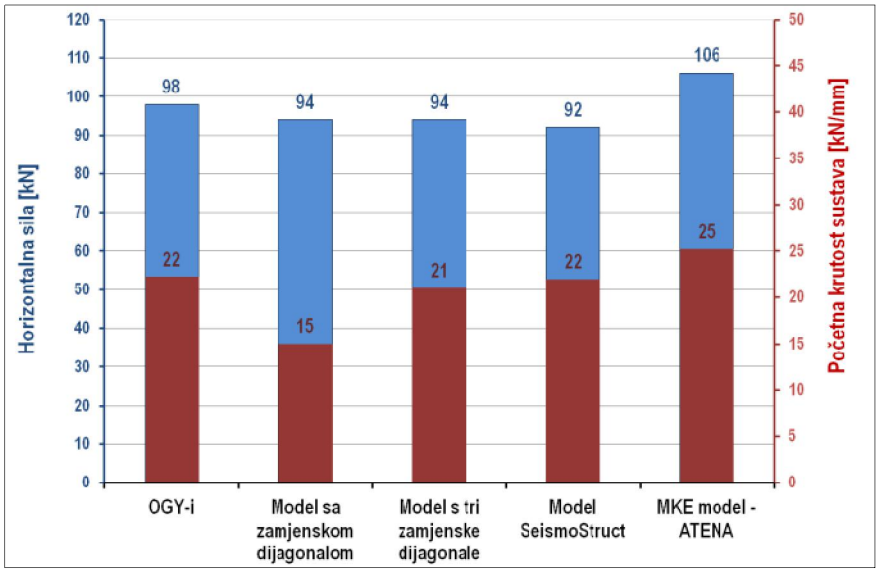


Slika 5.107 – Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata čeličnih okvira s glinenim ispunom



Slika 5.108 – Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata čeličnih okvira s porobetonskim ispunom

Ako se promatraju okviri s porobetonskim ispunom (OY-i), pogrješke su u rasponu od 3 % do 16 %, pri čemu MKE model ima najmanje odstupanje, a model s tri dijagonale podcjenjuje najveće. Najbolja procjena početne krutosti sustava OY-i dobivena je primjenom modela s makro-elementom zidanog ispuna (odstupanje 4 %), dok je pogrješka procjene kod modela s jednom dijagonalom 34 %.



Slika 5.109 – Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata čeličnih okvira s kombiniranim ispunom

Najveće odstupanje u početnoj krutosti modela s kombiniranim ispunom (OGY-i), kao i u slučaju sustava OY-i, ima model s jednom dijagonalom (32 %), a početna krutost modela s makro-elementom odgovara rezultatima ispitivanja. Najbolju procjenu otpornosti daju modeli s jednom i trima dijagonalama (odstupanje 4 %), a MKE model precjenjuje nosivost na horizontalne sile za 15 % u odnosu na eksperimentalne rezultate.

U usporedbi s fizikalnim eksperimentima, metoda konačnih elemenata relativno je jeftina i vremenski učinkovita, a korisna je i kao značajan alat u dimenzioniranju i analizi konstrukcija. Prednost ove metode je u tome što pruža detaljniji uvid u ponašanje zidanih ispuna (npr. razvoj i raspored pukotina), što s jednostavnijim modelima nije moguće, ali prije nego li se provede istraživanje pomoću ove metode, vrlo je važno razviti točan i pouzdan model, za što su opet neophodni eksperimentalni rezultati kako bi se modeli mogli kalibrirati.

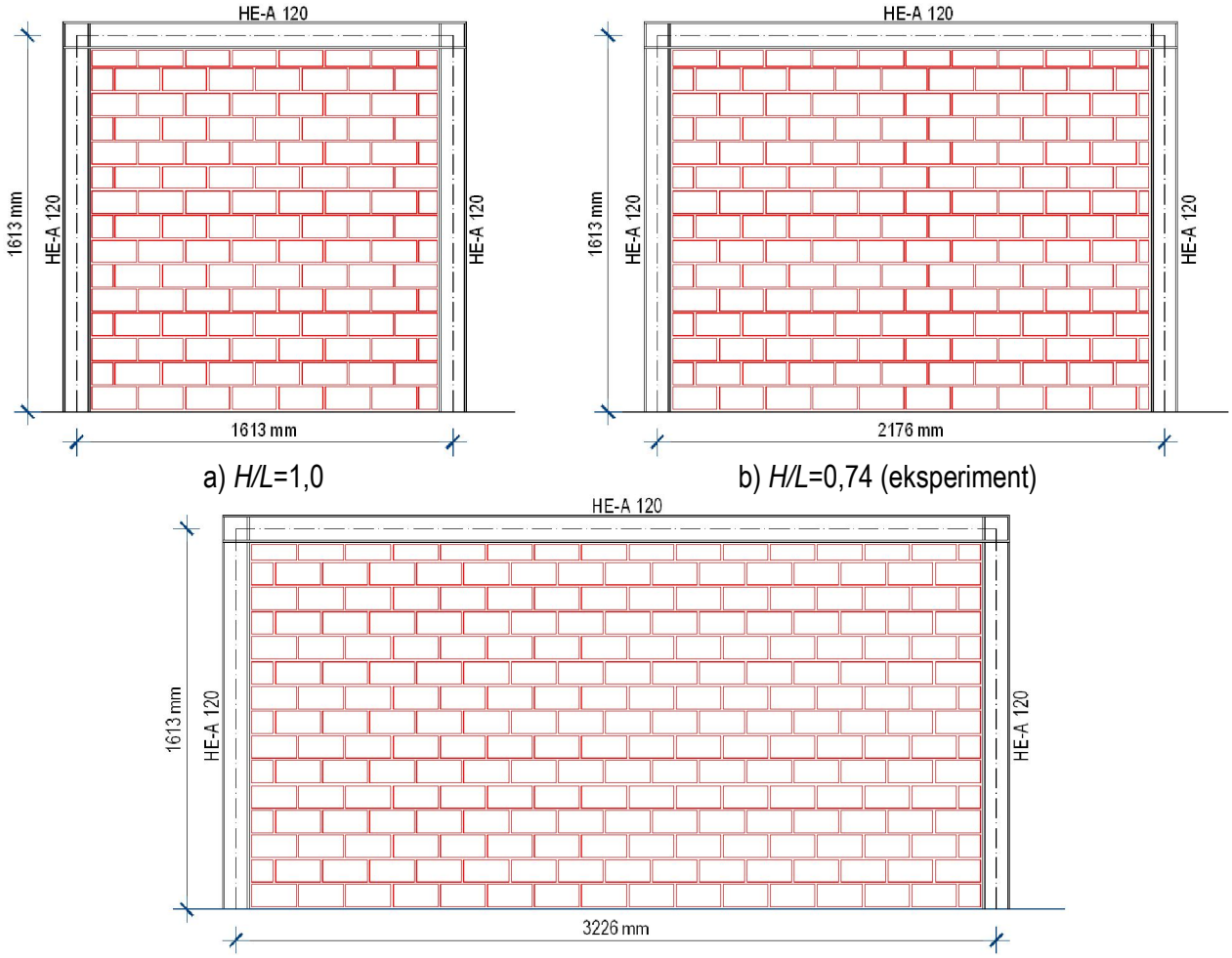
6. PARAMETARSKA ANALIZA

Numerički modeli modeliizrađeni u programskim paketima *SeismoStruct* i *ATENA 2D*, prikazani i elaborirani u prethodnome poglavlju ovoga rada, ovdje su korišteniu svrhu parametarske analizi i poslužili kao osnova za utvrđivanje utjecaja raznih parametara na ponašanje okvira pri potresnim opterećenjima. Pomoću parametarske analize na jednostavan se način mogu uvidjeti razlike u ponašanju složenoga sustava čeličnoga okvira i zidanog ispuna izloženoga potresnom djelovanju, pri čemu su u provedenim analizama mijenjani jedan ili dvaod više parametara kako bi rezultati bili usporedivi, a zaključci valjani.
Provedenom parametarskom analizomdobiven je uvid u ponašanje čeličnih okvira sa zidanim ispunom, odnosnouvid u nosivost raznih inačica ovakvih sustava izloženih horizontalnim silama u visini grede čeličnoga okvira. Grafički rezultati prikazani su u obliku anvelopahistereznih petlji te omogućuju jasnu i jednostavnu ocjenu utjecaja određenih variranih varijabli na ponašanje sustava.

6.1. Provedba parametarske analize

Za potrebe analiza korišten je numerički model razvijen u programskom paketu *SeismoStruct*, a za posebne slučajeve parametarske analize,korišten je numerički model razvijen u programskom paketu *ATENA 2D* -način modeliranja pojedinih čeličnih okvira sa zidanim ispunom proveden je na isti način kako je objašnjeno u 5. poglavlju ovoga rada.Parametarska analiza provedena je tako da su mijenjani parametri koje bi projektant takve konstrukcije imao na raspolaganju, odnosno za parametarsku analizu odabrane su varijable na koje se prilikom projektiranja može utjecati (broj stupova u ravnini okvira, odnosno broj raspona, granica popuštanja čeličnoga materijala, vrste priključaka stup-greda, omjer visine i širine okvira, kvaliteta zidanog ispuna) - izuzev čeličnih profila (HEA 120). Osim toga, izvršena je analiza utjecaja veličine oslabljenja u porobetonskim elementima kombiniranoga ispuna, te utjecaj raznih položaja razmaka (područja bez morta) između rubova zidanoga ispuna i okvira koji ga omeđuje. Kako bi se uzeo u obzir mogući položaj okvira u konstrukciji, u parametarskoj analizi mijenjane su i razine vrijednosti uzdužne tlačne sile u njihovima stupovima – čime se simulira razina uzdužne sile ovisno o razini opterećenja koje okvir prenosi, tj. od etaža na vrhu prema donjim etažama dolazi do povećanja opterećenja..

Slika 6.1 prikazuje neke od slučajeva sustava korištenih u parametarskoj analizi, a sažeti prikaz korištenih kombinacija svojstava i geometrija nalazi se u tablicama 6.1 i 6.2.



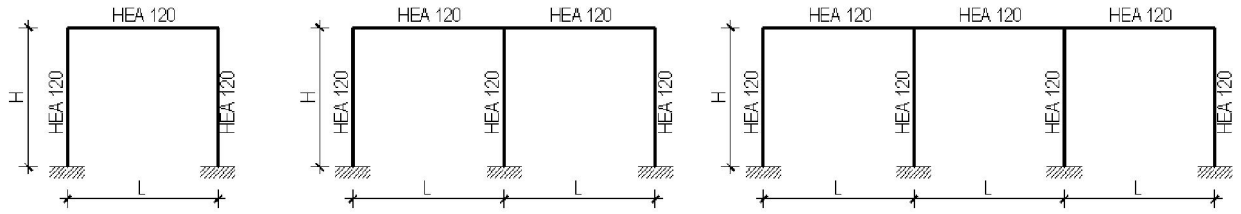
Slika 6.1 – Varijacije odnosa visine i širine čeličnog okvira sa zidanim ispunom

Granica popuštanja čeličnoga materijala varirana je unutar nominalnih granica popuštanja standardnih europskih čelika (kvalitete materijala S235, S275 i S355), odnosno za vrijednosti granica popuštanja od 235 N/mm^2, 275 N/mm^2 i 355 N/mm^2, te vrijednost granice popuštanja materijala od kojega su načinjeni okviri korišteni u eksperimentu - 337 N/mm^2 (točka 4.4, tablica 4.5). Ponašanje čelika u programskom je paketu *SeismoStruct*modelirano kao elastično – idealno plastično. U ispisu rezultata na dijagramima za europske kvalitete čelika korištene su oznake S235, S275 i S355, a kada je u pitanju eksperimentalna vrijednost, nije se koristila oznaka jer sesmatra kako se radi o referentnoj vrijednosti.

Vrijednosti razmaka stupova u ravnini za potrebe ove analize poprimaju tri veličine - 1613 mm, 2176 mm (referentna vrijednost prema eksperimentu) i 3226, slika 6.1. Ove vrijednosti odabrane su prema omjeru osne visine i širine čeličnoga okvira *H/L*, tako da donja i gornja granica ovoga intervala budu ±0,25

odreferentnog omjera, koji iznosi 0,74. Bitno je napomenuti da je osna visina čeličnog okvira *H*=1613 mm zadržana kroz sve omjere. Pri ispisu rezultata za označivanje ovoga parametra u grafičkim prikazima korištene su oznake *H/L*=0,50,*H/L*=0,74 i *H/L*=1,0, prema korištenim omjerima.

Broj raspona čeličnih okvira sa zidanim ispunom u ovoj analizi promatran je u području od jedan do tri. Pri povećanju broja raspona na dva i tri, okviri koji čine novu konstrukciju istovjetni su – odnosno njihova svojstva ista su u svim pogledima (omjer *H/L*, kvaliteta materijala, mehaničke karakteristike zidanog ispuna i vrsta priključka stup-greda) - slika 6.2. U ilustracijama rezultata za ovaj parametar korištene su oznake 1R, 2R i 3R, gdje brojčana vrijednost predstavlja broj raspona.



a) jedan raspon – 1R b) dva raspona – 2R c) tri raspona – 3R

Slika 6.2 – Varijacije broja raspona u parametarskoj analizi

Tablica 6.1 – Parametri varirani u analizi za slučaj djelomično nepopustljivog i nominalno zglobnog priključka i ukupan broj izrađenih modela za program *SeismoStruct*

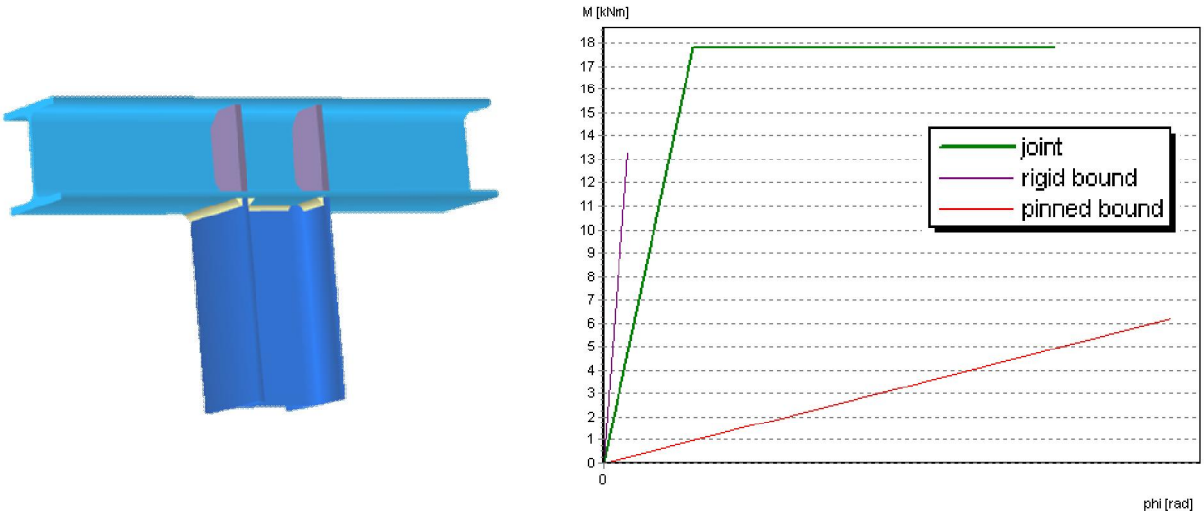
Granica popuštanja čelika - f_y [N/mm^2]	Omjer visine i širine okvira - H/L	Broj raspona - R	Vrsta ispuna	Broj modela
337	0,50	1	OG, OY, OGY	2x27=54
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
	0,74	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
	1,0	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	

Tablica 6.2 – Parametri varirani u analizi za slučaj nepopustljivog priključka i ukupan broj izrađenih modela

Granica popuštanja čelika - f_y [N/mm^2]	Omjer visine i širine okvira - H/L	Broj raspona - R	Vrsta ispuna	Broj modela
235	0,50	1	OG, OY, OGY	144
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
	0,74	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
	1,0	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
275	0,50	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
	0,74	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
	1,0	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
355	0,50	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
	0,74	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
	1,0	1	OG, OY, OGY	
		2	OG, OY, OGY	
		3	OG, OY, OGY	
337	0,50	1	OG, OY, OGY, M1, M2, M3, M4	
		2	OG, OY, OGY, M1, M2, M3, M4	
		3	OG, OY, OGY, M1, M2, M3, M4	
	0,74	1	OG, OY, OGY, M1, M2, M3, M4	
		2	OG, OY, OGY, M1, M2, M3, M4	
		3	OG, OY, OGY, M1, M2, M3, M4	
	1,0	1	OG, OY, OGY, M1, M2, M3, M4	
		2	OG, OY, OGY, M1, M2, M3, M4	
		3	OG, OY, OGY, M1, M2, M3, M4	

Prema mogućnosti relativne rotacije između spojenih elemenata stup-greda, u parametarskoj analizi varirane su tri inačice priključaka: nepopustljivi, djelomično nepopustljivi i nominalno zglobni. S obzirom na to da se klasifikacija priključaka prema rotacijskoj krutosti vrši ovisno o M-Φ dijagramu, za potrebe analize izvršeno je računalno modeliranje priključaka u programskom paketu *CoP*. Navedeni programski paket omogućava podjelu priključaka u komponente na osnovu kojih se, pomoću principa serijskoga spoja, proračunava mogućnost rotacije cijeloga priključka. Ova metoda rada poznata je kao *metoda komponenata*, a prihvaćena je u [57]. Na slici 6.3 prikazan je model priključka stup-greda sa

svimkomponentama koje omogućuju njegovo djelomično nepopustljivo ponašanje, a na slici 6.3prikazan je njegov M-Φ odnos (zelena linija) te granice za nepopustljivi (ljubičasta linija) i nominalno zglobni (crvena linija) priključak.



Slika 6.3 – Model priključka stup-greda izrađen u programskom paketu *CoP*(lijevo)i M-Φ dijagram priključka stup-greda dobiven analizom u programskom paketu *CoP*(desno)

Vrijednosti otpornosti na savijanje i poprečnu silu priključka su $M_{j,Rd}$= 17,77 kNm i $V_{j,Rd}$= 658 kN, a vrijednost početne krutosti iznosi $S_{j,ini}$ = 7152,85 kNm/rad. Za potrebe prikaza rezultata, vezano uz priključke, korištene su oznake *Z*, *P* i *K*, koje redom predstavljaju nominalno zglobni (Z), djelomično nepopustljivi (P) i nepopustljivi (K) priključak.

Vrste ispune čeličnoga okvira korištene u parametarskoj analizi mijenjanesu na način da se uzmu u obzir u praksi često korišteni materijali, kako je to urađeno i u eksperimentu, a za slučaj nepopustljivog priključka stup-greda (K),varirane su i četiri dodatne vrste ispuna – kombinacije kako je prikazano u tablici 6.1.Svojstva dodatnih četiriju vrsta zidanoga ispuna, koje su varirane u svrhu određivanja utjecaja mehaničkih svojstava zidanog ispuna na ponašanje sustava, prikazana su u tablici 6.3. Vrsta ispuna M3 predstavlja karakteristike ziđa od opečnog bloka prema [35], a na toj vrsti ziđa izvršene su izmjene tako da su dobivene preostale tri dodatne vrste ispune – M1, M2 i M4, i to na način da su vrijednosti svojstava ispuna M1 smanjenje za 50 % u odnosu na M3, ispuna M2 smanjene za 25 % u odnosu na M3, aza ispun M4 usvojene su mehaničke karakteristike ispuna M3 povećane za 10 %. U obrađenim rezultatima parametarske analize korištene su oznake OGY, OG, OY, M1, M2, M3 i M4, gdje OG predstavlja okvir s glinenim blokom, OY okvir s Ytong blokom, OGY okvir s kombiniranim ispunom, a M1, M2, M3 i M4 predstavljaju spomenute modele zidova prema tablici 6.3.

Tablica 6.3 – Mehaničke karakteristike analiziranih zidanih ispuna

	Naziv modela			
	M1	M2	M3	M4
f [N/mm^2]	7,50	11,25	15,00	16,50
f_m[N/mm^2]	2,50	3,75	5,00	5,50
f_k[N/mm^2]	1,50	2,25	3,00	3,30
E [N/mm^2]	2500	3750	5000	5500
f_t[N/mm^2]	0,09	0,14	0,18	0,20
c [N/mm^2]	0,35	0,53	0,70	0,77
$tg\alpha$ [-]	0,40	0,60	0,80	0,88

f - tlačna čvrstoća zidnog elementa
f_m - tlačna čvrstoća morta
f_k - karakteristična tlačna čvrstoća zida
E - modul elastičnosti zida
f_t - vlačna čvrstoća ziđa
c - kohezijska čvrstoća
$tg\alpha$ - kut unutarnjeg trenja

U tablici 6.4 prikazane su vrijednosti parametara potrebnih za modeliranje zidanog ispuna u programskom paketu *SeismoStruct* za modele od M1 do M4, dok su u tablici 6.5 prikazani parametri za zidani ispun iz eksperimenta (OG – glineni zidani ispun, OY – porobetonski zidani ispun i OGY – kombinirani zidani ispun).

Tablica 6.4 – Parametri zidanih ispuna M1, M2, M3 i M4 modeliranih u *SeismoStruct*-u

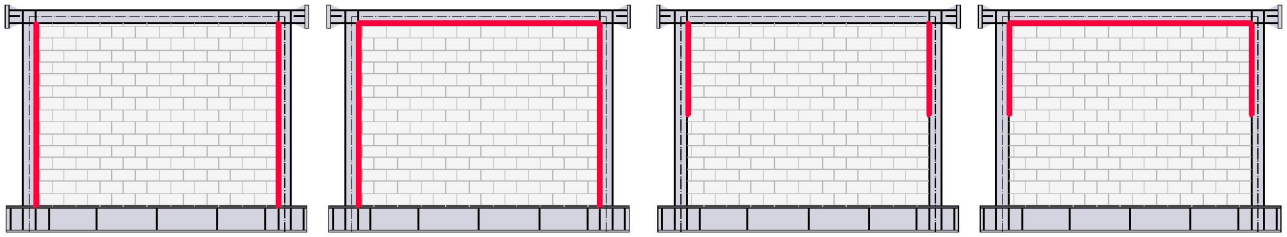
	M1			M2			M3			M4		
H [mm]	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613
L [mm]	1613	2176	3226	1613	2176	3226	1613	2176	3226	2176	2176	3226
H/L [-]	1,00	0,74	0,50	1,00	0,74	0,50	1,00	0,74	0,50	0,74	0,74	0,50
b_w[mm]	217,2	260,6	357,6	208,5	250,3	343,4	202,6	243,2	333,6	240,9	240,9	330,5
d_w [mm]	2160,6	2583,2	3479,3	2160,6	2583,2	3479,3	2160,6	2583,2	3479,3	2583,2	2583,2	3479,3
λ [-]	0,0025	0,0025	0,0023	0,0027	0,0027	0,0026	0,0029	0,0029	0,0028	0,0030	0,0030	0,0029
A [mm^2]	26058	31276	42907	25022	30032	41202	24313	29180	40033	28904	28904	39654
z [mm]	633,3	639,5	669,6	572,3	577,8	605,0	532,6	537,7	563,0	525,1	525,1	549,8
h_z [%]	16,28	16,44	17,21	14,71	14,85	15,55	13,69	13,82	14,47	13,50	13,50	14,13
$f_{m\theta}$[N/mm^2]	0,54	0,54	0,53	0,84	0,84	0,82	1,15	1,15	1,13	1,27	1,27	1,25

Tablica 6.5 – Parametri zidanih ispuna OG, OY i OGY modeliranih u *SeismoStruct*-u

	OG			OY			OGY		
H [mm]	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613
L [mm]	1613	2176	3226	1613	2176	3226	1613	2176	3226
H/L [-]	1,00	0,74	0,50	1,00	0,74	0,50	1,00	0,74	0,50
b_w[mm]	204,3	245,2	336,4	233,7	280,5	384,8	214,0	256,8	352,3
d_w [mm]	2160,6	2583,2	3479,3	2160,6	2583,2	3479,3	2160,6	2583,2	3479,3
λ [-]	0,0029	0,0029	0,0027	0,0021	0,0020	0,0020	0,0026	0,0025	0,0024
A [mm^2]	24517	29425	40369	28043	33658	46175	25674	30815	42275
z [mm]	543,8	549,0	574,9	760,9	768,3	804,4	610,3	616,2	645,2
h_z [%]	13,98	14,11	14,78	19,56	19,75	20,68	15,69	15,84	16,59
$f_{m\theta}$[N/mm^2]	1,40	1,39	1,37	1,06	1,02	0,84	0,55	0,55	0,55

Razine uzdužne tlačne sile u stupovima okvira, korištene u parametarskoj analizi, vezane su uz čisti čelični okvir, a mijenjane su kako bi se pokazao njihov utjecaj na nosivost.Utjecaj na nosivost nužno je prikazati zbog, već navedene, potrebe simuliranja razina uzdužne sile ovisno o razini opterećenja koje okvir prenosi, što je u funkciji položaja okvira po visini konstrukcije. Vrijednosti su odabrane tako da se pokrije raspon omjera uzdužne sile i otpornosti poprečnog presjeka stupa na uzdužnu tlačnu silu $N_{Ed}/N_{c,Rd}$od 0 do 0,8, u pet koraka – 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8. Rezultati tih proračuna prikazani su pomoću oznaka koje odgovaraju navedenim omjerima - $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ = 0, $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ = 0,2, $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ = 0,4, $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ = 0,6, $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ = 0,8.

Na početku poglavlja spomenuti posebni slučaj parametarske analize predstavlja procjenu utjecaja postojanja razmaka između zidanoga ispuna i čeličnogaokvira na ponašanje čeličnog okvira sa zidanim ispunom. Razmaci su postavljani između stupova i ispuna, te između grede i ispuna na takav način da se kroz analizu uzmu u obzir i ostale moguće kombinacije takvih slučajeva, a neki od njih prikazani su na slici 6.4. Ova parametarska analiza izvršena je u programskom paketu *ATENA 2D*, na modelu čeličnoga okvira s porobetonskimzidanim ispunom. Pri ispisu rezultata, vezanih uz ovu analizu, korištene su oznake koje se sastoje od prvog slovnog dijela, OY, koji označava kako se radi o čeličnom okviru s porobetonskim ispunom, zatim drugoga brojčanoga dijela, 1/1, 1/2, 1/3, 1/4,- koji označava udjel dodirne površine između stupa i ispuna bez morta, te posljednjega slovnoga dijela, G - kojim se označavao slučaj kada je dodirna površina između grede i ispuna bez morta (razmak po cijeloj duljini grede). Primjerice, oznaka OY-1/2 označava čelični okvir s porobetonskim ispunom, gdje na jednoj polovini površine između stupova okvira i ispuna nije ostvarena veza, a recimo oznaka OY-1/1-G označava čelični okvir s porobetonskim ispunom gdje na cijeloj duljini između stupova okvira i ispuna nije ostvarena veza,kao ni na cijeloj duljini između grede okvira i ispunanije ostvarena veza.



a) b) c) d)

Slika 6.4 – Modeli okvira s nepovezanim ispunom: a) OY-1/1, b) OY-1/1-G, c) OY-1/2 i d) OY-1/2-G

Drugi poseban slučaj parametarske analize predstavlja procjenu utjecaja oslabljenja porobetonskih elemenata u čeličnom okviru s kombiniranim zidanim ispunom, zajedno s izmjenom čvrstoća porobetonskih elemenata. Ovakvom se analizom pružaju naznake za mogućnost korištenja raznih kombinacija čvrstoće i oslabljenja porobetonskih elemenata u kombiniranome ispunu pri potresnome opterećenju.Kao i u prethodnome slučaju parametarske analize, numeričko modeliranje izvršeno je u programskom paketu *ATENA 2D*, uz napomenu kako se radi o modelu čeličnog okvira s kombiniranim zidanim ispunom. U prikazu rezultata korištene su oznake OGY – *XY* – *Z*, gdje dio oznake OGY označava kombinirani ispun, brojčani dio *XY* poprima vrijednosti ovisno o debljini oslabljenja, a *Z* označava izmjene čvrstoće, kako je prikazano u tablici 6.6.

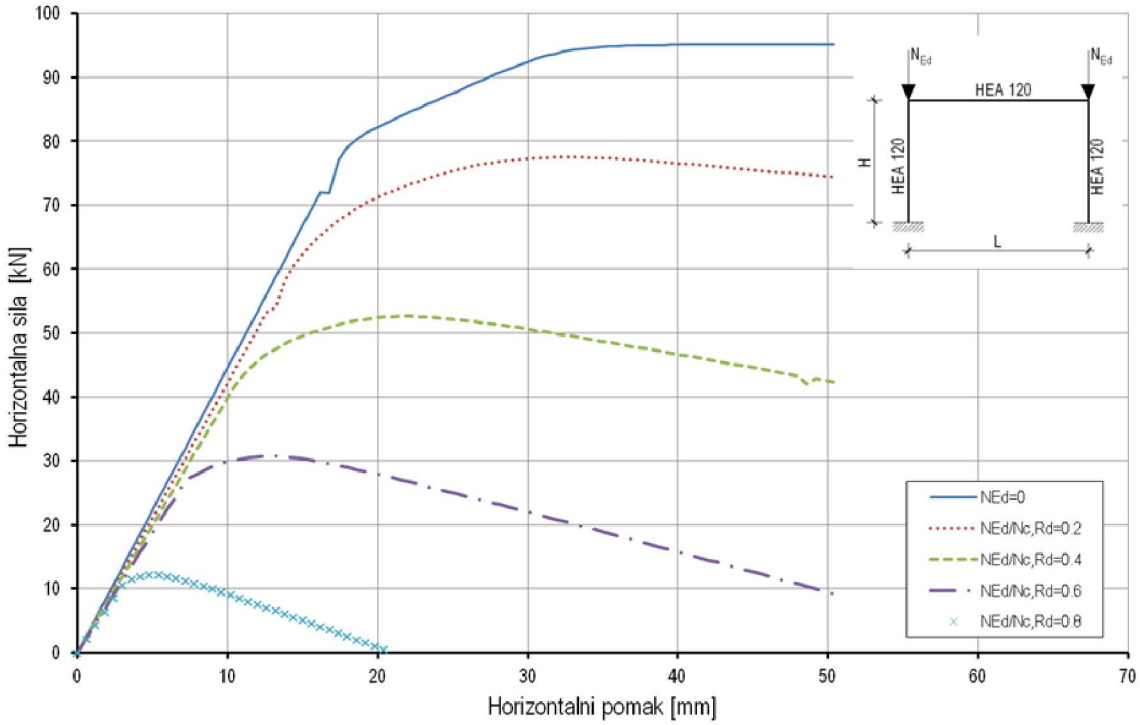
Tablica 6.6 – Parametri varirani u analizi utjecaja oslabljenja i čvrstoća porobetonskih elemenata u kombiniranom ispunu

Model	Debljina oslabljenja	Tlačna čvrstoća Ytong blokova [N/mm^2]	Vlačna čvrstoća Ytong blokova [N/mm^2]
OGY – 70 – 1	70 mm	2,0	1,0
OGY – 70 – 2	70 mm	2,5	1,0
OGY –70 – 3	70 mm	3,0	1,0
OGY – 70 – 4	70 mm	3,2	1,0
OGY – 60 – 1	60 mm	2,0	1,0
OGY – 60 – 2	60 mm	2,5	1,0
OGY – 60 – 3	60 mm	3,0	1,0
OGY – 60 – 4	60 mm	3,2	1,0
OGY – 50 – 1	50 mm	2,0	1,0
OGY – 50 – 2	50 mm	2,5	1,0
OGY – 50 – 3	50 mm	3,0	1,0
OGY – 50 – 4	50 mm	3,2	1,0
OGY – P – 1	-	0,25	0,50
OGY – P – 2	-	0,50	0,50
OGY – P – 3	-	0,75	0,50
OGY – P – 4	-	1,0	0,50
OGY – P – 5	-	2,0	1,0
OGY – P – 6	-	2,5	1,0
OGY – P – 7	-	3,0	1,0
OGY – P – 8	-	3,2	1,0

6.2. Rezultati parametarske analize

6.2.1. Razina uzdužne sile u stupovima čeličnog okvira

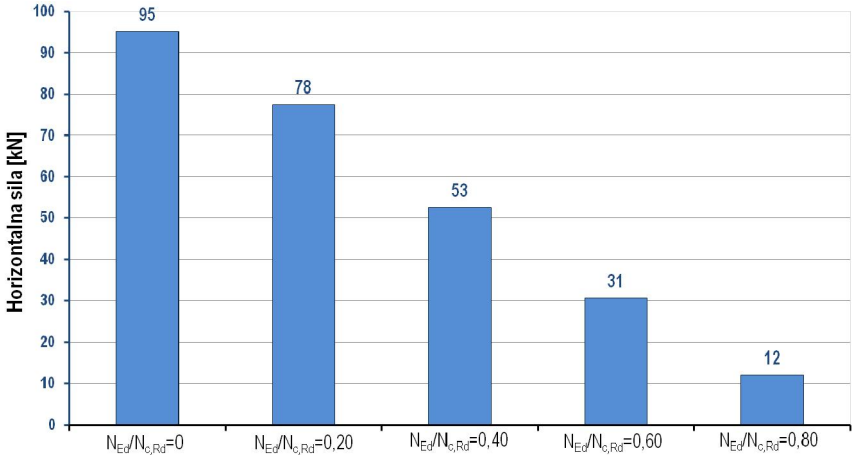
Slika 6.5 predstavlja rezultate proračuna čeličnoga okvira, osnih dimenzija *H*x*L*=1613 x 2176 mm (eksperiment), čiji su poprečni presjeci stupova i greda od profila HEA 120, a kvaliteta čeličnog materijala jednaka je eksperimentalnim rezultatima (f_y=337 N/mm^2). Uzdužne sile, kojima je okvir opterećen, iznose N_{Ed} =170,79 kN (za $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ = 0,2), N_{Ed} =341,58 kN (za $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ = 0,4), N_{Ed} =512,37 kN (za $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ = 0,6) i N_{Ed} =683,17 kN (za $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ = 0,8).



Slika 6.5 – Ponašanje čeličnog okvira u ovisnosti o razini uzdužne tlačne sile u stupovima

Može se uočiti kako manji omjeri proračunskoga djelovanja i otpornosti dozvoljavaju znatno veće razine horizontalne sile koju okvir može preuzeti, a osim toga, jasno je uočljivo postojanje korelacije između razine omjera $N_{Ed}/N_{c,Rd}$ i nosivosti. Navedeni odnos obrnuto je proporcionalne prirode, dakle s porastom uzdužne sile smanjuje se mogućnost preuzimanja horizontalne sile. Ovime se dokazuje postojanje snažnih veza između navedenih sila, te je stoga uzdužna tlačna sila u stupovima okvira izuzeta iz kombinacija varijabli korištenih u parametarskoj analizi, a iz toga razloga nisu opterećivani stupovi okvira pri eksperimentalnome ispitivanju.

Na slici 6.6 prikazane su maksimalne horizontalne sile koje su okviri mogli preuzeti u ovisnosti o razini uzdužne sile u stupovima.

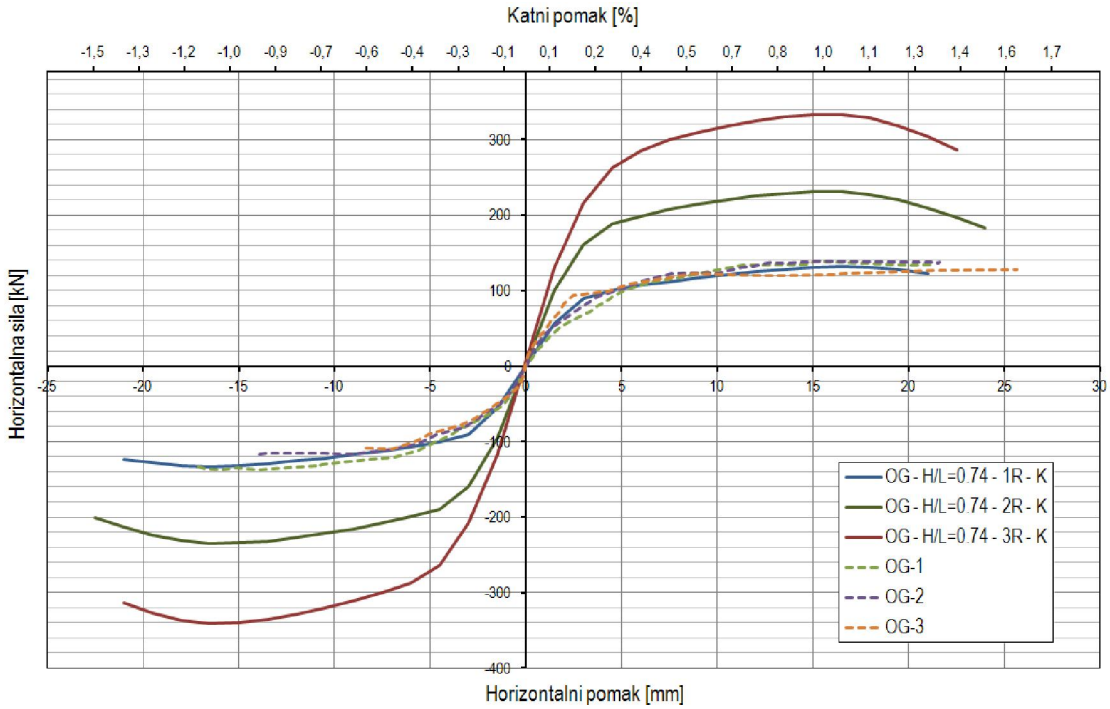


Slika 6.6 – Horizontalna nosivost čeličnog okvira u ovisnosti o razini uzdužne tlačne sile u stupovima

6.2.2. Čelični okviri s glinenim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira, broja raspona, vrste priključka i kvalitete čeličnoga materijala

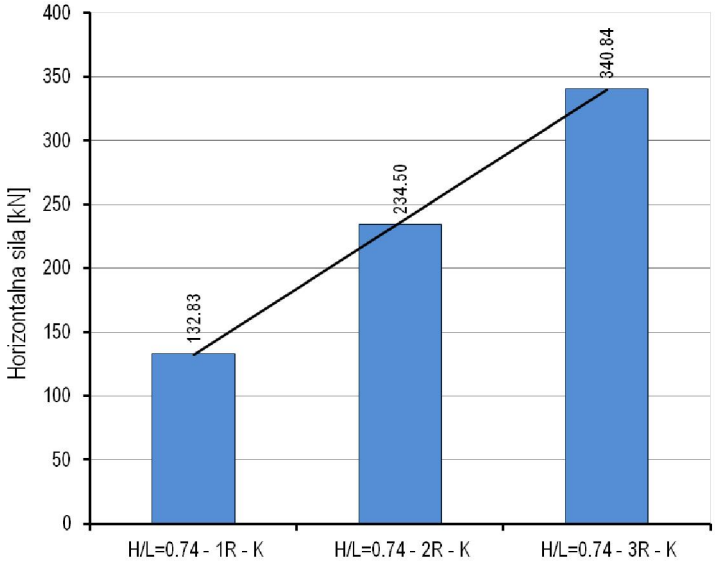
Kroz ovu seriju modela varirani su u naslovu navedeni parametri, a prikazani su samo neki od dijagrama, koji su usporedivi s eksperimentalnim rezultatima. Ostali dijagrami iz ove serije modela nalaze se u Prilogu A (slike od A1 do A9 i A40 do A48).

Slika 6.7prikazuje anvelopehistereznih petlji čeličnoga okvira s glinenim zidanim ispunom kod kojega je variran broj raspona, a zadržan je omjer visine i širine okvira (*H/L*=0,74), te vrsta priključka (nepopustljivi).



Slika 6.7 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), *H/L*=0.74; *R*=1, 2 i 3

Iz ovoga je dijagrama vidljivo karakteristično ponašanje ovisnosti broja raspona i svih ostalih parametara; naime s povećanjem broja raspona postoji pravilan porast nosivosti okvira s ispunom na horizontalne sile, odnosno može se reći kako je odnos gotovo linearan, slika 6.8. Nosivost čeličnoga okvira s nepopustljivim priključcima i omjerom H/L=0,74, te jednim rasponom iznosila je 133 kN, dok je za isti omjer i dva raspona nosivost povećana za 77 % (235 kN), a u slučaju triju raspona povećanje iznosi 157 % (341 kN).



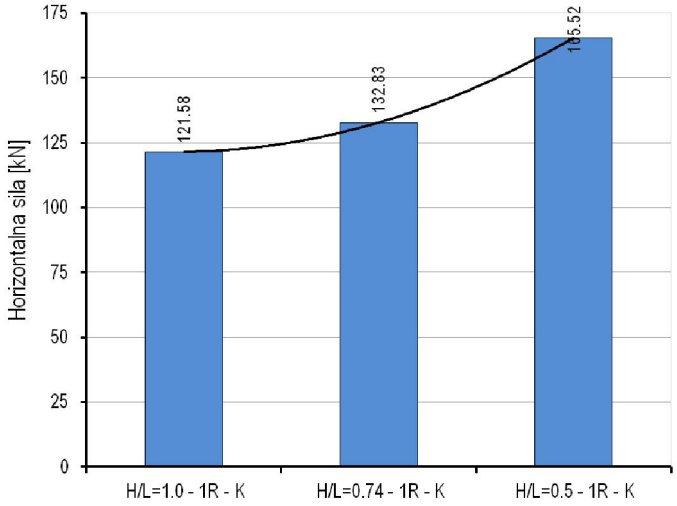
Slika 6.8 - Porast nosivosti čeličnih okvira s glinenim ispunom s brojem raspona

Osim povećanja nosivosti, s brojem raspona povećava se i početna krutost sustava, pa je tako za promatrani sustav s jednim rasponom početna krutost 37 kN/mm, za sustav s dva raspona početna krutost iznosi 67 kN/mm (povećanje od 81 %), a za tri raspona 87 kN/mm (povećanje od 135 % u odnosu na sustav s jednim rasponom).

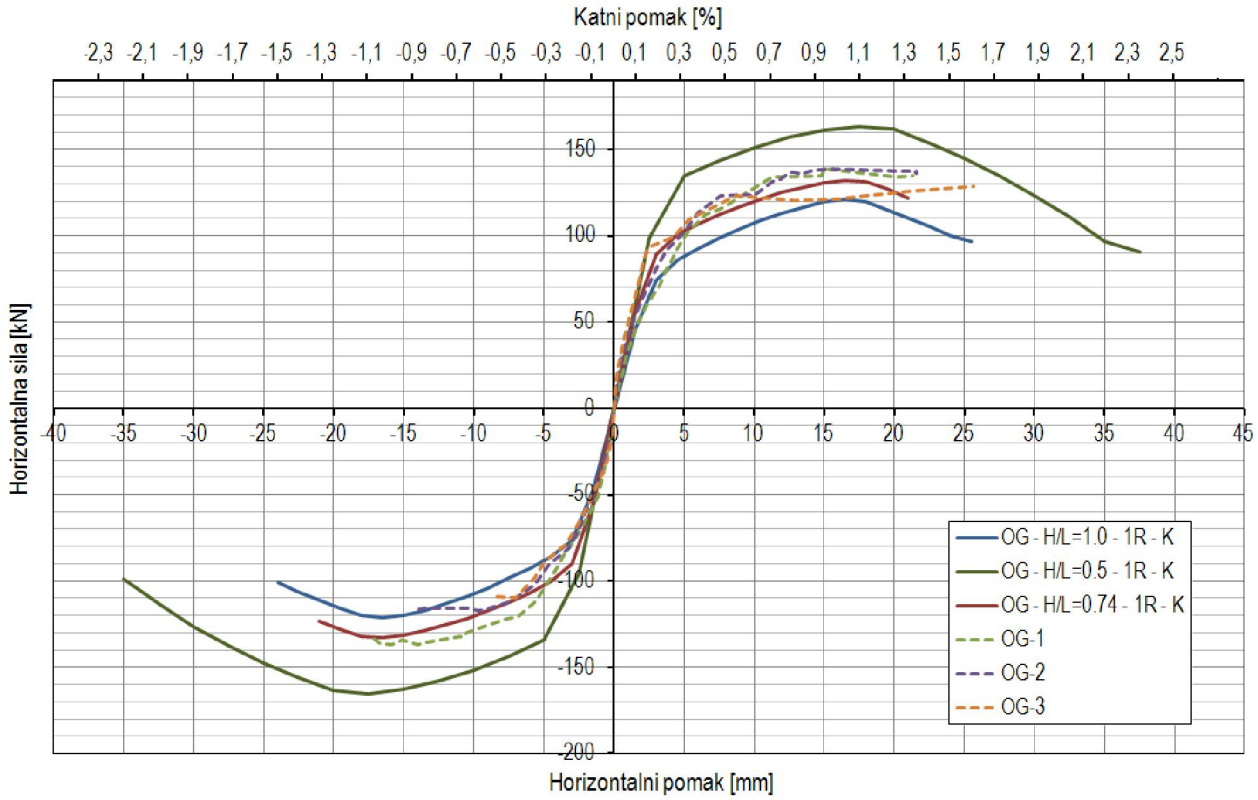
S povećanjem broja raspona ne dolazi do značajnijih promjena u krajnjem pomaku okvira, odnosno pomaci su slični pri slomu konstrukcije.

Slika 6.10 prikazuje anvelopehistereznih petlji čeličnoga okvira s glinenim zidanim ispunom kod kojega je variran omjer visine i širine okvira (*H/L*=0.50, 0.74 i 1.0), a zadržan je broj raspona i vrsta priključka (nepopustljivi).

Rezultati proračuna pokazuju kako se s povećanjem omjera *H/L* nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom na horizontalnu silu smanjuje. Povećanje nosivosti promjenom omjera s 1,0 na 0,74 znatno je manje nego pri promjeni s 0,74 na 0,50, pa tako u navedenome primjeru ta promjena iznosi 10 % razlike u nosivosti između omjera 1,0 i 0,74, te 25 % razlike između 0,74 i 0,50, slika 6.9. Ovakvo ponašanje vidljivoje kroz sve modele u kojima je variran omjer *H/L* s raznim kombinacijama ostalih parametara (broj raspona i vrsta priključka).



Slika 6.9 - Porast nosivosti čeličnih okvira s glinenim ispunom sa smanjenjem omjera *H/L*



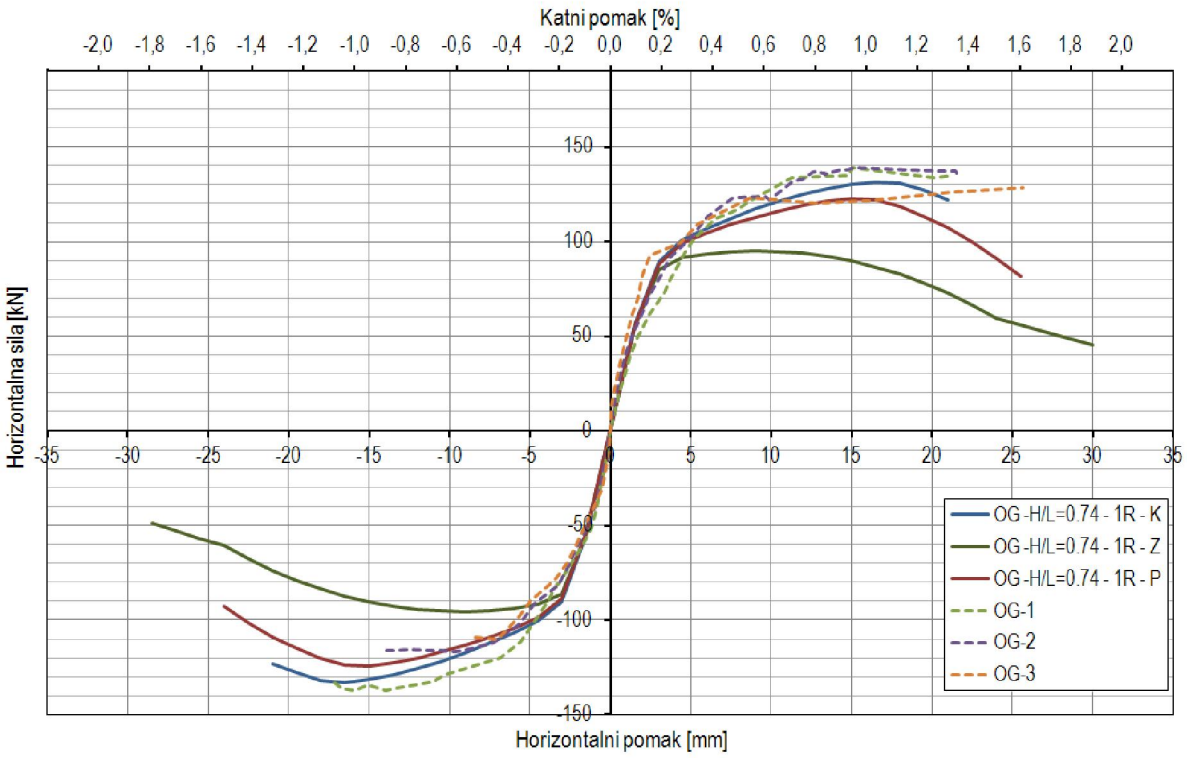
Slika 6.10 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), *R*=1, *H/L*=0.50, 0.74 i 1.0

Povećanjem omjera H/L smanjuje se početna krutost sustava, s time da je to smanjenje naglašenije između omjera 0,74 na 1,0 od omjera 0,50 na 0,74. Početna krutost okvira s glinenim ispunom, kod kojega je *H/L*=1,0, iznosi 31 kN/mm, kod omjera *H/L*=0,74 početna krutost je 37 kN/mm, a za omjer *H/L*=0,50 krutost iznosi 40 kN/mm. Promjena krutosti između modela s omjerima *H/L* 0,74 i 1,0 iznosi 29 %, dok promjena među omjerima 0,50 i 0,74 iznosi 8 %.

Također se može primijetiti da, slično kao i kod nosivosti, postoje male razlike u krajnjim pomacima kod omjera *H/L* 0,74 i 1,0, a omjer 0,50 ima nešto veću mogućnost deformiranja.

Ponašanje čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom u kojima je varirana vrsta priključka stup-greda, pri čemu je zadržan omjer *H/L* i broj raspona, prikazano je na slici 6.11. Kako je uočljivo na dijagramu horizontalna sila-horizontalni pomak, vrsta priključka nema utjecaja na početnu krutost sustava - svi modeli imaju jednaku početnu krutost koja iznosi 37 kN/mm. Ovo je moguće objasniti time što početna krutost ovisi prvenstveno o zidanome ispunu, a vrsta priključka dolazi do izražaja tek nakon popuštanja zidanoga ispuna.Na slici se može uočiti kako najveću nosivost ima okvir s nepopustljivim priključcima - 133 kN, a najmanja nosivost od 95 kN zabilježena je kod okvira sa zglobnim priključkom stup-greda. Okvir s djelomično nepopustljivim priključkom preuzeo je horizontalnu silu od 124 kN, što je za 7 % manje u odnosu na model s nepopustljivim priključcima, odnosno 31 % manje u odnosu na okvir sa zglobnim priključkom stup-greda. Ovo se može objasniti time što su karakteristike djelomično nepopustljivog priključka, u smislu rotacijske krutosti, bliže granici nepopustljivog priključka nego granici nominalno zglobnog priključka, slika 6.3.

Na slici 6.11 može se uočiti kako je okvir sa zglobnim priključkom imao najveću mogućnost deformiranja, a okvir s nepopustljivim priključkom najmanju.



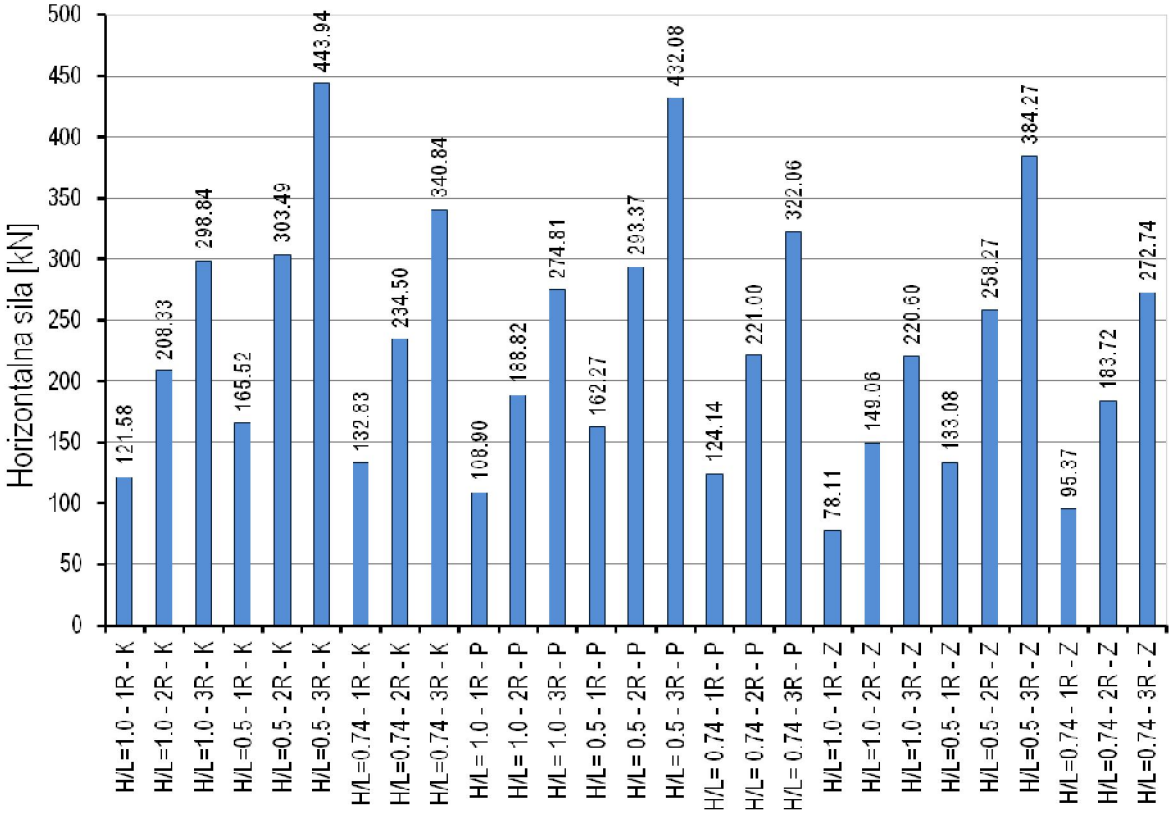
Slika 6.11 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom –H/L=0.74; R=1; nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

U tablici 6.7 dani su podatci o maksimalnim silama (i pripadnim pomacima) i maksimalnim pomacima (i pripadnim silama) za sve promatrane slučajeve čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom u kojima su varirani omjeri visine i širine okvira (*H/L*), broj raspona (R) i vrsta priključka stup-greda (K, P, Z).

Tablica 6.7 – Nosivost i pomaci čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera *H/L*, broja raspona i vrste priključka

Model	Maksimalna sila i pripadni pomak		Maksimalni pomak i pripadna sila	
	F_{max} [kN]	u [mm]	F [kN]	u_{max} [mm]
OG - H/L=1.0 - 1R - K	121,58	16,5	101,24	24,0
OG - H/L=1.0 - 2R - K	208,33	15,0	193,79	19,5
OG - H/L=1.0 - 3R - K	298,84	16,5	279,90	19,5
OG - H/L=0.5 - 1R - K	165,52	17,5	98,72	35,0
OG - H/L=0.5 - 2R - K	303,49	17,5	267,67	25,0
OG - H/L=0.5 - 3R - K	443,94	17,5	427,65	22,5
OG - H/L=0.74 - 1R - K	132,83	16,5	123,13	21,0
OG - H/L=0.74 - 2R - K	234,50	16,5	201,06	22,5
OG - H/L=0.74 - 3R - K	340,84	16,5	313,60	21,0
OG - H/L=1.0 - 1R - P	108,90	14,9	68,16	31,5
OG - H/L=1.0 - 2R - P	188,82	13,4	102,32	31,4
OG - H/L=1.0 - 3R - P	274,81	13,5	156,58	25,5
OG - H/L=0.5 - 1R - P	162,27	20,0	97,60	32,5
OG - H/L=0.5 - 2R - P	293,37	17,5	191,42	30,0
OG - H/L=0.5 - 3R - P	432,08	17,5	288,94	30,0
OG - H/L=0.74 - 1R - P	124,14	15,0	92,81	24,0
OG - H/L=0.74 - 2R - P	221,00	13,5	157,03	24,0
OG - H/L=0.74 - 3R - P	322,06	15,0	279,77	21,0
OG - H/L=1.0 - 1R - Z	78,11	9,0	45,35	30,0
OG - H/L=1.0 - 2R - Z	149,06	7,5	68,06	30,0
OG - H/L=1.0 - 3R - Z	220,60	7,5	90,84	30,0
OG - H/L=0.5 - 1R - Z	133,08	12,5	76,50	30,0
OG - H/L=0.5 - 2R - Z	258,27	10,0	137,73	30,0
OG - H/L=0.5 - 3R - Z	384,27	12,5	265,16	27,5
OG - H/L=0.74 - 1R - Z	95,37	9,0	48,99	28,5
OG - H/L=0.74 - 2R - Z	183,72	9,0	76,56	28,5
OG - H/L=0.74 - 3R - Z	272,74	9,0	105,67	28,5

Slika 6.12 prikazuje nosivosti čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom u kojima su varirani omjer H/L, broj raspona i vrsta priključka.



Slika 6.12 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira *H/L*, broja raspona i vrste priključka

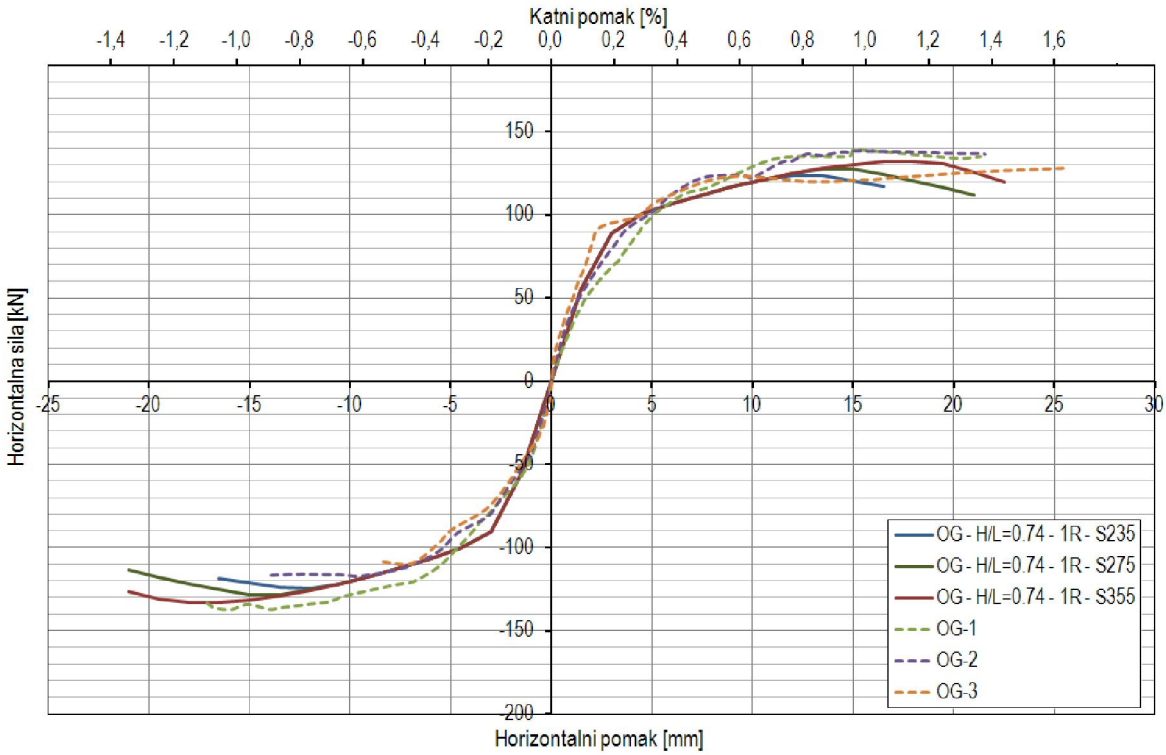
Rezultati parametarske analize prikazani na slici 6.13 predstavljaju rezultate proračuna čeličnog okvira s glinenim zidanim ispunom u kojemu je promatran utjecaj kvalitete čeličnoga materijala na nosivost sustava. Ponašanje sustava istovjetno je do razine najvećeg opterećenja koje je mogao preuzeti okvir s najslabijom kvalitetom materijala – u ovom slučaju to se odnosi na kvalitetu S235. Tek nakon prelaska te razine opterećenja dolazi do grananja krivulja, pa je tako sljedeća grana istovjetna do razine najvećeg opterećenja po kvaliteti materijala sljedećeg okvira (S235 → S275 → eksperiment → S355).

Nosivost čeličnoga okvira s kvalitetom materijala S235 iznosi 125 kN, s materijalom S275 postiže se nosivost od 128 kN, a s najkvalitetnijim materijalom S355 nosivost je 133 kN. Odnosno, izraženo u postotcima, čelični okvir izrađen od materijala S275 ima nosivost 2 % veću u odnosu na okvir čija je kvaliteta S235, a nosivost okvira s materijalom S355 je 6 % veća u odnosu na S235.

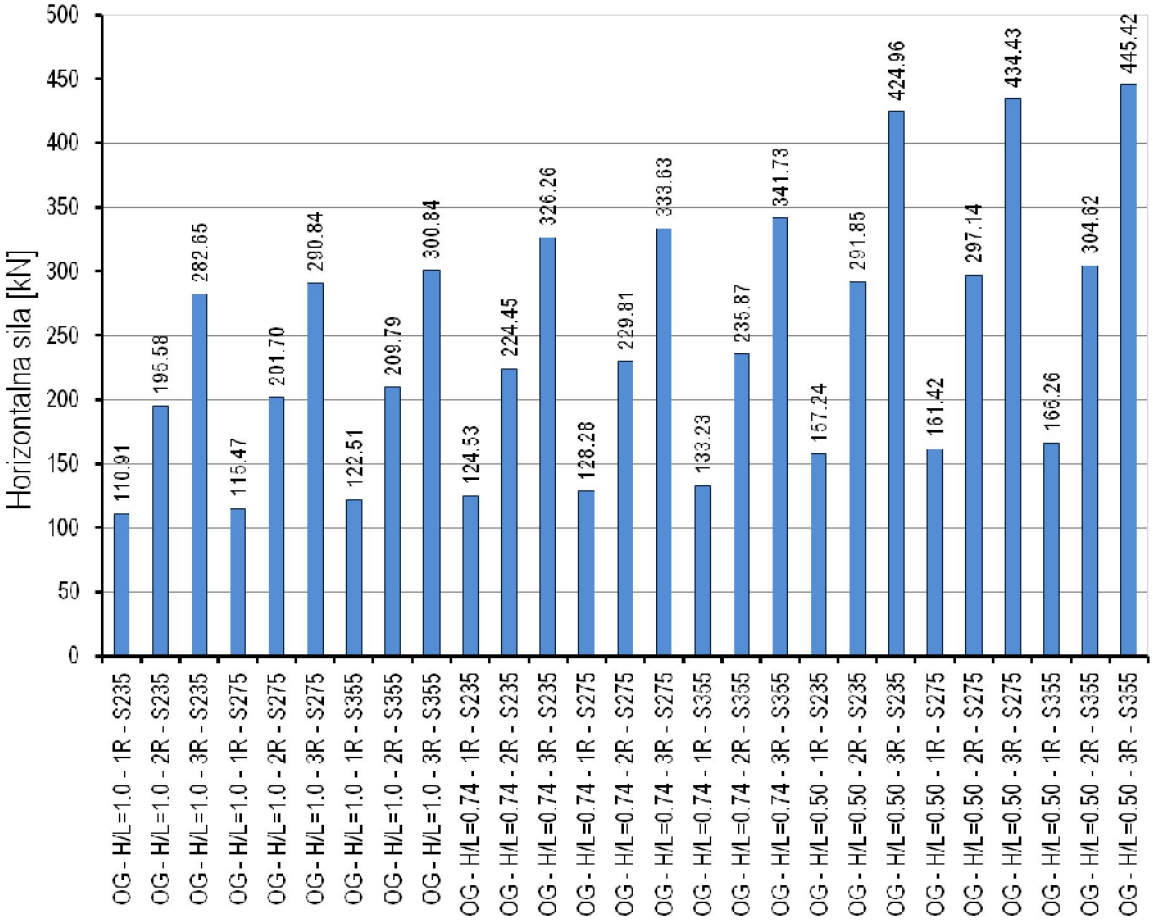
Početna krutost svih modela iznosi 37 kN/mm.

Uz povećanje nosivosti s povećanjem kvalitete čeličnog materijala primjetno je kako dolazi do povećanja maksimalnih pomaka. Neki od modela ne prikazuju ovakvo ponašanje, ali to se može objasniti numeričkom nestabilnošću modela uslijed nanošenja opterećenja pomoću pomaka – prirast pomaka je takav da se može dogoditi otkazivanje modela, iako se krajnja deformacija događa između dvaju posljednjih koraka.

Na slici 6.14 prikazane su nosivosti svih modela s glinenim zidanim ispunom u kojima su, osim omjera visine i širine okvira i broja raspona, primijenjene različite kvalitete čeličnoga materijala.



Slika 6.13 - Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom – nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=1



Slika 6.14 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira *H/L*, broja raspona i kvalitete materijala

U tablici 6.8 nalaze se podatci o maksimalnim silama i maksimalnim pomacima za čelične okvire s glinenim zidanim ispunom u kojima su varirani omjeri visine i širine okvira (*H/L*), broj raspona (R) te kvaliteta materijala.

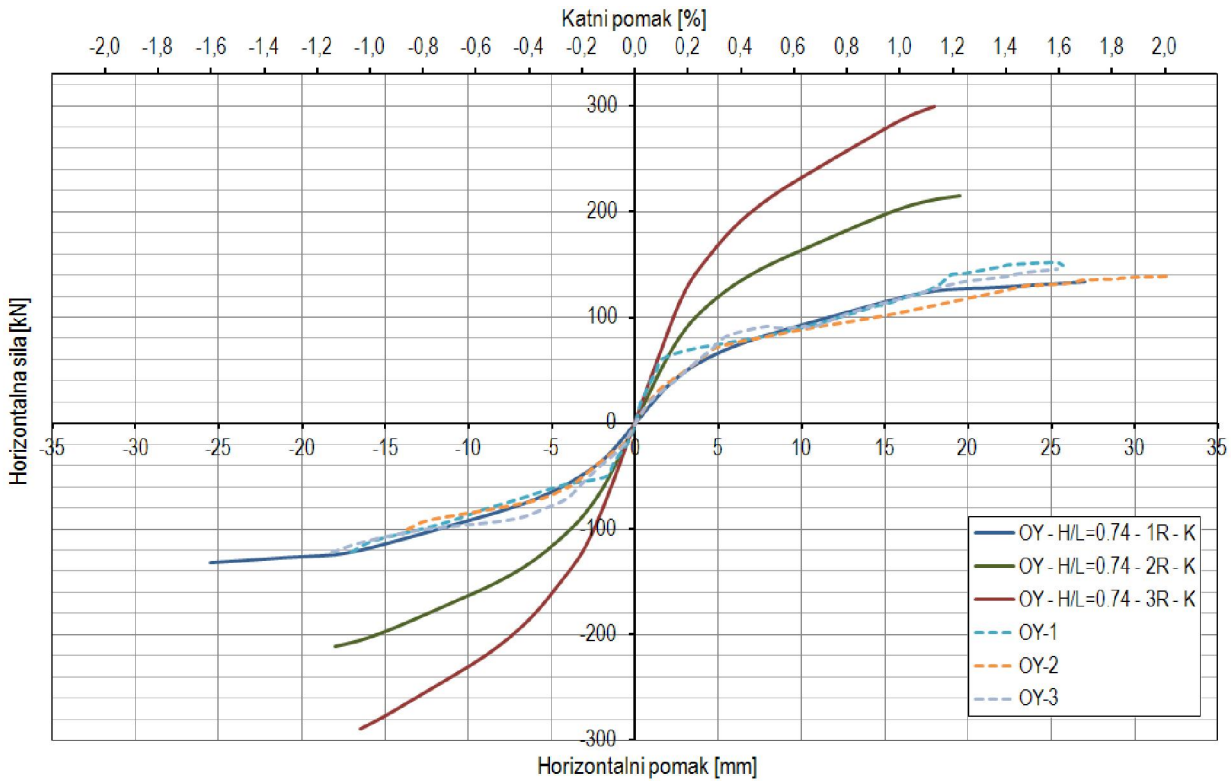
Tablica 6.8 – Nosivost i pomaci čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera *H/L*, broja raspona i kvalitete materijala

Model	Maksimalna sila i pripadni pomak		Maksimalni pomak i pripadna sila	
	F_{max} [kN]	u [mm]	F [kN]	u_{max} [mm]
OG - H/L=1.0 - 1R - S235	110,91	12,0	108,71	14,0
OG - H/L=1.0 - 2R - S235	195,58	12,0	165,30	19,0
OG - H/L=1.0 - 3R - S235	282,65	12,0	280,19	13,0
OG - H/L=1.0 - 1R - S275	115,47	13,5	115,06	13,5
OG - H/L=1.0 - 2R - S275	201,70	13,0	188,80	17,0
OG - H/L=1.0 - 3R - S275	290,84	13,0	286,73	15,0
OG - H/L=1.0 - 1R - S355	122,51	16,5	95,85	28,5
OG - H/L=1.0 - 2R - S355	209,79	16,5	188,93	21,0
OG - H/L=1.0 - 3R - S355	300,84	16,0	235,89	24,0
OG - H/L=0.74 - 1R - S235	124,53	12,0	118,37	16,5
OG - H/L=0.74 - 2R - S235	224,45	12,0	212,18	16,0
OG - H/L=0.74 - 3R - S235	326,26	12,0	284,35	19,5
OG - H/L=0.74 - 1R - S275	128,28	13,5	113,20	21,0
OG - H/L=0.74 - 2R - S275	229,81	13,5	214,11	18,0
OG - H/L=0.74 - 3R - S275	333,63	13,5	332,99	15,0
OG - H/L=0.74 - 1R - S355	133,23	16,5	126,25	21,0
OG - H/L=0.74 - 2R - S355	235,87	16,5	193,57	24,0
OG - H/L=0.74 - 3R - S355	341,73	16,5	304,35	22,5
OG - H/L=0.50 - 1R - S235	157,24	13,5	153,19	16,5
OG - H/L=0.50 - 2R - S235	291,85	13,5	278,88	18,0
OG - H/L=0.50 - 3R - S235	424,96	15,0	385,84	22,5
OG - H/L=0.50 - 1R - S275	161,42	15,0	141,20	24,0
OG - H/L=0.50 - 2R - S275	297,14	15,0	296,40	16,0
OG - H/L=0.50 - 3R - S275	434,43	16,5	388,92	24,0
OG - H/L=0.50 - 1R - S355	166,26	18,0	166,10	19,5
OG - H/L=0.50 - 2R - S355	304,62	18,0	242,41	28,5
OG - H/L=0.50 - 3R - S355	445,42	18,0	237,89	36,0

6.2.3. Čelični okviri s porobetonskim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira, broja raspona, vrste priključka i kvalitete čeličnog materijala

Pomoću ove serije modela želi se prikazati utjecaj, kroz parametarsku analizu variranih varijabli, na ponašanje čeličnih okvira s porobetonskim ispunom. Kao i u prethodnome poglavlju odabrani su samo neki od dijagrama i to, opet oni, usporedivi s eksperimentalnim rezultatima. Uvid u ostale dijagrame moguće je ostvariti kroz Prilog A (slike A10 do A18 i A49 do A57).

Na slici 6.15prikazane su anvelope nosivosti okvira s porobetonskim ispunom u kojima je variran broj stupova u ravnini okvira. Prikazani rezultati odnose se na numeričke modele koji su imali nepopustljive priključke stup-greda te iste odnose visine i širine okvira (*H/L*=0,74) – odabir jednoga dijagrama moguć je zbog toga što ne postoje značajne razlike u trendovima ponašanja modela u kojima su zadržane razne kombinacije variranih parametara, a mijenjan je broj raspona.

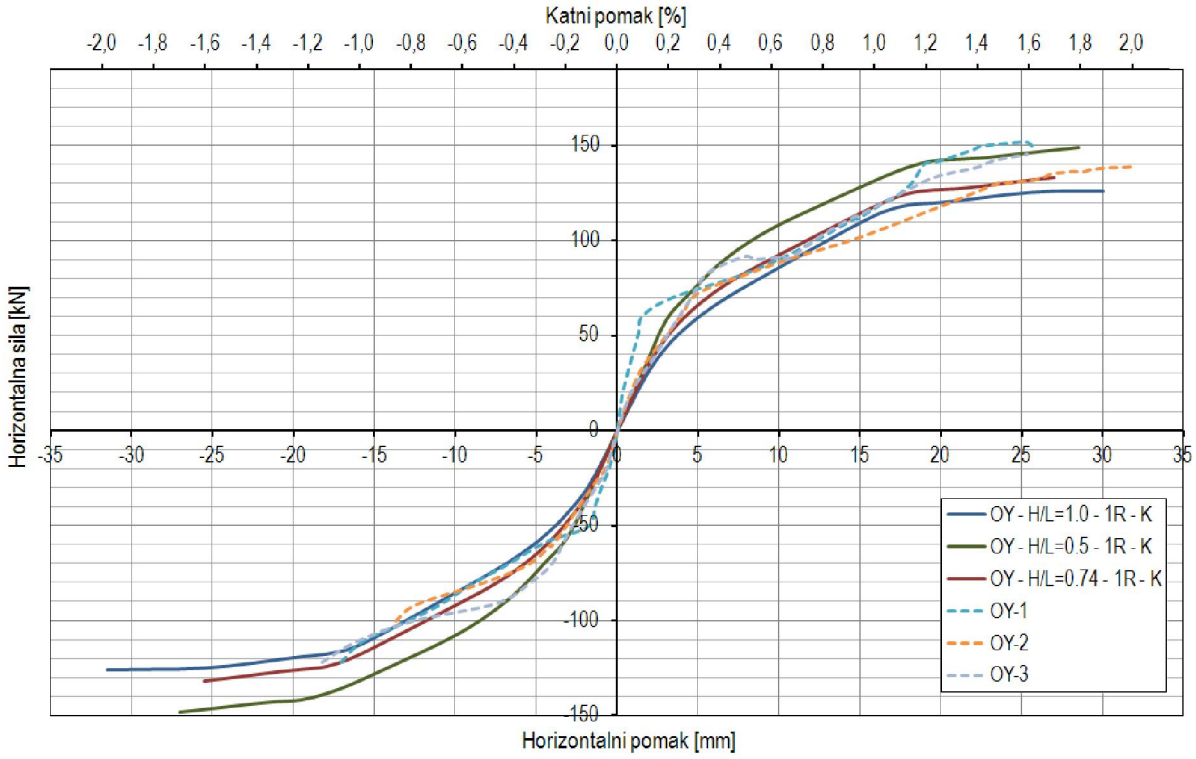


Slika 6.15 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), *H/L*=0.74; *R*=1, 2 i 3

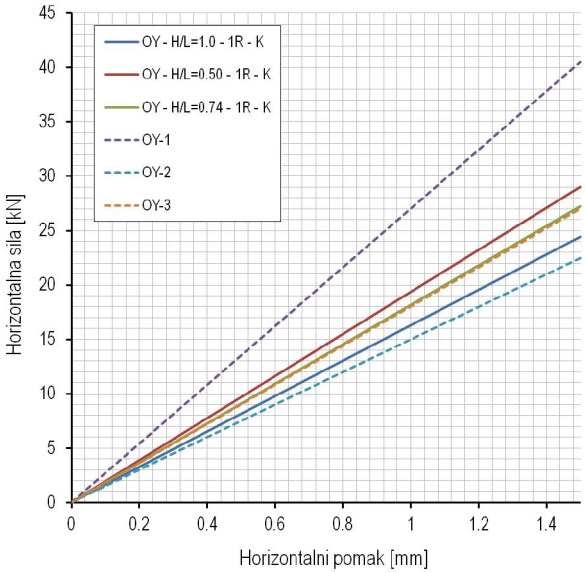
Nosivost okvira povećava se s brojem raspona, a isto tako i početna krutost sustava. Nosivost okvira s jednim rasponom iznosi 116 kN, s dvama 199 kN, a okvira s trima rasponima 281 kN – kod modela s dvama rasponima povećanje iznosi 72 % u odnosu na model s jednim rasponom, a kod modela s trima

rasponima 142 %. Povećanje nosivosti kod oveskupine modela odvija se gotovo po linearnom zakonu, slično kao i kod okvira s glinenim ispunom. Maksimalni pomaci kod ovih modela dosegnuti su u području bliskom maksimalnim silama, a u određenim slučajevima točke maksimalne sile i maksimalnog pomaka se podudaraju – ovo semože objasniti krtijim ponašanjem sustava (slom se događao naglo i bez pada nosivosti nakon dosezanja maksimalne vrijednosti) u odnosu na sustave s glinenim zidanim ispunom.
Zabilježena krutost kod modela s jednim rasponom iznosi 19 kN/mm, kod modela s dvama rasponima krutost je veća za 74 % i iznosi 33 kN/mm, dok je za model s trima rasponima početna vrijednost krutosti veća 132 % u odnosu na prvi model (44 kN/mm).

Slično kao i kod okvira s glinenim ispunom, čiji su rezultati opisani u prethodnoj točki, s povećanjem omjera visine i širine okvira *H/L* dolazi do smanjenja nosivosti i početne krutosti sustava, slika 6.16. Po pitanju nosivosti, razlika u smanjenju naglašenija je u području između omjera 0,50 i 0,75, a po pitanju krutosti u području između omjera 0,74 i 1,0. Maksimalne horizontalne sile, koje su mogli preuzeti modeli kod kojihH/L iznosi 1.0, 0.74 i 0.5 redom iznose, 126 kN, 133 kN i 149 kN, što predstavlja povećanje nosivosti od 6 % i 18 % drugoga i trećega modela u odnosu na prvi.
Prirast krutosti između modela s omjerom H/L=1,0 i 0,74 iznosi 13 % (16 kN/mm na 18 kN/mm), a između modela s omjerom 0,74 i 0,50, povećanje iznosi 6 %. Na slici 6.17 jasno su prikazane razlike među početnim krutostima različitih izvedbi okvira po pitanju omjera visine i širine te eksperimentalnih rezultata.

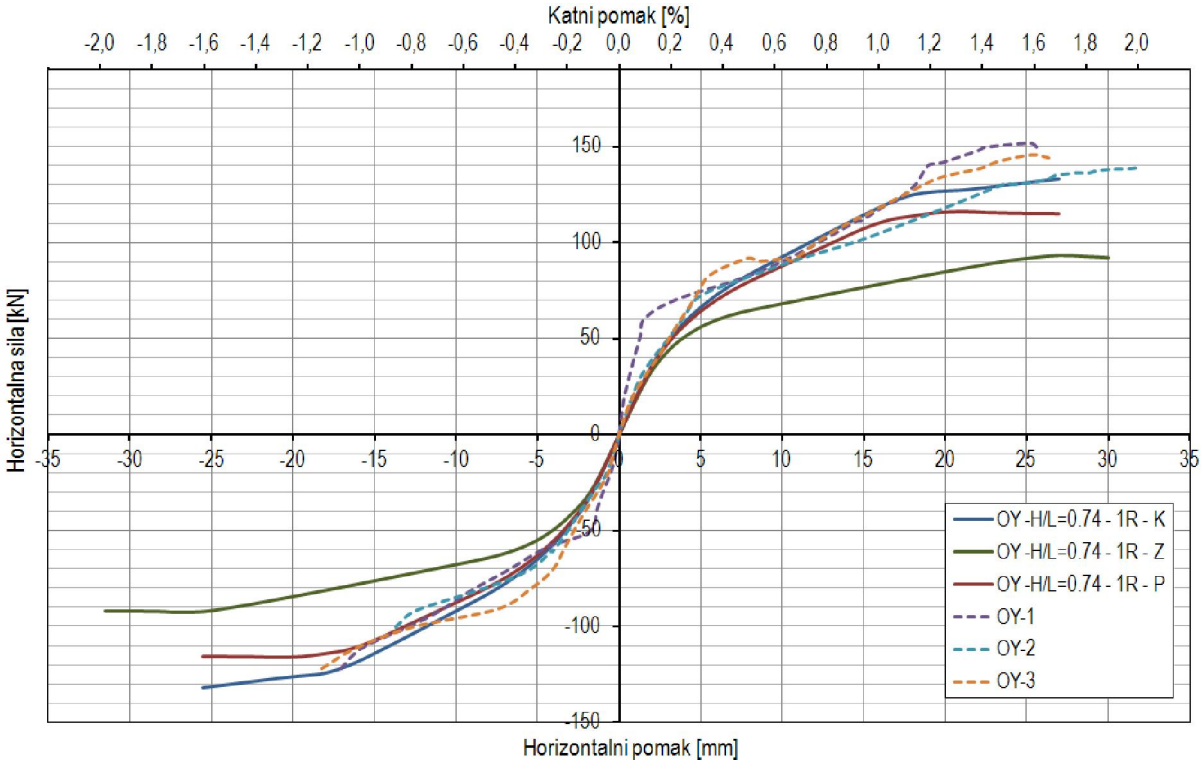


Slika 6.16 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), *R*=1, *H/L*=0.50, 0.74 i 1.0



Slika 6.17 – Usporedba početnih krutosti numeričkih i eksperimentalnih modela serije OY-i

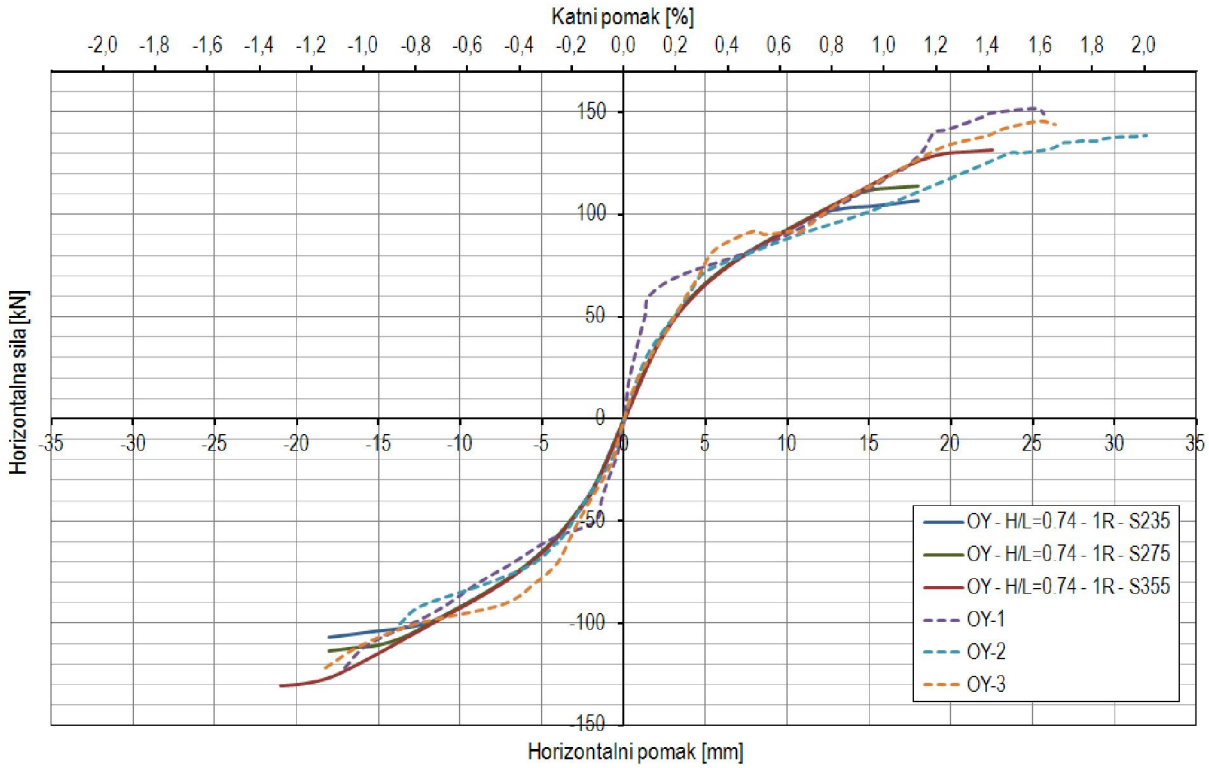
Krivulje na slici 6.18 prikazuju ponašanje čeličnih okvira s porobetonskim ispunom kod kojih su mijenjanekarakteristike priključka stup-greda uz zadržavanje omjera visine i širine okvira, kvalitete materijala (eksperimentalna vrijednost) i raspona. Početne krutosti kod prikazanih modela gotovo su jednake, odnosno za modele s nepopustljivim i djelomično nepopustljivim priključkom krutost iznosi 18 kN/mm, dok je za nominalno zglobni priključak vrijednost početne krutosti 17 kN/mm.



Slika 6.18 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim zidanim ispunom –H/L=0.74; R=1; nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

Nosivost spomenutih modela iznosi: za model s nepopustljivim priključkom stup-greda 133 kN, za model s djelomično nepopustljivim priključkom 116 kN, dok je najmanja vrijednost nosivosti dobivena na modelu s nominalno zglobnim priključkom i iznosi 93 kN. Može se zaključiti, kao i u slučajevima čeličnih okvira s glinenim ispunom, kako se s povećanjem rotacijske krutosti priključka povećava nosivost čeličnih okvira s ispunom na horizontalne sile.

Povećanjem kvalitete materijala dolazi do povećanja nosivosti od 107 kN do 132 kN, što je prikazano na slici 6.19, zajedno s eksperimentalnim rezultatima.
Osim toga na slici 6.19 vidljivo je kako su početne krutosti iste, neovisno o korištenoj kvaliteti čelika; kod svih promatranih modela vrijednost početne krutosti iznosi 18 kN/mm.
Usporedbom dijagrama na slikama 6.13 i 6.19. može se zaključiti kako je ponašanje ovih modela analogno ponašanju modela čeličnih okvira s glinenim ispunom – kvaliteta čeličnogamaterijala nema veliki utjecaj naponašanje modela, nego samo na konačnu vrijednost nosivosti, odnosno na maksimalnu horizontalnu silu koju modeli mogu preuzeti.



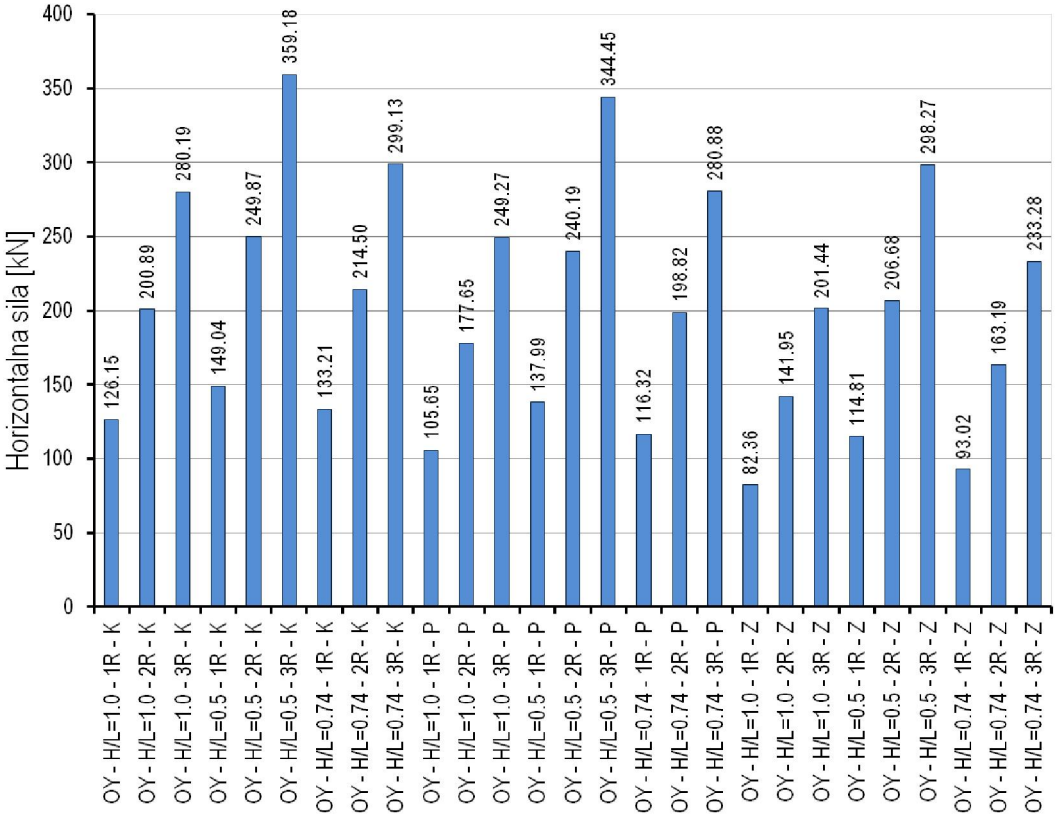
Slika 6.19 - Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=1

U tablici 6.9 prikazane su vrijednosti maksimalnih sila i maksimalnih pomaka za sve kombinacije mijenjanih omjera visine i širine okvira (*H/L*), broja raspona (R) i vrste priključka stup-greda (K, P, Z).

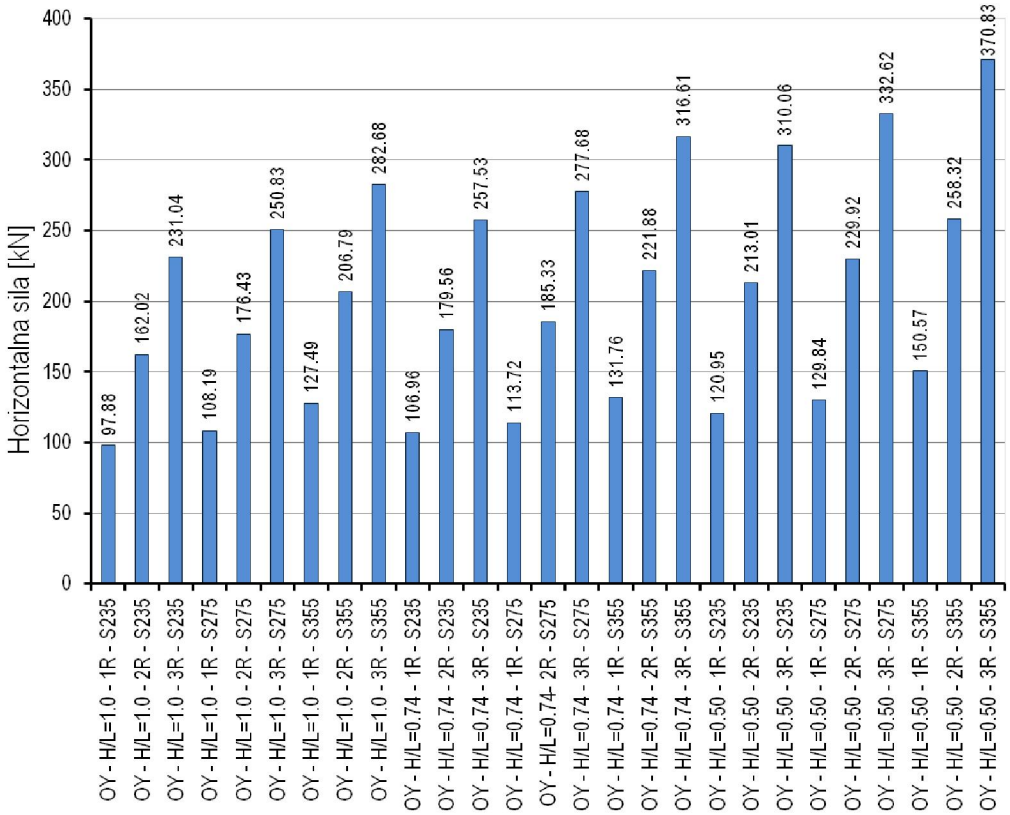
Tablica 6.9 – Nosivost i pomaci čeličnih okvira s porobetonskim ispunom - varijacija omjera *H/L*, broja raspona i vrste priključka

Model	Maksimalna sila i pripadni pomak		Maksimalni pomak i pripadna sila	
	F_{max} [kN]	u [mm]	F [kN]	u_{max} [mm]
OY - H/L=1.0 - 1R - K	126,15	31,5	126,15	31,5
OY - H/L=1.0 - 2R - K	200,89	24,0	200,89	24,0
OY - H/L=1.0 - 3R - K	280,19	19,5	280,19	19,5
OY - H/L=0.5 - 1R - K	149,04	28,5	149,04	28,5
OY - H/L=0.5 - 2R - K	249,87	21,0	249,87	21,0
OY - H/L=0.5 - 3R - K	359,18	22,5	359,18	22,5
OY - H/L=0.74 - 1R - K	133,21	27,0	133,21	27,0
OY - H/L=0.74 - 2R - K	214,50	19,5	214,50	19,5
OY - H/L=0.74 - 3R - K	299,13	18,0	299,13	18,0
OY - H/L=1.0 - 1R - P	105,65	21,0	104,70	25,4
OY - H/L=1.0 - 2R - P	177,65	20,9	176,55	22,4
OY - H/L=1.0 - 3R - P	249,27	21,0	245,38	31,5
OY - H/L=0.5 - 1R - P	137,99	21,0	137,17	25,5
OY - H/L=0.5 - 2R - P	240,19	25,5	240,19	25,5
OY - H/L=0.5 - 3R - P	344,45	27,0	344,25	28,5
OY - H/L=0.74 - 1R - P	116,32	21,0	115,41	25,5
OY - H/L=0.74 - 2R - P	198,82	21,0	196,78	28,5
OY - H/L=0.74 - 3R - P	280,88	21,0	279,20	25,5
OY - H/L=1.0 - 1R - Z	82,36	27,0	81,35	31,5
OY - H/L=1.0 - 2R - Z	141,95	27,0	140,79	28,5
OY - H/L=1.0 - 3R - Z	201,44	27,0	199,10	30,0
OY - H/L=0.5 - 1R - Z	114,81	27,0	114,03	31,5
OY - H/L=0.5 - 2R - Z	206,68	27,0	205,67	31,5
OY - H/L=0.5 - 3R - Z	298,27	27,0	297,94	31,5
OY - H/L=0.74 - 1R - Z	93,02	27,0	91,96	31,5
OY - H/L=0.74 - 2R - Z	163,19	27,0	161,40	31,5
OY - H/L=0.74 - 3R - Z	233,28	27,0	231,22	31,5

Na slikama 6.20 i 6.21 prikazani su rezultati proračuna modela čeličnih okvira s porobetonskim ispunom. Slika 6.20 prikazuje razlike u nosivostima sustava, ukoliko se variraju omjer visine i širine okvira (*H/L*), broj raspona i vrsta priključka, dok je na slici 6.21 prikazana promjena nosivosti, ukoliko se uz kvalitetu čeličnoga materijala mijenjaju broj raspona i omjer *H/L*.



Slika 6.20 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira *H/L*, broja raspona i vrste priključka



Slika 6.21 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira *H/L*, broja raspona i kvalitete materijala

Tablicom 6.10prikazane su vrijednosti maksimalnih sila i pomaka za sve kombinacije mijenjanih omjera visine i širine okvira (*H/L*), broja raspona (R) i kvalitete čeličnog materijala (S235, S275 i S355).

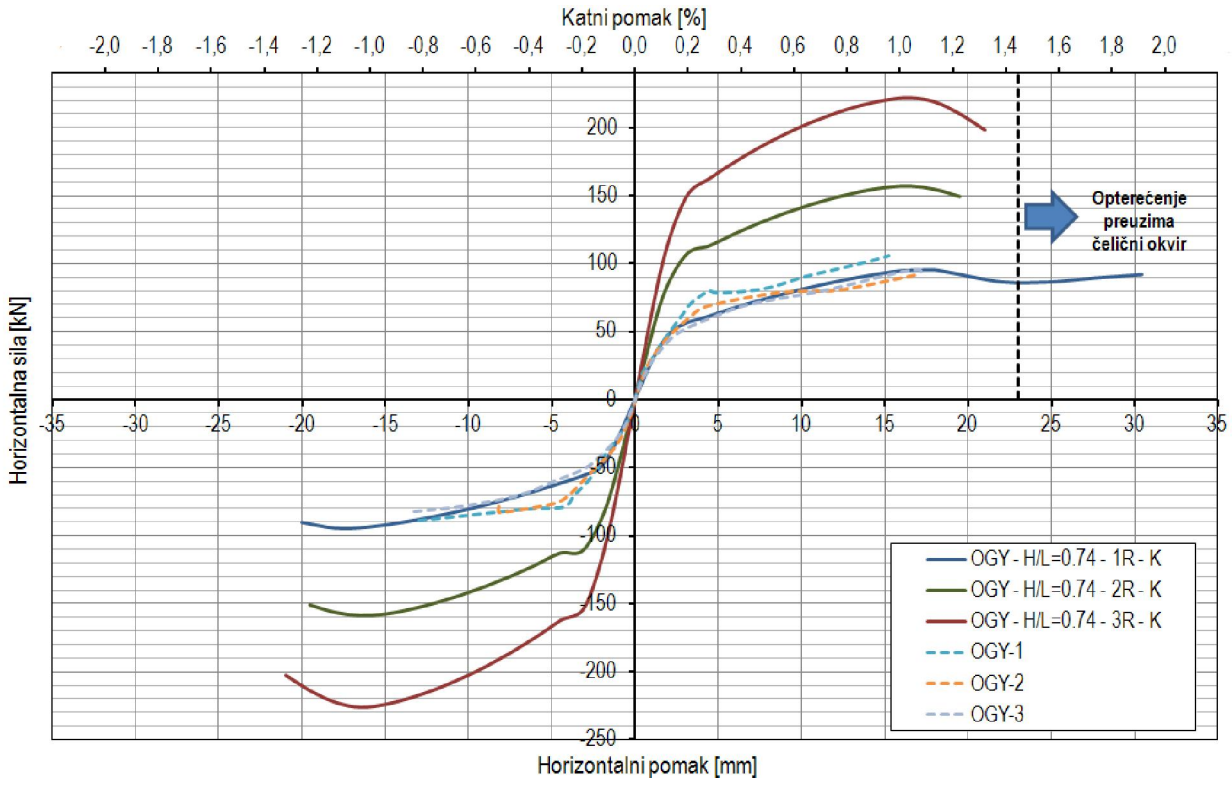
Tablica 6.10 – Nosivost i pomaci čeličnih okvira s porobetonskim ispunom - varijacija omjera *H/L*, broja raspona i kvalitete materijala

Model	Maksimalna sila i pripadni pomak		Maksimalni pomak i pripadna sila	
	F_{max} [kN]	u [mm]	F [kN]	u_{max} [mm]
OY - H/L=1.0 - 1R - S235	97,88	16,5	97,88	16,5
OY - H/L=1.0 - 2R - S235	162,02	15,0	162,02	15,0
OY - H/L=1.0 - 3R - S235	231,04	15,0	231,04	15,0
OY - H/L=1.0 - 1R - S275	108,19	19,5	108,19	19,5
OY - H/L=1.0 - 2R - S275	176,43	16,5	176,43	16,5
OY - H/L=1.0 - 3R - S275	250,83	18,0	250,83	18,0
OY - H/L=1.0 - 1R - S355	127,49	24,0	127,49	24,0
OY - H/L=1.0 - 2R - S355	206,79	24,0	206,79	24,0
OY - H/L=1.0 - 3R - S355	282,68	18,0	282,68	18,0
OY - H/L=0.74 - 1R - S235	106,96	18,0	106,96	18,0
OY - H/L=0.74 - 2R - S235	179,56	15,0	179,56	15,0
OY - H/L=0.74 - 3R - S235	257,53	15,0	257,53	15,0
OY - H/L=0.74 - 1R - S275	113,72	18,0	113,72	18,0
OY - H/L=0.74- 2R - S275	185,33	13,5	185,33	13,5
OY - H/L=0.74 - 3R - S275	277,68	18,0	277,68	18,0
OY - H/L=0.74 - 1R - S355	131,76	22,5	131,76	22,5
OY - H/L=0.74 - 2R - S355	221,88	24,0	221,88	24,0
OY - H/L=0.74 - 3R - S355	316,61	24,0	316,61	24,0
OY - H/L=0.50 - 1R - S235	120,95	15,0	120,95	15,0
OY - H/L=0.50 - 2R - S235	213,01	13,5	213,01	13,5
OY - H/L=0.50 - 3R - S235	310,06	15,0	310,06	15,0
OY - H/L=0.50 - 1R - S275	129,84	18,0	129,84	18,0
OY - H/L=0.50 - 2R - S275	229,92	18,0	229,92	18,0
OY - H/L=0.50 - 3R - S275	332,62	19,5	332,62	19,5
OY - H/L=0.50 - 1R - S355	150,57	27,0	150,57	27,0
OY - H/L=0.50 - 2R - S355	258,32	25,5	258,32	25,5
OY - H/L=0.50 - 3R - S355	370,83	25,5	370,83	25,5

6.2.4. Čelični okviri s kombiniranim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira, broja raspona, vrste priključka i kvalitete čeličnog materijala

Ovom serijom modela želio se pokazati utjecaj vrijednosti omjera visine i širine okvira, broja raspona, vrste priključka i kvalitete čeličnoga materijala, na ponašanje čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom. Kombinirani zidani ispun čine glineni i porobetonski zidni elementi - porobetonski zidni elementi nalaze se uz stupove čeličnog okvira, a glineni zidni elementi formiraju preostali dio zidanog ispuna.
Kao i u prethodnim dvama slučajevima (glinenog i porobetonskog ispuna) i ovdje će se prezentirati rezultati usporedivi s eksperimentalnim rezultatima, dok se ostatak dijagrama može naći u Prilogu A (slike A19 do A27 i A58 do A66).

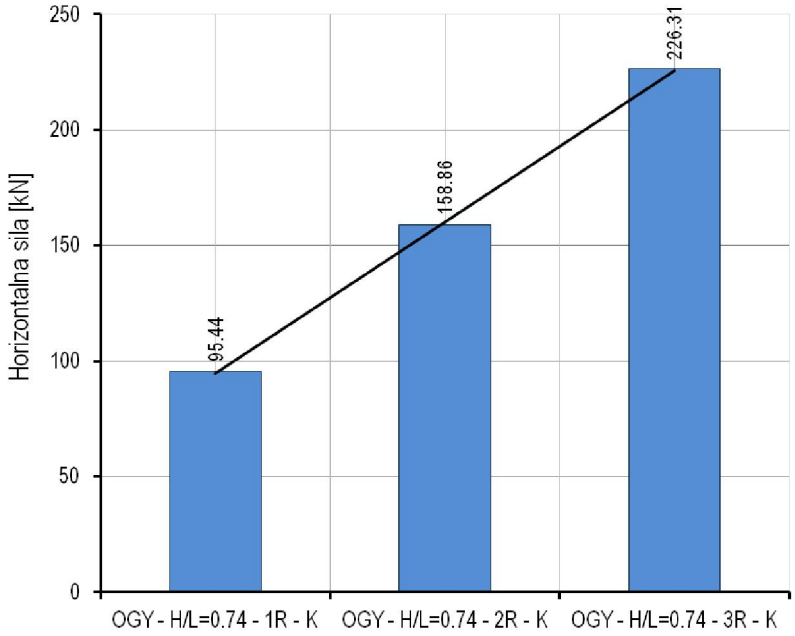
Slikom 6.22 prikazano je ponašanje numeričkih modela čeličnih okvira s kombiniranim ispunom s nepopustljivim priključkom stup-greda i omjerom visine i širine okvira od 0,74. Dijagram pokazuje kako s povećanjem broja raspona dolazi do povećanja nosivosti okvira.



Slika 6.22 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), *H/L*=0.74; *R*=1, 2 i 3

Kao i u prethodno opisanim modelima, koji su se odnosili na drugačije vrste ispuna, i ovdje najveću nosivost ima model koji se sastojao od triju raspona–226 kN, potom model s dva raspona (159 kN) i

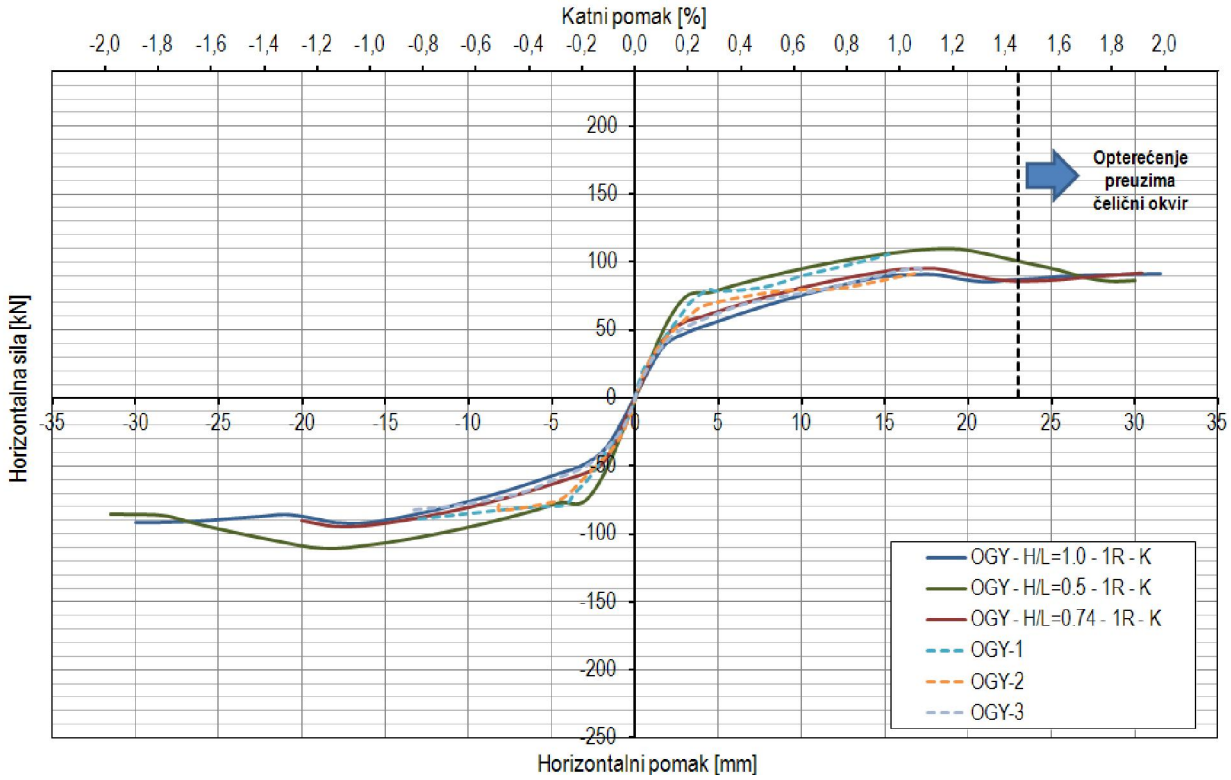
nakraju model s jednim rasponom kod kojega je iznos horizontalne sile bio 95 kN, slika 6.23. Razlike nosivosti ovih modela u postotcima iznose: model s dva raspona ima za 67 % veću nosivost u odnosu na model s jednim rasponom, dok je to povećanje kod modela s trima rasponima 138 %.



Slika 6.23 - Porast nosivosti čeličnih okvira s kombiniranim ispunom s brojem raspona

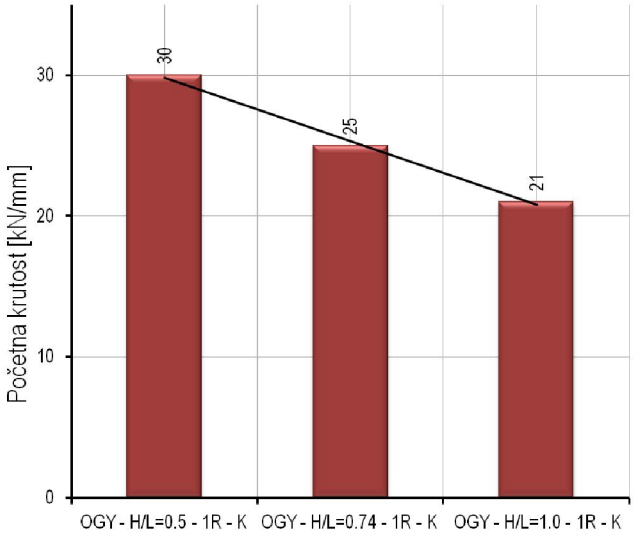
Također, može se zaključiti kako se s povećanjem broja raspona povećava početna krutost sustava, pa tako najveću početnu krutost ima model s tri raspona (62 kN/mm), potom model s dva raspona (46 kN/mm), a najmanju početnu krutost ima model s jednim rasponom i ona iznosi 25 kN/mm. U postotcima u odnosu na model s jednim rasponom, model s dva raspona ima krutost veću za 84 %, a model s tri raspona za 148 %.

Promjena nosivosti sustava čeličnih okvira s kombiniranim ispunom s promjenom odnosa visine i širine okvira prikazana je dijagramom na slici 6.24. Kod ovih modela zadržana je kvaliteta čeličnoga materijala (korištena je eksperimentalna vrijednost), broj raspona i vrsta priključka (nepopustljivi). Kao i kod modela s glinenim i porobetonskim ispunom, može se zaključiti kako sa smanjenjem odnosa visine i širine okvirne konstrukcije raste nosivost na horizontalnu silu, po sličnom obrascu – porast nosivosti modela s omjerom *H/L*=1,0 na *H/L*=0,74 znatno je manji nego li porast nosivosti modela s omjerom *H/L*=0,74 na *H/L*=0,50. Model kod kojega je omjer *H/L* najmanji, postigao je najveću nosivost (111 kN), dok je najmanja nosivost zabilježena kod modela s najvećim omjerom visine i širine okvira (92 kN). Zanimljivo je za primijetiti,kako je pri konačnom pomaku, razina horizontalne sile koju okvir može podnijeti gotovo ista, neovisno o omjeru *H/L*, a osim toga radi se i o gotovo identičnom krajnjem pomaku, iz čega proizlazi zaključak kako je pri krajnjim deformacijama sustava, opterećenje preuzimao samo čelični okvir.



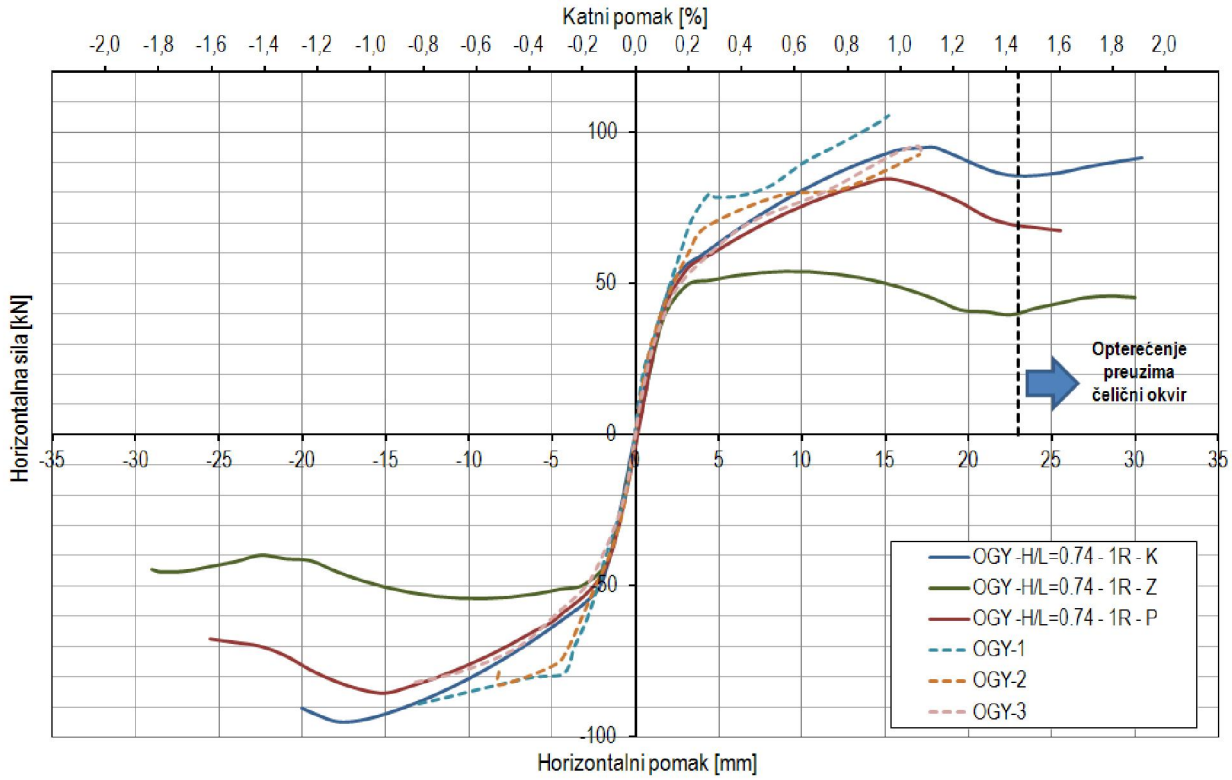
Slika 6.24 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), *R*=1, *H/L*=0.50, 0.74 i 1.0

Za razliku od svih do sada opisanih modela, s povećanjem omjera visine i širine okvira, pad početne krutosti događa se po, gotovo, linearnoj zakonitosti, kao što je prikazano na slici 6.25. Osim toga, primjetno je kako s omjeri *H/L* (1,0 i 0,74) bliski po nosivosti, bliskiji i po pitanju krutosti, što kod modela s glinenim i porobetonskim ispunom nije bio slučaj.



Slika 6.25 - Smanjenje početne krutosti čeličnih okvira s kombiniranim ispunom s povećanjem omjera *H/L*

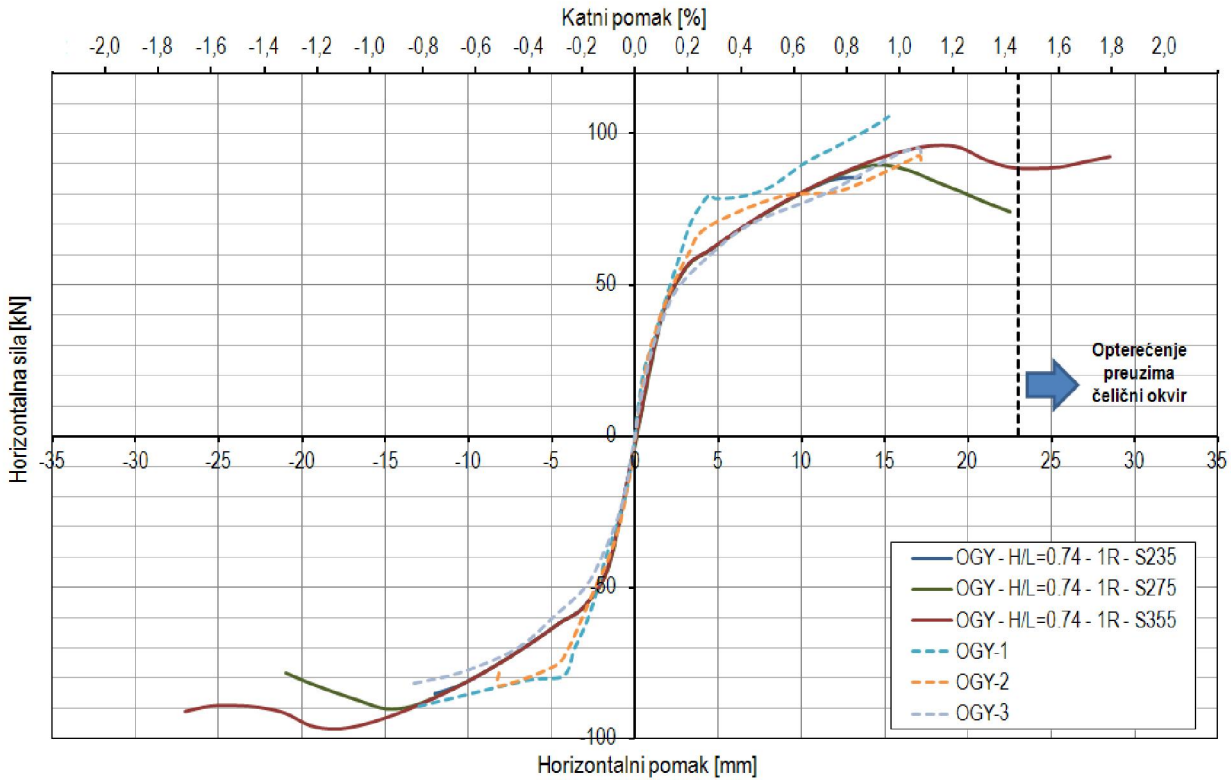
Ponašanje modela čeličnih okvira s kombiniranim ispunom u kojima su mijenjane vrste priključka, a zadržane već navedene varijable (kvaliteta materijala, omjer visine i širine okvira, broj raspona), prikazano je na slici 6.26.Promjenom vrste priključka stup-greda ne dolazi do promjena u početnoj krutosti sustava ili su te promjene zanemarive, a zanimljivo je i kako se elastična područja, kroz sve modele u kojima je vršena izmjena ovog parametra, podudaraju pa tako i u odabranome slučaju. Manje odstupanje od ovakvoga obrasca ponašanja pokazuju modeli s nominalno zglobnom inačicom priključka (za promatrani slučaj odstupanje je manje od 10 %). Nakon elastičnog područja dolazi do grananja krivulja i primjetne su veće razlike u ponašanju pa tako nepopustljivi priključci omogućuju sustavu preuzimanje najvećih horizontalnih sila (95,13 kN), a nominalno zglobni priključak najmanjih (54,19 kN), no s povećanjem nosivosti, kroz većinu rezultata ovakvih modela, vidljivo je kako dolazi do smanjenja mogućnosti horizontalnog pomaka pa je tako u prosjeku sustav s nepopustljivim priključkom imao najmanji horizontalni pomak pri slomu, a sustav sa zglobnim, najveći – prosjek horizontalnog pomaka svih modela s nepopustljivim priključkom iznosi 23,87 mm, modela s djelomično nepopustljivim priključkom 27,83 mm, a modela s nominalno zglobnim priključkom 29,5 mm. Sustav s djelomično nepopustljivim priključkom svojim ponašanjem pri horizontalnom opterećenju uklapao se, po nosivosti i mogućnosti horizontalnog pomaka, između dvije krajnje inačice priključaka, što je i logično – ponašanje je bliže nepopustljivome priključku, što je vidljivo i na slici 6.3.



Slika 6.26 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom –H/L=0.74; R=1; nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

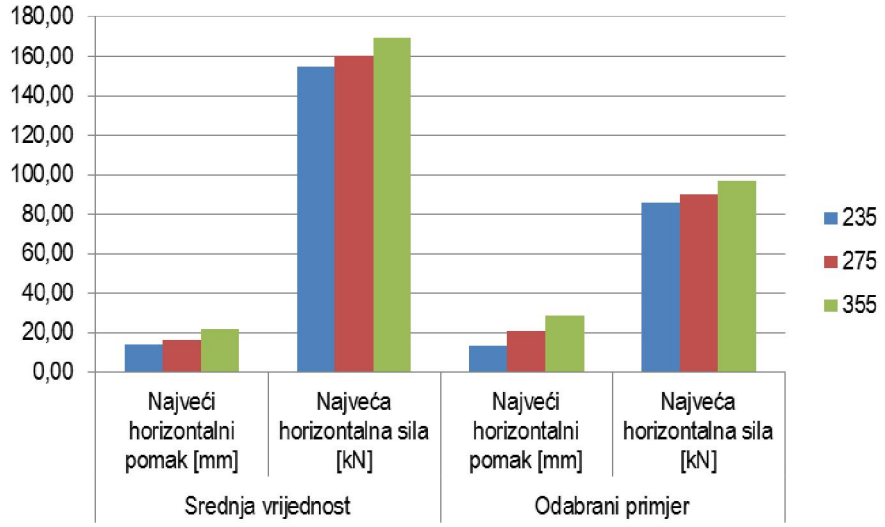
Na slici 6.27 prikazana je karakteristična anvelopa otpornosti okvira s kombiniranim ispunom u kojem je mijenjana kvaliteta čeličnoga materijala. Promatrani model ima omjer visine i širine okvira 0,74, sastoji se od jednoga raspona, a priključak stup-reda ostvaren je na nepopustljiv način.

Promjenomkvalitete čeličnog materijala, od niže prema većoj, dolazi do pravilnog povećanja maksimalne nosivosti na horizontalne sile, pa tako model s kvalitetom materijala S235 ima nosivost od 85,63 kN, model s kvalitetom materijala S275 od 90kN, a model kod kojega je korišten čelik kvalitete S355, ima nosivost 96,75 kN (porast od 5% s kvalitetom S275 u odnosu na S235, te 13 % s kvalitetom S355 u odnosu na S235). Osim toga trenda, primjetno je kako čelik najveće kvalitete - S355, omogućuje dosezanje najvećih horizontalnih pomaka pri slomu sustava, model s kvalitetom čeličnog materijala S235 doseže pomak od 13,50 mm, zatim model s kvalitetom S275 od 21,00 mm i na kraju model s kvalitetom S355 od 28,50 mm. Prosječne vrijednosti nosivosti na horizontalnu silu i krajnjih horizontalnih pomaka modela s raznim kombinacijama broja raspona (*1R, 2R, 3R*) te omjera visine i širine okvira (*H/L=0,5, H/L=0,74, H/L=1,0*) također su u skladu s navedenim zaključcima, što je jasno vidljivo na slici 6.28. Prema prosječnim vrijednostima, s porastom kvalitete materijala sa S235 na S275 dolazi do povećanja nosivosti od 2,5, a s porastom kvalitete materijala, sa S235 na S355, dolazi do povećanja nosivosti od 10.



Slika 6.27 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=1

Početne krutosti modela ne mijenjaju se u funkciji kvalitete čeličnoga materijala. Zapravo, ponašanje pri nanošenju horizontalnih sila istovjetno je sve do najveće nosivosti prema kvaliteti najslabijeg čeličnog materijala, S235. Ovo ponašanje u skladu je s, do sada, promatranim slučajevima okvira sa zidanim glinenim i porobetonskim ispunom.



Slika 6.28 – Vrijednosti nosivostii horizontalnih pomaka u prosjeku i za odabrane modele (OGY, H/L=0,74, 1R)čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika

Pomoću tablice 6.11 moguće je ostvariti uvid u vrijednosti najvećih sila i pripadnih pomaka te maksimalnih pomaka i pripadnih sila svih modela čeličnih okvira s kombiniranim ispunom u kojima su ostvarene razne kombinacije omjera visine i širine okvira (*H/L*), broja raspona (R) i vrste priključka stup-greda (K, P, Z).

Na slikama 6.29 i 6.30sažeto su prikazani rezultati proračuna numeričkih modela čeličnih okvira s kombiniranim ispunom. Nosivostisustava,u ovisnosti opromjeni omjera visine i širine okvira (*H/L*), broja raspona (R) i vrste priključka (K, P, Z), prikazani su na slici 6.29, a na slici 6.30 prikazanesu promjene nosivosti, ukoliko se uz kvalitetu čeličnoga materijala (S235, S275, S355),mijenjaju broj raspona i omjer visine i širine okvira.

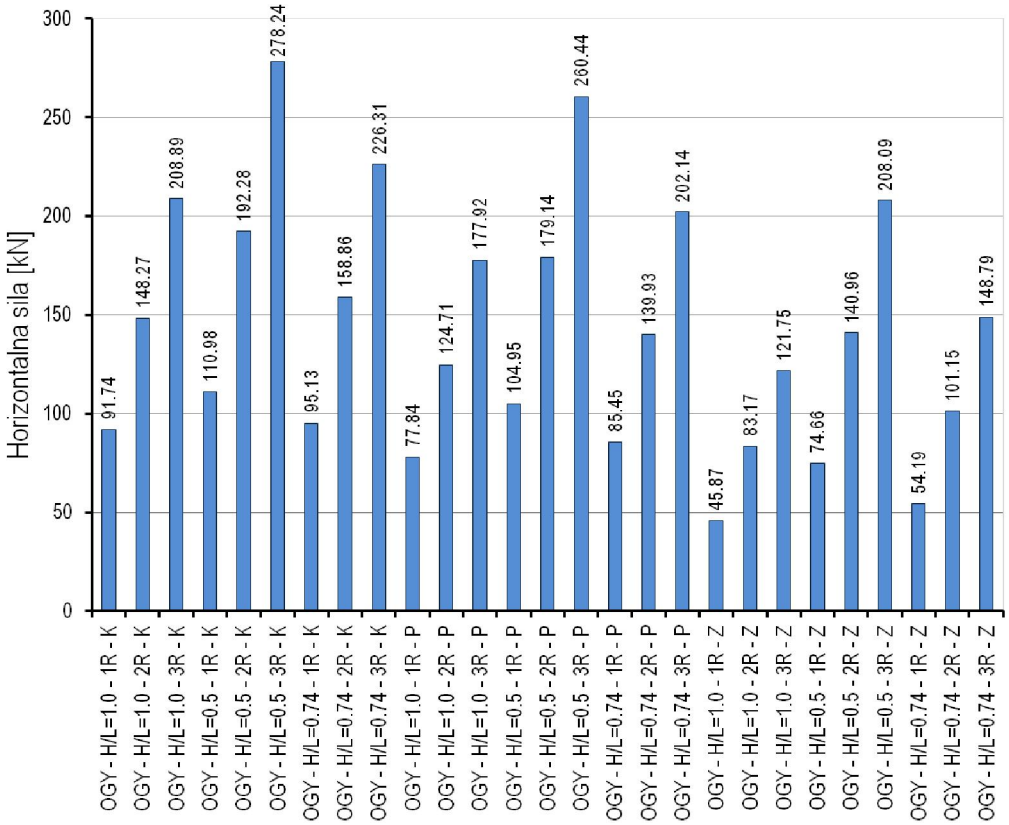
U tablici 6.12nalaze se iznosi najvećih sila i pripadnihhorizontalnih pomaka te najvećih pomaka i pripadnih silasvih modela čeličnih okvira s kombiniranim ispunom za sve mogućnostikombiniranjaomjera visine i širine okvira (*H/L*), broja raspona (R) i kvalitete čeličnoga materijala (S235, S275 i S355).

Tablica 6.11 – Nosivost i pomaci čeličnih okvira s kombiniranim ispunom - varijacija omjera *H/L*, broja raspona i vrste priključka

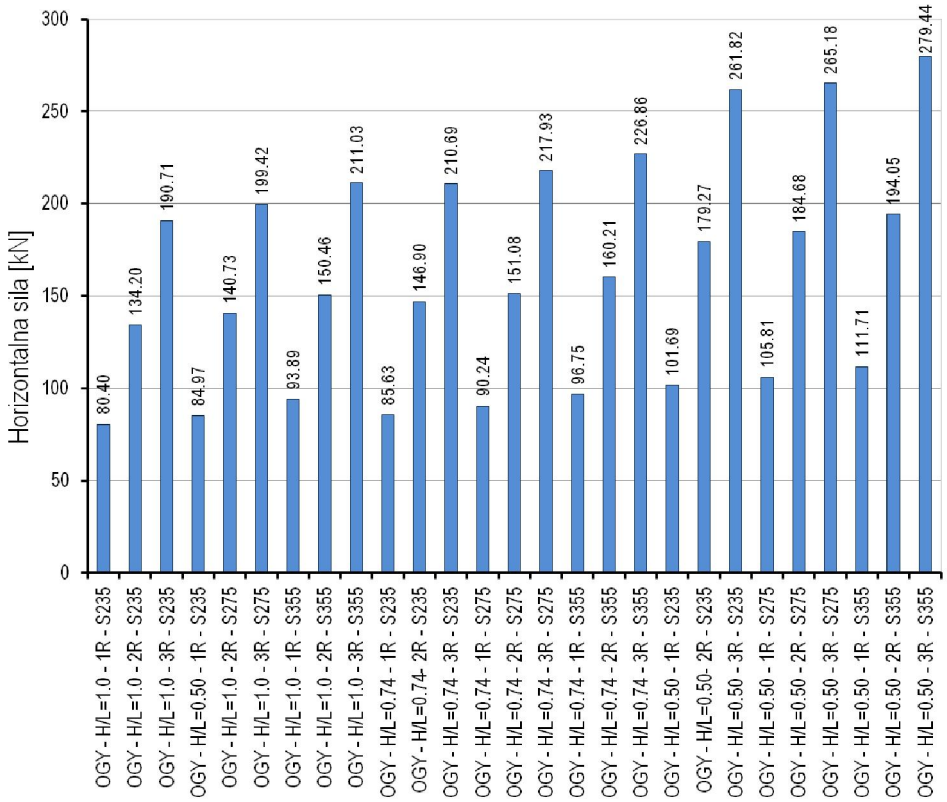
Model	Maksimalna sila i pripadni pomak		Maksimalni pomak i pripadna sila	
	F_{max} [kN]	u [mm]	F [kN]	u_{max} [mm]
OGY - H/L=1.0 - 1R - K	91,74	31,50	91,74	31,50
OGY - H/L=1.0 - 2R - K	148,27	16,50	145,00	18,00
OGY - H/L=1.0 - 3R - K	208,89	16,50	177,90	22,50
OGY - H/L=0.5 - 1R - K	110,98	18,00	86,14	30,00
OGY - H/L=0.5 - 2R - K	192,28	18,00	168,92	24,00
OGY - H/L=0.5 - 3R - K	278,24	18,00	278,24	18,00
OGY - H/L=0.74 - 1R - K	95,13	18,00	91,75	30,40
OGY - H/L=0.74 - 2R - K	158,86	16,50	151,08	19,50
OGY - H/L=0.74 - 3R - K	226,31	16,50	202,79	21,00
OGY - H/L=1.0 - 1R - P	77,84	13,46	68,19	31,47
OGY - H/L=1.0 - 2R - P	124,71	13,50	101,78	28,50
OGY - H/L=1.0 - 3R - P	177,92	12,00	136,43	31,50
OGY - H/L=0.5 - 1R - P	104,95	18,00	99,10	21,00
OGY - H/L=0.5 - 2R - P	179,14	15,00	106,08	30,00
OGY - H/L=0.5 - 3R - P	260,44	16,50	229,98	22,50
OGY - H/L=0.74 - 1R - P	85,45	15,00	67,52	25,50
OGY - H/L=0.74 - 2R - P	139,93	13,50	102,36	31,50
OGY - H/L=0.74 - 3R - P	202,14	13,50	135,50	28,50
OGY - H/L=1.0 - 1R - Z	45,87	28,50	45,40	30,00
OGY - H/L=1.0 - 2R - Z	83,17	7,50	68,14	30,00
OGY - H/L=1.0 - 3R - Z	121,75	7,50	90,95	30,00
OGY - H/L=0.5 - 1R - Z	74,66	12,00	48,71	28,50
OGY - H/L=0.5 - 2R - Z	140,96	10,50	75,87	28,50
OGY - H/L=0.5 - 3R - Z	208,09	10,50	104,72	28,50
OGY - H/L=0.74 - 1R - Z	54,19	9,00	45,40	30,00
OGY - H/L=0.74 - 2R - Z	101,15	7,50	68,15	30,00
OGY - H/L=0.74 - 3R - Z	148,79	7,50	91,00	30,00

Tablica 6.12 – Nosivost i pomaci čeličnih okvira s kombiniranim ispunom - varijacija omjera *H/L*, broja raspona i kvalitete materijala

Model	Maksimalna sila i pripadni pomak		Maksimalni pomak i pripadna sila	
	F_{max} [kN]	u [mm]	F [kN]	u_{max} [mm]
OGY - H/L=1.0 - 1R - S235	80,40	12,0	80,30	12,0
OGY - H/L=1.0 - 2R - S235	134,20	12,0	126,10	15,0
OGY - H/L=1.0 - 3R - S235	190,71	12,0	187,37	13,5
OGY - H/L=1.0 - 1R - S275	84,97	13,5	77,14	19,5
OGY - H/L=1.0 - 2R - S275	140,73	13,5	140,73	13,5
OGY - H/L=1.0 - 3R - S275	199,42	13,5	199,42	13,5
OGY - H/L=1.0 - 1R - S355	93,89	18,0	93,89	18,0
OGY - H/L=1.0 - 2R - S355	150,46	16,5	137,32	25,5
OGY - H/L=1.0 - 3R - S355	211,03	16,0	197,25	20,0
OGY - H/L=0.74 - 1R - S235	85,63	13,5	85,63	13,5
OGY - H/L=0.74- 2R - S235	146,90	12,0	146,90	12,0
OGY - H/L=0.74 - 3R - S235	210,69	12,0	210,69	12,0
OGY - H/L=0.74 - 1R - S275	90,24	15,0	78,36	21,0
OGY - H/L=0.74 - 2R - S275	151,08	13,5	151,08	13,5
OGY - H/L=0.74 - 3R - S275	217,93	13,5	217,93	13,5
OGY - H/L=0.74 - 1R - S355	96,75	18,0	92,32	28,5
OGY - H/L=0.74 - 2R - S355	160,21	16,5	134,07	27,0
OGY - H/L=0.74 - 3R - S355	226,86	18,0	226,86	18,0
OGY - H/L=0.50 - 1R - S235	101,69	13,5	98,18	16,5
OGY - H/L=0.50- 2R - S235	179,27	12,0	179,27	12,0
OGY - H/L=0.50 - 3R - S235	261,82	13,5	249,24	18,0
OGY - H/L=0.50 - 1R - S275	105,81	15,0	79,67	28,5
OGY - H/L=0.50 - 2R - S275	184,68	13,5	184,68	13,5
OGY - H/L=0.50 - 3R - S275	265,18	13,5	265,18	13,5
OGY - H/L=0.50 - 1R - S355	111,71	20,0	96,55	26,0
OGY - H/L=0.50 - 2R - S355	194,05	18,0	194,05	18,0
OGY - H/L=0.50 - 3R - S355	279,44	18,0	279,44	18,0



Slika 6.29 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira *H/L*, broja raspona i vrste priključka

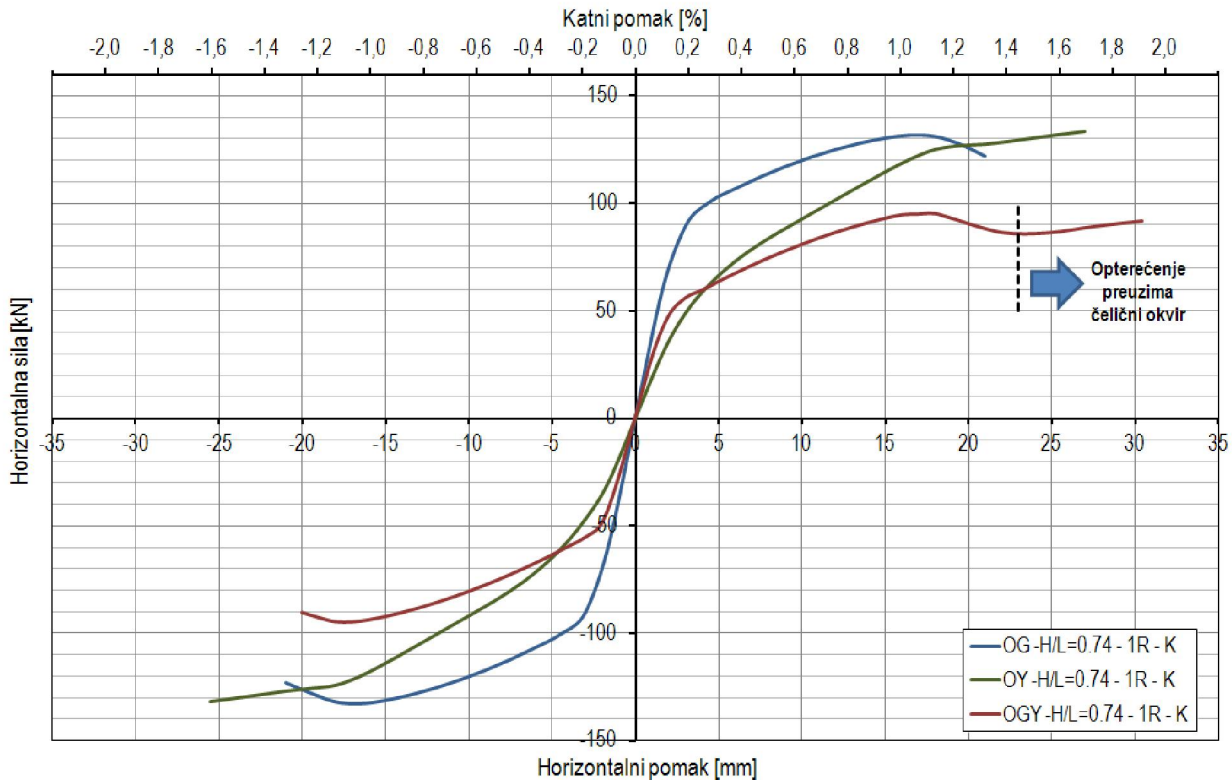


Slika 6.30 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira *H/L*, broja raspona i kvalitete materijala

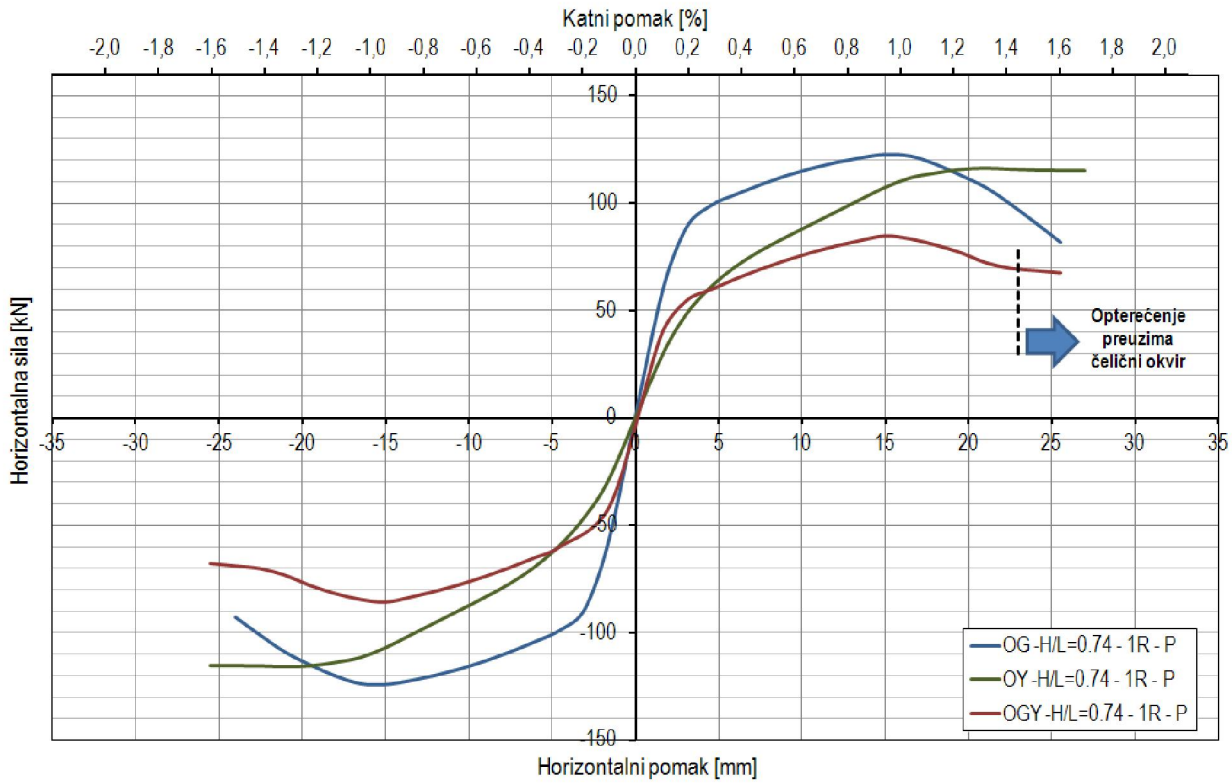
6.2.5. Čelični okviri sa zidanim ispunom - varijacija vrste ispuna

Modeli predstavljeni u ovome poglavlju služe za prikaz utjecaja vrste ispuna na ponašanje čeličnoga okvira sa zidanim ispunom pri opterećenju horizontalnim silama u osi grede. Zadržavajući ostale varijable moguće je procijeniti na koji način odabir ispuna utječe na nosivost i krutost sustava, te postoje li određene prednosti ili nedostatci koje je potrebno uzeti u obzir pri tome odabiru. Vrste ispuna koje se razmatraju su: glineni (OG), porobetonski (OY), kombinirani (OGY) (ispuni korišteni u eksperimentalnom istraživanju) i dodatne četiri vrste glinenog ispuna (M1, M2, M3, M4). Po mehaničkim svojstvima različite vrste glinenoga ispuna proučene su kako bi se dobio bolji uvid u učinak takve promjene na ponašanje sustava, obzirom da je u praksi prisutan određeni raspon čvrstoća glinenih opekarskih proizvoda. Kao i u prethodnim poglavljima, odabrani su samo neki od rezultata, vezani uz uvjete eksperimenta (jedan raspon, omjer visine i širine jednak 0,74), a ostatak anvelopa otpornosti modela moguće je pregledati u Prilogu A (slike A28 do A39).

Slike 6.31, 6.32 i 6.33 prikazuju anvelope otpornosti modela čeličnih okvira sa zidanim ispunom u kojima je mijenjana vrsta ispuna, uz zadržane vrijednosti ostalih parametara. Iako je utjecaj vrste priključka na nosivost pojedinačnih vrsta ispuna već opisan, odabrana su tri prikaza, koja se razlikuju prema vrsti ostvarenja priključka stup-greda,čime se vide razlike među njima u post-elastičnom području. Iz priloženih slika vidi se kako najveću nosivost na horizontalne sile, neovisno o vrsti priključka, ostvaruje čelični okvir s glinenom ispunom (F_{max}(K-OG)=133 kN, F_{max}(P-OG)=124 kN, F_{max}(Z-OG)=95 kN), sa srednjom vrijednošću od 117,45 kN, zatim čelični okvir s porobetonskim ispunom (F_{max}(K-OY)=133 kN, F_{max}(P-OY)=116 kN, F_{max}(Z-OY)=93 kN) sa srednjom vrijednošću od 114,83 kN i naposljetku čelični okvir s kombiniranom ispunom (F_{max}(K-OGY)=95 kN, F_{max}(P-OGY)=86 kN, F_{max}(Z-OGY)=54 kN) sa srednjom vrijednosti nosivosti od 78,26 kN. Dakle, čelični okvir s porobetonskom ispunom ima prosječno 49 % veću maksimalnu nosivost od okvira s kombiniranim ispunom, a okvir s glinenim ispunom 54 % veću nosivost. Kada se dijagrami na slikama promatraju pojedinačno, vidljivo je kako se najveće razlike u nosivosti između ispuna javljaju pri uporabi nominalno zglobnog priključka pa je tako u tome slučaju, nosivost čeličnog okvira s porobetonskim ispunom 72 % veća od okvira sa kombiniranim ispunom, a okvira s glinenim ispunom 76 %. Uz do sada navedeno, primjetno je kako su nosivosti čeličnih okvira s glinenim i porobetonskim ispunom vrlo bliske, neovisno o priključku stup-greda - prosječno povećanje nosivosti uporabom glinenog ispuna umjesto porobetonskog iznosi 3 %. Iako sumaksimalne nosivosti okvira s porobetonskim i glinenim ispunom bliske, horizontalni pomak pri najvećoj sili znatno se razlikuje između tih dvaju sustava– sustav s porobetonskim ispunom, pri najvećoj sili, ima u prosjeku 101 % veći horizontalni pomak od sustava s glinenim ispunom. Po ovome pitanju, vrlo je blisko ponašanje čeličnoga okvira s glinenim i kombiniranim ispunom, pa je u tom slučaju razlika u horizontalnom pomaku pri najvećoj horizontalnoj sili samo 3 % - tablica 6.13.

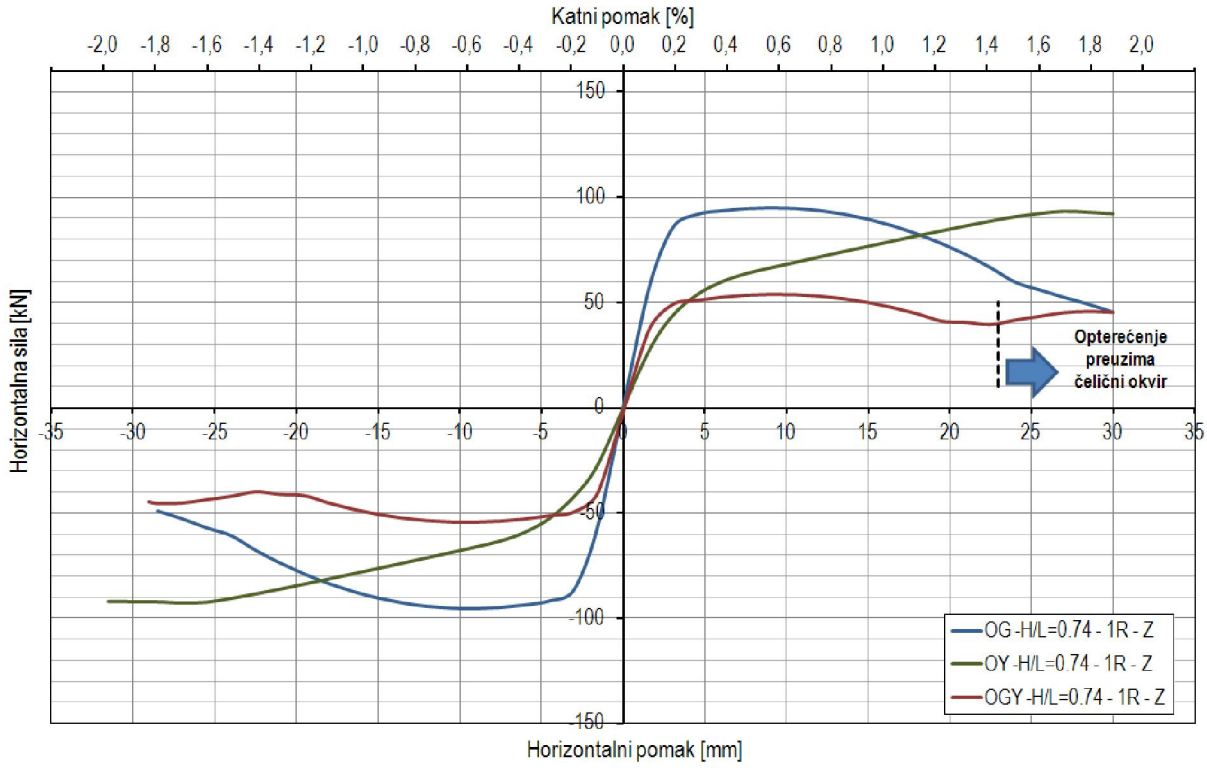


Slika 6.31 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom –nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.74; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)



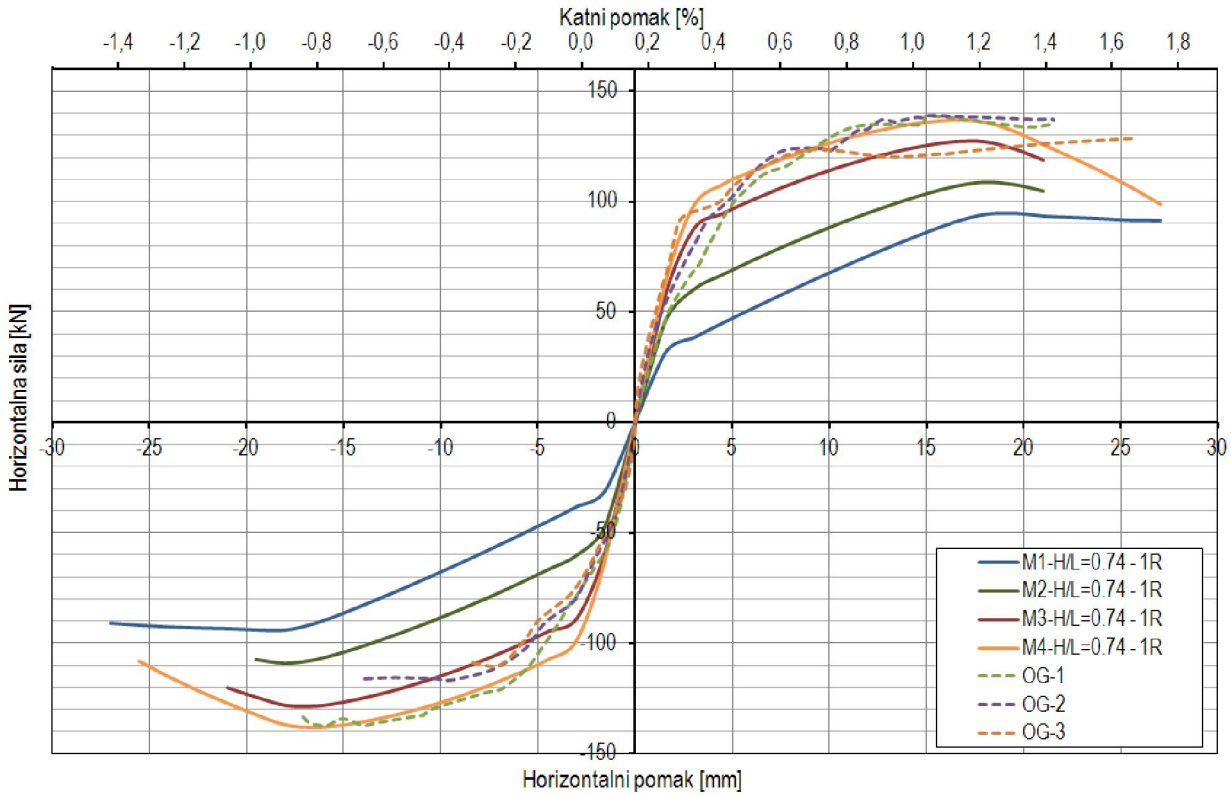
Slika 6.32 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.74; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

Najveći pomaci čeličnih okvira sa zidanim ispunom u ovisnosti su o vrsti ispuna. Kako je vidljivo na slikama 6.31, 6.32 i 6.33 i u tablici 6.13, okvir s kombiniranim ispunom dopušta najveće horizontalne pomake prije sloma, sa srednjom vrijednosti horizontalnog pomaka promatranih slučaja od 28,63 mm, (u_{max}(K-OGY)=30,4 mm, u_{max}(P-OGY)=25,5 mm, u_{max}(Z-OGY)=30,0 mm), poslije njega u prosjeku najveći pomak imaju čelični okviri s porobetonskim ispunom, u iznosu 28,00 mm (u_{max}(K-OY)=27,0 mm, u_{max}(P-OY)=25,5 mm, u_{max}(Z-OY)=31,5 mm), a najmanji horizontalni pomak pri slomu u prosjeku dopušta čelični okvir s glinenim ispunom, u iznosu 24,5 mm (u_{max}(K-OG)=21,0 mm, u_{max}(P-OG)=24,0 mm, u_{max}(Z-OG)=28,5 mm) – tablica 6.13. Prema tome, okvir s kombiniranim ispunom prosječno dopušta 17 % veće horizontalne pomake pri slomu od okvira s glinenim ispunom i 2 % veće od okvira s porobetonskim ispunom, što je i logično jer je pretpostavka kako se ispun na kontaktu potpuno „potrošio“ pa su veći pomaci kod kombiniranoga modela zapravo posljedica deformiranja samoga duktilnoga čeličnog okvira.



Slika 6.33 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – nominalno zglobni priključak (Z) – H/L=0.74; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

Početne krutosti čeličnih okvira u kojima je mijenjana vrsta ispuna (OG, OY, OGY) očekivano se razlikuju s obzirom na poznata svojstva materijala ispuna, pa tako okvir s glinenim ispunom ima najveću krutost (36 kN/mm), zatim okvir s kombiniranim ispunom (24 kN/mm), te na posljetku okvir s porobetonskim ispunom (17 kN/mm).Korištenjem porobetonskog ispuna u odnosu na glineni ispun, dolazi do smanjenja krutosti od 53 %, a uporabom kombiniranog ispuna do smanjenja od 33 %. Kao što je ranije napomenuto, vrijedi kako vrsta priključka stup-greda ne utječe na početnu krutost pa se navedene razlike zadržavaju na promatranim slučajevima.



Slika 6.34 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – nepopustljivi priključak – H/L=0.74; R=1; M=1, 2, 3 i 4

Usporedba ponašanja različitih kvaliteta glinenog ispuna u čeličnim okvirima prikazana je na slici 6.34. Za predstavljanje utjecaja ovakvih vrsta ispuna na otpornost i krutost sustava,odabran je primjer modela s jednim rasponom omjerom visine i širine jednakom 0,74, te kvalitetnom čelika iz eksperimenta. Mehaničke karakteristike korištenih vrsta ispuna prikazane su u tablici 6.3.

Vidljivo je kako s povećanjem kvalitete materijala ispuna dolazi do povećanja otpornosti na horizontalnu silu, pa tako okvir s kvalitetom ispune M4 ima nosivost od 138 kN, okvir s kvalitetom ispune M3 nosivost od 128 kN, s kvalitetom M2 od 109 kN i okvir s kvalitetom ispune M1 od 95 kN. Dakle, za promatrani slučaj uz povećanje svih mehaničkih karakteristika kvalitete ispuna M2 u odnosu na M1 za 50 % (*E, f, f_t, f_m, f_k, c, tg(α)*), dolazi do povećanja nosivosti čeličnog okvira sa zidanim ispunom za 15 %, a uz povećanje kvalitete ispuna M3 u odnosu na M2 za 33 %,dolazi do povećanja nosivosti sustava za 18 %, te na posljetku uz povećanje mehaničkih karakteristika ispuna M4 u odnosu na M3 za 10 %, dolazi do povećanja nosivosti okvira sa ispunom za 8 %. Prosječna nosivost na horizontalnu silu svih modela s kvalitetom ispuna M1 (varijacije broja raspona i omjera visine i širine okvira) iznosi 157,23 kN, modela s kvalitetom M2 iznosi 191,22 kN, modela s kvalitetom M3 iznosi 238,32 kN, a modela s kvalitetom ispuna M4 iznosi 261,07 kN.
Uz povećanje nosivosti, s promjenom kvalitete materijala ispuna na veće vrijednosti, dolazi do povećanja početne krutosti čeličnog okvira sa zidanim ispunom, s 21 kN/mm za kvalitetu ispuna M1 na 30 kN/mm za

ispun M2, te s 38 kN/mm za ispun M3 na 41 kN/mm za ispun M4 – povećanje od 42 % s M1 na M2, zatim povećanje od 27 % s M2 na M3, te povećanje od 8 % korištenjem ispuna M4 umjesto ispuna M3.

Razina najvećih horizontalnih pomaka koje čelični okvir sa zidanim ispunom može podnijeti, s promjenom vrste ispuna na bolje, u prosjeku također rastepa je tako okvir sa zidanim ispunom M1 imao najveći horizontalni pomak od 23,39 mm (međukatni pomak 1,45 %), okvir sa zidanim ispunom M2 pomak od 23,50 mm (međukatni pomak 1,46 %), a kada je korišten ispun M3, sustav je mogao podnijeti horizontalni pomak od 24,56 mm (međukatni pomak 1,52 %), što je opet manje od pomaka koji je dostignut kada je korišten ispun M4, koji iznosi 25 mm (međukatni pomak 1,55 %).

Tablica 6.13 predstavlja sažet prikaz vrijednosti najvećih sila i pripadnih pomaka, te maksimalnih pomaka i pripadnih sila modela čeličnih okvira sa zidanim ispunom u kojima su mijenjane vrste ispuna, a koji su prikazani u ovome poglavlju.

Slika 6.35grafički ilustrira rezultate proračuna numeričkih modela čeličnih okvira sazidanim ispunom kroz koje je istražen utjecaj izmjene vrsta ispune na ponašanje pri opterećenju horizontalnim silama. Prikazom su obuhvaćene nosivostisustava u ovisnosti o promjeni omjera visine i širine okvira i broja raspona.

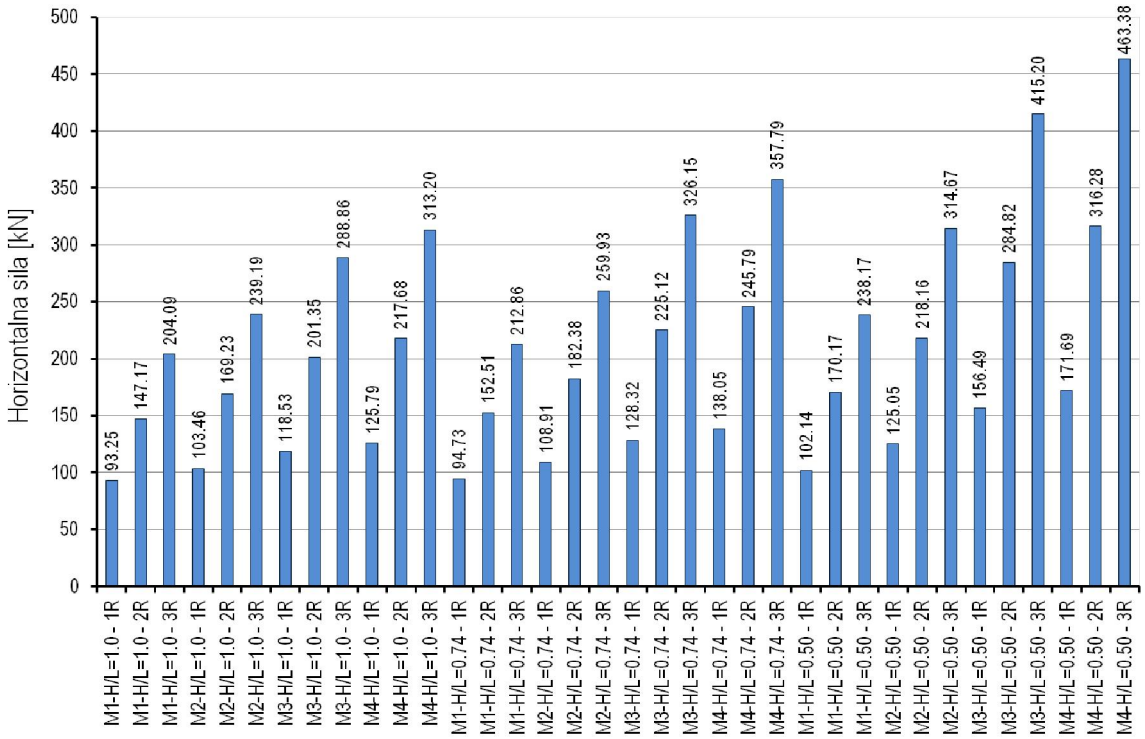
U tablici 6.14ispisani su iznosi najvećih sila i pripadnih horizontalnih pomaka, te najvećih pomaka i pripadnih sila svih modela čeličnih okvira sa zidanim ispunom, dobivene raznim kombinacijama omjera visine i širine okvira (*H/L*) i broja raspona (R).

Tablica 6.13 – Nosivost i pomaci čeličnih okvira s zidanim ispunom - varijacija vrste ispuna

Model	Maksimalna sila i pripadni pomak		Maksimalni pomak i pripadna sila	
	F_{max} [kN]	u [mm]	F [kN]	u_{max} [mm]
OG - H/L=0.74 - 1R - K	132,83	16,5	123,13	21
OY - H/L=0.74 - 1R - K	133,21	27	133,21	27
OGY - H/L=0.74 - 1R - K	95,13	18	91,75	30,4
OG - H/L= 0.74 - 1R - P	124,14	15	92,81	24
OY - H/L=0.74 - 1R - P	116,32	21	115,41	25,5
OGY - H/L=0.74 - 1R - P	85,45	15	67,52	25,5
OG - H/L=0.74 - 1R - Z	95,37	9	48,99	28,5
OY - H/L=0.74 - 1R - Z	93,02	27	91,96	31,5
OGY - H/L=0.74 - 1R - Z	54,19	9	45,4	30

Tablica 6.14 – Nosivost i pomaci čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera *H/L*, broja raspona i kvalitete zidanog ispuna

Model	Maksimalna sila i pripadni pomak		Maksimalni pomak i pripadna sila	
	F_{max} [kN]	u [mm]	F [kN]	u_{max} [mm]
M1-H/L=1.0 - 1R	93,25	18,00	92,41	21,00
M1-H/L=1.0 - 2R	147,17	18,00	140,74	22,50
M1-H/L=1.0 - 3R	204,09	18,00	190,27	24,00
M2-H/L=1.0 - 1R	103,46	18,00	103,46	18,00
M2-H/L=1.0 - 2R	169,23	16,50	158,50	21,00
M2-H/L=1.0 - 3R	239,19	16,50	204,17	24,00
M3-H/L=1.0 - 1R	118,53	16,50	100,46	24,00
M3-H/L=1.0 - 2R	201,35	15,00	169,00	22,50
M3-H/L=1.0 - 3R	288,86	16,50	257,62	21,00
M4-H/L=1.0 - 1R	125,79	16,50	102,89	24,00
M4-H/L=1.0 - 2R	217,68	15,00	200,72	19,50
M4-H/L=1.0 - 3R	313,20	15,00	273,83	21,00
M1-H/L=0.74 - 1R	94,73	19,50	91,34	27,00
M1-H/L=0.74 - 2R	152,51	19,50	150,00	21,00
M1-H/L=0.74 - 3R	212,86	19,50	207,45	22,50
M2-H/L=0.74 - 1R	108,91	18,00	107,23	19,50
M2-H/L=0.74 - 2R	182,38	18,00	174,15	21,00
M2-H/L=0.74 - 3R	259,93	18,00	218,94	25,50
M3-H/L=0.74 - 1R	128,32	16,50	119,95	21,00
M3-H/L=0.74 - 2R	225,12	16,50	206,07	21,00
M3-H/L=0.74 - 3R	326,15	16,50	268,52	24,00
M4-H/L=0.74 - 1R	138,05	16,50	108,06	25,50
M4-H/L=0.74 - 2R	245,79	15,00	232,96	19,50
M4-H/L=0.74 - 3R	357,79	16,50	287,06	24,00
M1-H/L=0.50 - 1R	102,14	20,00	100,03	25,00
M1-H/L=0.50 - 2R	170,17	20,00	160,22	27,50
M1-H/L=0.50 - 3R	238,17	20,00	238,17	20,00
M2-H/L=0.50 - 1R	125,05	20,00	101,88	32,50
M2-H/L=0.50 - 2R	218,16	20,00	203,19	25,00
M2-H/L=0.50 - 3R	314,67	20,00	297,44	25,00
M3-H/L=0.50 - 1R	156,49	17,50	110,80	32,50
M3-H/L=0.50 - 2R	284,82	17,50	234,59	27,50
M3-H/L=0.50 - 3R	415,20	17,50	355,08	27,50
M4-H/L=0.50 - 1R	171,69	17,50	99,84	35,00
M4-H/L=0.50 - 2R	316,28	16,50	284,63	24,00
M4-H/L=0.50 - 3R	463,38	17,50	308,16	32,50



Slika 6.35 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira *H/L* i broja raspona

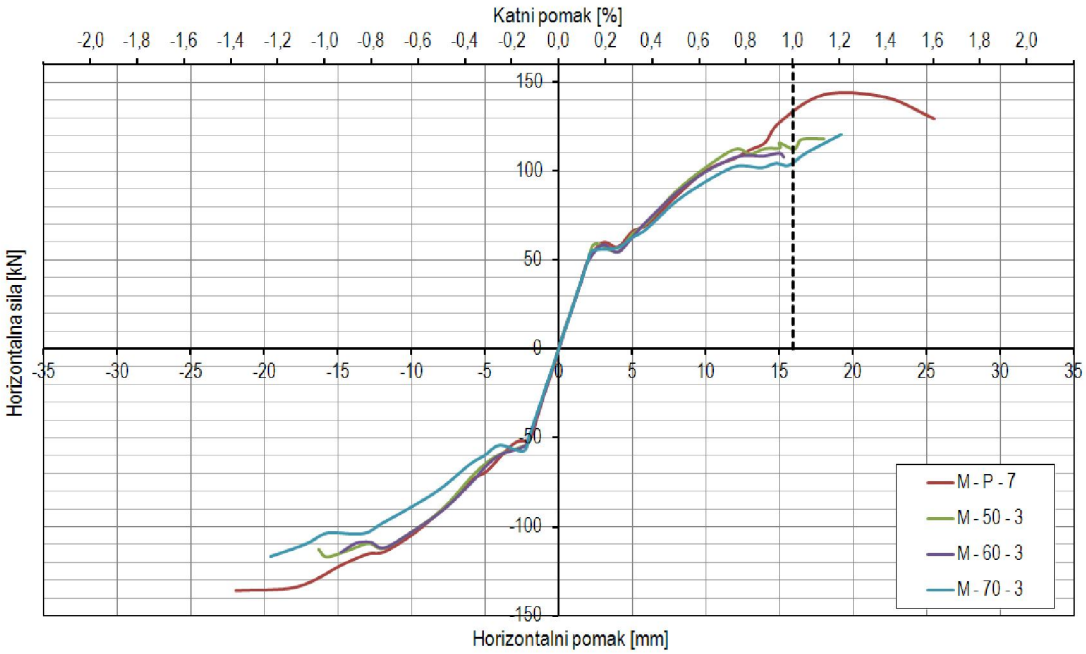
6.2.6. Čelični okviri sa zidanim ispunom - varijacija debljine oslabljenja i čvrstoća porobetonskih elemenata u kombiniranom ispunu

Poseban slučaj parametarske analize predstavlja procjena utjecaja debljine oslabljenja (čime se simulira oslabljenje porobetonskih elemenata uz stupove čelične konstrukcije) i čvrstoća porobetonskih elemenata u čeličnome okviru s kombiniranim zidanim ispunom na početnu krutost, nosivost i općenito ponašanje pri unošenju horizontalnih sila u visini grede takvoga sustava. Uz zadržavanje ostalih vrijednosti (vrsta priključka stup-greda, kvaliteta čeličnoga materijala, broj raspona, omjer visine i širine okvira te kvaliteta dijela zidanog ispuna od glinenih elemenata) moguće je utvrditi koliki je značaj promjene navedenih varijabli. Veličine oslabljenja dijela zida od porobetonskih elemenata,u vidu promjera rupa, koje se razmatraju, iznose 50, 60 i 70 mm (oznake 50, 60 i 70), a pri tome su mijenjane i tlačne čvrstoće porobetonskih elemenata tako da iznose: 2,0 N/mm^2, 2,5 N/mm^2, 3,0 N/mm^2 i 3,2 N/mm^2(oznake 1, 2, 3, 4). Osim toga, razmatrani su i čelični okviri s kombiniranim ispunom u kojemu su puni porobetonski elementi, dakle bez oslabljenja, ali kojima je mijenjana tlačna i vlačna čvrstoća prema kombinacijama navedenim u tablici 6.6. Svi rezultati ove parametarske analize promatrani su do vrijednosti međukatnog pomaka sustava okvira i ispuna,koja obuhvaća 1,0 % njegove visine – ta veličina za promatrane okvire, koji su istovjetni onima u eksperimentu, iznosi 16,13 mm, što je i naznačeno na slikama 6.36, 6.37, 6.38. Spomenuti međukatni pomak od 1,0 % visine okvira smatra se mjerodavnim i prema

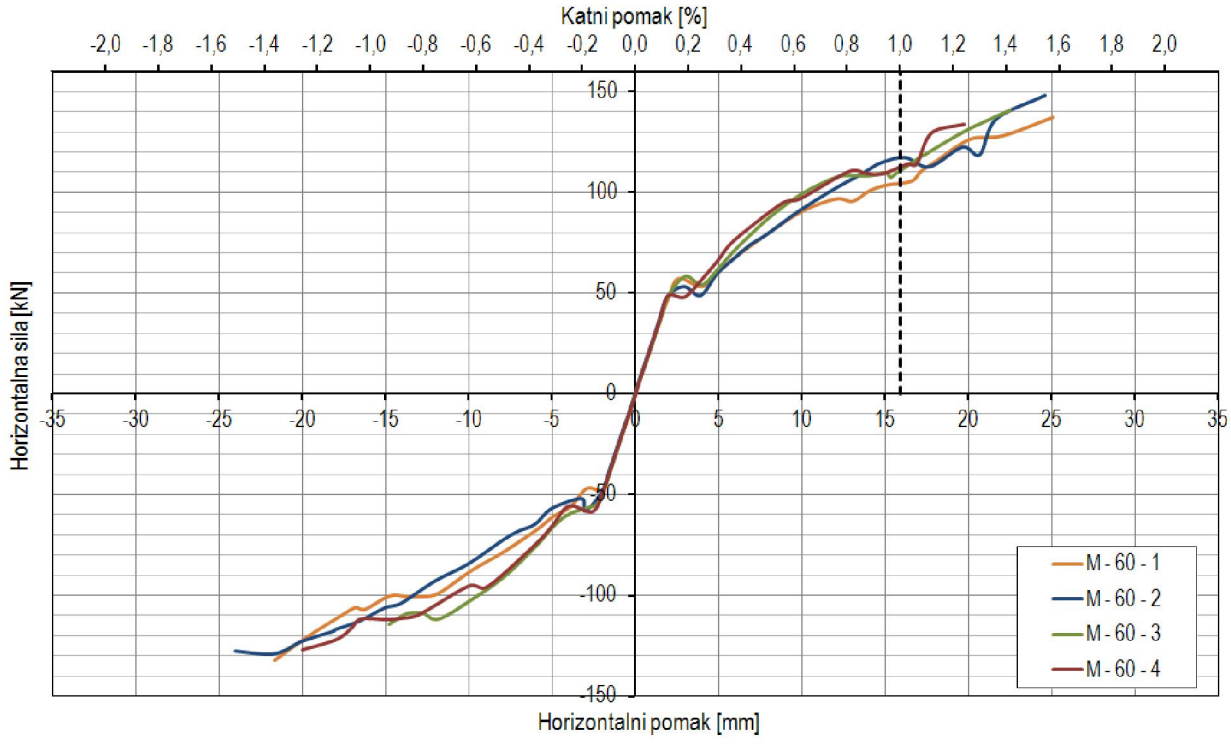
eksperimentalnimrezultatima – pri spomenutom pomaku dolazilo je do potpunog sloma oslabljenogporobetonskog ispuna pa je nakon toga ispitivanje prekinuto. Za potrebe razmatranja utjecaja veličine oslabljenja i čvrstoće porobetonskih elemenata, izrađeni su mikro-modeli u programskom paketu *ATENA 2D*, a za prikaz rezultata odabrani su samo neki od rezultata, dok je ostatak histereznihanvelopa prikazan u Prilogu A (slike A67 do A71).

Na slici 6.36 prikazane su karakteristične anvelope otpornosti čeličnih okvira s kombiniranim ispunom u kojima je varirana debljina oslabljenja porobetonskihelemenata uz zadržavanje čvrstoće porobetonskih elemenata. Odabrani su modeli s debljinom oslabljenja porobetonskih elemenata od 50 mm, 60 mm i 70 mm, uz zadržanu tlačnu i vlačnu čvrstoću porobetonskih elemenata od redom 3,0 N/mm^2 i 1,0 N/mm^2 (OGY – 50 – 3, OGY – 60 – 3, OGY – 70 – 3), te model s punim porobetonskim elementima jednake čvrstoće (OGY – P – 7). U prikaze je uključen model s punim (neoslabljenim) porobetonskim elementima u ispunu kako bi poslužio kao potvrda ostalim modelima u kontekstu rubnih uvjeta. Iz slike je vidljivo kako se s porastom oslabljenja porobetonskih elemenata smanjuje nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom, a okvir s punim porobetonskim elementom, ima najveću nosivost. Razlike u maksimalnim nosivostima promatranih modela male su, pa tako čelični okvir s porobetonskim elementima s veličinom oslabljenja od 60 mm (F_{max}(OGY-60-3)=110 kN) ima za 7 % veću nosivost na horizontalne sile od onoga s veličinom oslabljenja u porobetonskim elementima od 70 mm (F_{max}(OGY-70-3)=103 kN), a sustav u kojemu je veličina porobetonskog oslabljenja iznosila 50 mm (F_{max}(OGY-50-3)=116 kN) ima za 12,1 % veću nosivost od njemu slabijeg OGY-60-3. Čeličnog okvir s kombiniranim ispunom u kojemu je porobetonski element pun (F_{max}(OGY-P-3)=128 kN) imao je 24 % veću nosivost od onoga s najmanjim oslabljenjem, OGY-50-3. Sve navedene vrijednosti horizontalnih sila odnose se na najveću vrijednost ili ako ona nije dosegnuta prije međukatnog pomakaod 1,0 %, onda na pripadajuću silu.

Slika 6.37 daje uvid u karakteristične histerezneanvelope čeličnih okvira s kombiniranim ispunom u kojima je varirana kvaliteta porobetonskog ispuna, a zadržana je vrijednost oslabljenja porobetonskih elemenata, omjer visine i širine okvira, vrsta priključka stup-greda, kvaliteta čeličnog materijala i kvaliteta glinenog dijela kombiniranoga ispuna. Vrijednost oslabljenja porobetonskog ispuna, koja je usvojena, iznosi 60 mm, a tlačne čvrstoće porobetonskih elemenata, koje su mijenjane, iznose 2,0 N/mm^2 (1), 2,5 N/mm^2 (2), 3,0 N/mm^2 (3), 3,2 N/mm^2 (4), tablica 6.6. Pri nanošenju horizontalne sile, opisani sustavi ponašaju se po pitanju početne krutosti i krajnjih horizontalnih pomaka, neovisno o kvaliteti porobetonskog dijela kombiniranog ispuna, no po pitanju nosivosti, postoje određene razlike. Kao što se može i pretpostaviti, s povećanjem tlačne čvrstoće porobetonskih elemenata dolazi do povećanja nosivosti sustava na horizontalne sile.



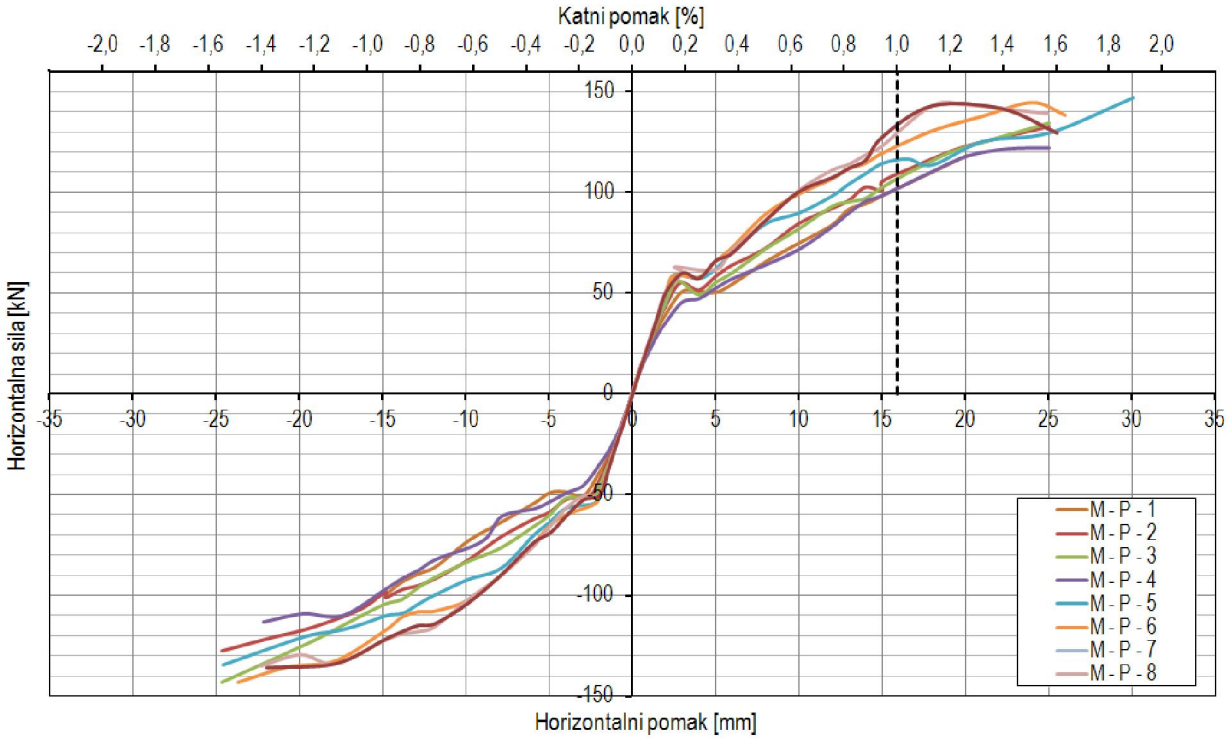
Slika 6.36 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije oslabljenja porobetonskih elemenata – P, 50, 60, 70; čvrstoće 3 i 7



Slika 6.37 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije kvalitete porobetonskih elemenata – 1, 2, 3, 4; debljina oslabljenja 60

Ponašanje čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom u kojima je mijenjana kvaliteta porobetonskih ispuna, bez oslabljenja, pri čemu su zadržani omjer *H/L*, broj raspona i vrsta priključka, prikazano je na slici 6.38. Kako je uočljivo na dijagramu horizontalna sila-horizontalni pomak, kvaliteta ispuna nema značajniji

utjecaj na početnu krutost sustava, a promjenom kvalitete ispuna (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)dolazi do blagoga porasta nosivosti, što je i za očekivati pri takvim varijacijama. Što se tiče horizontalnoga pomaka nema značajnijih razlika u mogućnosti njegovoga preuzimanja, naime spomenuti iznosmeđukatnog pomaka od 1,0 % sustav čeličnoga okvira s kombiniranim ispunom u mogućnosti je preuzeti, neovisno o kvaliteti ispuna – razlike su vezane samo uz razine horizontalne sile pri tome pomaku.

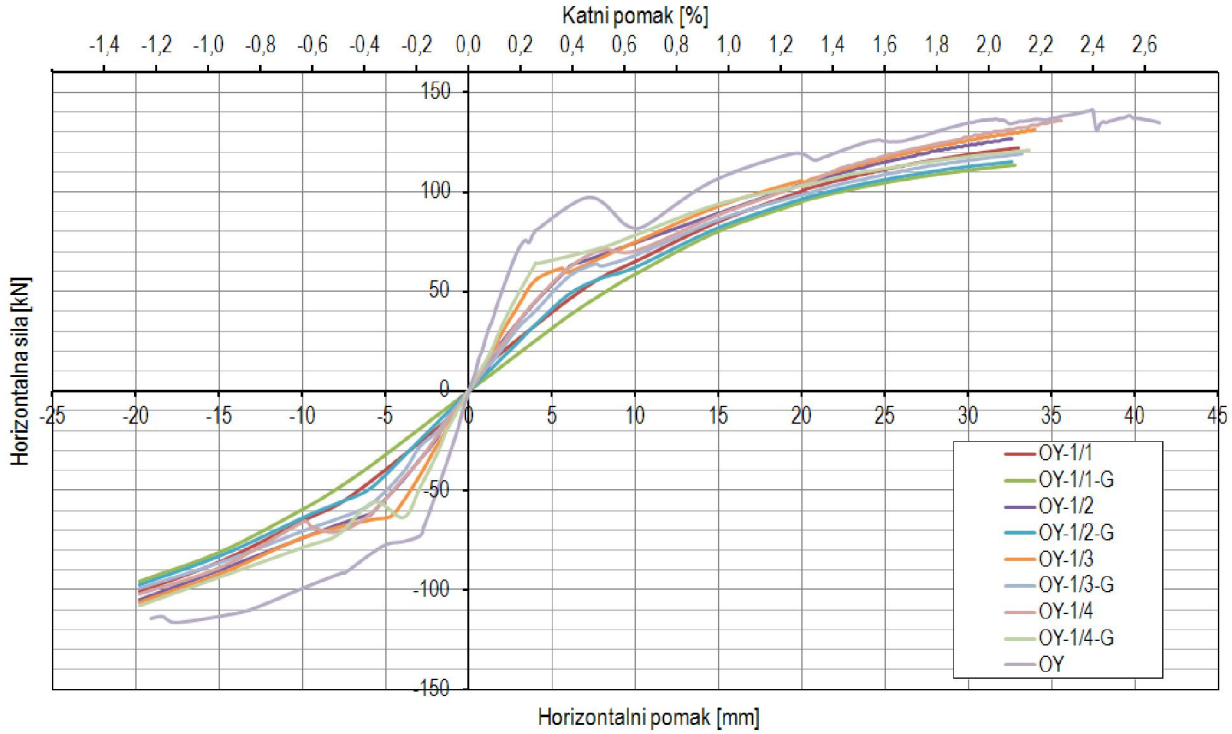


Slika 6.38 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije kvalitete porobetonskih elemenata – 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

6.2.7. Čelični okviri sa zidanim ispunom – varijacija načina povezivanja čeličnog okvira i zidanog ispuna

Ovaj dio parametarske analizeodnosi se na utvrđivanje utjecajapostojanja razmaka u kontaktnoj zoni između zidanog ispuna i čeličnoga okvira (eng. gap),na ponašanje pri opterećenju horizontalnim silama, a anvelope otpornosti takvih mikro-modela izrađenih u *ATENI 2D* nalaze se na slici 6.39. Za potrebe analize korišten je čelični okvir sa zidanim porobetonskim ispunom s parametrima jednakima kao u eksperimentu (jedan raspon, omjer širine i visine okvira jednak 0,74, granica popuštanja čeličnog materijala od 337 N/mm^2). Neki od načina na kojima je vršena izmjena načina povezivanja,prikazani su na slici 6.4, a svi promatrani slučajevi uključuju sljedeće modele: OY-1/1, OY-1/1-G, OY-1/2, OY-1/2-G, OY-1/3, OY-1/3-G, OY-1/4, OY-1/4-G. Dakle, promatrani su slučajevi kada je uklonjena veza po cijeloj duljini između stupova

okvira i ispuna (OY-1/1), kada je uklonjena veza po cijeloj duljini između stupova i ispuna, ali i grede (OY-1/1-G), te potom slučaj uklanjana polovine veze po duljini između stupova okvira i ispuna (OY-1/2), a uz polovinu duljine, i veza između grede i ispuna (OY-1/2-G). Osim tih modela, načinjeni su i modeli u kojima je uklonjena trećina veze između stupova okvira i ispuna (OY-1/3) i četvrtina te veze (OY-1/4), uz dodatne dvije varijacije, kada im je uklonjena i veza između grede i ispuna (OY-1/3-G, OY-1/4-G). Na spomenutom dijagramu, na slici 6.39, koji prikazuje rezultate proračuna tih modela pomoću anvelopa, prikazana je i anvelopa otpornosti čeličnoga okvira s porobetonskim ispunom u kojemu su sve veze između elemenata okvira i ispuna ostvarene. Ovaj prikaz uključen je u rezultate kako bi se lakše mogle uspostaviti korelacije između raznih inačica nedostatka veze i postojanja iste.



Slika 6.39 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije položaja nepovezanosti ispuna s čeličnim okvirom - OY-1/1, OY-1/1-G, OY-1/2, OY-1/2-G, OY-1/3, OY-1/3-G, OY-1/4, OY-1/4-G

Najveća razlika u ponašanju opisanih modela primjetna je kroz početnu krutost pa model čeličnog okvira s porobetonskim ispunom povezanim s okvirom, ima najveću početnu krutost (24 kN/mm), a model u kojemu je uklonjen najveći udio povezanosti ispuna i okvira, ima najmanju krutost (6 kN/mm) – porast početne krutosti produljivanjem kontakta između okvira i ispuna do potpune povezanosti iznosi 300 %. Ostali modeli prikazuju proporcionalan porast početne krutosti s povećanjem stupnja povezanosti. Nosivost modela na horizontalnu silu slaže se s načinom prirasta početne krutosti, dakle nosivost raste s većom razinom povezanosti. Po pitanju horizontalnih pomaka ne postoje primjetne razlike u njihovom najvećem iznosu u ovisnosti o modelu, no bitno je za napomenuti kako se linearni odnos između horizontalne sile i

horizontalnog pomaka zadržava do većih razina horizontalnih pomaka (iako pri manjim silama) sa smanjenjem povezanosti elemenata čeličnog okvira i ispuna. Primjerice, model u kojemu je veza između ispuna i čeličnog okvira u potpunosti ostvarena, prvi lom krivulje sila-pomak ima pri horizontalnoj sili od 74 kN i pomaku od 3,12 mm, model OY-1/4 pri pomaku od 4,00 i sili od 64 kN, zatim model OY-1/3 pri sili od 55 kN i pomaku od 4 mm, potom OY-1/4-G s pomakom od 5,99 mm i silom od 62 kN – ostali modeli ponašaju se u skladu s ovom zakonitošću.

6.3. Komentar rezultata

Pri provedbi ove parametarske analize u obzir su uzeti sljedeći parametri: omjer visine i širine okvirne konstrukcije, broj raspona okvira, kvaliteta čeličnoga materijala, vrsta priključka s obzirom na rotacijsku krutost, kvaliteta zidanog ispuna, utjecaj postojanja razmaka (gapova) između čeličnoga okvira i zidanog ispuna, te kvaliteta i debljina oslabljenja porobetonskih blokova kod okvira s kombiniranim ispunom.

Rezultati pokazuju kako se sa smanjenjem omjera visine i širine čeličnog okvira povećava nosivost na horizontalnu silu, a za promatrane slučajeve primijećeno je i da se s daljnjim smanjenjem omjera *H/L* smanjuje i doprinos povećanja nosivosti sustava. Smanjenjem omjera *H/L*, osim nosivosti sustava na horizontalne sile, povećava se i početna krutost.

Uočeno je kako vrsta priključka utječe na nosivost, tj. da se s povećanjem rotacijske krutosti priključka povećava i nosivost, te su u pravilu najveću nosivost postizali modeli čiji su priključci stup-greda imali karakteristike nepopustljivog priključka, a najmanju, modeli s nominalno zglobnim priključcima. Vrsta priključka nije utjecala, ili je imala zanemariv utjecaj, na početnu krutost sustava za predmetne modele.
Slično kao što je bio slučaj s vrstama priključaka, primijećeno je kako kvaliteta čelika ne utječe na ponašanje sustava u pogledu početne krutosti, te kako ima utjecaja samo na konačnu nosivost čeličnih okvira s ispunom na horizontalnu silu.

Povećavanjem mehaničkih svojstava ispuna dolazi do povećanja nosivosti i početne krutosti čeličnih okvira sa zidanim ispunom. Analizirani modeli s različitim vrstama ispuna (OG-i, OY-i i OGY-i) u pravilu pokazuju kako najveću krutost sustava okvira sa zidanim ispunom imaju okviri s glinenim ispunom (OG-i), a najmanju okviri s porobetonskim ispunom (OY-i), dok se modeli s kombiniranim ispunom (OGY-i) po početnoj krutosti, nalaze između ovih skupina modela, ali uz najmanju nosivost (ili nosivost jednaku modelima OG-i, u slučajevima kada čelični okvir s glinenim ispunom nakon otkazivanja ispuna ima dovoljnu duktilnost da

„padne“ na nosivost samog čeličnog okvira – što je u ovoj parametarskoj analizi bio čest slučaj kod sustava OGY-i koji i jest kalibriran kako bi ispun ranije otkazao nosivost, te bi se na taj način osigurala duktilnost samoga okvira). Rezultati analize pokazuju krtije ponašanje modela OY-i u odnosu na skupinu modela OG-i i OGY-i, koji imaju i naglašeniji pad anvelopne krivulje nakon dostizanja maksimalne horizontalne sile koju mogu preuzeti. Krtiji lom modela OY-i, vjerojatno, je posljedica bržeg trošenja duktilnih rezervi čeličnog okvira uslijed veće deformabilnostiporobetonskog ispuna, te je trenutak otkazivanja ove vrste zidanog ispuna blizak trenutku potpune plastifikacije elemenata čelične konstrukcije.

Parametarska analiza provedena na modelima okvira s kombiniranim ispunom pokazala je utjecaj debljine oslabljenja i kvalitete porobetonskih blokova na nosivost i početnu krutost. Tako je uočeno da se povećavanjem debljine porobetonskih blokova na mjestima vertikalnog oslabljenja zida - povećava nosivost, ali da se variranjem ovoga parametra ne dobivaju razlike u početnoj krutosti sustava. Slično je i s mijenjanjem mehaničkih karakteristika porobetonskih blokova, gdje je primijećeno povećanje nosivosti s povećanjem kvalitete materijala, ali uz jednaku početnu krutost, osim u slučajevima kada se promjena kvalitete materijala primjenjivala na pune porobetonske blokove pri čemu su zabilježene blage promjene početne krutosti sustava.

Analizom utjecaja postojanja razmaka između okvira i zidanog ispuna utvrđeno je da ovaj parametar utječe na krutost i na nosivost sustava – što je kontaktna površina između zidanog ispuna i čeličnog okvira manja, manje su vrijednosti početne krutosti i nosivosti na horizontalnu silu, a brže otkazivanje nosivosti sustava povezano je s bržim drobljenjem dijagonalnih kutova zidanog ispuna zbog veće koncentracije normalnih naprezanja.

Sumarni prikaz najvažnijih zaključaka provedene parametarske analize pregledno je dan tablicom 6.15.

Tablica 6.15 – Sažeti prikaz zaključaka izvedenih iz provedene parametarske analize

Parametar	Učinak
Povećanje uzdužne sile u stupovima čeličnog okvira	Smanjenje duktilnosti i nosivosti sustava na horizontalne sile
Povećanje omjera visine i širine okvira *H/L*	Smanjenje nosivosti sustava na horizontalne sile i početne krutosti
Povećanje broja raspona	Povećanje početne krutosti i nosivosti sustava na horizontalne sile; nema značajnijih promjena u krajnjem horizontalnom pomaku sustava

Parametar	Učinak
Varijacija vrste priključka	Nema utjecaja na početnu krutost; s povećanjem rotacijske krutosti priključka raste nosivost sustava na horizontalne sile
Varijacija kvalitete materijala	Ponašanje sustava identično je do granice popuštanja najslabije kvalitete čeličnog materijala; viša kvaliteta čeličnog materijala omogućuje veće pomake sustava i otpornosti na horizontalne sile
Povećanje mehaničkih svojstava zidanog ispuna	Povećanje nosivosti i početne krutosti sustava
Veličina oslabljenja prošupljenih porobetonskih blokova kod kombiniranog ispuna	S povećanjem oslabljenja porobetonskih blokova smanjuje se i nosivost sustava na horizontalne sile; nema promjene početne krutosti sustava
Povećanjem kvalitete prošupljenih porobetonskih zidnih elemenata u kombiniranom ispunu	Povećava se otpornost sustava na horizontalne sile; nema utjecaja na početnu krutost sustava
Povećanjem kvalitete punih porobetonskih elemenata u kombiniranom ispunu	Povećava se nosivost sustava na horizontalne sile uz neznatno povećanje početne krutosti
Postojanje razmaka između čeličnog okvira i ispuna	S povećanjem povezanosti ispuna i okvira – povećava se početna krutost i otpornost na horizontalne sile

7. NUMERIČKI PRIMJER - PRORAČUN I MODELIRANJE VIŠEETAŽNE ČELIČNE KONSTRUKCIJE SA ZIDANIM ISPUNOM

7.1. Uvod

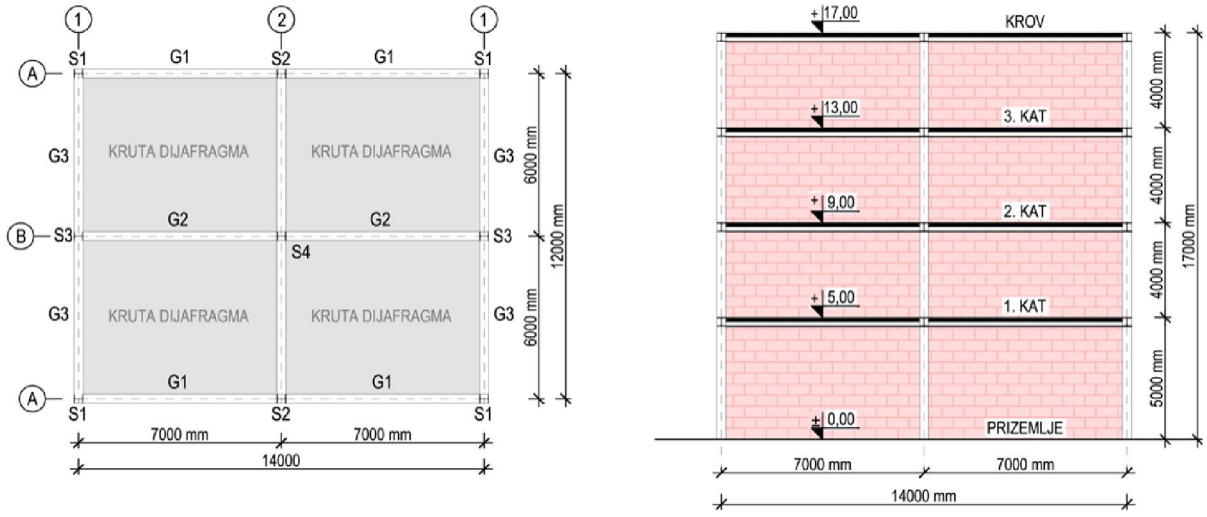
Svrha ovoga poglavlja je ilustrirati mogućnost primjene korištenih metoda modeliranja predloženoga koncepta izvedbe te dobivenih rezultata na numeričkom primjeru. Kao primjer, odabrana je višeetažna čelična konstrukcija koja je dimenzionirana za dva slučaja opterećenja: u prvome slučaju čelična konstrukcija dimenzionirana je na nepotresne kombinacije opterećenja, a u drugome slučaju proračunata je na potresna djelovanja primjenom ekvivalentne statičke metode. Pri dimenzioniranju konstrukcijskih čeličnih elemenata korištene su suvremene europske norme [34, 57, 69, 70, 71]. Nakon odabira čeličnih profila od kojih se sastoji višeetažna čelična konstrukcija, i to na način da je postignuta visoka razina iskorištenosti elemenata, u ravnine glavnih okvira (u poprečnom smjeru) dodani su glineni, porobetonski i kombinirani zidani ispun, kako bi se odredio njihov utjecaj na ponašanje cjelokupnoga sustava izloženoga horizontalnim djelovanjima. Analize su provedene u programskom paketu *SeismoStruct*, a za modeliranje ispuna korišteni su modeli detaljno objašnjeni u 5. poglavlju ovoga rada.

7.2. Opis modela konstrukcije

Višeetažna čelična konstrukcija, tlocrtnih dimenzija 14000x12000 mm, sastojala se od ukupno 4 etaže (P+3), slika 7.1. Radi pojednostavljenja i lakšega uočavanja bitnih rezultata, promatran je i analiziran samo jedan glavni ravninski okvir (okvir B na slici 7.1 a). Ukupna visina konstrukcije iznosi 17000 mm, odnosno - visina prizemlja konstrukcije iznosila je 5000 mm, dok su visine ostalih etaža bile 4000 mm. Raspon čeličnih stupova konstrukcije u ravnini glavnih okvira (okviri *A* i *B*, slika 7.1) iznosi 7000 mm, a razmak glavnih okvira je 6000 mm.

U Prilogu D nalazi se postupak dokaza nosivosti predmetne konstrukcije na potresna djelovanja. Pretpostavljeno je da se konstrukcija nalazi u VII. potresnoj zoni (lokacija grad Osijek), pa je prema tome

maksimalno ubrzanje tla 2,0 m/s^2, temeljena je na tlu razreda C. Za seizmičku analizu odabran je spektar odziva Tipa 1, faktor važnosti građevine iznosi γ_I=1,0, te je predviđeno da u objektu budu smješteni uredi (kategorija namjene objekta B prema [70]), krov je ravan i neprohodan (kategorija H). Kvaliteta čeličnoga materijala je S235.



a) b)

Slika 7.1 – Analizirana konstrukcija: a) tlocrt karakteristične etaže, b) glavni okviri A i B

Poprečni presjeci greda i stupova konstrukcije su HEA profili. U tablici 7.1 prikazane su dimenzije korištenih čeličnih profila stupova (S) i greda (G) glavnoga nosivoga okvira B u ovisnosti o etaži na kojoj se nalaze, te kombinaciji opterećenja kojima je konstrukcija bila izložena. U tablici 7.2 prikazane su geometrijske karakteristike korištenih profila.

Pri izradi modela čelične okvirne konstrukcije u programskom paketu *SeismoStruct*, za model ponašanja čelika odabran je elastični-idealno plastični model s granicom popuštanja od f_y=235 N/mm^2, te modulom elastičnosti od E=210 000 N/mm^2, a za relativnu deformaciju pri popuštanju čeličnoga materijala proračunata je vrijednost od 0,0011 mm/mm. Svi priključci stup-greda, s obzirom na rotacijsku krutost, pretpostavljeni su kao nepopustljivi, odnosno rotacijska krutost priključka nije zasebno proračunata.

Tablica 7.1 – Poprečni presjeci greda i stupova čelične konstrukcije

	Nepotresne kombinacije			Potresne kombinacije		
	S3	S4	G2	S3	S4	G2
Prizemlje	HEA 280	HEA 320	HEA 300	HEA 400	HEA 400	HEA 300
1. kat	HEA 260	HEA 280	HEA 300	HEA 320	HEA 360	HEA 300
2. kat	HEA 240	HEA 240	HEA 300	HEA 300	HEA 300	HEA 300
3. kat	HEA 180	HEA 240	HEA 260	HEA 280	HEA 280	HEA 240

Tablica 7.2 – Geometrijske karakteristike korištenih čeličnih profila

PROFIL	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	r [mm]	A [cm^2]	I_y [cm^4]	$W_{y,el}$ [cm^3]	$W_{y,pl}$ [cm^3]	I_z [cm^4]	$W_{z,el}$ [cm^3]	$W_{z,pl}$ [cm^3]
HEA 180	171	180	6	9,5	15	45,25	2510	293,6	324,9	924,6	102,7	156,5
HEA 220	210	220	7	11	18	64,34	5410	515,2	568,5	1955	177,7	270,6
HEA 240	230	240	7,5	12	21	76,84	7763	675,1	744,6	2769	230,7	351,7
HEA 260	250	260	7,5	12,5	24	86,82	10450	836,4	919,8	3668	282,1	430,2
HEA 280	270	280	8	13	24	97,26	13670	1013	1112	4763	340,2	518,1
HEA 300	290	300	8,5	14	27	112,5	18260	1260	1383	6310	420,6	641,2
HEA 320	310	300	9	15,5	27	124,4	22930	1479	1628	6985	465,7	709,7
HEA 360	350	300	10	17,5	27	142,8	33090	1891	2088	7887	525,8	802,3
HEA 400	390	300	11	19	27	159	45070	2311	2562	8564	570,9	872,9

Radi lakšega snalaženja u daljnjem tekstu analizirani modeli imat će oznake O*x*-*y*, pri čemu oznaka *x* označava vrstu ispuna (*S* za čistu čeličnu konstrukcije, *G* za konstrukciju s glinenim ispunom, te *Y* i *GY* za porobetonski i kombinirani ispun), a *y* označava proračunsku situaciju na koju je čelični okvir dimenzioniran (*N* za konstrukciju dimenzioniranu na nepotresne kombinacije i *P* za potresnu kombinaciju).

Za parametre zidanoga ispuna korištene su kalibrirane vrijednosti iz 5. poglavlja rada, uz korekciju debljine zida, koja je za potrebe ovog proračuna uzeta s vrijednošću od 190 mm. Osim ove vrijednosti korigirana je i rezidualna površina poprečnog presjeka zamjenske dijagonale A_2 kod sustava s kombiniranim ispunom (vidi poglavlje 5.3.1.) Ovom redukcijom modelira se odvajanje centralnoga dijela zidanog ispuna od okvira uslijed raspucavanja slabijeg ispuna uz stupove okvira. Zidani ispuni bili su smješteni simetrično po svim etažama u glavnom okviru konstrukcije.

Budući da se profili stupova i greda razlikuju po pojedinim etažama, za analize konstrukcije sa zidanim ispunima u programskom paketu *SeismoStruct* korigiran je i proračun parametara zidanog ispuna posebno za svaku etažu (geometrijske odrednice zamjenske dijagonale).

Tablicama 7.3 do 7.5 prikazani su najvažniji parametri glinenog, porobetonskog i kombiniranog zidanog ispuna koji su korišteni pri proračunima u programskom paketu *SeismoStruct*. Osim osnovnih parametara ziđa (kao što su širina zamjenske dijagonale b_w, površina poprečnog presjeka zamjenske dijagonale *A1*, kontaktna duljina između zidanog ispuna i čeličnog okvira *z*), u tablicama su sadržane i tlačne čvrstoće za četiri oblika sloma prema izrazima od (5.22) do (5.25). Za proračune je usvojena najmanja od ovih vrijednosti (kao što je to bio slučaj i kod kalibriranja u poglavlju 5), koja je u tablici otisnuta masnim slovima.

Tablica 7.3 – Parametri glinenog zidanog ispuna po etažama konstrukcije

	Prizemlje	1. kat	2. kat	3. kat
λ	0,00118	0,00144	0,00174	0,00174
b_w [mm]	717,00	680,08	632,72	633,20
A_1 [mm^2]	136230	129215	120217	120308
z [mm]	1331,64	1092,87	902,62	902,90
X_{oi} [%]	1,85	1,55	1,25	1,25
Y_{oi} [%]	2,35	2,96	2,96	2,70
h_z [%]	10,90	11,25	9,29	9,27
$f_{m\theta}$ [N/mm^2] (5.22)	**1,53**	**1,52**	1,64	1,64
$f_{m\theta}$ [N/mm^2] (5.23)	7,82	7,15	7,70	7,71
$f_{m\theta}$ [N/mm^2] (5.24)	1,72	1,56	**1,56**	**1,57**
$f_{m\theta}$ [N/mm^2] (5.25)	2,19	1,74	1,70	1,70

Tablica 7.4 – Parametri porobetonskog zidanog ispuna po etažama konstrukcije

	Prizemlje	1. kat	2. kat	3. kat
λ	0,00084	0,00103	0,00124	0,00124
b_w [mm]	820,12	777,89	723,72	724,26
A_1 [mm^2]	155823	147799	137507	137609
z [mm]	1863,30	1529,20	1262,99	1263,39
X_{oi} [%]	1,85	1,55	1,25	1,25
Y_{oi} [%]	2,35	2,96	2,96	2,70
h_z [%]	15,26	15,74	13,00	12,97
$f_{m\theta}$ [N/mm^2] (5.22)	1,46	1,45	1,56	1,56
$f_{m\theta}$ [N/mm^2] (5.23)	3,26	2,98	3,21	3,21
$f_{m\theta}$ [N/mm^2] (5.24)	**1,02**	**0,93**	**0,93**	**0,93**
$f_{m\theta}$ [N/mm^2] (5.25)	1,36	1,07	1,06	1,06

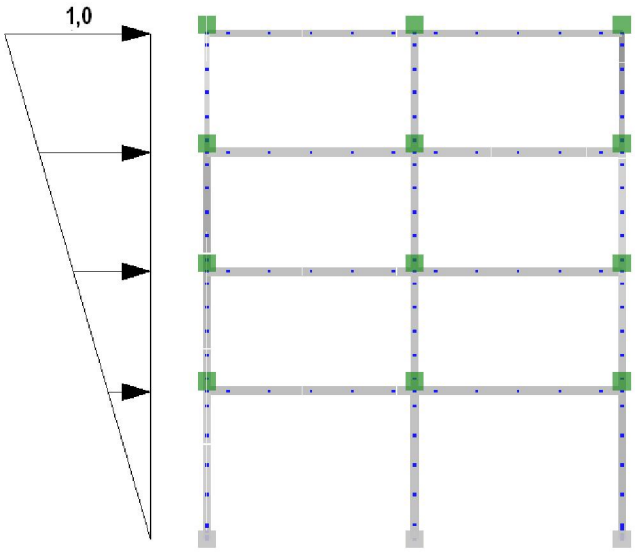
Tablica 7.5 u kojoj su sadržani parametri kombiniranoga zidanog ispuna ne sadrži podatke o tlačnim čvrstoćama pri različitim oblicima gubitka nosivosti ispuna, zbog toga što je i u ovoj analizi, kao i pri numeričkome modeliranju čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom u poglavlju 5, usvojena prosječna vrijednost tlačne čvrstoće prošupljenih porobetonskih blokova u horizontalnom smjeru dobivena eksperimentalno i koja iznosi 0,55 N/mm^2. (Treba napomenuti kako je i taj parametar moguće zadati prema konkretnim eksperimentalnim rezultatima kao i kod ostalih modela.)

Tablica 7.5 – Parametri kombiniranog zidanog ispuna po etažama konstrukcije

	Prizemlje	1. kat	2. kat	3. kat
λ	0,00084	0,00103	0,00124	0,00124
b_w [mm]	820,12	777,89	723,72	724,26
A_1 [mm^2]	155823	147799	137507	137609
z [mm]	1863,30	1529,20	1262,99	1263,39
X_{oi} [%]	1,85	1,55	1,25	1,25
Y_{oi} [%]	2,35	2,96	2,96	2,70
h_z [%]	15,26	15,74	13,00	12,97

Osim vlastite težine same čelične konstrukcije, koja je uzeta u obzir računalnim programom, modeli su opterećeni jednolikim površinskim opterećenjem uslijed vlastite težine *Hoesch Additiv* stropne ploče (g=3,0 kN/m^2) i dodatnim stalnim opterećenjem kojim su u obzir uzeti slojevi poda (za ravni krov Δg=1,50 kN/m^2, dok je za međuetaže usvojena vrijednost Δg=1,00 kN/m^2), a za uporabno opterećenje, prema [70], odabrana je vrijednost q= 3,0 kN/m^2. Pri analizi konstrukcije za potresna djelovanja, uporabno opterećenje smanjeno je koeficijentom kombinacije ψ_2=0,3, [69] pa ukupno uporabno opterećenje iznosi q=0,90 kN/m^2.

Odabrana metoda provjere horizontalne nosivosti sustava je metoda postupnog guranja konstrukcije (tzv. *pushover* metoda, [72, 73]), te su horizontalna opterećenja na predmetne konstrukcijske sustave zadana u obliku pomaka u visini svake etaže s trokutnom raspodjelom, pri čemu je na najvišoj etaži zadan najveći pomak, dok je pomak na razini temelja nula. Na slici 7.2 prikazan je opterećeni model čelične konstrukcije izrađen u programskom paketu SeismoStruct.

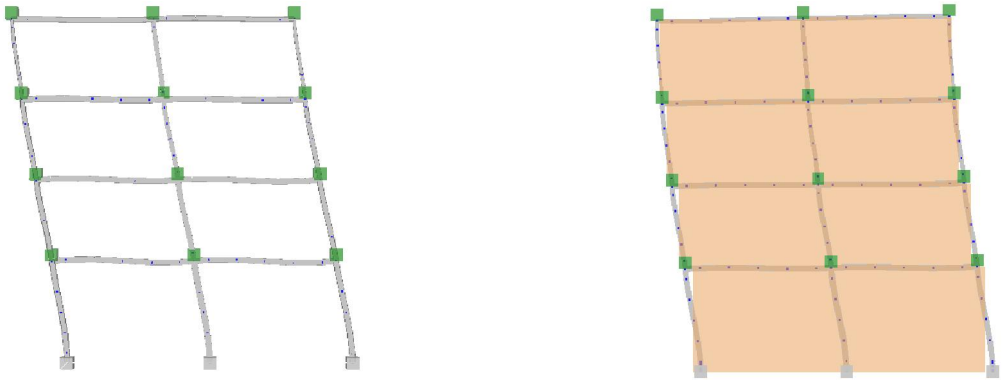


Slika 7.2 – Model višeetažne čelične konstrukcije u programskom paketu *SeismoStruct*

7.3. Rezultati proračuna

Dinamička svojstva sustava

Kako bi se odredio utjecaj različitih vrsta ispuna na dinamička svojstva razmatranih konstrukcijskih sustava, provedena je analiza njenih vlastitih frekvencija i oblika osciliranja. Slikom 7.3 prikazani su prvi modalni oblici za čistu čeličnu konstrukciju i konstrukciju s ispunom, a u tablici 7.6 dane su vrijednosti perioda, frekvencija i kružnih frekvencija promatranih sustava.



a) b)

Slika 7.3 – Prvi oblik osciliranja: a) čelične konstrukcije OS-N, b) čelične konstrukcije s glinenim ispunom – OG-N

Tablica 7.6 – Dinamička svojstva analiziranih konstrukcija

	Konstrukcija dimenzionirana na nepotresne kombinacije			Konstrukcija dimenzionirana na potresne kombinacije		
	Period T_1 [s]	Frekvencija f_1 [Hz]	Kružna frekvencija ω_1 [rad/s]	Period T_1 [s]	Frekvencija f_1 [Hz]	Kružna frekvencija ω_1 [rad/s]
Čelična konstrukcija (OS-N/OS-P)	1,82	0,55	3,44	1,54	0,65	4,09
Čelična konstrukcija s glinenim ispunom (OG-N/OG-P)	0,30	3,32	20,85	0,29	3,49	21,90
Čelična konstrukcija s porobetonskim ispunom (OY-N/OY-P)	0,51	1,96	12,33	0,49	2,04	12,84
Čelična konstrukcija s kombiniranim ispunom (OGY-N/OGY-P)	0,36	2,79	17,54	0,34	2,91	18,29

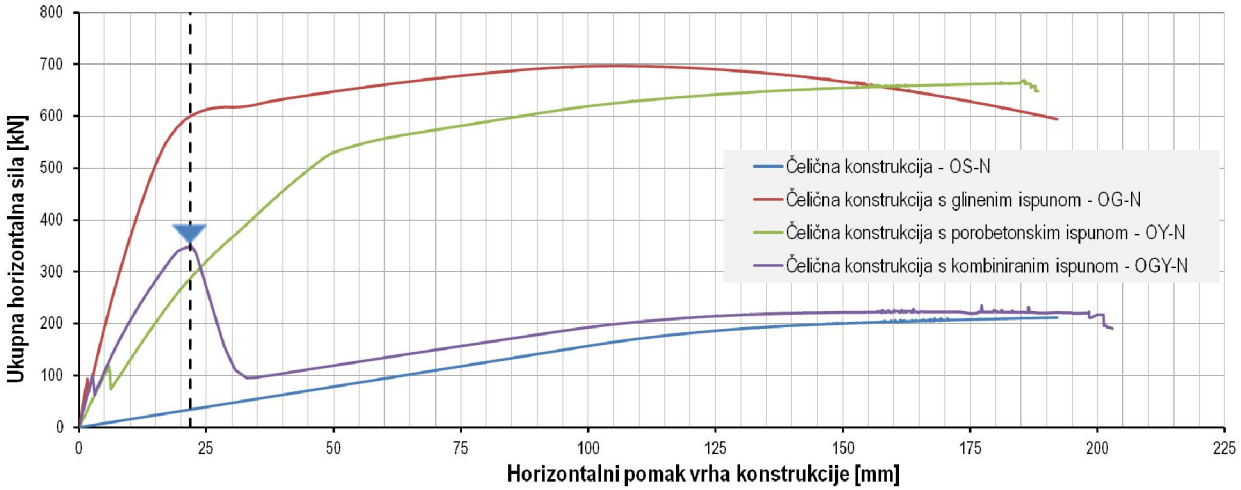
Prema rezultatima dinamičke analize može se zaključiti kako postojanje zidanoga ispuna u čeličnoj konstrukciji bitno mijenja njezina dinamička svojstva. Kao sustav koji ima najveću krutost pokazao se onaj s

glinenim zidanim ispunom (OG-N), dok je, očekivano, „najmekša“ čelična konstrukcija bez zidanoga ispuna (OS-N). Zanimljivo je primijetiti i preslikavanje ponašanja okvira jedan kat-jedno polje sa zidanim ispunom na globalno ponašanje sustava u pogledu krutosti – konstrukcija s porobetonskim ispunom (OY-N) ima najmanju krutost, dok se krutost sustava s kombiniranim ispunom (OGY-N) nalazi između modela s glinenim i porobetonskim ispunom.

Ako se usporede vlastite vrijednosti konstrukcijskog sustava dimenzioniranoga na potresna djelovanja (Oi-P) u odnosu na sustav dimenzioniran na nepotresne kombinacije (Oi-N), primjetna je nešto veća krutost svih modela serije Oi-P, što je i logično zbog povećanih dimenzija elemenata čeličnoga okvira.

Konstrukcijski sustav dimenzioniran na nepotresne kombinacije opterećenja

Na slici 7.3 prikazano je ponašanje čiste čelične konstrukcije (OS-N) i konstrukcija s glinenim (OG-N), porobetonskim (OY-N) i kombiniranim ispunom (OGY-N) pri postupnom povećavanju horizontalnoga opterećenja. Na slici se jasno uočava trenutak otkazivanja nosivosti kombiniranoga zidanog ispuna (označeno isprekidanom linijom), nakon čega je ponašanje konstrukcijskog sustava s kombiniranim ispunom (OGY-N) blisko ponašanju čiste čelične konstrukcije (OS-N).

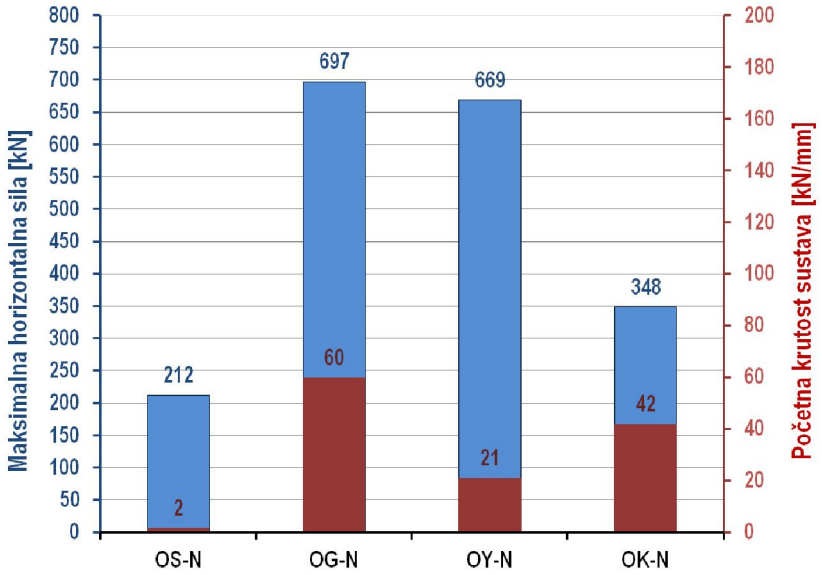


Slika 7.4 – Dijagram ukupna horizontalna sila – horizontalni pomak vrha zgrade za sustave Oi-N

Najveću ukupnu horizontalnu silu (eng. *base shear*) preuzeo je model konstrukcije s glinenim zidanim ispunom (OG-N) – 697 kN, a najmanja je zabilježena na čistoj čeličnoj konstrukciji bez zidanih ispuna (OS-N) – 212 kN, slika 7.5. Vrijednost ukupne horizontalne sile, koju je preuzela čelična konstrukcija bez ispuna (OS-N), iznosi 212 kN, a „ugradnjom“ ispuna, otpornost na horizontalne sile povećava se pa tako u slučaju sustava s glinenim zidanim ispunom (OG-N) horizontalna otpornost iznosi 697 kN, što je povećanje od 229

%, kod sustava s porobetonskim ispunom (OY-N) doprinos u otpornosti je 215 % (669 kN), te 164 % (348 kN) ako se promatra sustav s kombiniranim ispunom (OGY-N). Otpornost na horizontalne sile kod modela s kombiniranim ispunom moguće je, prema potrebi, jednostavno korigirati mijenjanjem vrijednosti čvrstoće kombiniranoga ispuna.

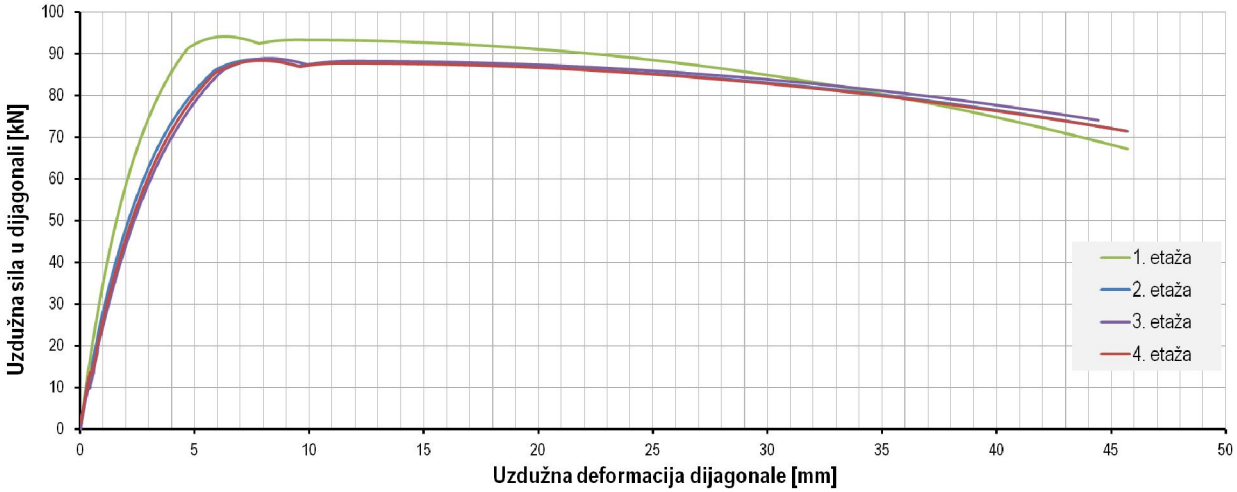
Usporedbom početnih krutosti razmatranih konstrukcijskih sustava može se uočiti ponašanje sukladno eksperimentalnim rezultatima, slika 7.4. Najmanju krutost ima čista čelična konstrukcija (2 kN/mm), a s povećanjem mehaničkih karakteristika zidanog ispuna (prvenstveno modula elastičnosti) raste i krutost sustava pa je tako kod konstrukcije s glinenim zidanim ispunom zabilježena početna krutost od 60 kN/mm, zatim slijedi konstrukcija s kombiniranim ispunom (42 kN/mm), te naposljetku sustav s porobetonskim ispunom (21 kN/mm).



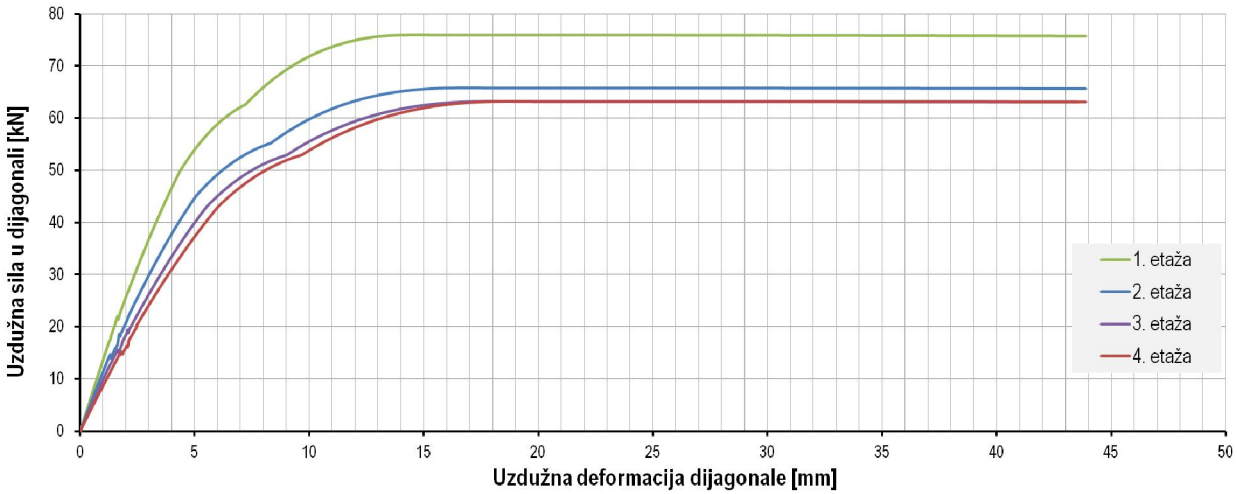
Slika 7.5 – Maksimalne dosegnute horizontalne sile i početne krutosti sustava Oi-N

Na slikama 7.6 do 7.8 prikazan je odnos uzdužnih sila i uzdužnih deformacija u glinenim, porobetonskim i kombiniranim zidanim ispunima po etažama čelične konstrukcije, dok je slikom 7.9, radi usporedbe, prikazan odnos uzdužna sila-deformacija zidanog ispuna samo 1. etaže za sve spomenute sustave. Najveće sile, kod svih vrsta zidanoga ispuna, dostignute su na 1. etaži (prizemlju) višeetažne konstrukcije. Ovo je posljedica konfiguracije same čelične konstrukcije, odnosno njezinih geometrijskih izmjera. Naime, visina prve etaže veća je (za 1,0 m) u odnosu na više etaže konstrukcije, te u skladu s time i zidani ispun na ovoj etaži većih dimenzija, što se odražava na povećanje poprečnog presjeka zamjenske dijagonale, a samim time i na sile koje je zidani ispun u stanju preuzeti. Potrebno je napomenuti kako je i inače uobičajeno pojavljivanje najvećih sila u konstrukcijskim elementima najniže etaže zgrade. Maksimalna uzdužna sila koju je mogao preuzeti glineni ispun iznosi 94 kN, a u porobetonskom i kombiniranom ispunu vrijednosti uzdužnih sila su: 76 i 41 kN. Ovdje treba obratiti pozornost na nagli pad uzdužne sile u

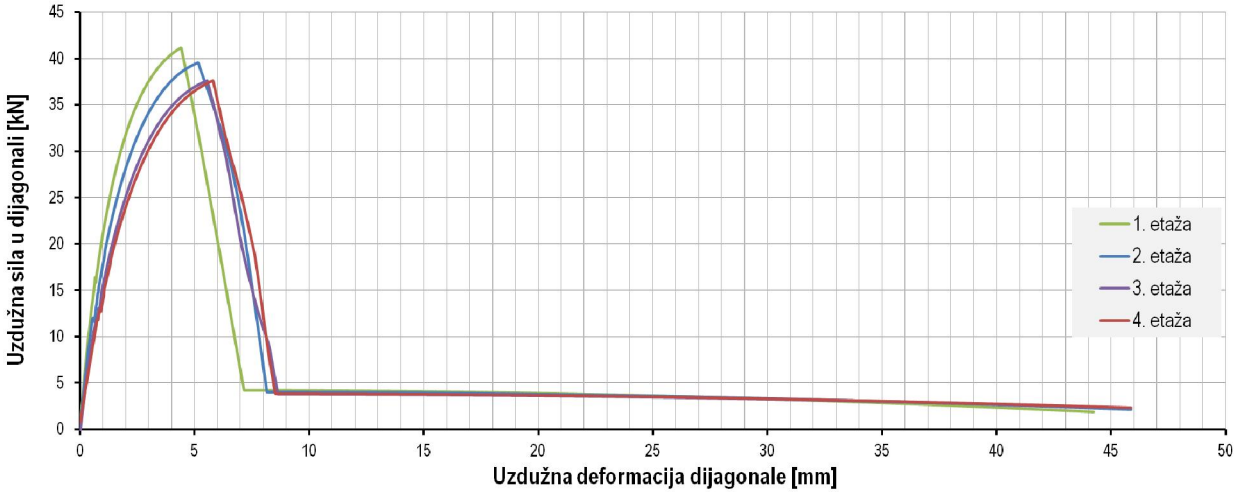
kombiniranom zidanom ispunu uslijed otkazivanja „mekših“ elemenata ispuna, što se odražava na čitav konstrukcijski sustav.



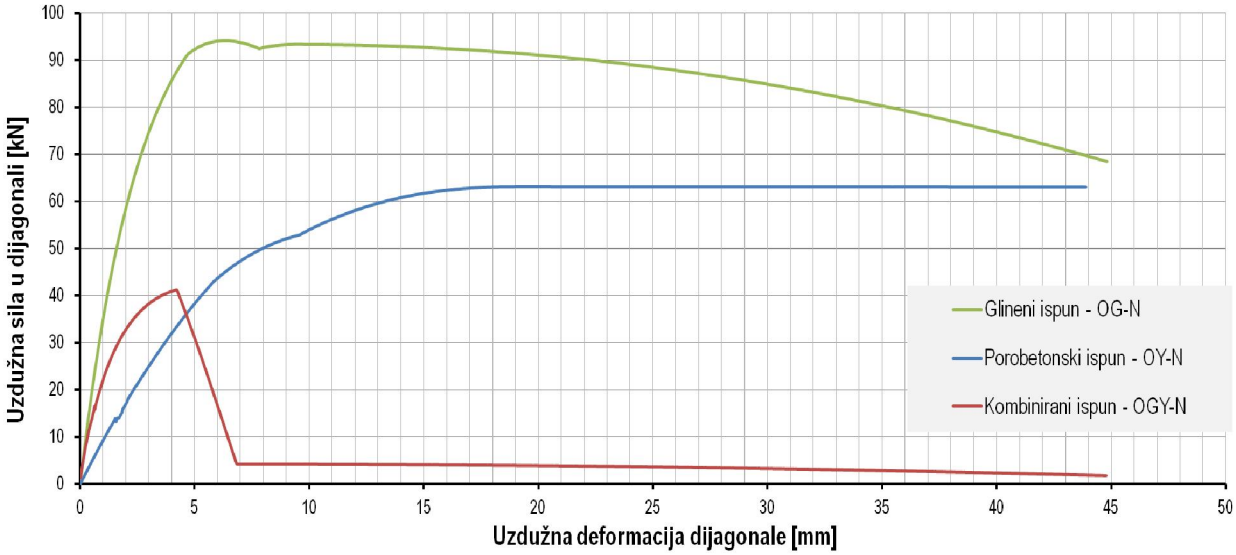
Slika 7.6 – Dijagram uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija glinenog zidanog ispuna OG-N



Slika 7.7– Dijagram uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija porobetonskog zidanog ispuna OY-N



Slika 7.8 – Dijagram uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija kombiniranog zidanog ispuna OGY-N

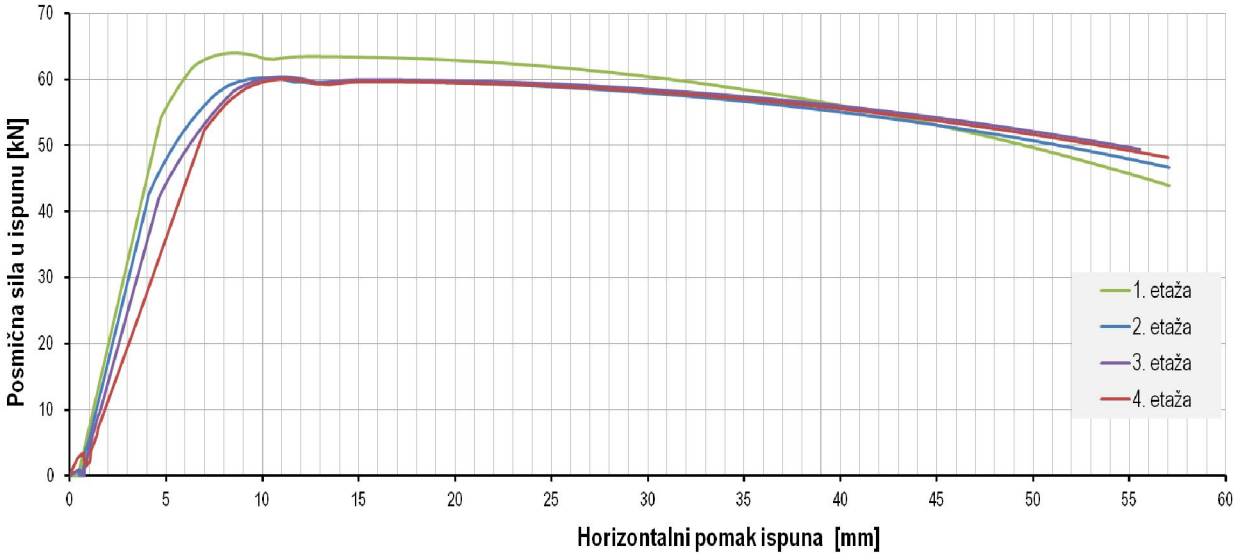


Slika 7.9 – Dijagram uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija zidanih ispuna OG-N, OY-N i OGY-N

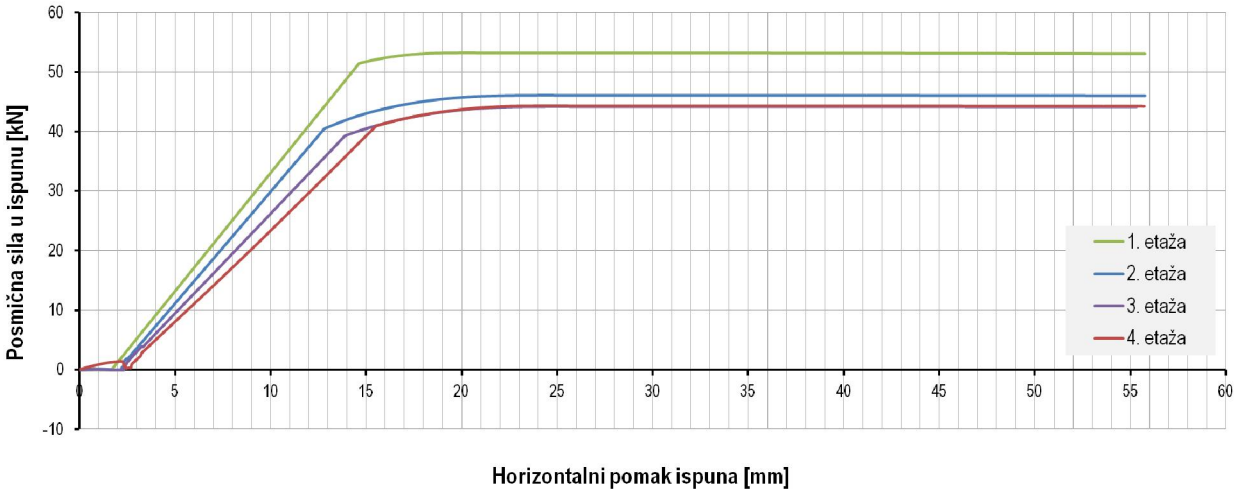
Slikama 7.10 do 7.13 dan je prikaz posmičnih sila u glinenim, porobetonskim i kombiniranim ispunima u odnosu na horizontalni pomak vrha ispuna.

I ovdje je trend, kao što je to bio slučaj i kod uzdužnih sila u dijagonalnom smjeru u zidanom ispunu, da se u prvoj etaži konstrukcije pojavljuju najveće posmične sile, čija se vrijednost smanjuje kako se povećava broj etaža. Najveća posmična sila javila se u glinenom zidanom ispunu - 64 kN, a vrijednosti poprečnih sila koje su mogli preuzeti porobetonski i kombinirani zidani ispunu slične su, odnosno njihove su vrijednosti 53 i 52 kN.

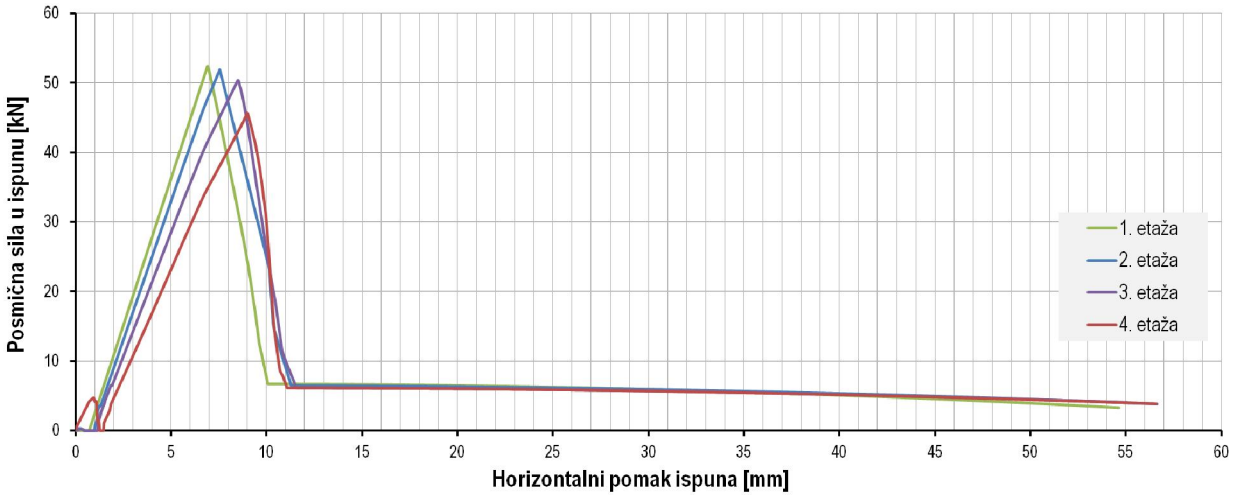
I ovdje je, kada se promatra kombinirani zidani ispun, primjetan nagli pad posmične sile uslijed otkazivanja „mekših“ zidnih elemenata, nakon čega njezina vrijednost pada na rezidualnu.



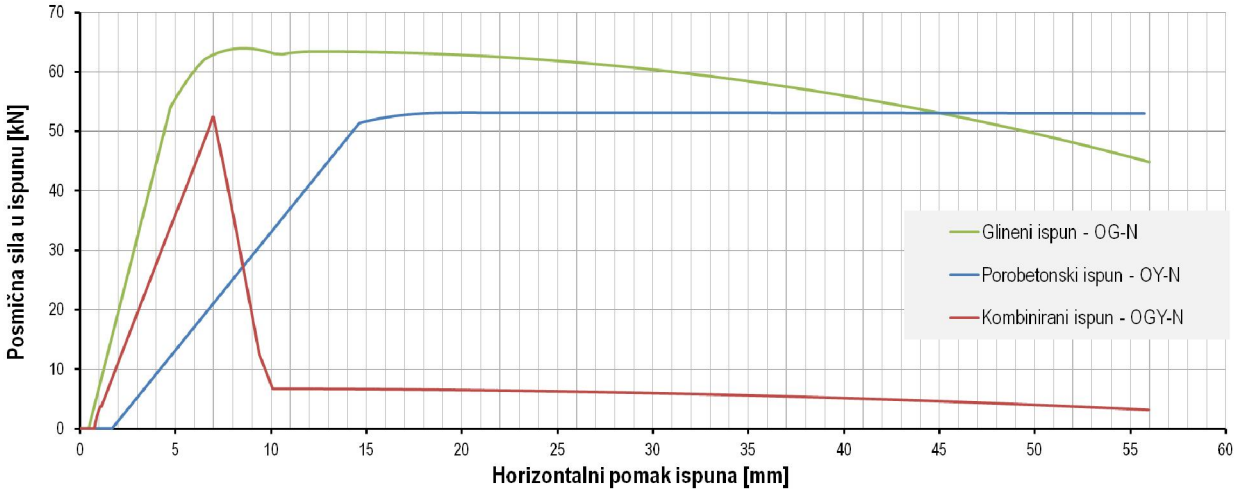
Slika 7.10 – Dijagram posmična sila - horizontalni pomak glinenog zidanog ispuna OG-N



Slika 7.11 – Dijagram posmična sila - horizontalni pomak porobetonskog zidanog ispuna OY-N

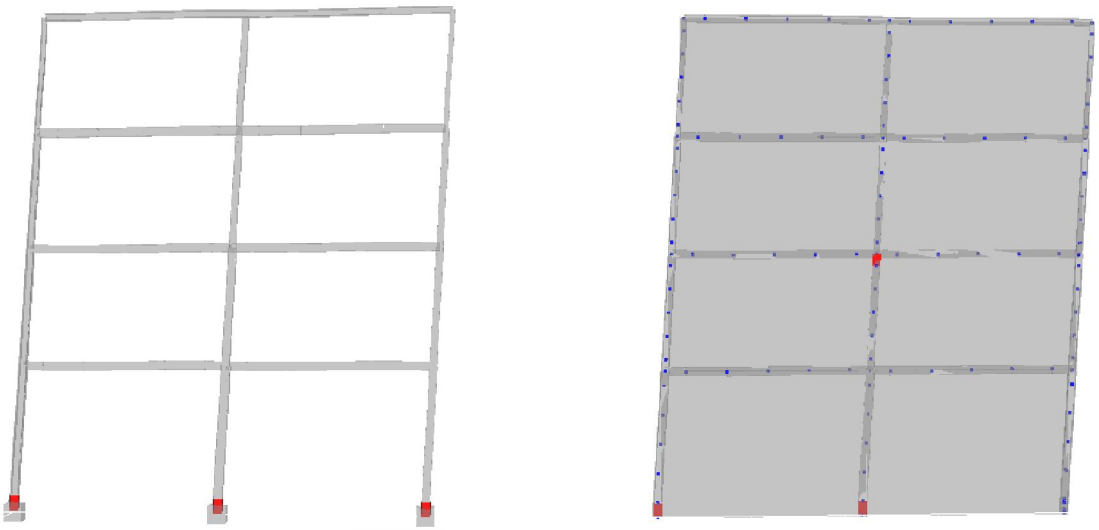


Slika 7.12 – Dijagram posmična sila - horizontalni pomak kombiniranog zidanog ispuna OGY-N



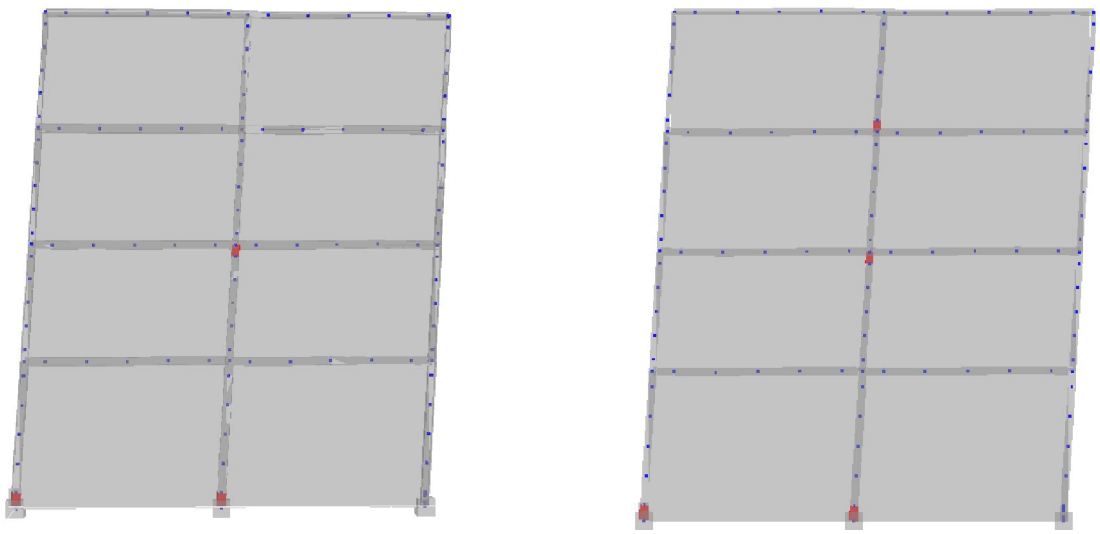
Slika 7.13 – Dijagram posmična sila - horizontalni pomak zidanih ispuna OG-N, OY-N i OGY-N

Prikaz plastificiranih mjesta razmatranih konstrukcijskih sustava dan je slikama 7.14 i 7.15. Otkazivanje nosivosti čiste čelične konstrukcije dogodilo se uslijed plastifikacije stupova na prvoj etaži konstrukcije. Kod sustava s ispunima, plastificirana su dva stupa na prvoj etaži konstrukcije, te jedan stup na drugoj etaži konstrukcijskog sustava s glinenim i porobetonskim ispunom, odnosno po jedan stup na drugoj i trećoj etaži u slučaju kombiniranoga ispuna. Može se zaključiti kako je čelični okvir s kombiniranim ispunom u većoj mjeri sudjelovao u preuzimanju opterećenja jer je kod njega otvoren jedan plastični zglob više u odnosu na ostale sustave.



a) b)

Slika 7.14 – Prikaz plastificiranih presjeka: a) čelična konstrukcija OS-N, b) čelična konstrukcija s glinenim ispunom OG-N



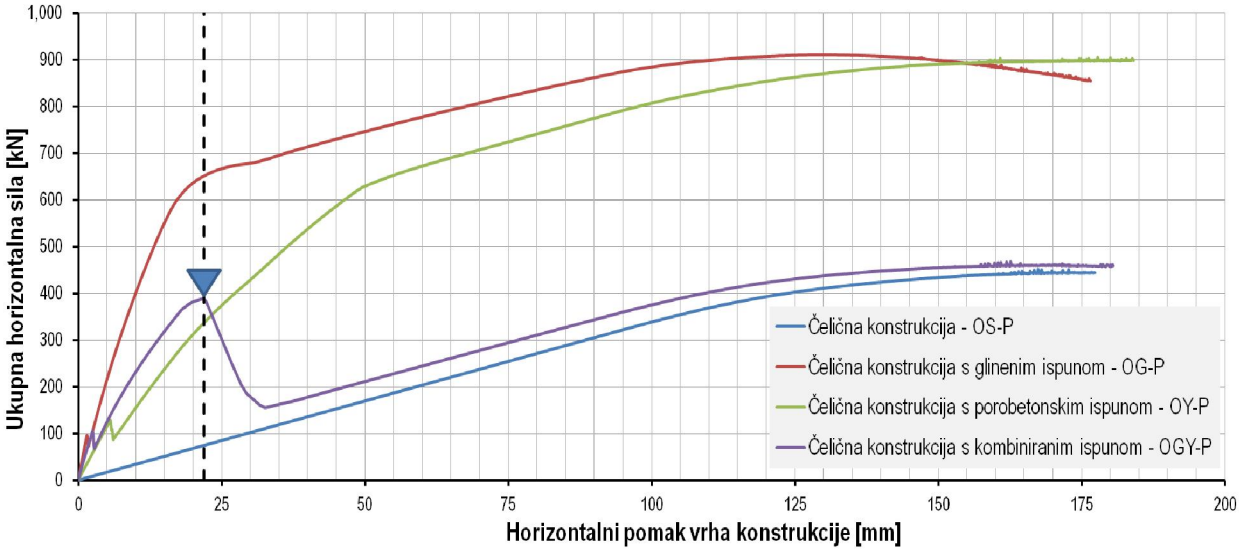
a) b)

Slika 7.15 – Prikaz plastificiranih presjeka: a) čelična konstrukcija s porobetonskim ispunom OY-N, b) čelična konstrukcija s kombiniranim ispunom OGY-N

Konstrukcijski sustav dimenzioniran na potresne kombinacije opterećenja

Ponašanje konstrukcijskog sustava dimenzioniranoga na potresne kombinacije opterećenja sličan je ponašanju sustava optimiziranoga za preuzimanje nepotresnih djelovanja, ali uz značajnije povećanje otpornosti sustava pri djelovanju horizontalnih sila.

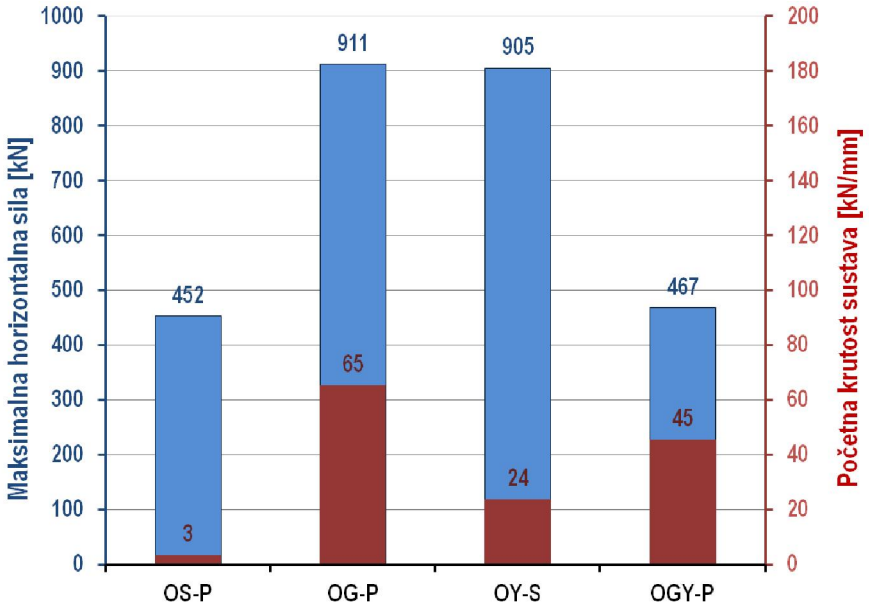
Rezultati proračuna ovih sustava dani su slikama 7.16 i 7.17.



Slika 7.16 – Dijagram ukupna horizontalna sila – horizontalni pomak vrha zgrade za sustave Oi-P

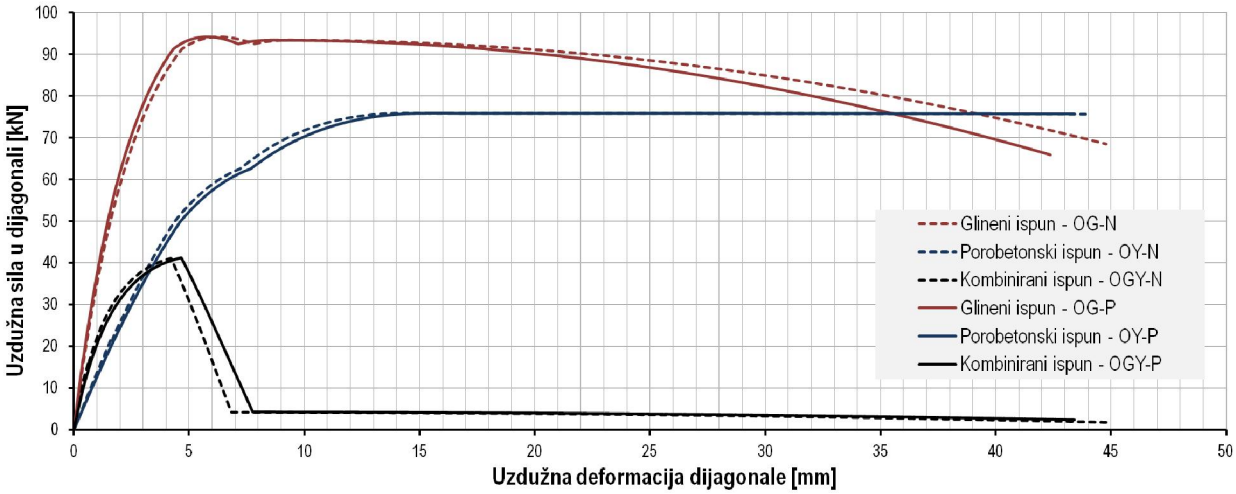
Kao i u prvome slučaju konstrukcije s kombiniranim ispunom (OGY-N), i na rezultatima proračuna seizmički otporne konstrukcije (OGY-P) uočljiv je pad nosivosti na horizontalne sile. Čista čelična konstrukcija (OS-P) mogla je preuzeti silu od 452 kN, a sustav s kombiniranim ispunom (OGY-P) 467 kN (povećanje od 3 %), a kako su ove vrijednosti bliske, može se reći kako se određena rezerva u nosivosti sustava OGY-P izgubila kroz povećanje dimenzija čeličnih presjeka konstrukcije. Horizontalne sile koje preuzimaju sustavi s glinenim i porobetonskim ispunima bližih su vrijednosti nego u prethodnome slučaju i iznose 911 za sustav OG-P, te 905 kN za OY-P – što je razlika od 1 %, a ova situacija bliža je rezultatima iz eksperimentalnih istraživanja, gdje je čelični okvir s porobetonskim ispunom imao sposobnost preuzimanja najveće horizontalne sile. Povećanja nosivosti sustava OG-P i OY-P, u odnosu na čistu čeličnu konstrukciju OS-P, iznose 101 % i 100 %.

Što se tiče početnih krutosti promatranih konstrukcijskih sustava, najveća je krutost zabilježena kod sustava OG-P (65 kN/mm), zatim slijede sustavi OGY-P (45 kN/mm) i OY-P (24 kN/mm), dok je izrazito malu početnu krutost imao sustav bez ispuna OS-P (3 kN/mm).



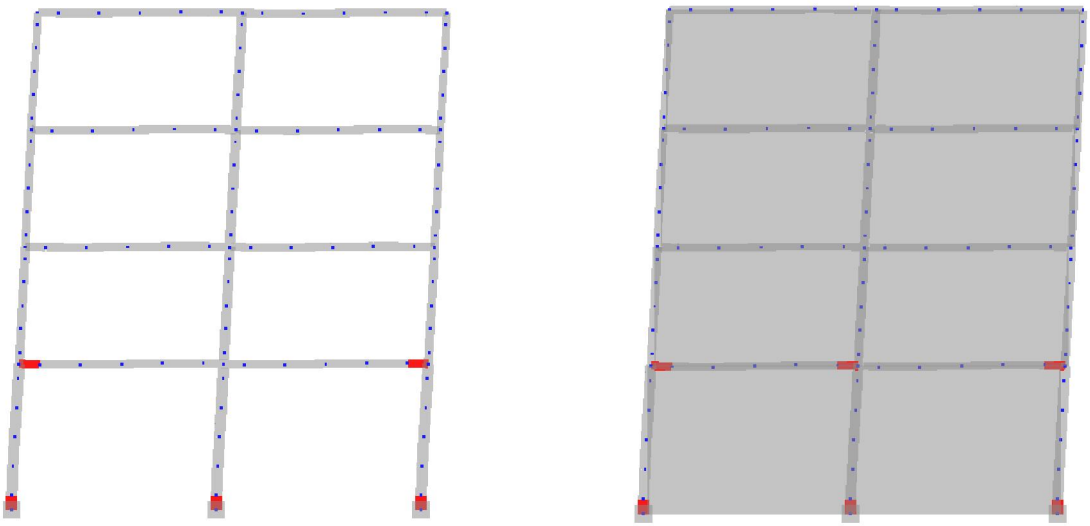
Slika 7.17 – Maksimalne dosegnute horizontalne sile i početne krutosti sustava Oi-P

Kako su mehaničke karakteristike zidanog ispuna jednake kao i u prvome slučaju proračuna (u kojem su analizirani sustavi dimenzionirani na nepotresna opterećenja), ponašanje zidanih ispuna, u smislu dijagonalnih i posmičnih sila koje se u njima javljaju kao i njihovi intenziteti, potpuno su istovjetni onima iz prvoga primjera, slika 7.18. Manje razlike javljaju se samo u vrijednostima pomaka pri kojima se razvijaju maksimalne sile u ispunima, a što je posljedica drugačije krutosti elemenata kojima su ispuni okruženi, budući da su elementi čelične konstrukcije dimenzionirani na potresna djelovanja pa imaju i veće geometrijske karakteristike u odnosu na elemente konstrukcije dimenzionirane na nepotresne kombinacije djelovanja.



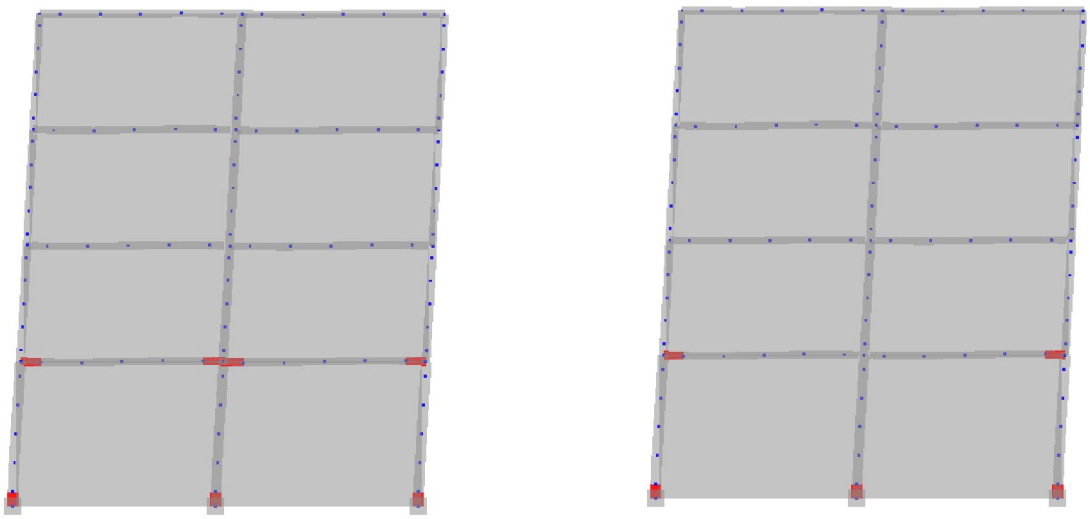
Slika 7.18 - Dijagrami uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija zidanih ispuna OG-i, OY-i i OGY-i

Plastifikacije elemenata čeličnih konstrukcija, „čiste“ i onih s ispunima, prikazane su slikama 7.19 i 7.20.



a) b)

Slika 7.19 – Prikaz plastificiranih presjeka: a) čelična konstrukcija OS-P, b) čelična konstrukcija s glinenim ispunom OG-P



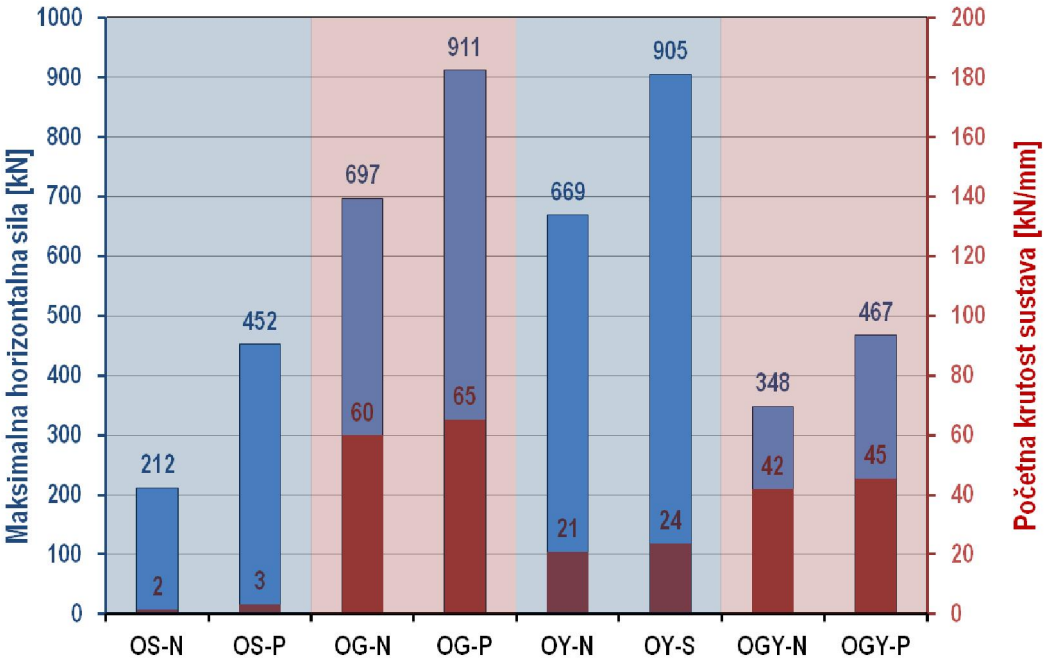
a) b)

Slika 7.20 – Prikaz plastificiranih presjeka: a) čelična konstrukcija s porobetonskim ispunom OY-P, b) čelična konstrukcija s kombiniranim ispunom OGY-P

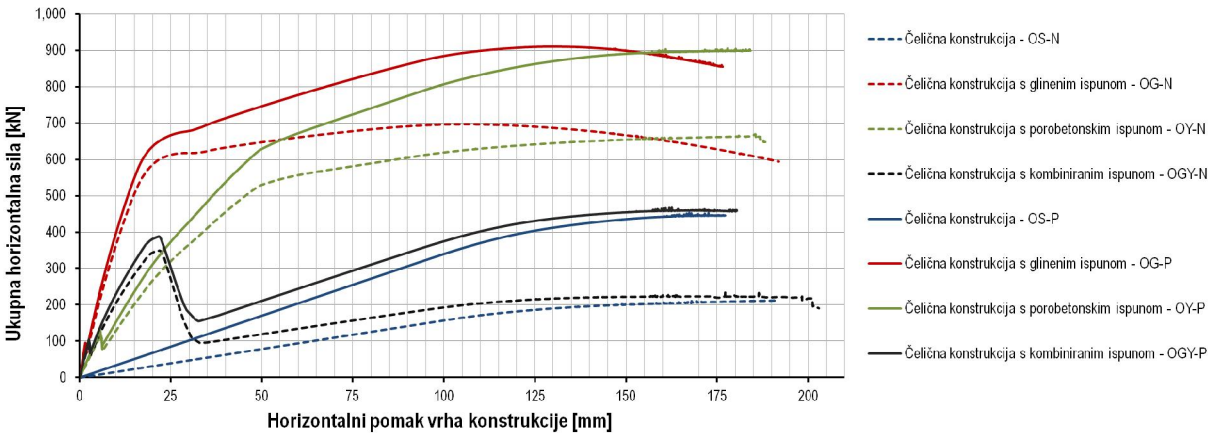
Za razliku od prethodno razmatranoga primjera, u konstrukcijama dimenzioniranima na potresna opterećenja došlo je do plastifikacija i čeličnih greda, što i jest ciljani način otkazivanja nosivosti prema europskoj normi za proračun seizmički otpornih konstrukcija, [34]. Na slikama se može uočiti kako se otvaranje plastičnih zglobova čiste čelične konstrukcije i konstrukcije s kombiniranim ispunima dogodilo na istim mjestima – na stupovima i vanjskim krajevima obiju greda prve etaže. Kod konstrukcije s glinenim

ispunom pojavio se jedan zglob više (na gredi prve etaže) nego kod sustava OS-P i OGY-P, a kod konstrukcije s porobetonskim ispunom broj zglobova je dva puta veći u odnosu na sustave OS-P i OGY-P.

Na slikama 7.21 i 7.22 usporedno su prikazani rezultati proračuna konstrukcijskih sustava sa i bez zidanih ispuna dimenzioniranih na nepotresne i potresne kombinacije opterećenja. Očekivano, rezultati pokazuju veće vrijednosti otpornosti na horizontalne sile i veće početne krutosti kod konstrukcija dimenzioniranih za preuzimanje seizmičkih opterećenja. Razlike u mogućnostima preuzimanja horizontalnih sila su 54 % između sustava OS-N i OS-P, kod sustava s glinenim ispunom (OG-i) 23 %, te 26 % i 25 % kod sustava OY-i i OGY-i. Trend je isti, što se tiče i početnih krutosti, s iznimkom što je kod čiste čelične konstrukcije doprinos krutosti približno jednak povećanju otpornosti na horizontalne sile (54 %), a kod sustava s ispunom, krutost se ne povećava u istome omjeru kao i nosivost pa je tako povećanje krutosti sustava OG-P i OGY-P 8 %, a sustava OY-P 11 %.



Slika 7.21 – Maksimalne dosegnute horizontalne sile i početne krutosti sustava Oi-N i Oi-P



Slika 7.22 – Dijagram ukupna horizontalna sila – horizontalni pomak vrha zgrade za sustave Oi-N i Oi-P

7.4. Prijedlog metode proračuna čeličnih konstrukcija s kombiniranim zidanim ispunom

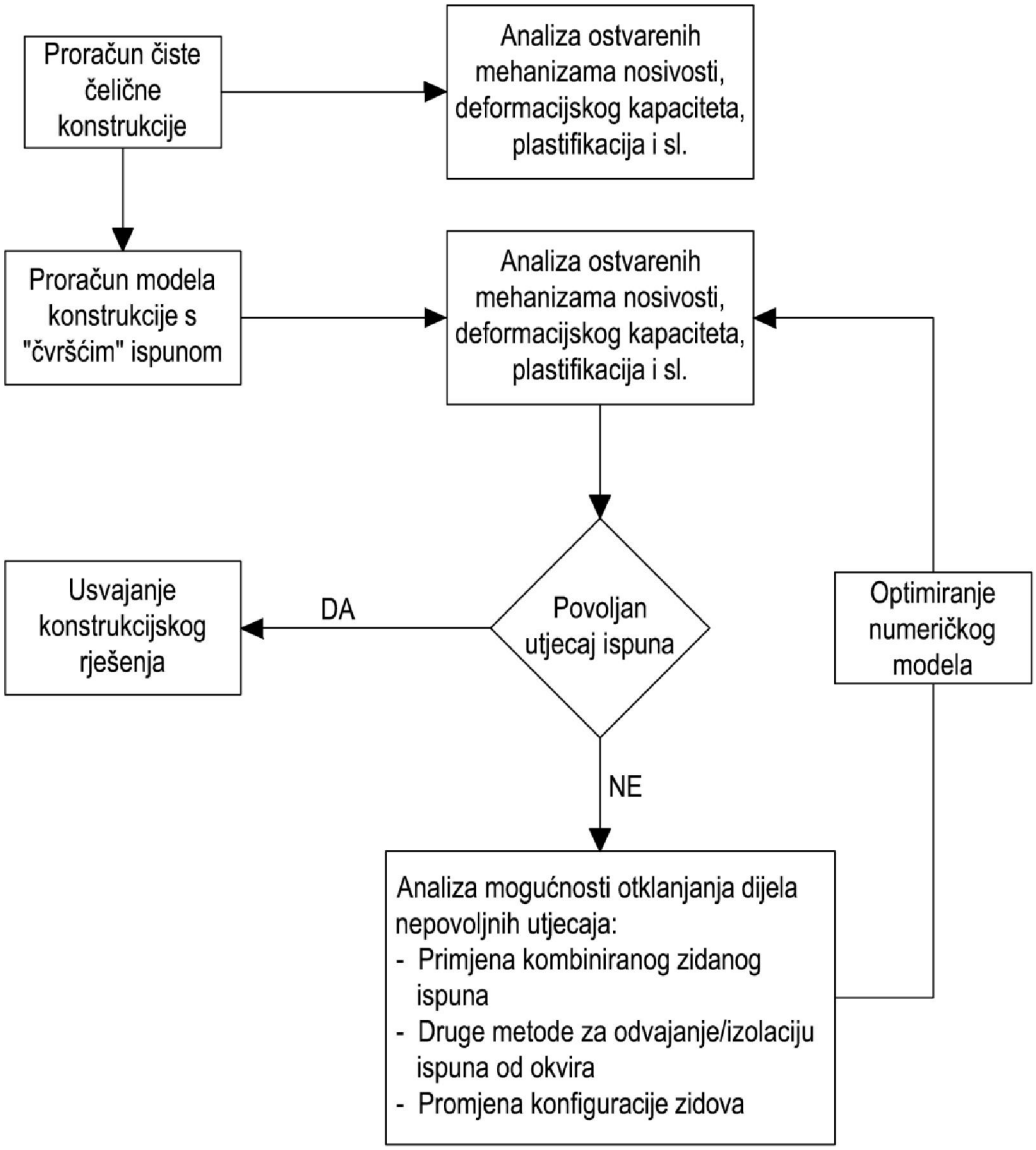
Konstrukcija razmatrana u ovome poglavlju bila je regularna, te se iz toga razloga nisu pojavili nepovoljni učinci zidanog ispuna koji mogu dovesti do prijevremenog otkazivanja nosivosti sustava. Prema [34] neregularnost konstrukcije utječe na: odabir proračunskog modela (ravninski ili prostorni), odabir metode proračuna (ekvivalentna statička ili modalna) te na vrijednost faktora ponašanja (smanjena vrijednost dovodi do povećanih seizmičkih sila).

Ovdje se daje prijedlog metode proračuna sustava s kombiniranim zidanim ispunom u slučaju nepovoljnih učinaka ispuna na čeličnu okvirnu konstrukciju.

U **1. koraku** potrebno je proračunati model uobičajene čiste čelične konstrukcije bez zidanog ispuna. **Drugi korak** sastoji se od analize rezultata proračunatoga modela čiste čelične konstrukcije u svrhu određivanja mehanizama nosivosti, deformacijskog kapaciteta, lokacija otvaranja plastičnih zglobova (koji moraju biti locirani na gredama konstrukcije, ukoliko se provodi seizmička analiza konstrukcije prema Eurokodu 8, [34]) i sl. **Korak 3** obuhvaća „ubacivanje“ zidanog ispuna jačih mehaničkih karakteristika (npr. zidani ispun od glinenih zidnih elemenata) u čistu čeličnu konstrukciju, te proračun takvoga modela. U **4. koraku** analiziraju se performanse konstrukcijskoga sustava s jačim ispunom (mehanizmi nosivosti, deformacijski kapacitet, mjesta plastičnih zglobova, utjecaj zidanog ispuna na nosivost sustava). Ukoliko se u 4. koraku pokaže kako zidani ispun nije imao negativnih utjecaja, a postignuta je zahtijevana razina nosivosti sustava – usvaja se konstrukcijsko rješenje s jačim zidanim ispunom. Ako je učinak ispuna nepovoljan, tada se u **5. koraku** analizira mogućnost otklanjanja njegovih nepovoljnih učinaka, što se može postići na više načina: primjenom kombiniranoga zidanog ispuna, nekom drugom metodom kojom je moguće izolirati zidani ispun od čeličnoga okvira, promjenom konfiguracije zidova i sl. Potom, u **6. koraku**, slijedi optimiranje numeričkoga modela prema odabranom rješenju iz 5. koraka, te ponovni proračun numeričkoga modela, nakon čega se ponovno analizira ponašanje konstrukcije i učinci ispuna na nosivost, deformacijsku sposobnost sustava itd. (**korak 4**).

Ako je kao konstrukcijsko rješenje u 5. koraku odabran pristup koji uključuje kombinirani zidani ispun, moguće je različitim čvrstoćama slabijih elemenata, koji se postavljaju uz sam čelični okvir, utjecati na nosivost cjelokupnoga sustava, kao i na trenutak u kojem se želi postići odvajanje ispuna od okvira. Nedostatak ovoga pristupa je u tome što bi trebalo imati veliku bazu podataka o čvrstoćama i deformacijskim svojstvima zidnih elemenata dobivenu eksperimentalnim istraživanjima.

Opisana metoda dana je u obliku dijagrama toka na slici 7.23.



Slika 7.23 – Dijagram toka – metoda proračuna okvirnih konstrukcija s kombiniranim zidanim ispunom

7.5. Zaključno o numeričkom primjeru višeetažne čelične konstrukcije sa zidanim ispunima

U ovome poglavlju prikazan je numerički primjer proračuna višeetažne čelične konstrukcije, čija je svrha bila ilustrirati način primjene modela kalibriranih u radu. Budući da se radilo o regularnoj konstrukciji, nisu uočeni nepovoljni učinci zidanog ispuna na nosivost konstrukcijskoga sustava. Ovo je u skladu s Eurokodom 8, [34], koji ne predviđa nepovoljne učinke, ukoliko se radi o regularnoj građevini.

Rezultati proračuna pokazuju kako prisustvo zidanog ispuna u čeličnoj konstrukciji ima za posljedicu povećanje početne krutosti i otpornosti na horizontalne sile. U slučaju konstrukcija dimenzioniranih na nepotresne kombinacije, povećanje u pogledu nosivosti iznosi od 164 % (sustav OGY-N) do 229 % (OG-

N), dok je početna krutost sustava „ubacivanjem“ kombiniranog ispuna u čeličnu konstrukciju povećana 10 puta, odnosno čak 40 puta, ako se promatra sustav s glinenim ispunom.
Slično se ponašaju i konstrukcije dimenzionirane na potres, s time da je doprinos ispuna povećanju nosivosti i krutosti manji; nosivost je udvostručena kod sustava OG-P i OY-P u odnosu na čistu čeličnu konstrukciju OS-P, a neznatno povećana, ako je ispun bio kombinirani (3 %). U odnosu na čeličnu konstrukciju OS-P, krutost sustava OY-P povećana je 8 puta, odnosno 20 puta kod sustava OG-P.
Rezultati proračuna pokazali su da postojanje zidanih ispuna mijenja i dinamička svojstva sustava čineći ga krućim, što dovodi do smanjivanja perioda konstrukcije.

Za neregularne zgrade, kod kojih može doći do nepovoljnih utjecaja ispuna na nosivost sustava, predložena je metoda proračuna koja uključuje upotrebu kombiniranog zidanog ispuna u smanjivanju ili uklanjanju nepoželjnih efekata koje može izazvati ispun.

8. IDEALIZACIJA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

8.1. Uvod

Za potrebe pojednostavljenja analize i dimenzioniranjaziđa kao konstrukcijskoga materijala - vrijednosti unutarnjih sila, naprezanja i deformacija obično se određuju na bruto geometrijskim karakteristikama poprečnih presjeka zidova, uz pretpostavku elastičnog, homogenog i izotropnog ponašanja. Ovakve pretpostavke dopuštaju uporabu izraza zasnovanih na jednostavnoj teoriji elastičnosti u provjerama otpornosti na potresna djelovanja, izmijenjenih na način da uzimaju u obzir svojstva ziđa uočena pri potresu.

8.2. Idealizacija eksperimentalnih rezultata bi-linearnom anvelopom nosivosti

Praktični izrazi,koji se upotrjebljavaju za proračun otpornosti na bočne sile i deformacijskih svojstavaziđa, razvijeni su na isti način kao i složeniji matematički modeli, na osnovu opsežnih ispitivanja neomeđenih, omeđenih i omeđenih ojačanih zidova izloženih potresnim opterećenjima.

Iako pojednostavljeni, oviizrazi odražavaju stvarne mehanizme sloma pa mehanička svojstva ziđa,koja određuju kapacitet nosivosti i deformabilnostiziđa, u tim izrazima treba odrediti eksperimentalno, i to na takav način da su postupci ispitivanja u skladu s eksperimentima na osnovu kojih su razvijeniizrazi za proračun. U suprotnome može doći do grešaka pri predviđanju potresne otpornosti zgrade.

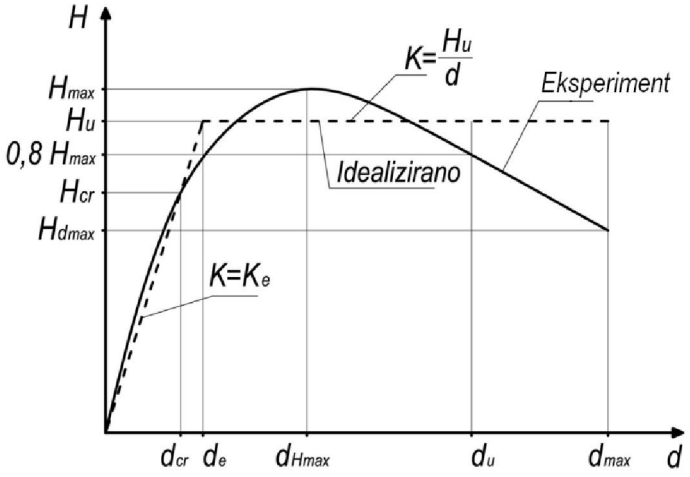
Najvažnija mehanička svojstva ziđa, za koje su potrebni eksperimentalni podatci koji se koriste u izrazima, su [58]:

- tlačna čvrstoća ziđa (f),
- posmična (f_v) ili vlačna čvrstoća ziđa (f_t),
- modul elastičnosti (E),
- modul posmika(G),
- faktor duktilnosti (μ)

Kako bi se proračuni pojednostavili, stvarno histerezno ponašanje ziđamoguće je pojednostavljeno predstaviti pomoću idealizirane bi-linearne anvelope otpornosti, kako je prikazano na slici 8.1.

Za potrebe idealizacije eksperimentalne anvelope potrebno je prvo odrediti tri granična stanja u ponašanju promatranoga zida:

- stanje stvaranja značajnijih pukotina – određena pomakom d_{cr}i otpornošću H_{cr}pri formiranju prvih značajnijih pukotina u zidu, uslijed kojih se mijenja nagib anvelope,
- najveća otpornost – određena najvećom otpornošću H_{max} dobivenom tijekom ispitivanja, te pripadnim pomakom d_{Hmax},
- krajnje stanje – određeno najvećim pomakom d_{max}dobivenim tijekom ispitivanja i pripadajućom otpornošćuH_{dmax}.



Slika 8.1 – Idealizacija eksperimentalne anvelope otpornosti pomoću bilinearnog odnosa

Početni nagib idealizirane anvelope najbolje je odrediti pomoću sekantne krutosti pri formiranju značajnih pukotina u zidanom ispunu, koja se tada naziva djelotvorna krutost zida K_e, a proračunava se kao omjer otpornosti i pomaka zida pri pukotinskoj granici:

$$K_e = \frac{H_{cr}}{d_{cr}} \tag{8.1}$$

Ako je anvelopa otpornosti idealizirana pomoću bilinearnog odnosa, ukupna otpornost idealizirane anvelope$H_{u,}$procjenjuje se uzimajući u obzir jednaku mogućnost trošenja energije stvarnoga i idealiziranoga zida: površine ispod stvarne i idealizirane krivulje trebaju biti jednake, slika 8.1.

Pri idealizaciji krivulje, uz poznavanje početne krutosti K_e, najveću nosivost *Hu* moguće je izračunati prema sljedećem izrazu (8.2), [58]:

$$H_u = K_e \cdot \left(d_{\max} - \sqrt{d_{\max}^2 - \frac{2 \cdot A_{env}}{K_e}} \right) \tag{8.2}$$

gdje je:

A_{env} - površina ispod anvelope otpornosti utvrđene eksperimentom.

Treba naglasiti da najveća nosivost $H_u$ne predstavlja proračunsku, već idealiziranu najveću eksperimentalnu vrijednost. Prema rezultatima ispitivanja više od 60 zidova, prosječna vrijednost omjera H_u/H_{max} je 0,9, [58].U skladu s time, u slučaju bilinearne idealizacije anvelope nosivosti proračunate vrijednosti najveće otpornosti treba pomnožiti s 0,9:

$$H_u = 0{,}9 \cdot H_{\max} \tag{8.3}$$

Krajnji idealizirani pomak $d_u$određen je kao vrijednost pomaka gdje se idealizirana linija siječe sa silaznom granom eksperimentalne linije. Prema tome, faktor krajnje duktilnosti μ_u određen je kao omjer:

$$\mu_u = \frac{d_u}{d_e} \tag{8.4}$$

a pomak pri idealiziranoj elastičnoj granici d_e procjenjuje se iz odnosa:

$$d_e = \frac{H_u}{K_e} \tag{8.5}$$

Pri određivanju otpornosti na potres, vrijednost faktora krajnje duktilnosti μ_u ograničena je, kako bi se izbjeglo pretjerano oštećivanje zidova. Uobičajeno su dopuštene vrijednosti za pojedine zidove, koji se uzimaju u obzir u proračunima idealiziranih anvelopa otpornosti, veće od vrijednosti faktora ponašanja preporučenih za svaku pojedinu vrstu konstrukcije od ziđa. Iako eksperimentalni rezultati mogu ukazivati kako su veće vrijednosti prihvatljive, preporučuje se prema [58] da se vrijednosti faktora krajnje duktilnosti μ_u pojedinih zidova ograniče na:

- μ_u= 2,0-3,0 za slučajeve običnih (neomeđenih) zidova,
- μ_u= 3,0-4,0 za slučajeve omeđenih zidova,
- μ_u= 4,0-5,0 za slučajeve (omeđenih i) ojačanih zidova.

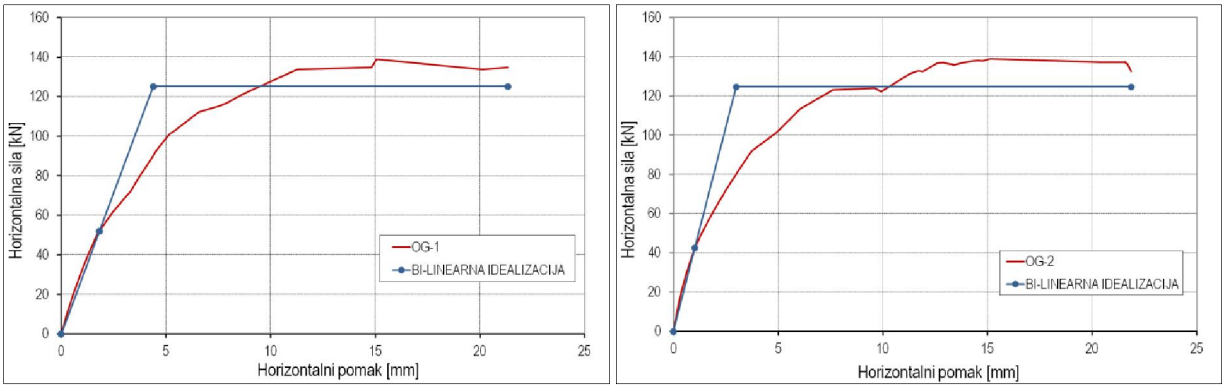
Prema gore opisanome postupku izvršena je idealizacija eksperimentalnih anvelopa nosivosti čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom (OG-i), s porobetonskim ispunom (OY-i) i kombiniranim zidanim ispunom (OGY-i). Budući da nijedna anvelopa nosivosti nema značajan pad poslije dostizanja maksimalne sile, iz razloga navedenih u poglavlju 4 pojedinačno za svaku seriju ispitivanih modela, nije bilo moguće odrediti krajnji idealizirani pomak d_u, a u skladu s time niti faktor duktilnosti μ_u.

Tablicom 8.1 prikazani su svi parametri kojima je određena bi-linearna idealizacija eksperimentalnih rezultata.

Tablica 8.1 – Parametri idealizirane bi-linearne anvelope nosivosti

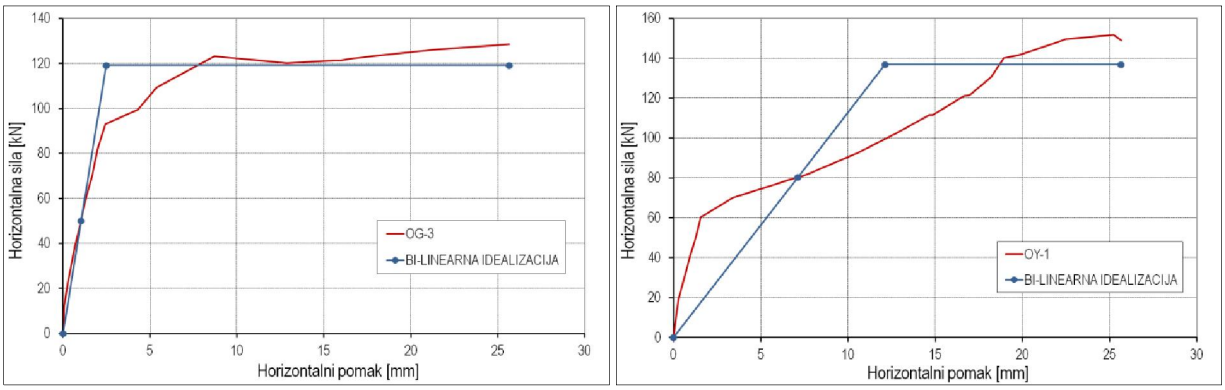
Uzorak	H_{max} [kN]	d_{max} [mm]	H_{cr} [kN]	d_{cr} [mm]	K_e [kN/mm]	H_u [kN]	d_e [mm]	A_{env} [kNmm]
OG-1	138,98	21,33	51,94	1,83	28,42	125,22	4,41	2395
OG-2	138,87	21,87	42,57	1,02	41,61	124,76	3,00	2541
OG-3	128,44	25,65	50,05	1,05	47,64	119,14	2,50	2907
OY-1	151,80	25,65	80,34	7,12	11,28	136,87	12,13	2681
OY-2	138,75	31,91	83,74	8,51	9,84	125,53	12,75	3205
OY-3	145,60	26,34	87,50	7,87	11,12	130,36	11,72	2669
OGY-1	105,57	15,22	79,00	4,62	17,08	95,12	5,57	1183
OGY-2	92,54	17,05	64,41	3,73	17,27	82,99	4,81	1215
OGY-3	95,17	17,04	60,39	4,65	12,99	85,48	6,58	1176

Slikama 8.2 do 8.6 prikazane su usporedno idealizirane i eksperimentalne anvelope nosivosti svih ispitivanih čeličnih okvira s raznim vrstama zidanog ispuna.



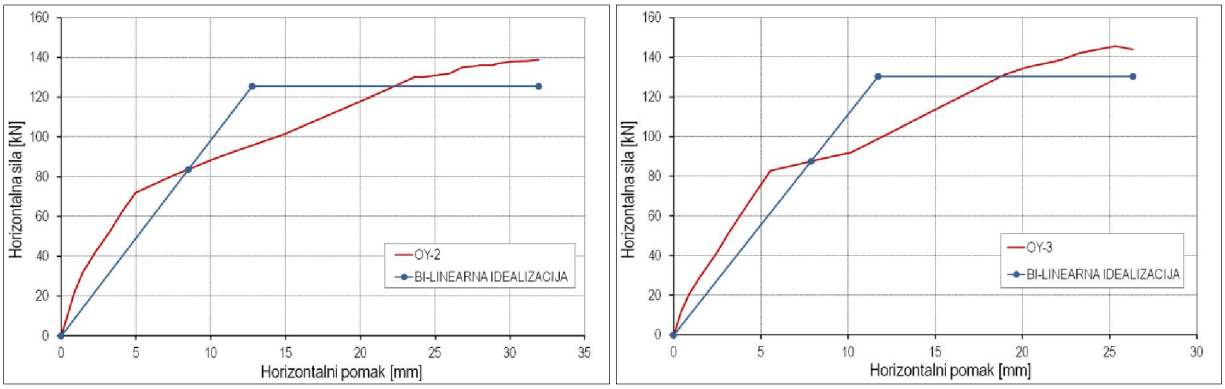
a) b)

Slika 8.2 – Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti: a) uzorak OG-1, b) uzorak OG-2



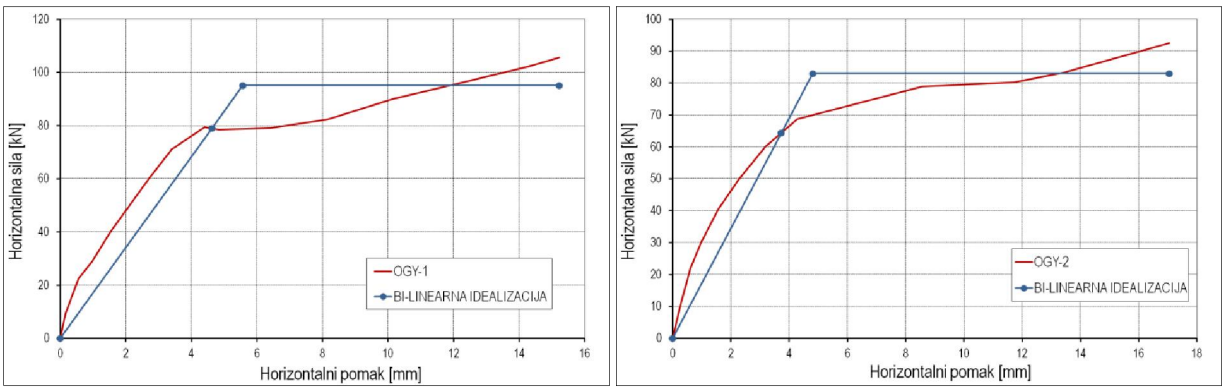
a) b)

Slika 8.3 – Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti: a) uzorak OG-3, b) uzorak OY-1



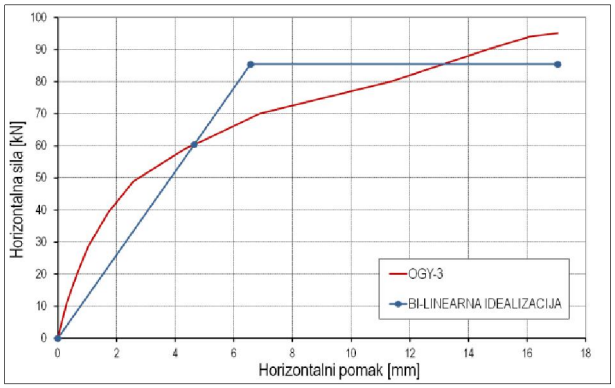
a) b)

Slika 8.4 – Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti: a) uzorak OY-2, b) uzorak OY-3



a) b)

Slika 8.5 – Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti: a) uzorak OGY-1, b) uzorak OGY-2



Slika 8.6 – Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti - uzorak OGY-3

Ovakve idealizirane krivulje, kojima se opisuje ponašanje okvira sa zidanim ispunom, moguće je koristiti u pojednostavljenim proračunima otpornosti ovih konstrukcija na horizontalna djelovanja, npr. u vidu nelinearnih zglobova kod modela kojima se ispun modelira zamjenskim dijagonalama (vidi poglavlja 5.2.1. i 5.2.2.)

9. ZAKLJUČAK I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Ovim doktorskim radom nastojalo se istražiti ponašanje čeličnih okvira sa zidanim ispunom pri potresnome opterećenju. Istraživanjem se nastojala naglasiti važnost uporabe zidanih ispuna u kontekstu povećanja krutosti, nosivosti i mogućnosti preuzimanja horizontalnih pomaka. Korištenje zidanoga ispuna u ove svrhe u Republici Hrvatskoj stvar je tradicije u gradnji pa je stoga bilo nužno dodatno istražiti ovo područje, a posebno mogućnost kombiniranja takvoga tradicionalnoga materijala s materijalom značajno drugačijih svojstava, poput čelika. Također, se nastojalo prikazati prednosti i nedostatke uporabe zidanih ispuna u čeličnim okvirnim konstrukcijama.

Proučavajući tržišne podatke u regiji, kao zidani ispuni odabrani su ispuni od porobetonskih i glinenih elemenata. Pokušalo se uvesti i novinu kroz kombinaciju tih dvaju materijala kako bi se bolje istražilo potresno ponašanje sustava okvira i ispuna. U skladu s time, laboratorijsko istraživanje odziva čeličnih okvira s različitim inačicama zidanog ispuna pri djelovanju horizontalnih sila, provedeno je na ukupno devet uzoraka - na trima s ispunom od šupljih glinenih blokova,trima s ispunom od porobetonskih blokova i na trima s kombiniranim ispunom od glinenih i porobetonskih blokova (kombinirani zidani ispun).

Ovo istraživanje može poslužiti kao vrijedna baza podataka za daljnja istraživanja ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom. Naime, rezultati dobiveni istraživanjem omogućili su određivanje korisnih anvelopa otpornosti ispitanih zidanih ispuna i čeličnih okvira, koji se kasnije mogu iskoristiti za utvrđivanje potresnih performansi dodatnih kombinacija takvih sustava pomoću numeričkih programskih paketa. Prije pristupanja složenijim numeričkim analizama izvršeno je kalibriranje pomoću poznatih, jednostavnijih metoda – modeli zamjenskih dijagonala. Za složenije numeričke proračune korišteni su programski paketi *SeismoStruct* i *ATENA 2D*.

Dan je i sumaran prikaz najvažnijih zaključaka proizašlih iz eksperimentalnih istraživanja, numeričkoga modeliranja, parametarske analize i urađenog numeričkoga primjera.

U nastavku su dani zaključci, koji se temelje na provedenim vlastitim **eksperimentalnim istraživanjima** čeličnih okvirnih konstrukcija s glinenim, porobetonskim i kombiniranim zidanim ispunom (kao originalnim

rješenjem za seizmičku izolaciju čeličnoga okvira od zidanog ispuna pri većim horizontalnim opterećenjima) izloženih cikličkoj horizontalnoj sili.

- Zidani ispun znatno doprinosi početnoj krutosti i nosivosti sustava, što je uobičajeno i usporedivo s rezultatima ranijih istraživanja. Najveće krutosti zabilježene su kod čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom, a najmanje kod okvira s porobetonskim ispunom, dok se sustav s kombiniranim ispunom po početnoj krutosti nalazi između dva navedena. Ovakva raspodjela početnih krutosti vezana je uz osnovna mehanička svojstva korištenih zidnih elemenata pa tako porobetonski blok, koji ima najmanju početnu krutost, ima i manji modul elastičnosti kao i tlačnu čvrstoću u odnosu na glinene zidne elemente.
- U pogledu nosivosti eksperimentalno ispitivanih sustava na horizontalnu silu, najotporniji se pokazao sustav s porobetonskim ispunom, a najmanje otporan bio je sustav s kombiniranim ispunom.
- Najveći horizontalni pomaci sustava u skladu su s otpornostima sustava na djelovanje horizontalne sile, dakle najveći horizontalni pomak pri slomu pretrpio je čelični okvir s porobetonskim ispunom, potom slijede okviri s glinenim ispunom, dok su najmanji pomaci izmjereni kod kombiniranoga sustava. Čelični okviri s kombiniranim ispunom ispitivani su približno do katnog pomaka od 1,0 %, pri kojem je ovaj sustav imao najmanju vrijednost preuzete horizontalne sile, a najveću, pri ovoj vrijednosti pomaka, imao je okvir s glinenim ispunom.
- Ispitivane serije okvira s ispunom pokazivale su i nešto drugačije ponašanje što se tiče oblika histerezne ovojnice. Kod okvira s glinenim ispunom histerezna ovojnica imala je glatki oblik, dok je kod modela s porobetonskim i kombiniranim ispunom, izgled anvelope nosivosti bio sličniji bi-linearnom ponašanju.
- Karakteristični način otkazivanja nosivosti sustava s glinenim ispunom bio je dijagonalno raspucavanje te prekoračenje tlačne čvrstoće ziđa uz lokalno ispadanje ispuna od glinenih blokova. Okvirni sustavi s porobetonskim ispunom pokazuju nešto drugačije ponašanje: uz dijagonalno raspucavanje (koje ipak intenzitetom nije bilo tako izraženo kao kod glinenih blokova) događalo se i izraženije klizanje po sljubnicama morta. Čelični okvir s kombiniranim zidanim ispunom pri slomu je imao karakteristično ponašanje - sve pukotine formirale su se u slabijim porobetonskim blokovima, dok na glinenom dijelu ispuna nije bilo pukotina.
- Najveće ukupno trošenje energije ostvareno je u čeličnim okvirima s ispunom od šupljih glinenih blokova, potom slijede okviri s ispunom od porobetonskih blokova, dok je najmanje energije disipirano u okvirima s kombiniranim ispunom. Usporedbom trošenja energije pri manjim

vrijednostima međukatnog pomaka (do 0,40 %) uočeno je najveće trošenje energije kod okvira s glinenim ispunom, potom slijedi sustav s kombiniranim ispunom i naposljetku slijede okviri s porobetonskim ispunom.

Početak **numeričkih analiza** predstavljala je izrada modela (jednostavnijih i složenijih), koji su potom na osnovu eksperimentalnih rezultata kalibrirani. Kalibrirani modeli prikazuju ponašanje koje je u skladu s opisanim eksperimentalnim ponašanjem, što je bila osnova za nastavak rada na modelima kako bi se provela parametarska analiza. U nastavku dani su najvažniji zaključci temeljeni na numeričkom modeliranju čeličnih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom.

- Najveće odstupanje po pitanju krutosti, između kalibriranih modela i eksperimentalnih rezultata, kada je u pitanju glineni ispun, dobiveno je na modelu s makro-elementom zidanoga ispuna, a što se tiče nosivosti, najveće odstupanje pokazao je model s tri zamjenske dijagonale.
- Razmatrajući proračune okvira s porobetonskim ispunom, najveća odstupanja otpornosti na horizontalnu silu u odnosu na eksperimentalne vrijednosti daje model s tri dijagonale, dok model s jednom dijagonalom daje najveća odstupanja u pogledu početne krutosti sustava.
- Usporedbom rezultata kalibriranih modela okvira s kombiniranim ispunom i eksperimentalnih rezultata može se zaključiti kako najveća odstupanja od eksperimentalnih rezultata pokazuje mikro-model (otpornost na horizontalne sile) te model s jednom zamjenskom dijagonalom (početna krutost). Može se reći kako su rezultati složenijih numeričkih modela bili sličniji ponašanju eksperimentalnih rezultata.
- Modelima, temeljenima na zamjenskim dijagonalama može se relativno brzo dobiti uvid u početnu krutost i nosivost sustava čeličnih okvira sa zidanim ispunom, dok je pri korištenju metode konačnih elemenata i mikro-modeliranju, potrebno poznavati više parametara za koje su potrebni opsežni eksperimentalni rezultati ispitivanja ziđa.
- Mikro-modelima čeličnih okvira sa zidanim ispunom može se dobiti detaljan uvid u ponašanje ovakvih konstrukcija (ukoliko se koriste odgovarajući modeli ponašanja pojedinih komponenti sustava), no zahtjevni su za proračun i neprimjenjivi na većim konstrukcijama (npr. višeetažne prostorne konstrukcije s ispunom).
- Treba napraviti distinkciju između makro-modela zidanog ispuna (modeli temeljeni na zamjenskim dijagonalama) i mikro-modela (modeli u kojima se svaka komponenta zidanog ispuna modelira odvojeno); prvi mogu poslužiti za približne inženjerske proračune, a potonji služe u znanstveno-istraživačke svrhe, odnosno za potrebe detaljnijega proučavanja nekih složenih fenomena

ponašanja koji se makro-modelima ne mogu uzeti u obzir (npr. odvajanje zidanog ispuna od okvira, klizanje zidanih elemenata po sljubnicama morta, koncentracije i preraspodjele naprezanja u zidanom ispunu pri pojavi pukotina i sl.). Osim toga, mikro-modeli mogu, zbog boljega opisa stvarnoga ponašanja zidanog ispuna, poslužiti za poboljšanje modela koji se temelje na makro-elementima.

Pri provedbi **parametarske analize** uzeti su u obzir izmijenjeni parametri kao što su: omjer visine i širine okvirne konstrukcije, broj raspona okvira, kvaliteta čeličnoga materijala, vrsta priključka s obzirom na rotacijsku krutost, kvaliteta zidanoga ispuna, utjecaj postojanja razmaka (gapova) između čeličnoga okvira i zidanoga ispuna, te kvaliteta i debljina oslabljenja porobetonskih blokova kod okvira s kombiniranim ispunom.

- Pokazalo se kako smanjenjem omjera visine i širine čeličnoga okvira dolazi do povećanja nosivosti i krutosti sustava pri opterećenju horizontalnim silama.
- Vrsta priključka utječe na nosivost, tj. s povećanjem rotacijske krutosti priključka povećava se i nosivost, te su u pravilu najveću nosivost postizali modeli čiji su priključci stup-greda imali karakteristike nepopustljivog priključka, a najmanju, modeli s nominalno zglobnim priključcima.
- Vrsta priključka nije utjecala, ili je imala zanemariv utjecaj, na početnu krutost sustava za predmetne modele.
- Kvaliteta čeličnoga materijala ne utječe na ponašanje sustava u pogledu početne krutosti, ali ima utjecaja na horizontalnu otpornost čeličnih okvira s ispunom.
- Povećavanjem mehaničkih karakteristika zidanoga ispuna dolazi do povećanja nosivosti i početne krutosti čeličnih okvira s ispunom. Kao što su pokazali eksperimentalni rezultati, analizirani modeli s različitim vrstama ispuna u pravilu pokazuju kako najveću krutost sustava imaju okviri s glinenim ispunom, a najmanju okviri s porobetonskim ispunom, dok se modeli s kombiniranim ispunom po početnoj krutosti nalaze između ovih skupina modela, ali uz najmanju nosivost.
- Analizom utjecaja veličine oslabljenja (promjeri rupa kojima se blokovi oslabljuju) porobetonskih blokova, kod čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom, s obzirom na nosivost i početnu krutost, uočeno je kako se povećavanjem debljine porobetonskih blokova na mjestima vertikalnih oslabljenja zida povećava nosivost, ali se variranjem ovoga parametra ne dobivaju razlike u početnoj krutosti sustava.

- Povećanjem tlačne čvrstoće porobetonskih blokova u kombiniranom zidanom ispunu povećava se maksimalna nosivost na horizontalne sile, ali početna se krutost ne mijenja promjenom ovoga parametra.
- Analizom utjecaja postojanja razmaka između okvira i zidanog ispuna utvrđeno je kako ovaj parametar utječe na krutost i na nosivost sustava – što je kontaktna površina između zidanog ispuna i čeličnog okvira manja, manje su i vrijednosti početne krutosti i nosivosti na horizontalnu silu.

Kroz **numerički primjer** čelične višeetažne konstrukcije sa zidanim ispunom ilustrirana je mogućnost primjene korištenih metoda modeliranja predloženoga koncepta izvedbe i dobivenih rezultata. Čelična konstrukcija dimenzionirana je za dva različita slučaja opterećenja: za nepotresne i potresne kombinacije opterećenja, nakon čega su, u tako dimenzionirane konstrukcije, dodani glineni, porobetonski i kombinirani ispuni s ciljem promatranja njihovih utjecaja na nosivost i deformabilnost sustava.

- Prisutnost zidanih ispuna u čeličnoj konstrukciji mijenja njezina dinamička svojstva.
- U razmatranim regularnim konstrukcijama ne dolazi do nepovoljnoga učinka zidanog ispuna na nosivost i deformacijsku sposobnost.
- Zidani ispuni povećavaju početnu krutost i otpornost sustava na horizontalne sile.
- Postojanje zidanih ispuna može utjecati na mehanizam otkazivanja nosivosti sustava, odnosno na mjesta otvaranja plastičnih zglobova u elementima čelične okvirne konstrukcije.
- Predložena je primjena odgovarajuće metode projektiranja u skladu s rezultatima ovoga rada.

Smjernice za daljnja istraživanja

Na osnovu rezultata eksperimenata i numeričkih analiza daljnja istraživanja potrebno je usmjeriti na sljedeće:

- nastavak istraživačkoga rada na predloženom sustavu kombiniranoga zidanog ispuna u smislu optimizacije ponašanja pri potresnim opterećenjima – istraživanje različitih udjela porobetonskih elemenata u zidanom ispunu, kombinacija drugačijih zidnih elemenata kombiniranog ispuna u smislu mehaničkih karakteristika, primjena drugačijih načina kombiniranja,
- usavršavanje jednostavnijih poznatih modela ponašanja zidanog ispuna zbog uočenih odstupanja od eksperimentalnih rezultata,

- proširivanje istraživanja primjene kombiniranog sustava na višeetažne i višerasponske konstrukcije,
- provedbu dinamičkih eksperimentalnih ispitivanja u radu proučenih sustava u svrhu potvrde zaključaka pri stvarnim potresnim opterećenjima,
- daljnje parametarske analize 3D konstrukcija s različitim konfiguracijama i generalizacijama ponašanja,
- probabilističku analizu na temelju baze eksperimentalnih podataka te parametarske analize,
- detaljnije istraživanje učinkovitosti predloženog sustava pridržanja ispuna za sprječavanje njegovoga ispadanja izvan ravnine kod kombiniranoga sustava,
- razmatranje primjene kombiniranoga sustava kod zidova s otvorima.

LITERATURA

[1] Polyakov, S.V. On the Interactions Between Masonry Filler Walls and Enclosing Frame When Loaded in the Plane of the Wall. (English translation by G.L. Cairns, 1963) Translations in Earthquake Engineering Research Institute, Moscow, Russia, 1956.

[2] Benjamin, J.R.; H.A., Williams. The Behavior of One-Story Shear Walls. Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 84, no. ST4, July 1958.

[3] Holmes, M. Steel Frames with Brickwork and Concrete Infilling. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. 19, no. 6501, 1961.

[4] Smith, B. S. Lateral Stiffness of Infilled Frames. Journal of the Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, vol. 88, no. 3355, 1962.

[5] Smith, B.S. Behavior of Square Infilled Frames. Journal of the Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, vol. 92, no. ST1, 1966.

[6] Smith, B.S.; C. Carter. A Method of Analysis for Infilled Frames. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. 44, paper 7218,1969.

[7] Mainstone, R.J. On the Stiffness and Strengths of Infilled Frames. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, supplement (iv), paper 7360 S, 1971.

[8] Klingner, R.E.; and V.V. Bertero. Infilled Frames in Earthquake-Resistant Construction. Report EERC 76-32, University of California, Berkeley, California, 1976.

[9] Barura, H.K.; Mallick, S.K. Behavior of Mortar Infilled Steel Frames Under Lateral Load. Building and Environment, vol. 12,1977.

[10] Liauw, T. C.; Lee, S. W. On the behaviour and analysis of multi-story infilled frames subject to lateral loading. Proc., Inst. Civ.Eng., Struct. Build., 63, 641–656.,1977.

[11] Riddington, J.R.; S.B. Smith. Analysis of Infilled Frames Subject to Racking With Design Recommendations. The Structural Engineer, vol. 55, no. 6, 1977.

[12] King, G. J.W.; Pandey, P.C. The Analysis of Infilled Frames Using Finite Elements. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, part 2, vol. 65, no. 8145, December 1978.

[13] Riddington, J. R. The Influence of Initial Gaps on Infilled Frame Behavior. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, part 2, vol. 77, paper 8767, 1984.

[14] Dawe, J.L.; Yong, T.C. An Investigation of Factors Influencing the Behavior of Masonry Infill in Steel Frames Subjected to In-Plane Shear. Proceedings of the 7th International Brick Masonry Conference, Brick Development Research Institute, pp 803-814.,1985.

[15] Dhanasekar, M.; Page, A.W. The Influence of Brick Masonry Infill Properties on the Behavior of Infilled Frames. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, part 2, vol. 81, no. 9061, 1986.

[16] Doudoumis, I. N.; Mitsopoulou, E. N. Non-linear analysis of multistorey infilled frames for unilateral contact conditions. Proc.,8th European Conf. on Earthquake Engineering, European Association for Earthquake Engineering (EAEE), Istanbul, Turkey, 63–70., 1986.

[17] Dawe, J.L.; Seah, C.K. Behavior of Masonry Infilled Steel Frames. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 16,1989.

[18] D'Asdia P.; Dayala, D.; Palombini, F. On the seismic behaviour of infilled frames. Proceedings of the Ninth European Conference on Earthquake Engineering, Moscow, 8, 162-171., 1990.

[19] El Haddad, M. H. Finite Element Analysis of Infilled Frames Considering Cracking and Separation Phenomena. Computers & Structures, vol. 41, no. 3,1991.

[20] Chrysostomou, C.Z.; Gergely, P.; Abel, J.E. Nonlinear Seismic Response of Infilled Steel Frames, Proceedings, Tenth World Conference on Earthquake Engineering, pp.4435-4442,Spain, 1992.

[21] Lotfi H.R.; and Shing, P.B. Interface Model Applied to Fracture of Masonry Structures. Journal of Structural Engineering, vol. 120, no. 1, January 1994.

[22] Saneinejad, A.; Hobbs, B. Inelastic Design of Infilled Frames. Journal of Structural Engineering, vol. 121, no. 4, April 1995.

[23] Bennett, R.M.; Flanagan, R.D.; Adham, S.; Fischer, W.L.; Tenbus, M.A. Evaluation and Analysis of the Performance of Masonry Infills During the Northridge Earthquake. Oak Ridge National Laboratory, February 1996.

[24] Madan, A.; Reinhorn, A.M.; Mander, J.B.; Valles, J.B. Modeling of Masonry Infill Panels for Structural Analysis, Journal of Structural Engineering, 1997.

[25] Mehrabi, A.B.; Shing, P.B.; Schuller, M.P.; Noland. J.L. Performance of Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames Under In-Plane Lateral Load. University of Colorado at Boulder, Structural Engineering and Structural Mechanics Research Series, Report CU/SR, 1996.

[26] Flanagan, R.D., Bennett, R.M. In-plane behavior of structural clay tile infilled frames, ASCE, Journal of Structural Engineering, 125(6) 590-599., 1999.

[27] Dawe, J.L; Liu, Y.; Seah, S.K. A parametric study of masonry infilled steel frames. Can. J. Civ. Eng. Vol.28 : 149-157., 2001.

[28] El-Dakhakhni, W. W.; Elgaaly, M.; Hamid, A.A.Three-Strut Model for Concrete Masonry Infilled Steel Frames, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No.2, pp. 177-185, 2003.

[29] Moghaddam, H. A. Lateral Load Behavior of Masonry Infilled Steel Frames with Repair and Retrofit, Journal of Structural Engineering (ASCE) 130(1), 56 – 63, 2004.

[30] Moghadam, H. A.; Ghaemian, M. Experimental and Analytical Investigation into Crack Strength Determination of Infilled Steel Frames, Journal of Constructional Steel Research, vol. 118(7), pp.1-12., 2006.

[31] Kaltakci, M. Y.; Korkmaz, H. H.; Koken, A. An Investigation of the Behaviour of Steel Frames with Masonry Infills under Lateral Loading, Journal of Engineering and Applied Sciences 2 (5):930-943, 2007.

[32] Ravichandran, S. S.; Klingner, R. E. Behavior of Steel Moment Frames with Autoclaved Aerated Concrete Infills. ACI Structural Journal 109(1): 83-90,24-30., 2012.

[33] FEMA – 306, NHERP Evalition of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, Federal Emergency Management Agency, Aplied Techonology Council, Washington DC, United States, 1998.

[34] EN 1998-1-1:2004: Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, Bruxelles, 2004.

[35] Sorić, Z. Zidane konstrukcije I, drugo, prošireno izdanje. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Manualia Universitatis Studiorum Zagrabiensis, Tisak tmg-topgraf, Zagreb, 2004.

[36] EN 1996-1-1:2005: Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, European Committee for Standardization, Bruxelles, 2005.

[37] HRN EN 772-2:2004: Metode ispitivanja zidnih elemenata – 1. dio: Određivanje tlačne čvrstoće (EN 772-1:2004). European Committee for Standardization. CEN. Brussels, 2004.

[38] HRN EN 998-2:2002: Specifikacija mortova za ziđe -- 2. dio: Mortovi za ziđe (EN 998-2:2001). European Committee for Standardization. CEN. Brussels, 2004.

[39] HRN EN 1015-11:2000: Metode ispitivanja mortova za ziđe – 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrslog morta (EN 1015-11:1999). European Committee for Standardization. CEN. Brussels, 1999.

[40] HRN EN 1052-1:2004: Metode ispitivanja ziđa – 1. dio: Određivanje tlačne čvrstoće (EN 1052-1:1998). European Committee for Standardization. CEN. Brussels, 1998.

[41] EN 1996-1-1:2005: Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, European Committee for Standardization, Bruxelles, 2005.

[42] HRN EN 1052-3:2004: Metode ispitivanja ziđa – 3. dio: Određivanje početne posmične čvrstoće (prEN 1052-3:2001). European Committee for Standardization. CEN. Brussels, 2001.

[43] Self, M.,W. Structural Properties of load-bearing concrete masonry. Masonry: past and present, ASTM STP 589, American Society for Testing and Materials, pp. 233-254, 1975.

[44] Aničić, D. Ytong - potresna otpornost zgrada od porastoga betona http://www.ytong.hr/hr/docs/POTRESNA_OTPORNOST_ZGRADA_OD_PORASTOGA_BETONA_2012_FINAL.pdf, 26.5.2012.

[45] Bosiljkov, V.; Totoev Z.Y.; Nichols M.J. Shear modulus and stiffness of brickwork masonry: An experimental perspective, Structural Engineering and Mechanics. 20,1., 2005.

[46] Celarec, D.; Ricci, P.; Dolšek, M. The sensitivity of seismic response parameters to the uncertain modelling variables of masonry-infilled reinforced concrete frames, *Engineering Structures*, Vol. 35 (February 2012), pp. 165-177

[47] Crisafulli F.J. Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills, PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 1997.

[48] Smyrou E. Implementation and Verification of a Masonry Panel Model for Nonlinear Dynamic Analysis of Infilled RC Frames, MSc Dissertation, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk (ROSE School), Pavia, Italy, 2006.

[49] Hendry A.W. Structural Masonry, Macmillan Education Ltd, London, England, 1990.

[50] Paulay T., Priestley M.J.N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley & Sons Inc., New York, 1992.

[51] Shrive N.G. Materials and material properties in Reinforced and Prestressed Masonry, Longman Scientific and Technical, London, England, 1991.

[52] Atkinson R.H., Amadei B.P., Saeb S., Sture S. Response of masonry bed joints in direct shear," ASCE Journal of Structural Division, Vol. 115, No. 9, pp. 2276-2296., 1989.

[53] Panagiotakos, T.B.; Fardis, M.N. Seismic response of infilled RC frame structures, 1th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996, Paper No P-4(225).

[54] Chiostrini, S.; Galano, L.; Vignoli, A. On the determination of strength of ancient masonry walls via experimental tests, *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand

[55] Tubi, N. La realizzazione di murature in laterizio, Andil, Sezione Murature, Ed. Laterconsult, Luglio, 1993.

[56] Calderoni, B. Valutazione sperimentale delle caratteristiche meccaniche di muratura di tufo per modelli in scala intermedia, Atti del Convegno Nazionale: La Meccanica delle Murature tra Teoria e Progetto, Messina, 18-20 Settembre, pp95-104, 1996.

[57] EN 1993-1-8:2005: Eurocode 3 - *Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*, European Committee for Standardization, Bruxelles, 2005.

[58] Tomaževič, M. Earthquake-Resistance Design of Masonry Buildings (Series on Innovation in Structures and Construction-Vol. 1). Imperial College Press, London, 1999.

[59] Markulak, D.; Sigmund, V.; Radić, I. Modeliranje čeličnih okvira sa zidanom ispunom. Građevinar 60, 4 (2008.), str. 317-326

[60] Markulak, D.; Radić, I.; Sigmund, V. Ispitivanje čeličnih okvira sa zidanim ispunom. GTZ 2012 TUZLA / GEO-EXPO 2012, Tuzla, 2012.

[61] Markulak, D. Proračun čeličnih konstrukcija prema EN 1993-1-1, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinkski fakultet, 2008.

[62] Penava, D.; Radić, I.; Gazić, G.; Sigmund, V. Mechanical Properties of Masonry as Required for the Seismic Resistance Verification. *Tehnički vjesnik,* 18 (2011) , 2; 273-280

[63] Markulak, D. Posebna poglavlja čeličnih konstrukcija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinkski fakultet, Osijek, 2010.

[64] ATENA Program Documentation, Part 1, ATENA Theory Manual, Cervenka Consulting, 2009.

[65] ATENA Program Documentation, Part 2-1, ATENA 2D User's Manual, Cervenka Consulting, 2008.

[66] SeismoSoft (2012.), SeismoStruct – Programski paket za nelinearne statičke i dinamičke analize konstrukcija. http://www.seismosoft.com

[67] Autodesk Robot Structural Analysis - Metric Getting Started Guide, 2010. http://images.autodesk.com/adsk/files/robot_getting_started_guide_eng_2011_metric_2.pdf

[68] DEWESoft v6.6 - Data acquisition, processing, analyzing and storage software, User Manual v1.3.0, 2008. http://www.dewesoft.com/download?file=dws66Manual130.pdf

[69] EN 1990:2002: Eurocode – *Basis of structural design*, European Committee for Standardization, Bruxelles, 2002.

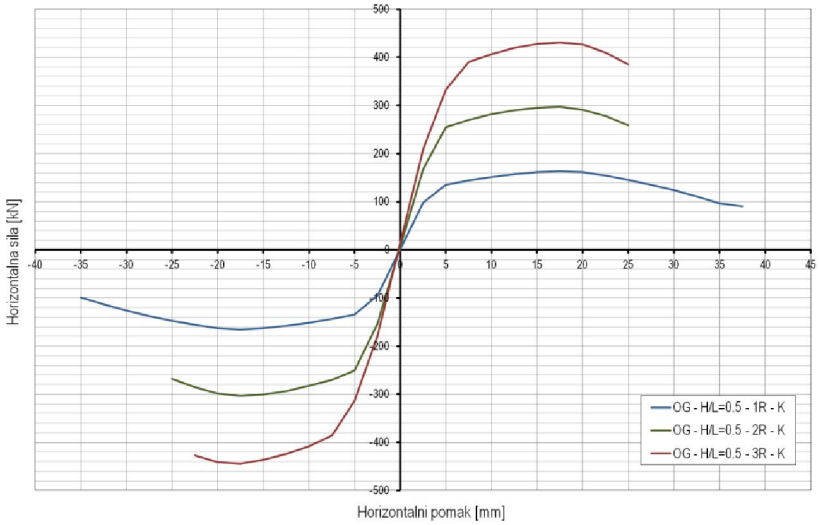
[70] EN 1991-1-1:2002: Eurocode 1 – *Action on structures - Part 1-1: General actions – Density,self-weight, imposed loads for buildings*, European Committee for Standardization, Bruxelles, 2002.

[71] EN 1993-1-1:2005: Eurocode 3 - *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, European Committee for Standardization, Bruxelles, 2005.

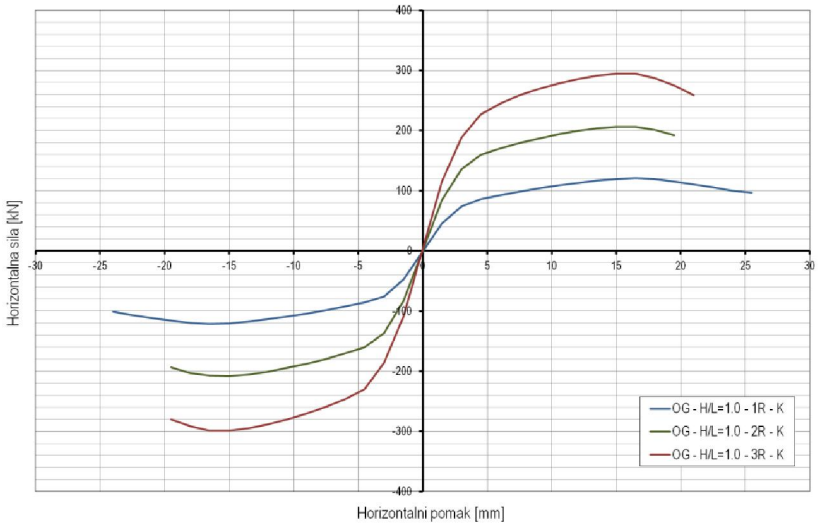
[72] Oguz, S. *Evaluation of Pushover Analysis Procedures for Frame Structures,*
Master of Science Thesis, METU, Turska, 2005.

[73] Chopra, A. K.; R. K. Goel. A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation, PEER Report 2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center,College of Engineering, University of California Berkeley, 2001.

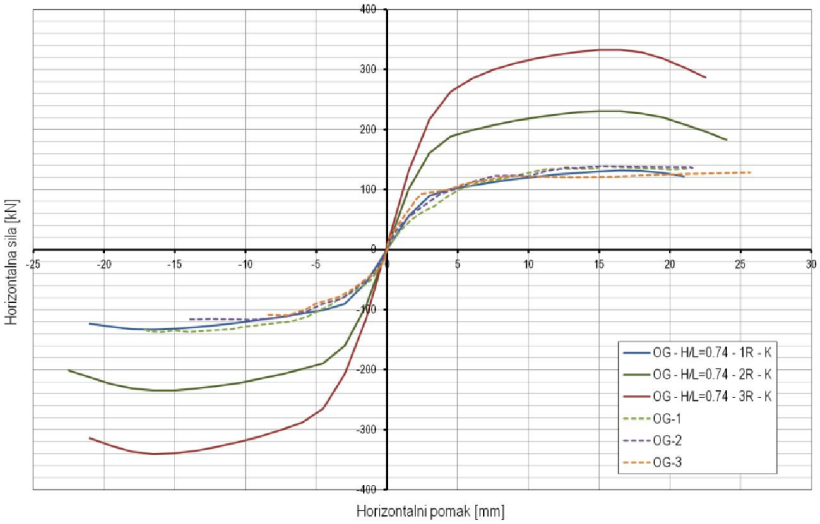
PRILOG A - REZULTATI PARAMETARSKE ANALIZE



a) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50; R=1, 2 i 3

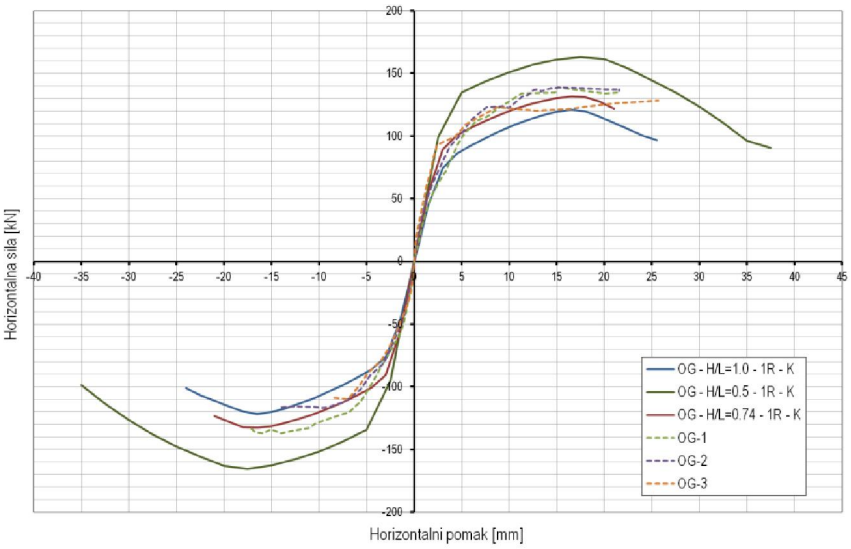


b) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=1.0; R=1, 2 i 3

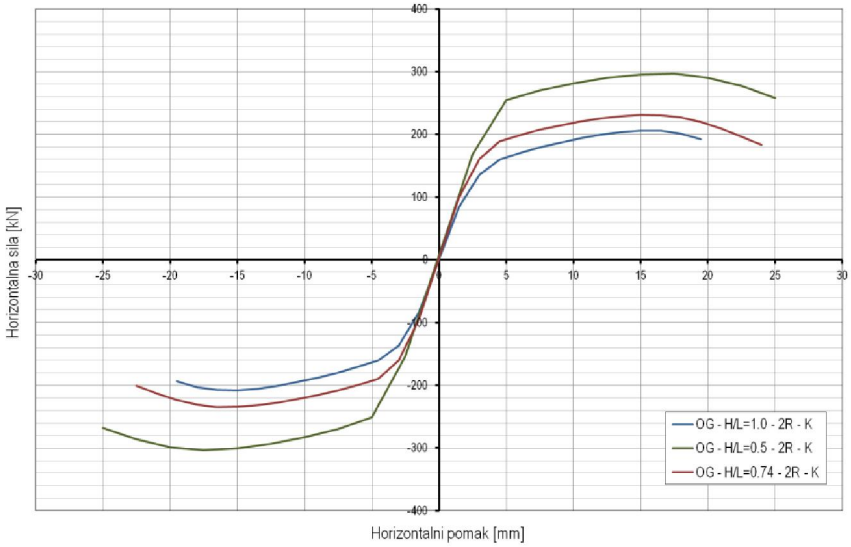


c) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.74; R=1, 2 i 3

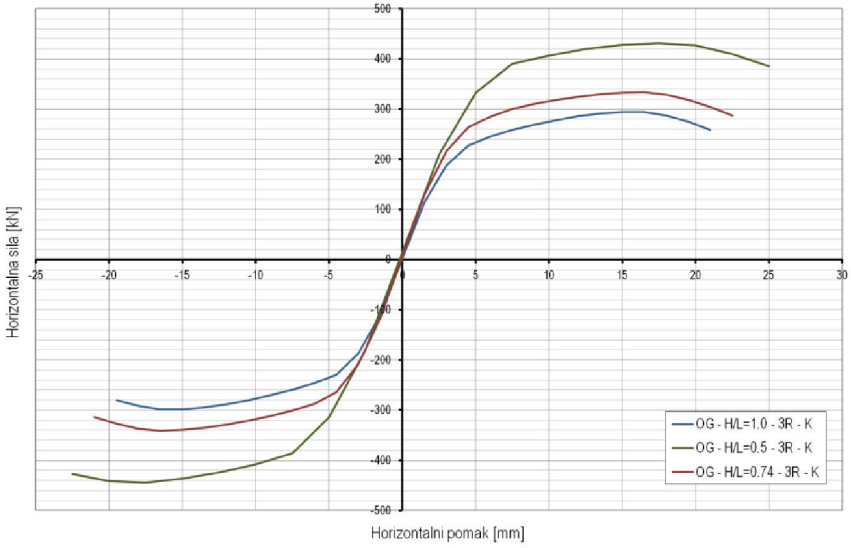
Slika A1 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50, 0.74 i 1.0; R=1

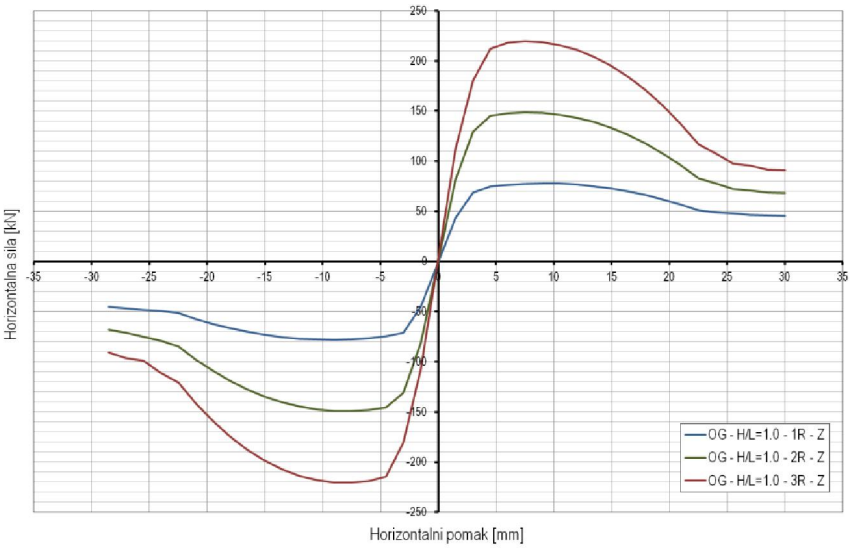


b) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50, 0.74 i 1.0; R=2

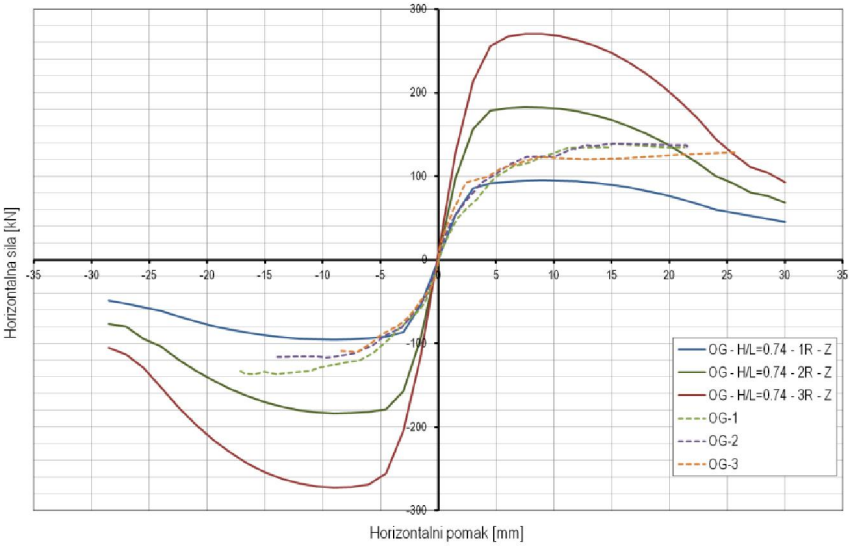


c) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50, 0.74 i 1.0; R=3

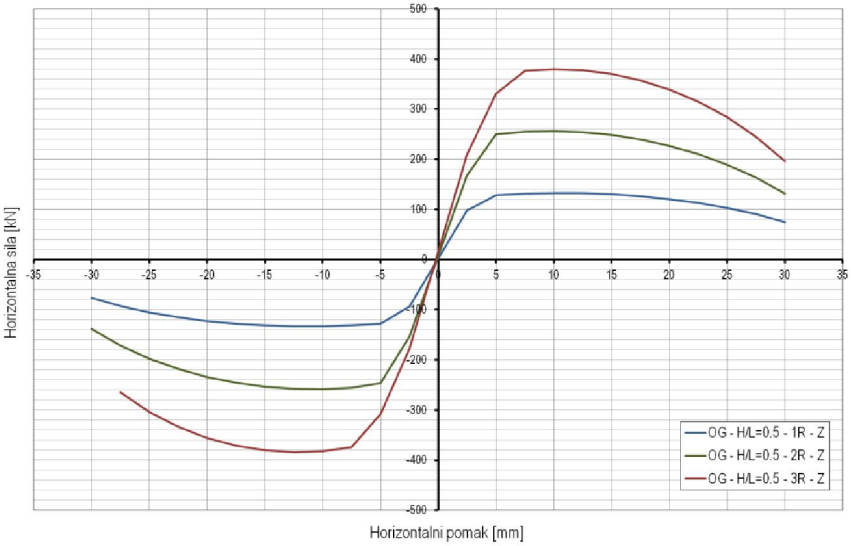
Slika A2 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Zglobni priključak (Z) – H/L=1.0; R=1, 2 i 3

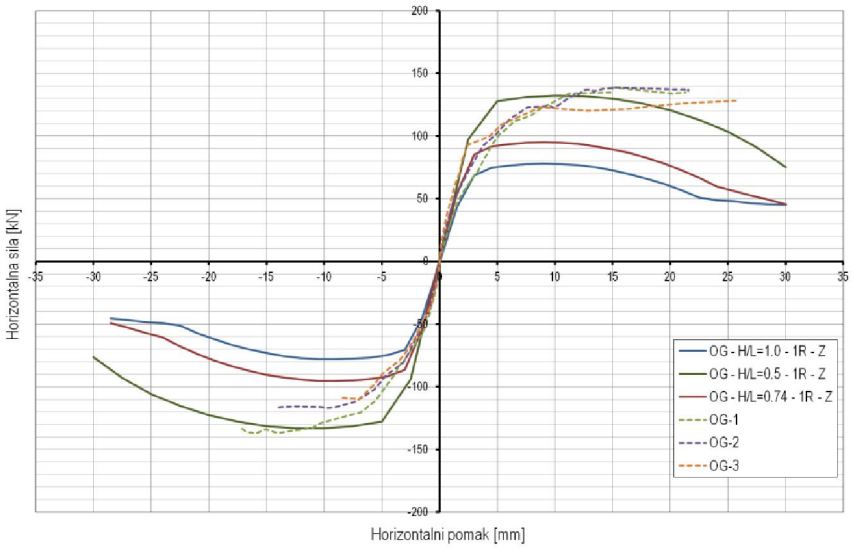


b) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.74; R=1, 2 i 3

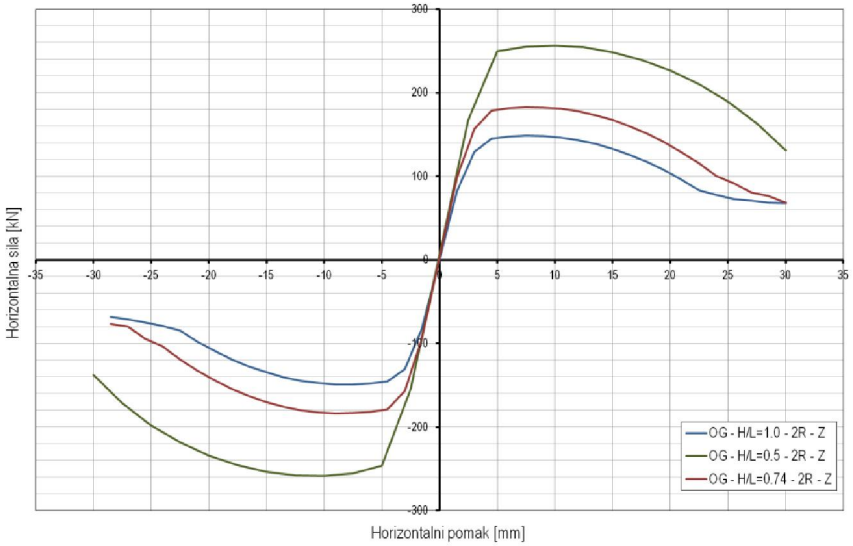


c) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50; R=1, 2 i 3

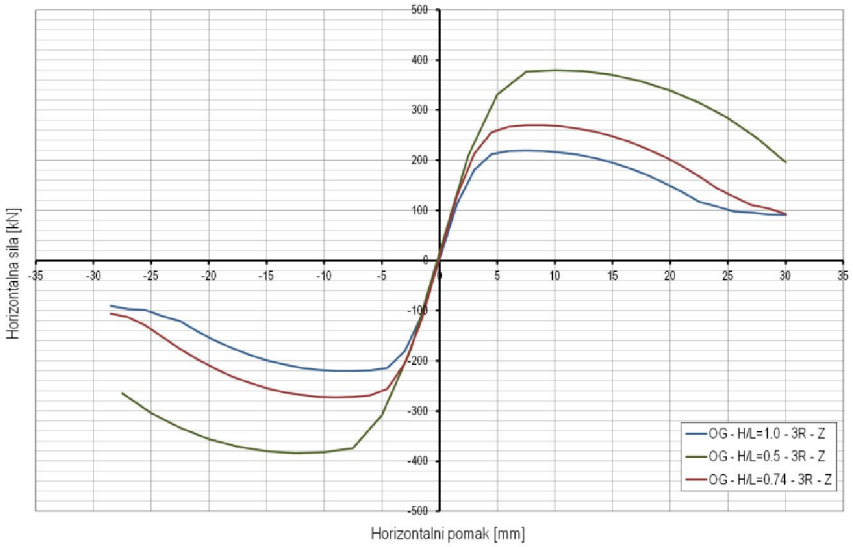
Slika A3 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=1

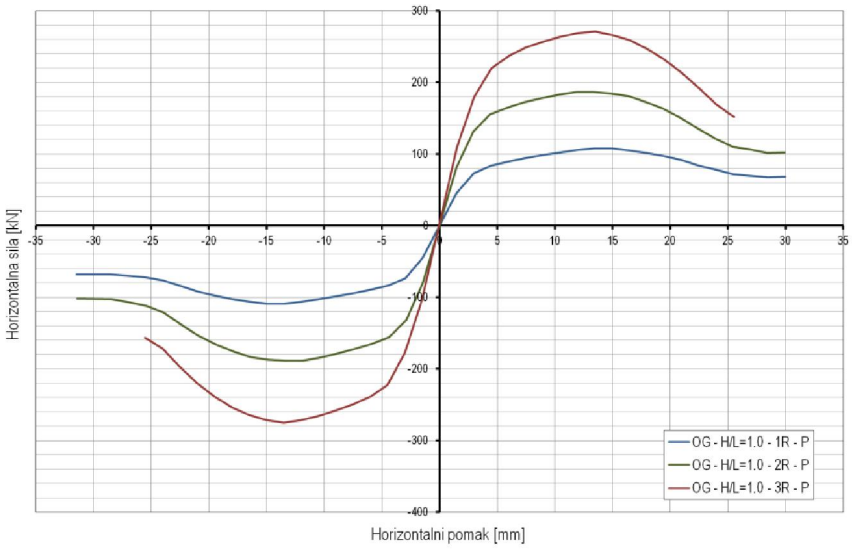


b) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=2

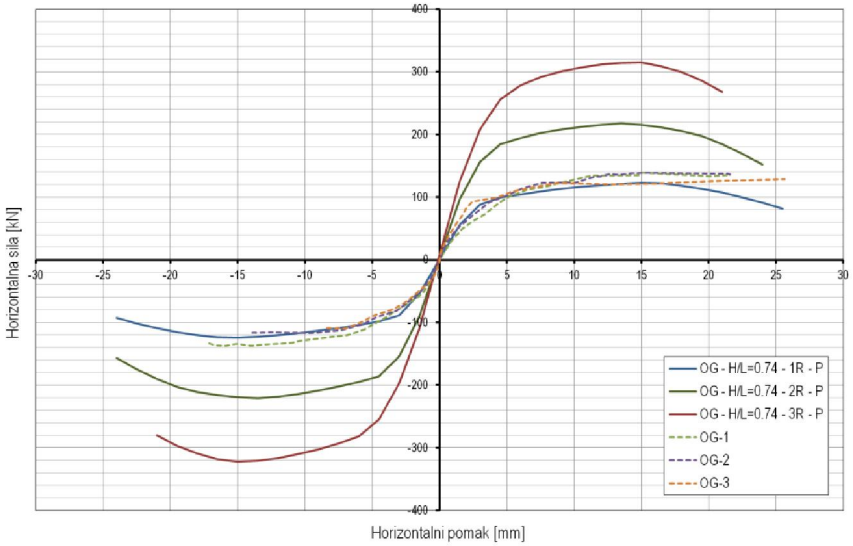


c) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=3

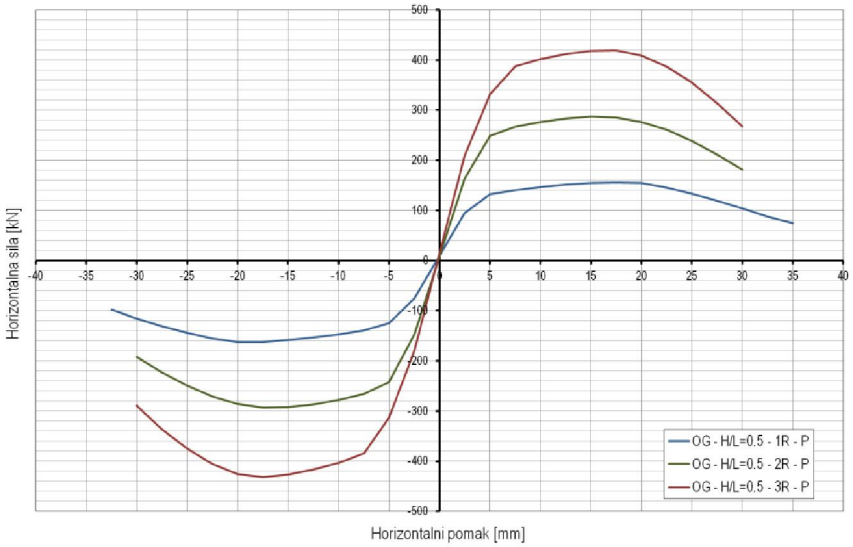
Slika A4 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=1.0; R=1, 2 i 3

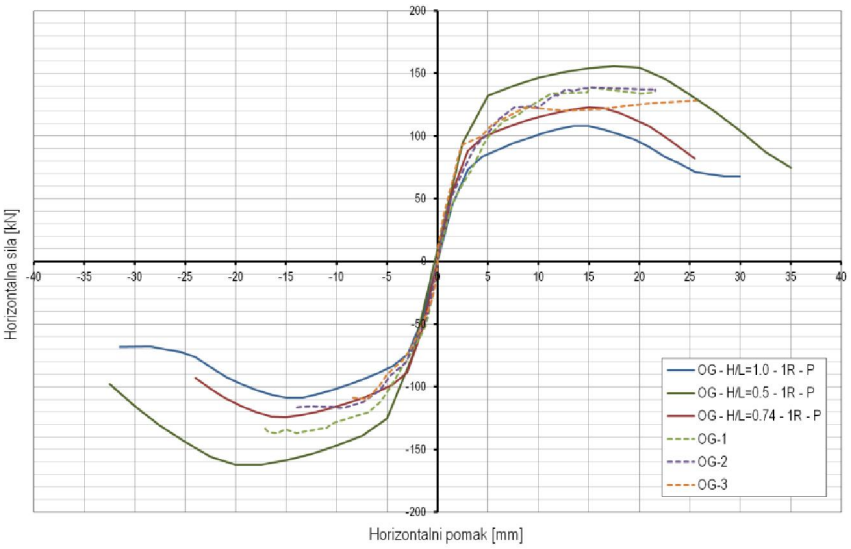


b) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.74; R=1, 2 i 3

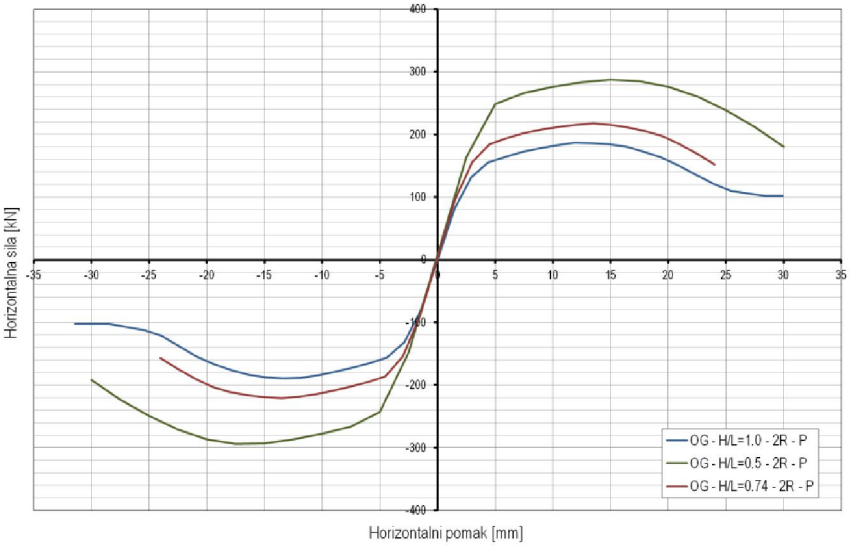


c) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.5; R=1, 2 i 3

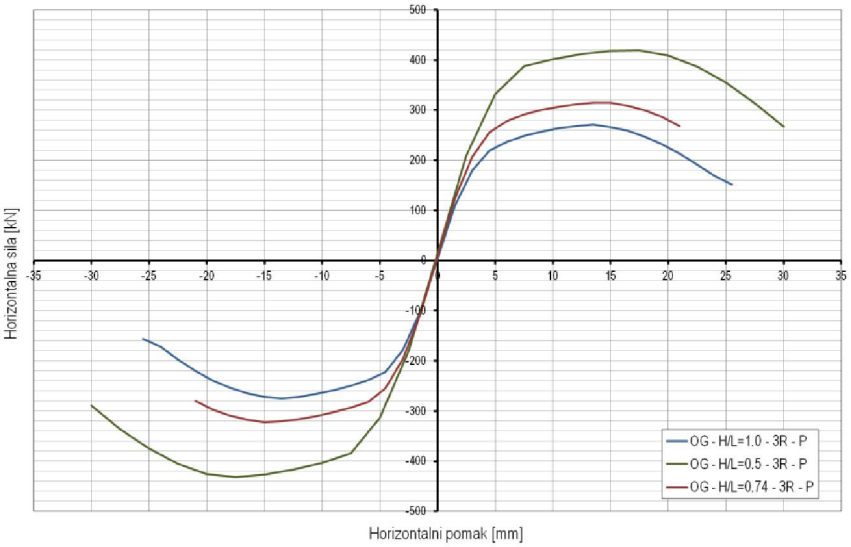
Slika A5 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=1

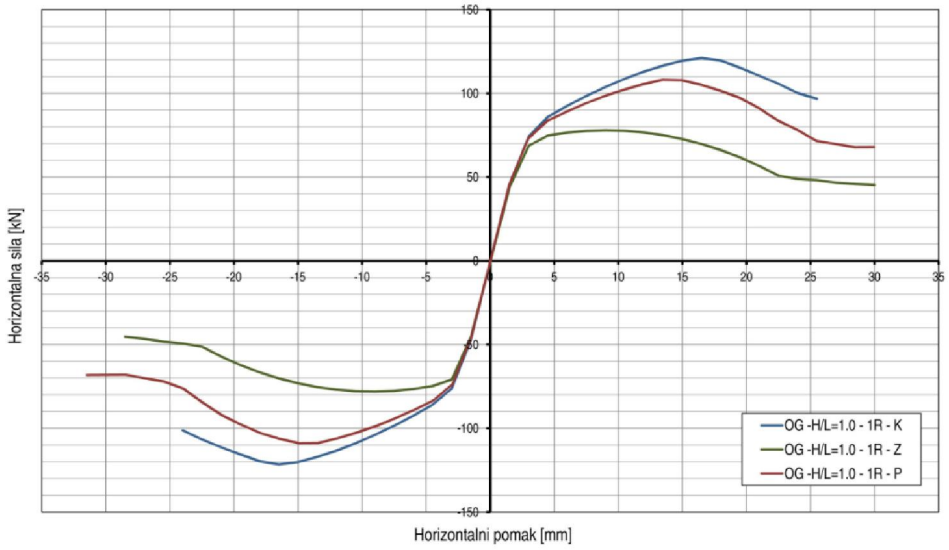


b) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=2

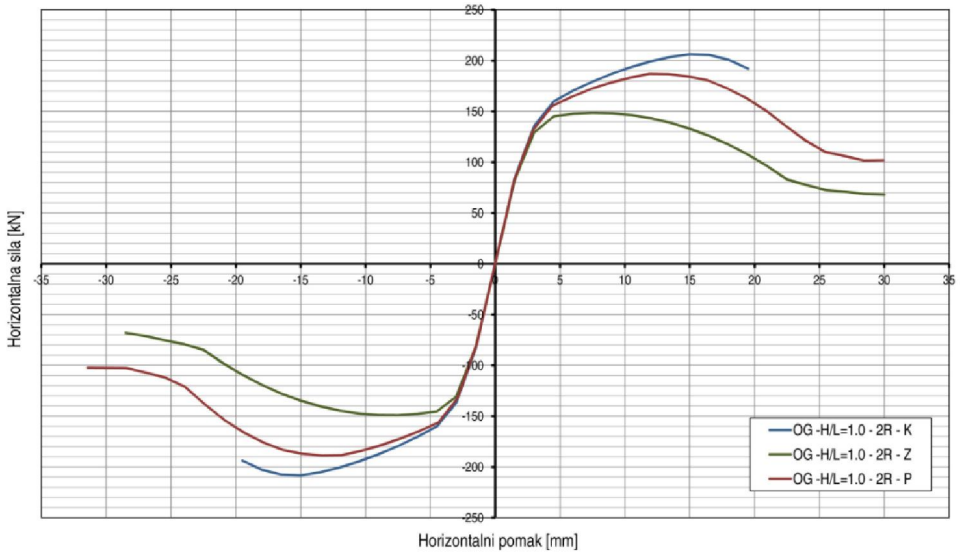


c) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=3

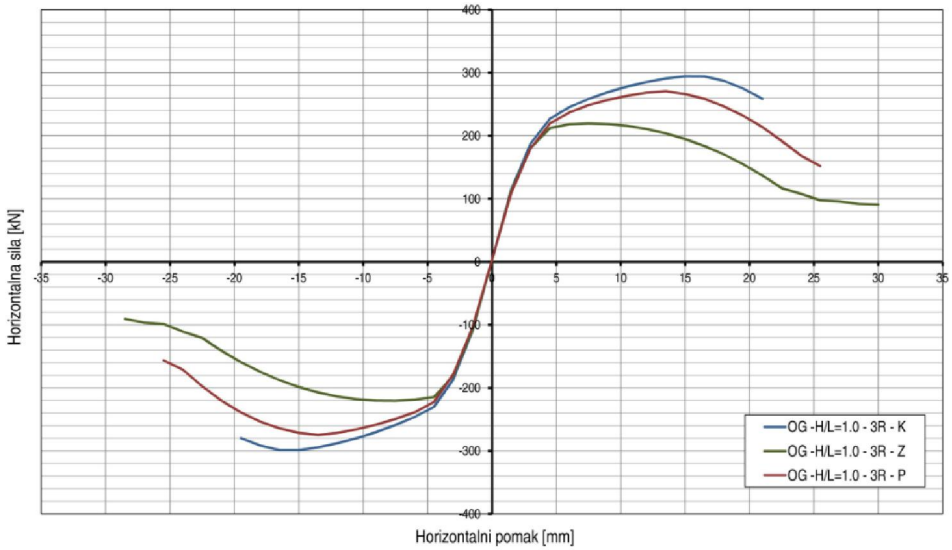
Slika A6 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Jedan raspon (1R); H/L=1.0 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

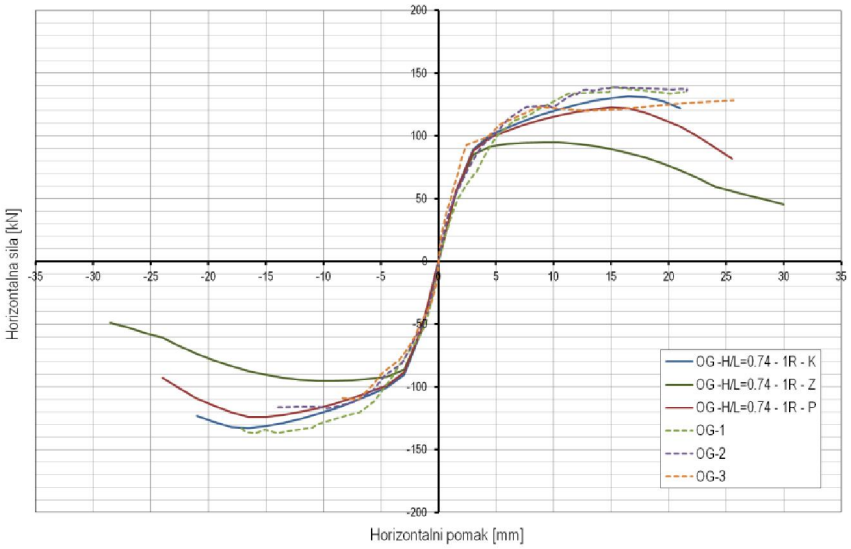


b) Dva raspona (2R); H/L=1.0 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

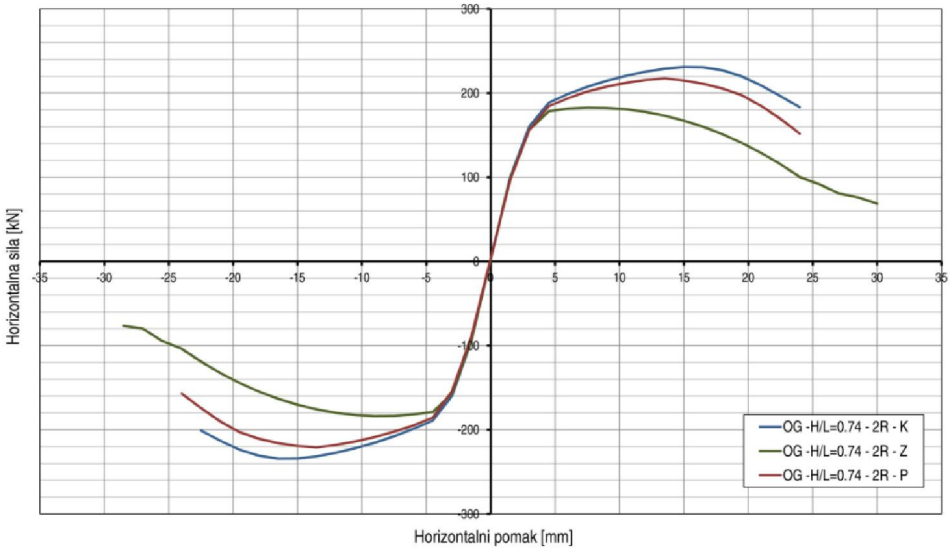


c) Tri raspona (3R); H/L=1.0 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

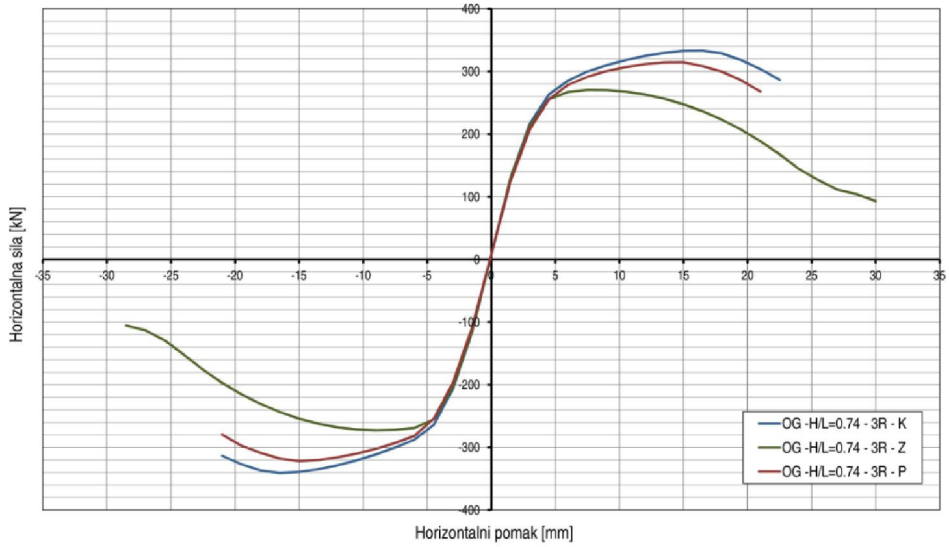
Slika A7 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona



a) Jedan raspon (1R); H/L=0.74 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

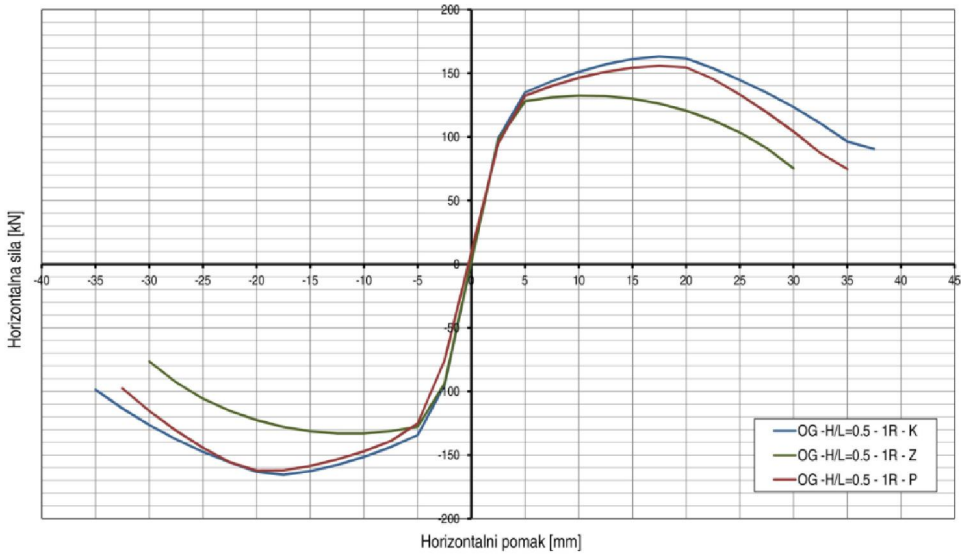


b) Dva raspona (2R); H/L=0.74 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

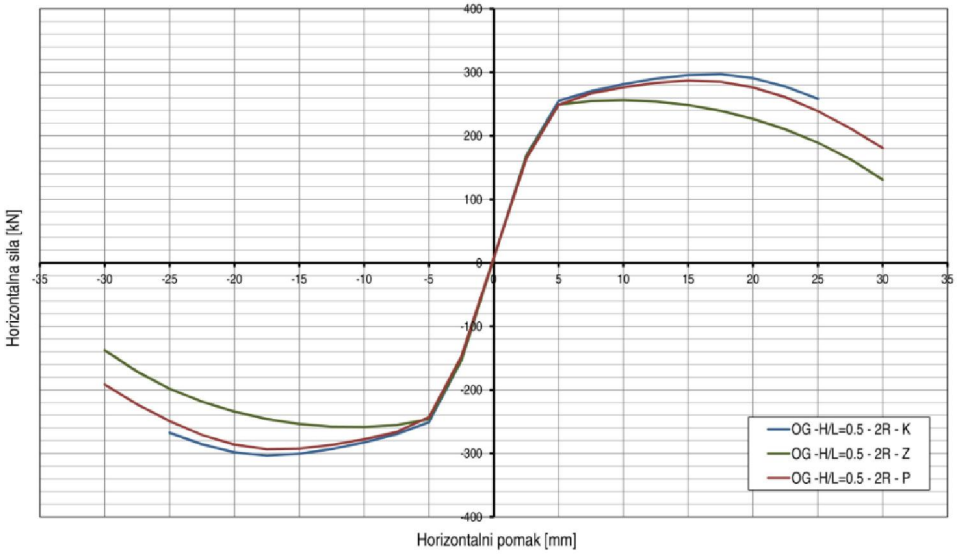


c) Tri raspona (3R); H/L=0.74 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

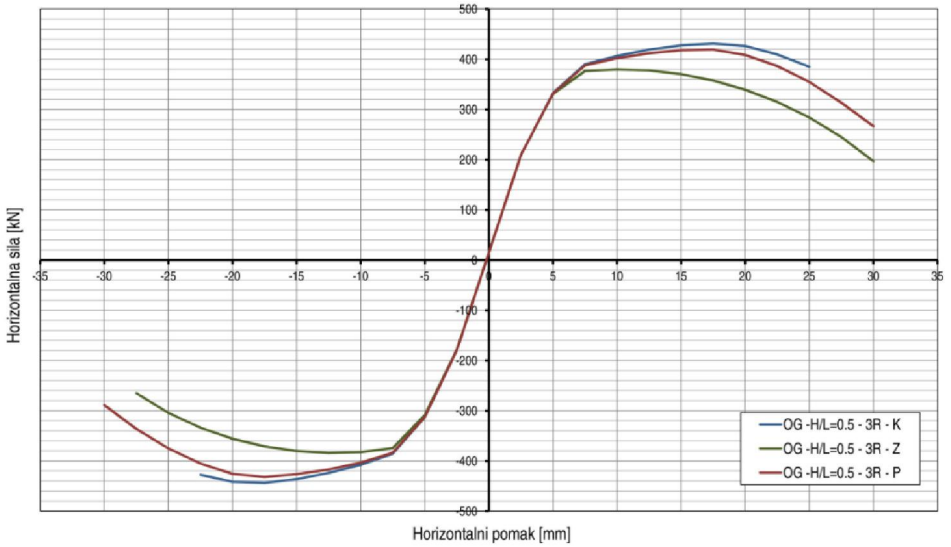
Slika A8 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona



a) Jedan raspon (1R); H/L=0.50 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

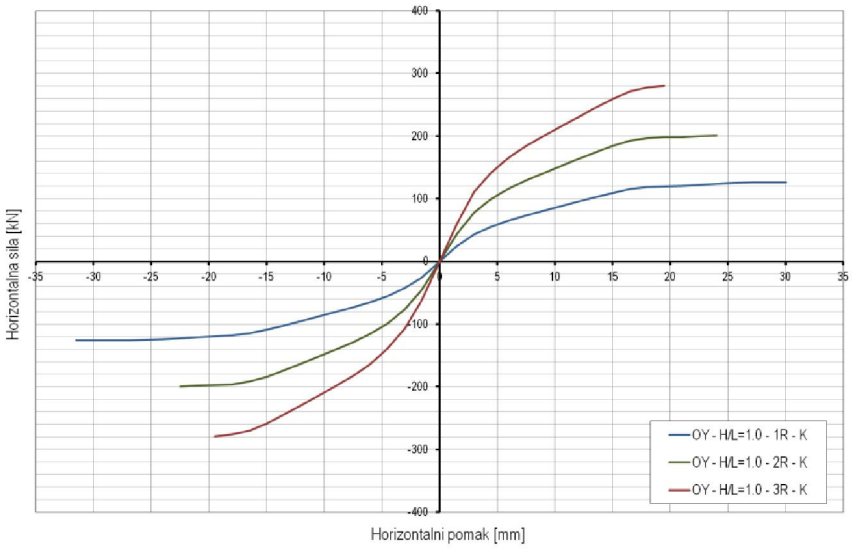


b) Dva raspona (2R); H/L=0.50 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

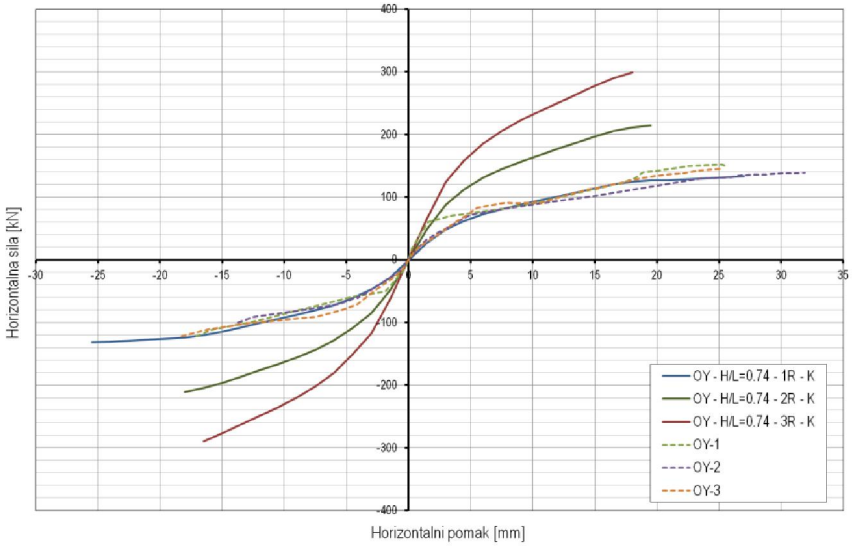


c) Tri raspona (3R); H/L=0.50 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

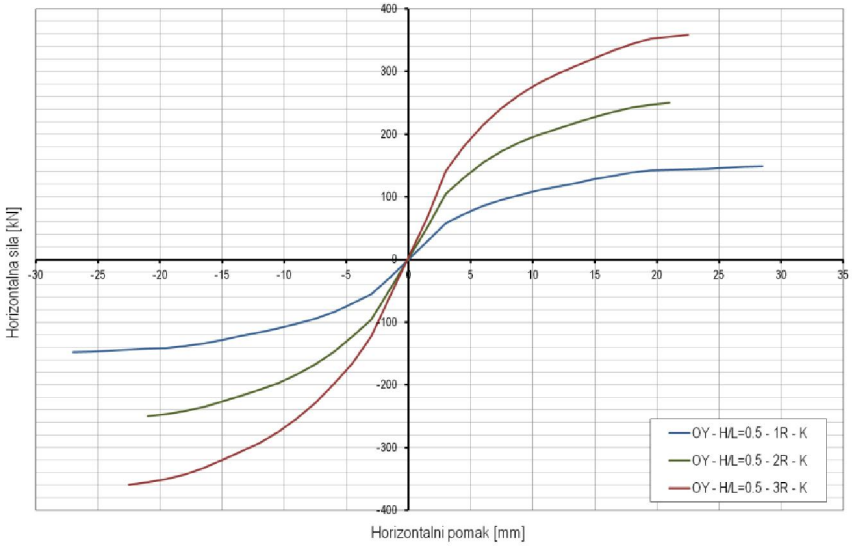
Slika A9 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=1.0; R=1,2 i 3

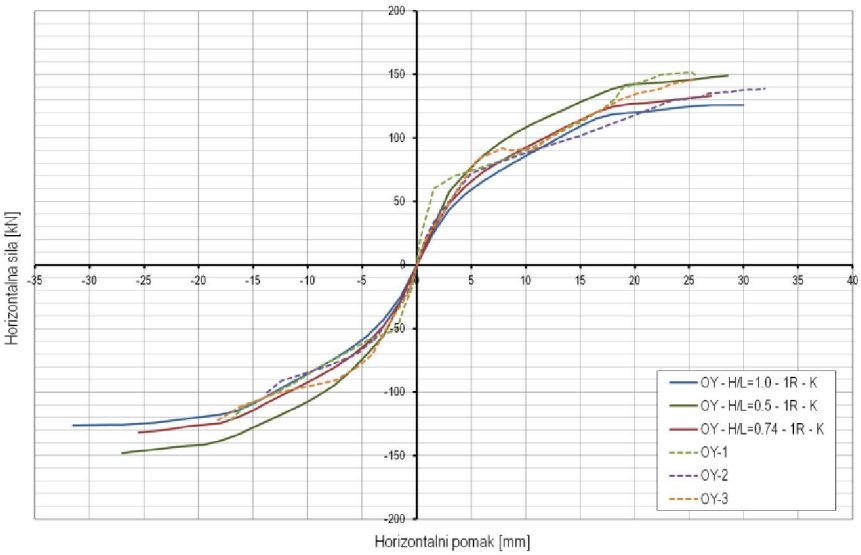


b) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.74; R=1,2 i 3

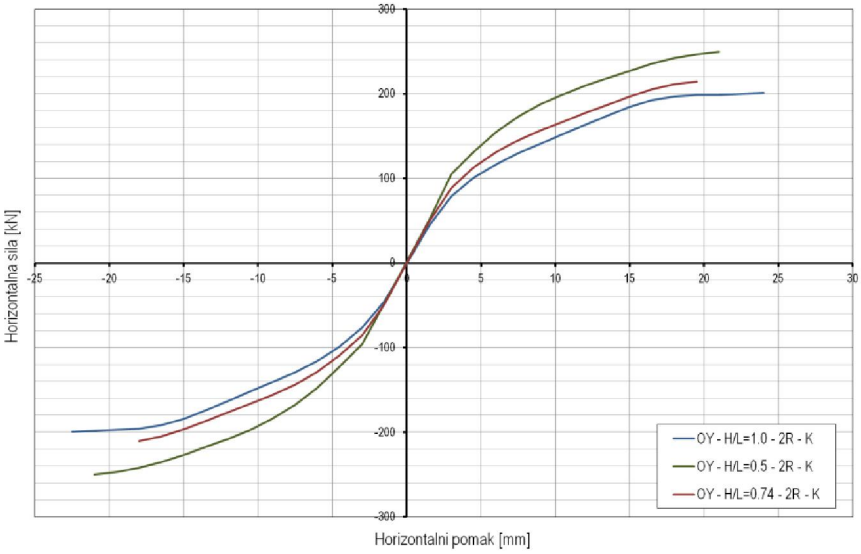


c) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50; R=1,2 i 3

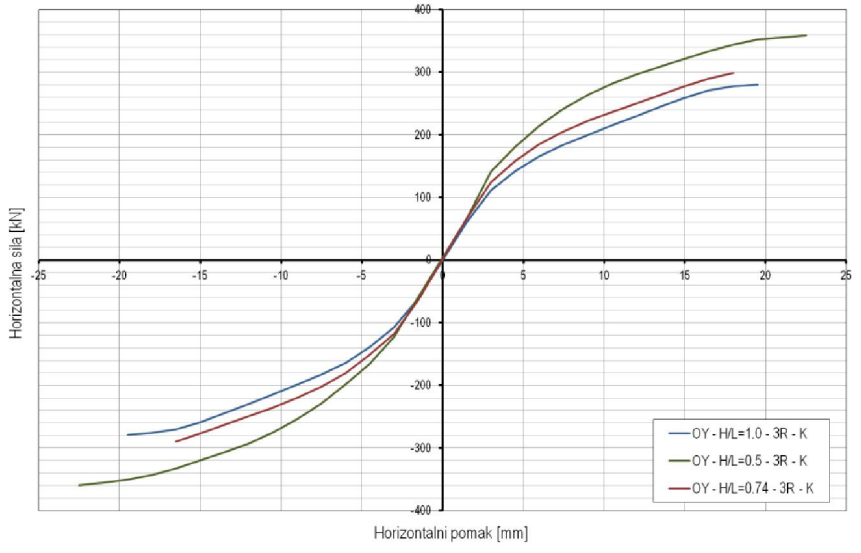
Slika A10 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50, 0.74 i 1.0; R=1

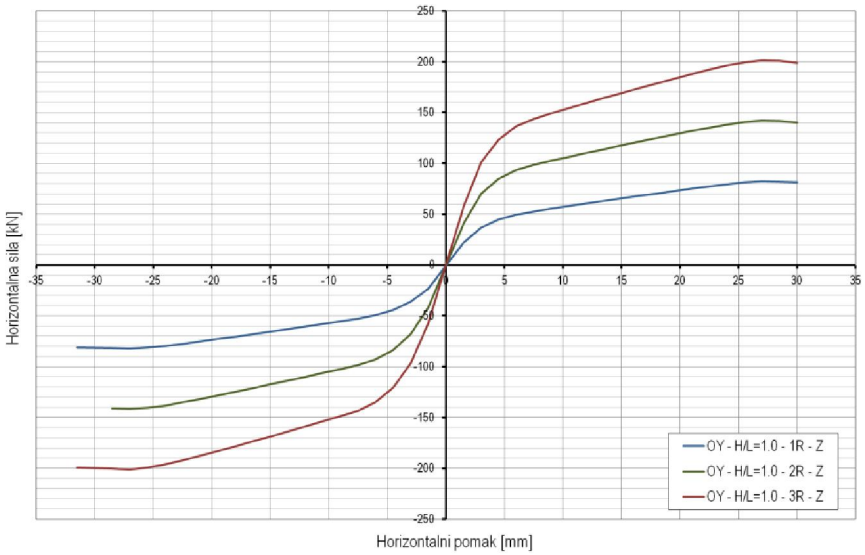


b) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50, 0.74 i 1.0; R=2

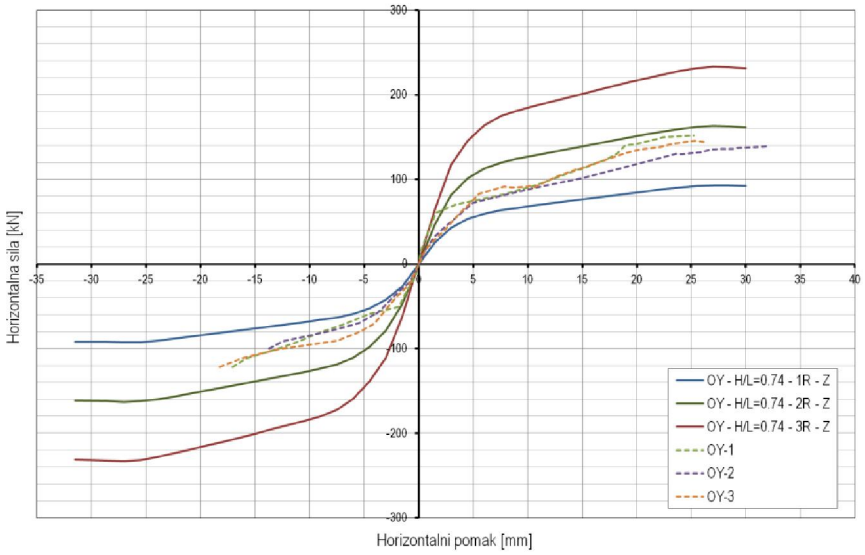


c) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50, 0.74 i 1.0; R=3

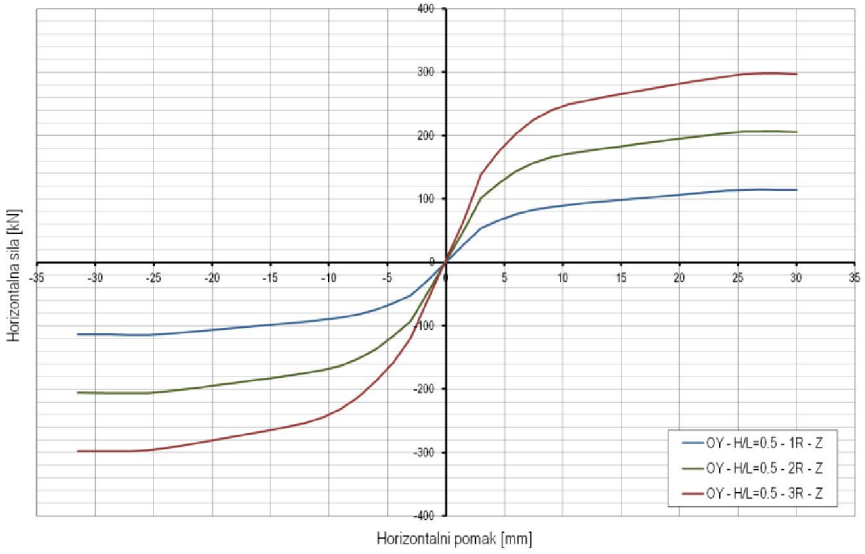
Slika A11 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Zglobni priključak (Z) – H/L=1.0; R=1, 2 i 3

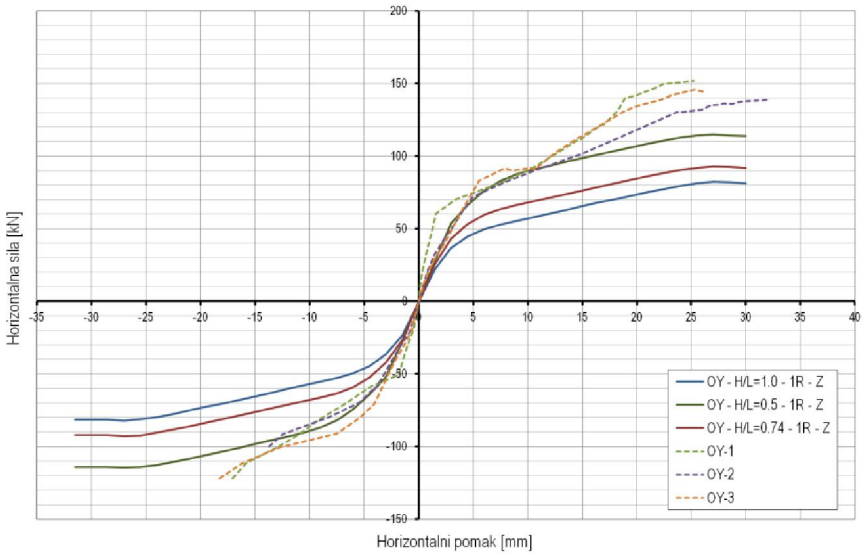


b) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.74; R=1, 2 i 3

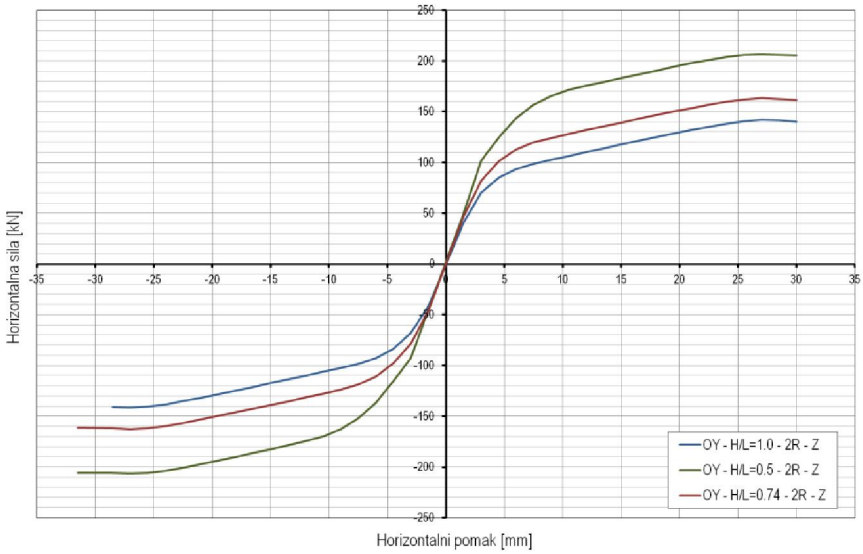


c) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50; R=1, 2 i 3

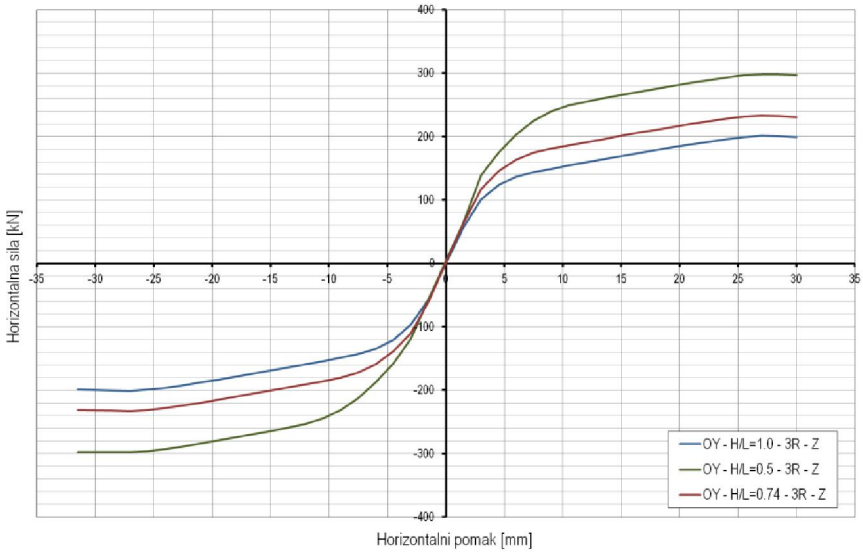
Slika A12 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=1

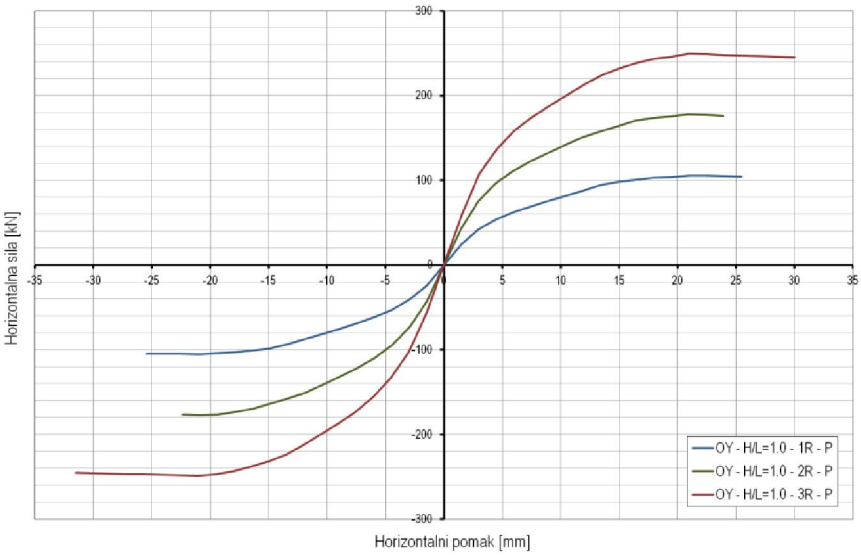


b) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=2

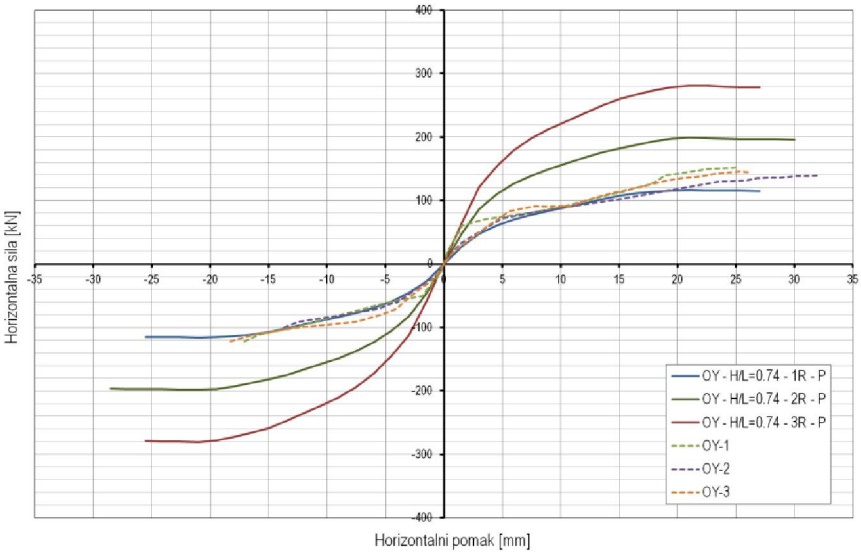


c) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=3

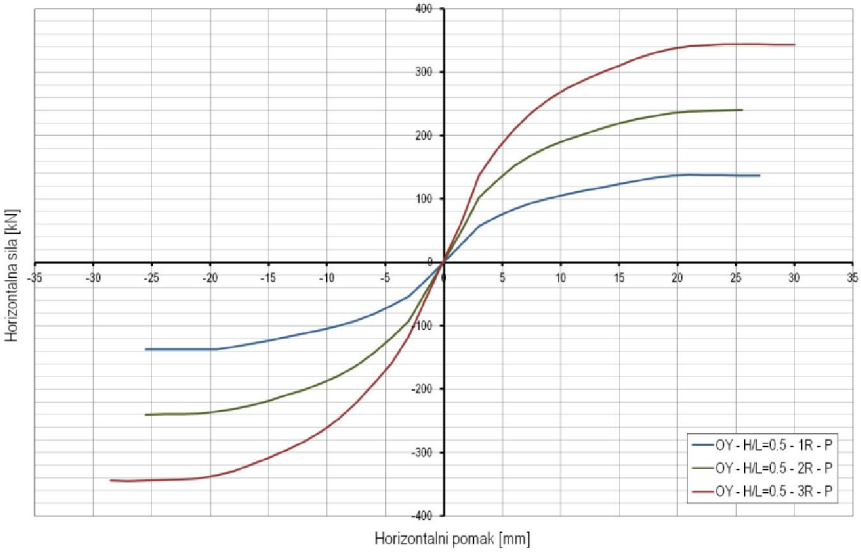
Slika A13 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=1.0; R=1, 2 i 3

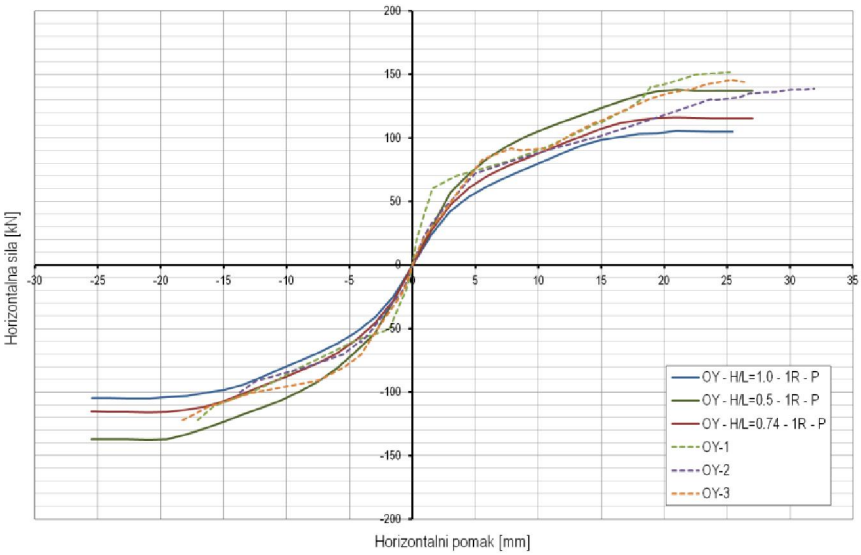


b) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.74; R=1, 2 i 3

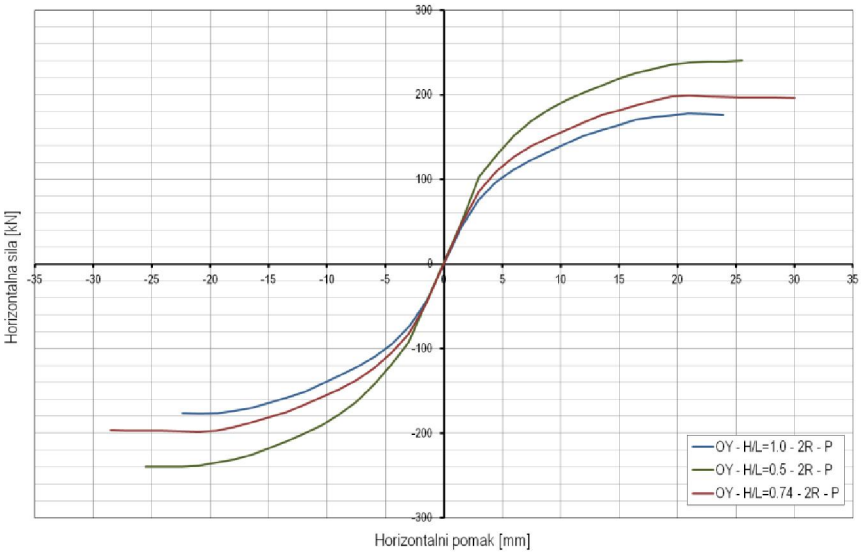


c) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.5; R=1, 2 i 3

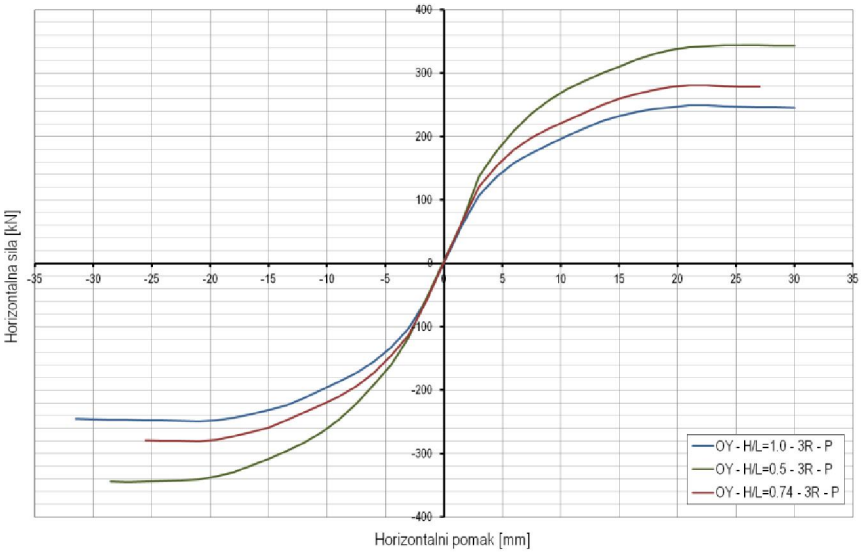
Slika A14 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=1

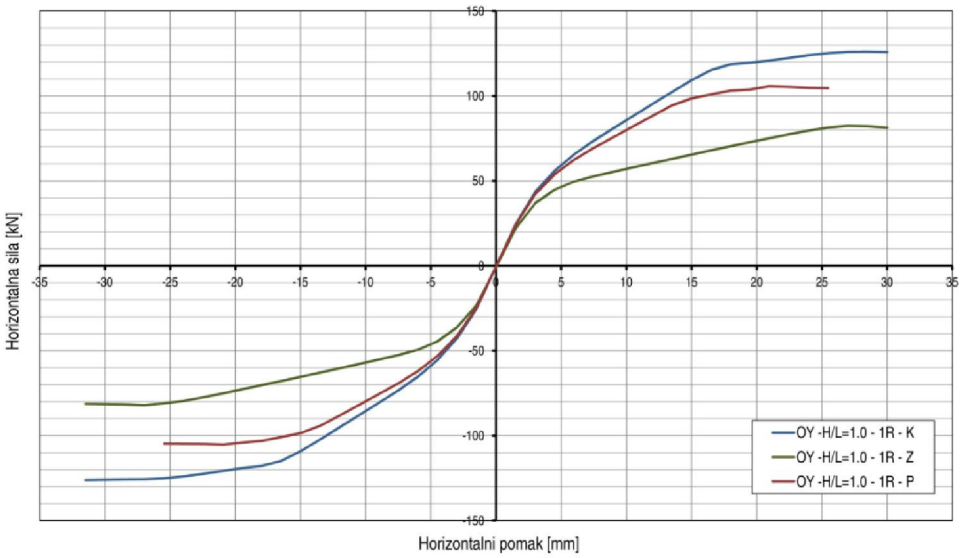


b) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=2

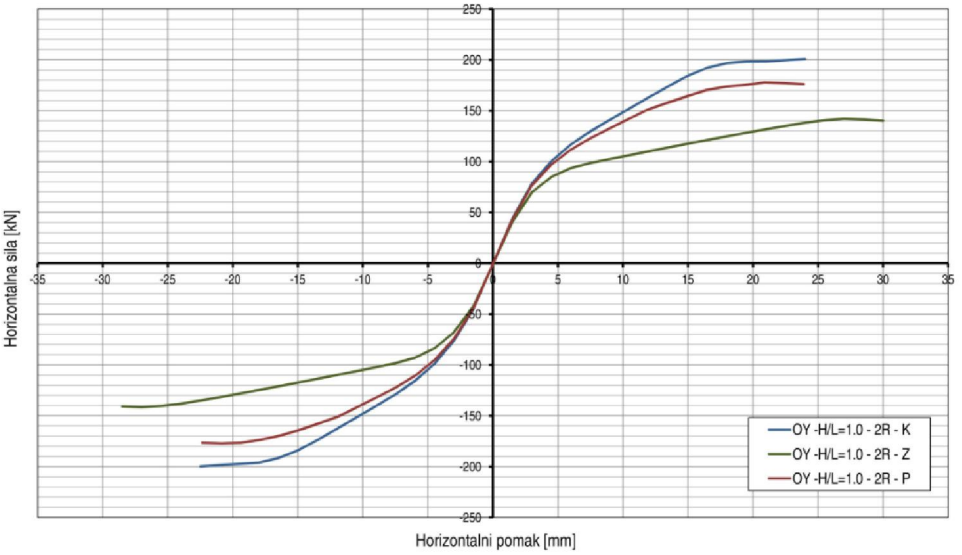


c) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=3

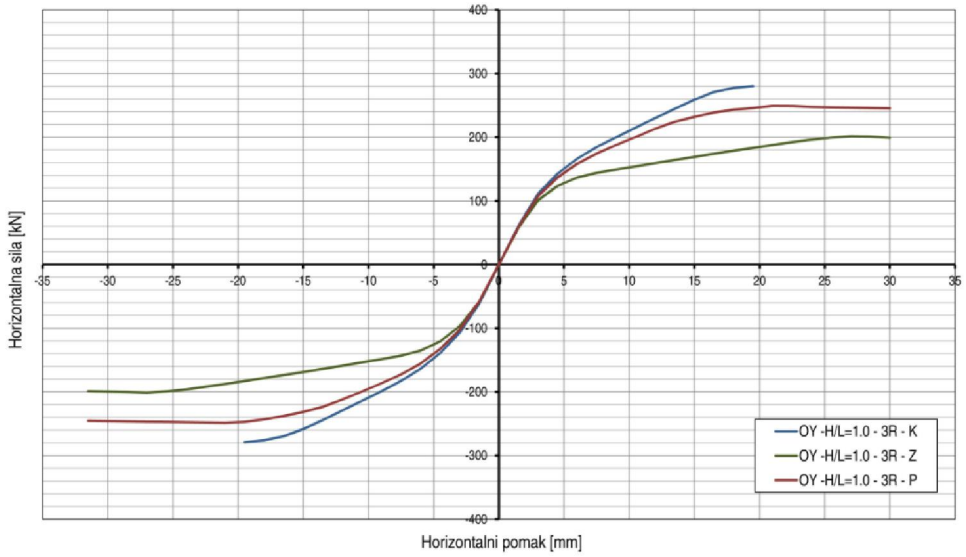
Slika A15 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Jedan raspon (1R); H/L=1.0 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

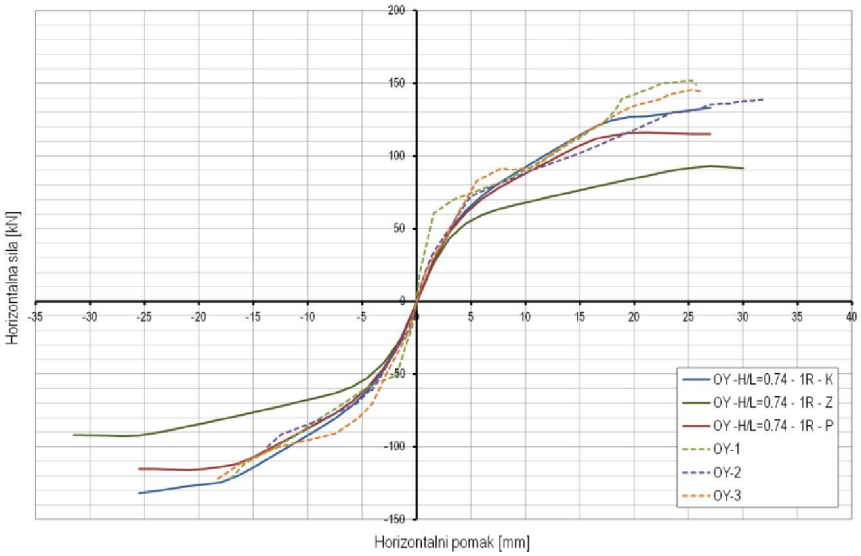


b) Dva raspona (2R); H/L=1.0 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

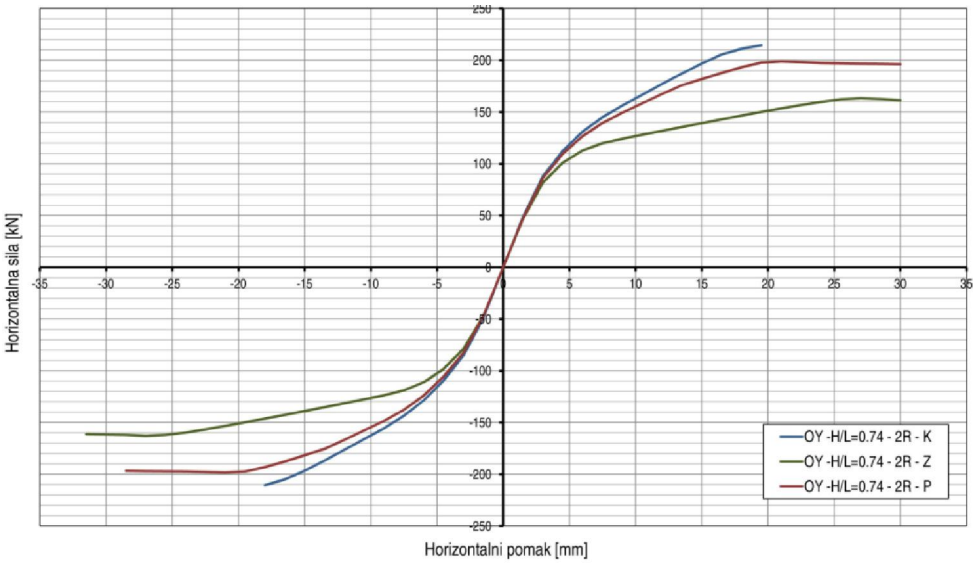


c) Tri raspona (3R); H/L=1.0 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

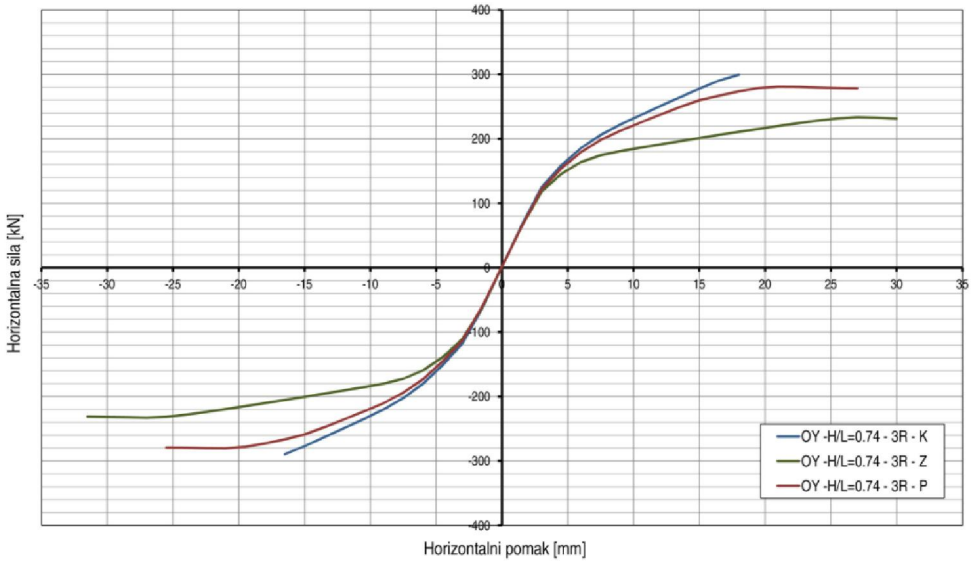
Slika A16 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona



a) Jedan raspon (1R); H/L=0.74 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

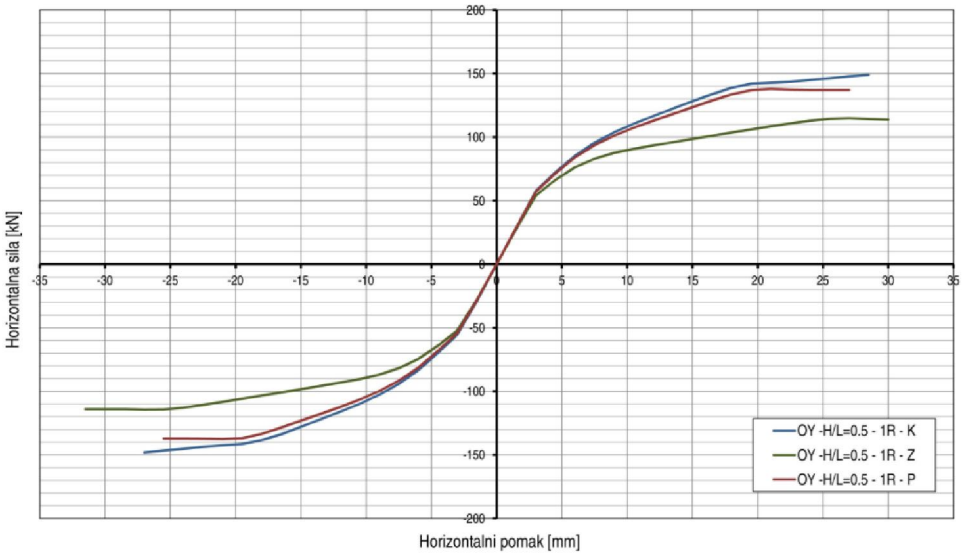


b) Dva raspona (2R); H/L=0.74 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

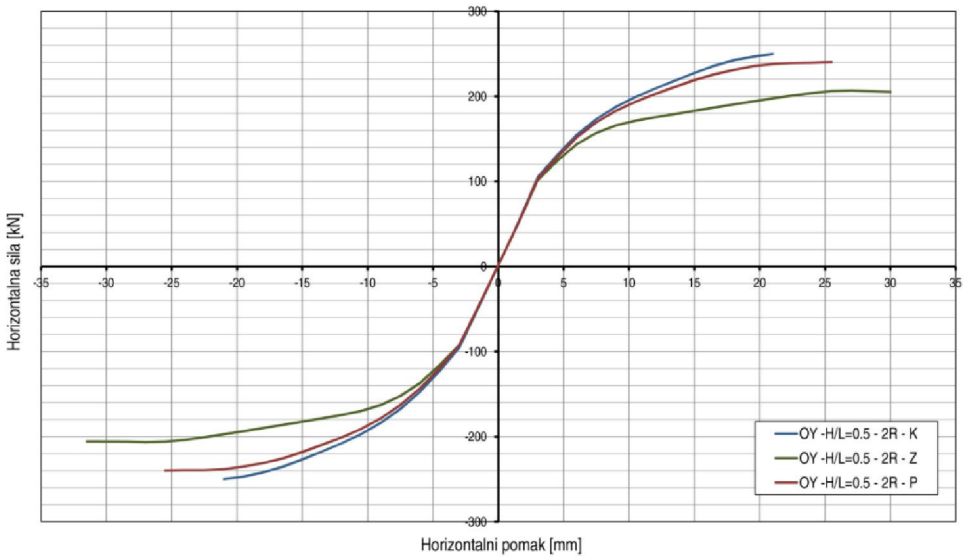


c) Tri raspona (3R); H/L=0.74 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

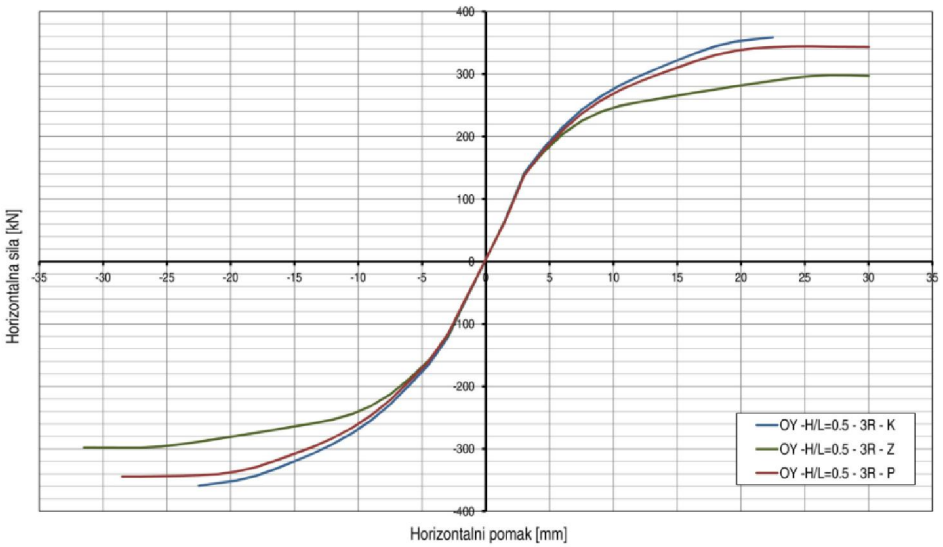
Slika A17 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona



a) Jedan raspon (1R); H/L=0.50 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

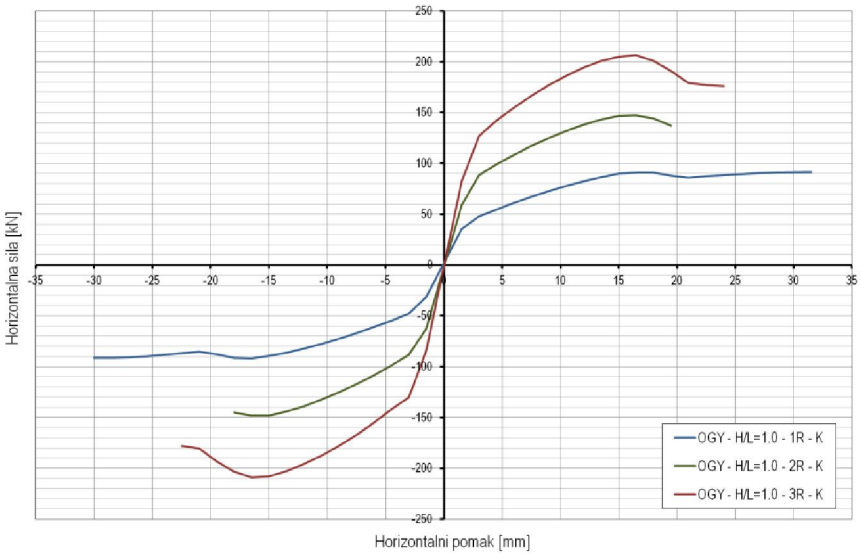


b) Dva raspona (2R); H/L=0.50 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

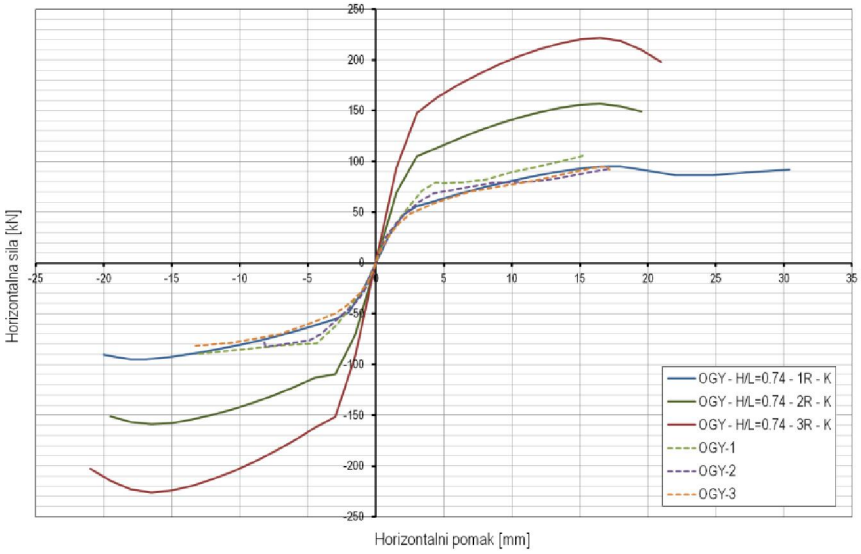


c) Tri raspona (3R); H/L=0.50 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

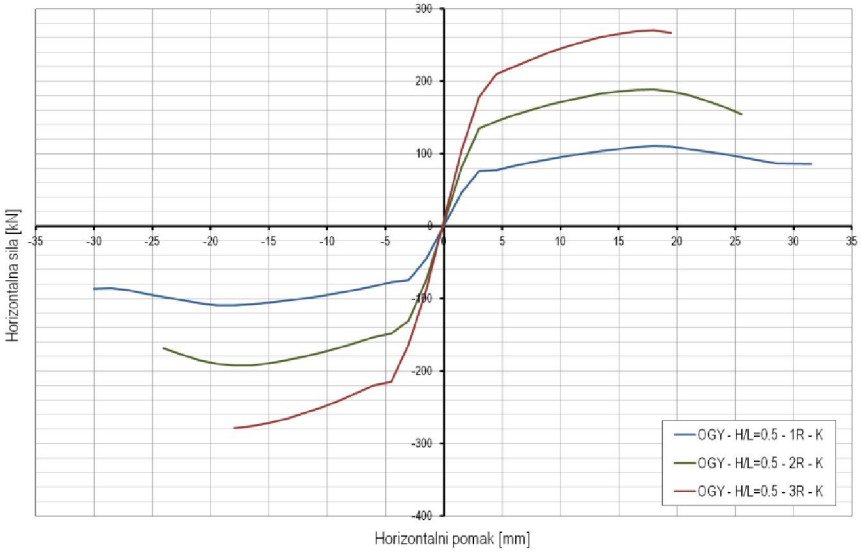
Slika A18 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=1.0; R=1, 2 i 3

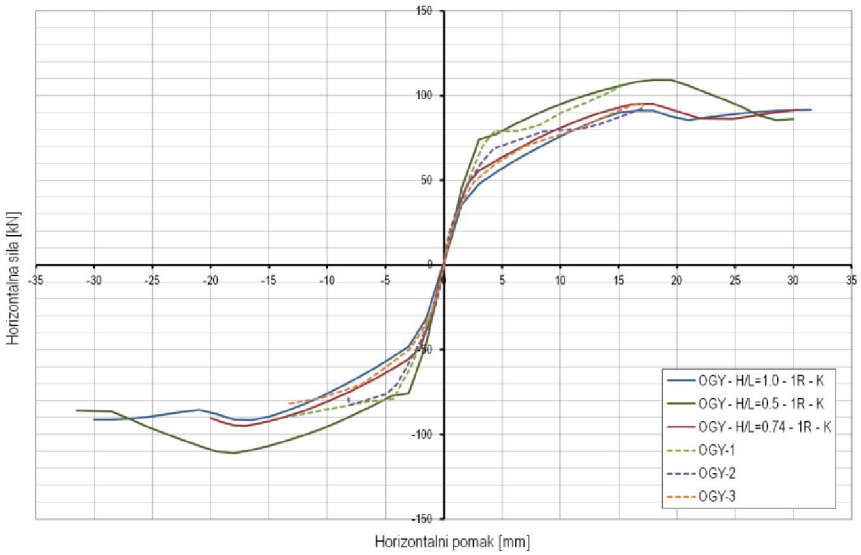


b) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.74; R=1, 2 i 3

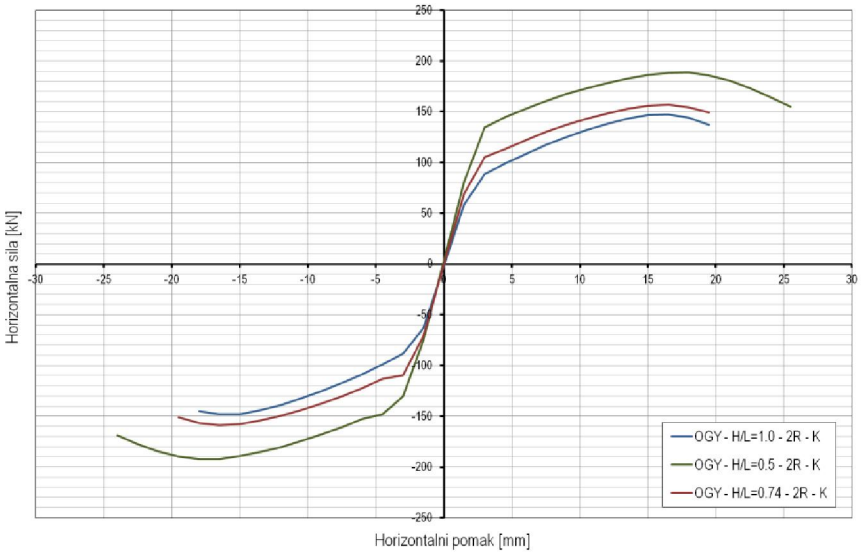


c) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50; R=1, 2 i 3

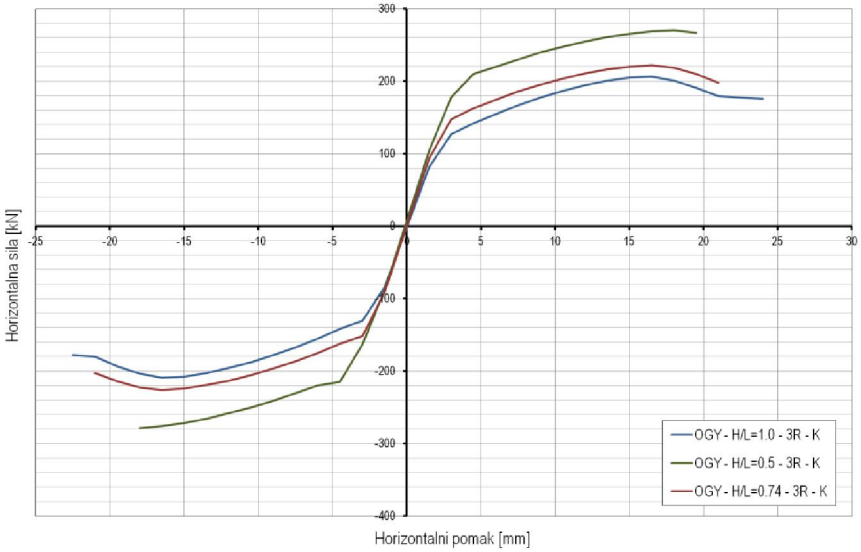
Slika A19 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50, 0.74 i 1.0; R=1

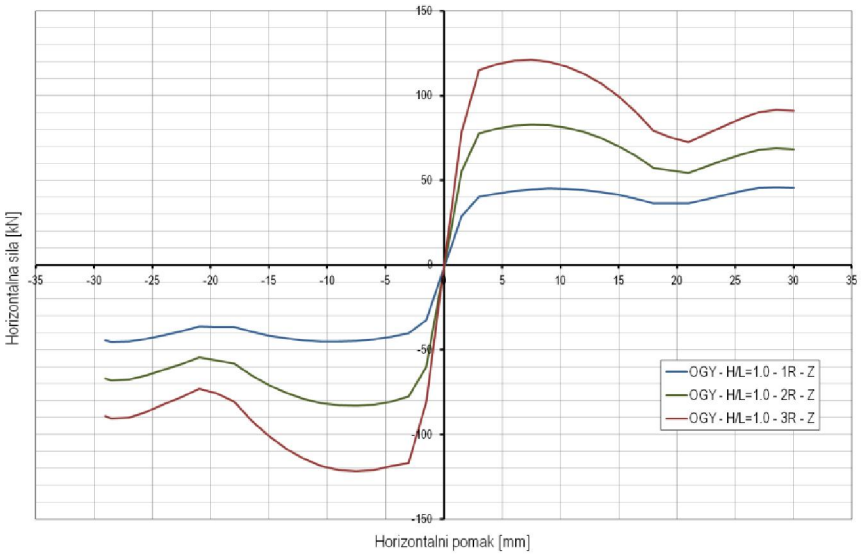


b) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50, 0.74 i 1.0; R=2

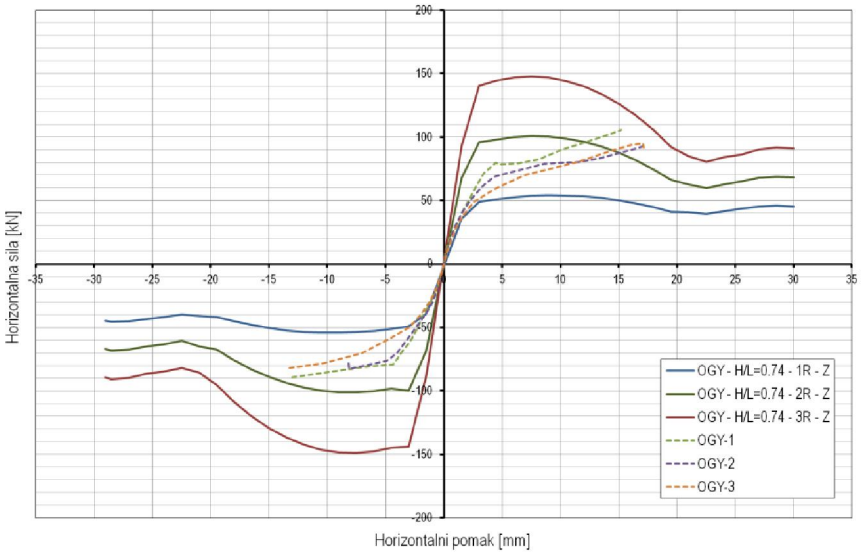


c) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.50, 0.74 i 1.0; R=3

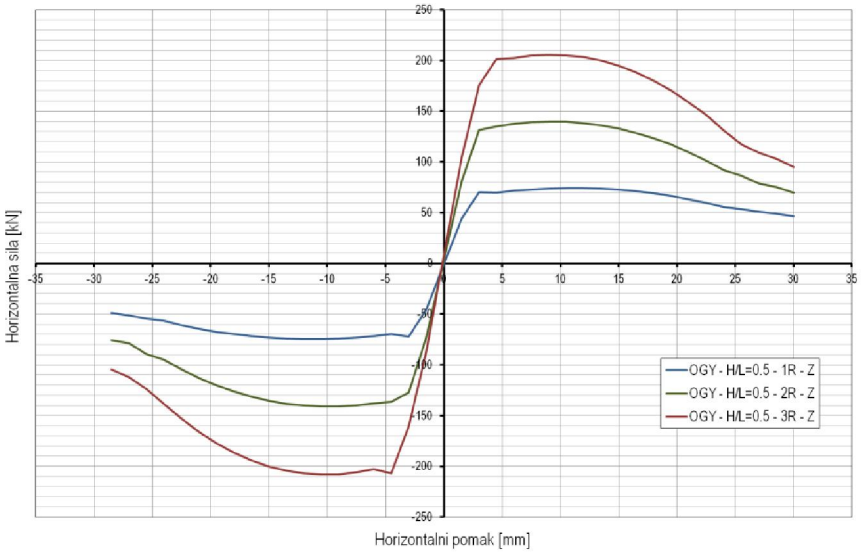
Slika A20 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Zglobni priključak (Z) – H/L=1.0; R=1, 2 i 3

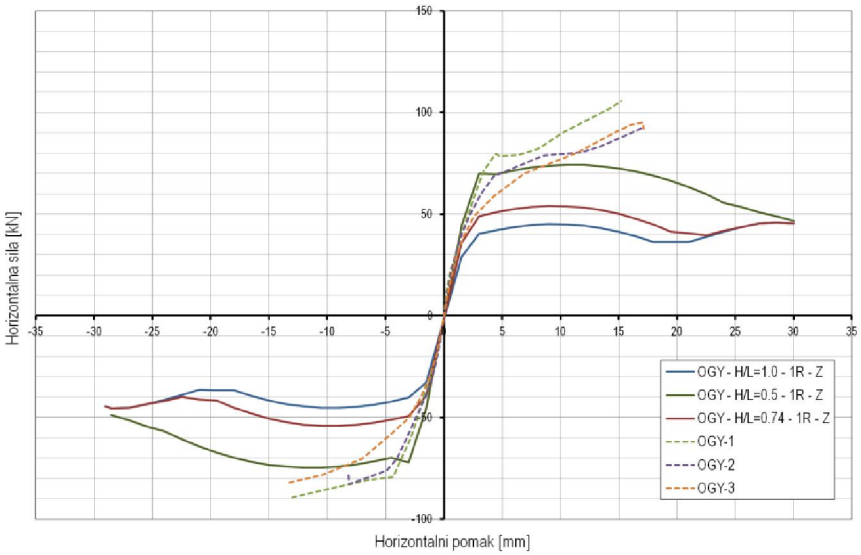


b) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.74; R=1, 2 i 3

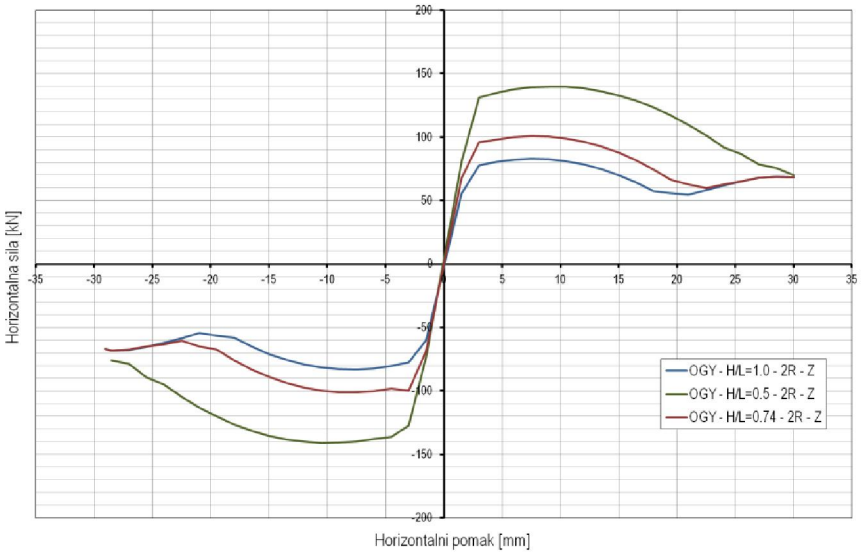


c) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50; R=1, 2 i 3

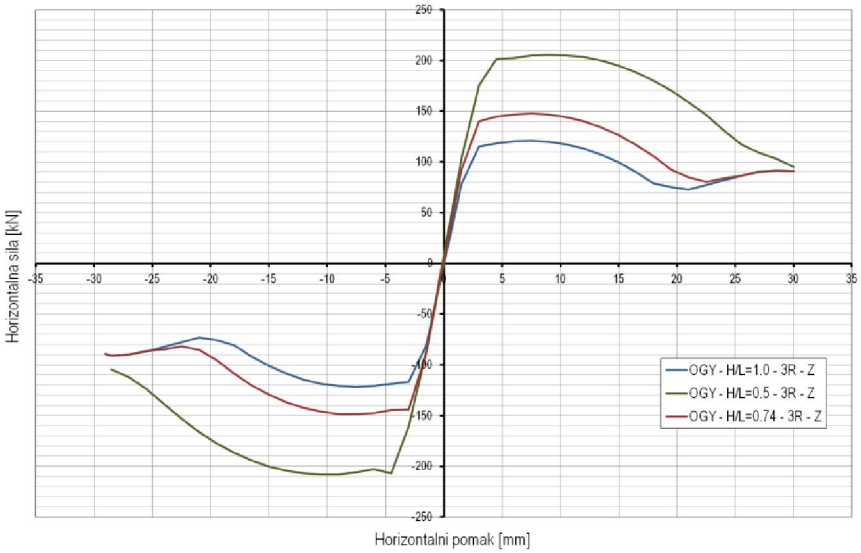
Slika A21 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=1

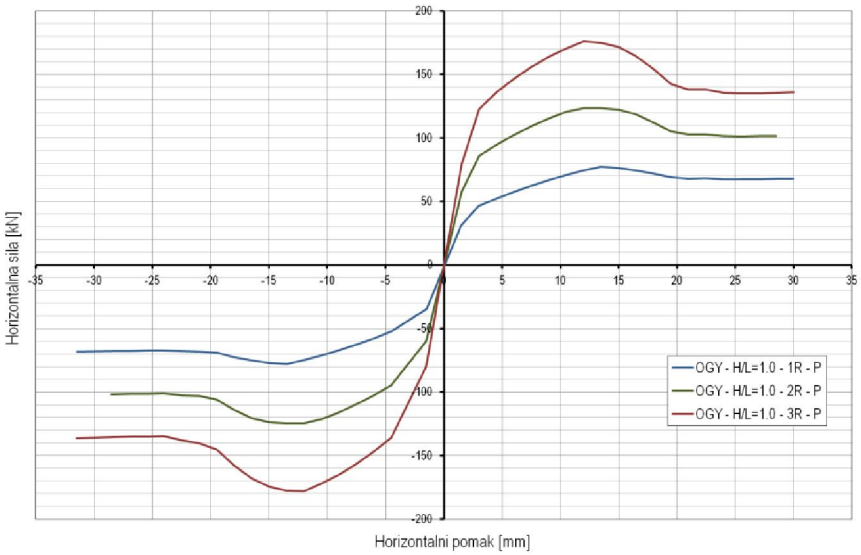


b) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=2

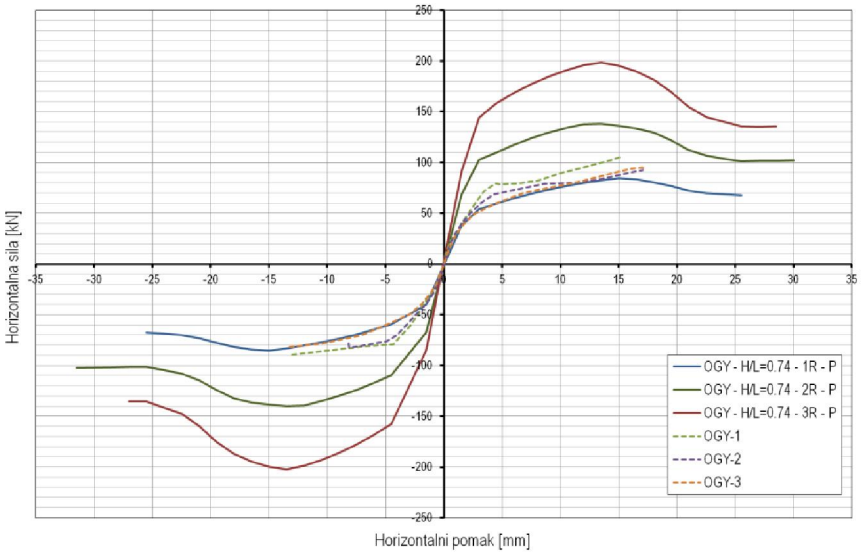


c) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=3

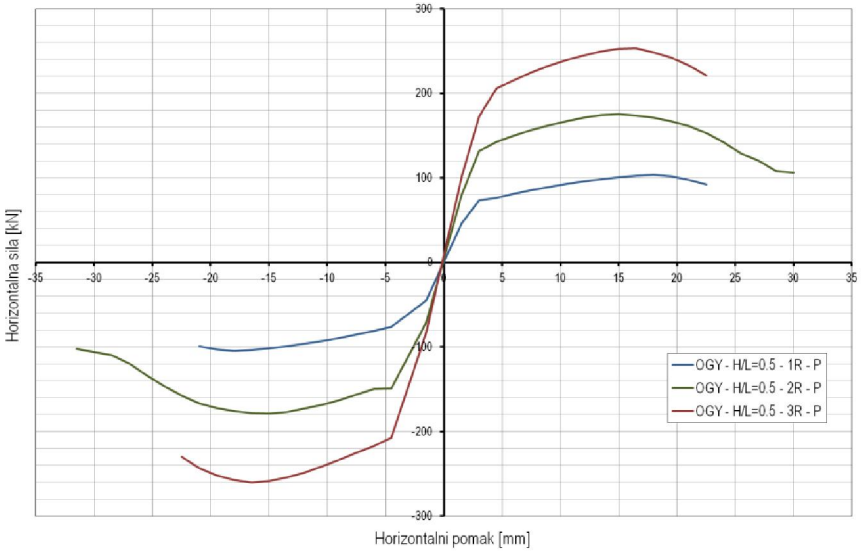
Slika A22 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=1.0; R=1, 2 i 3

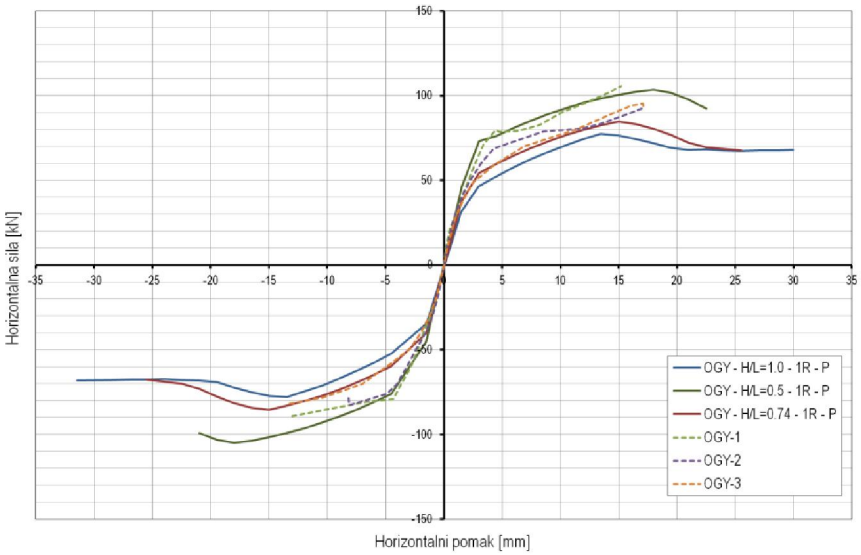


b) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.74; R=1, 2 i 3

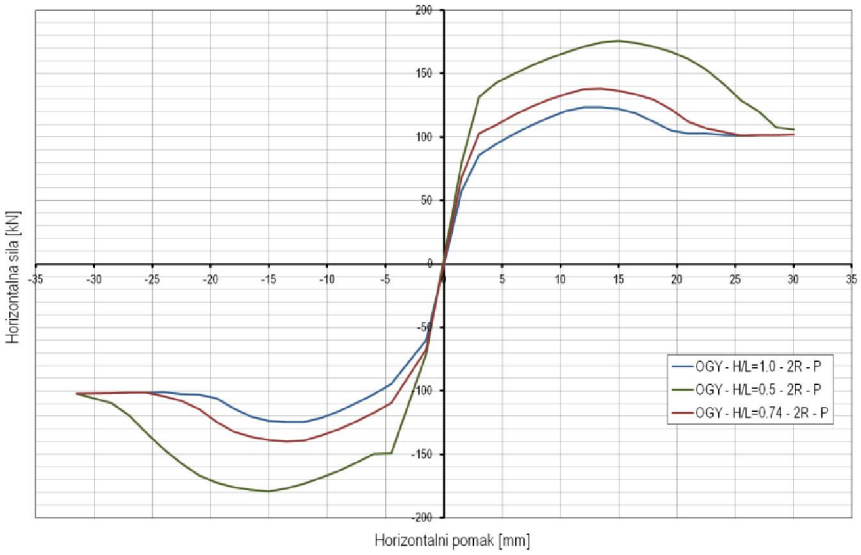


c) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.5; R=1, 2 i 3

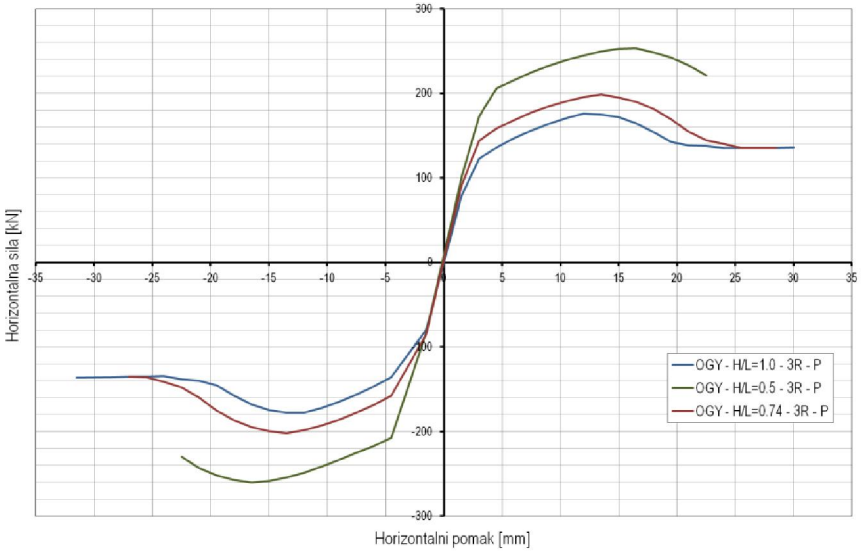
Slika A23 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=1

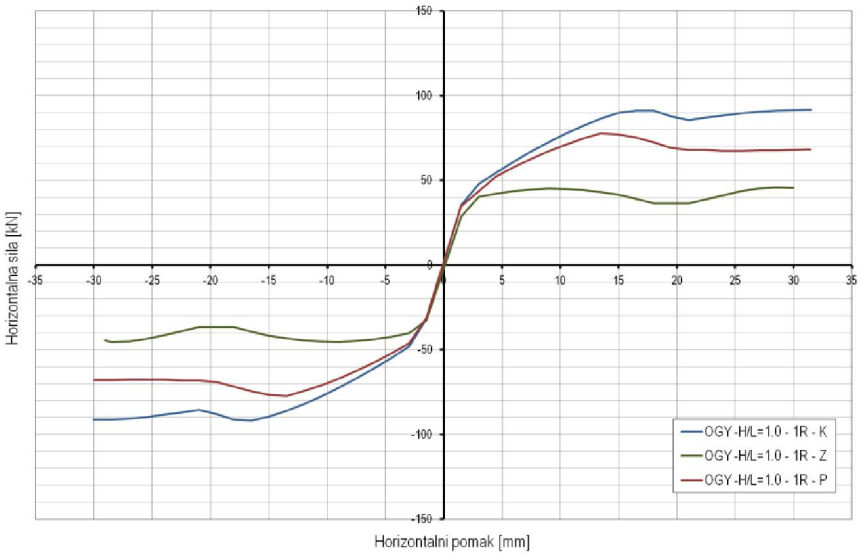


b) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=2

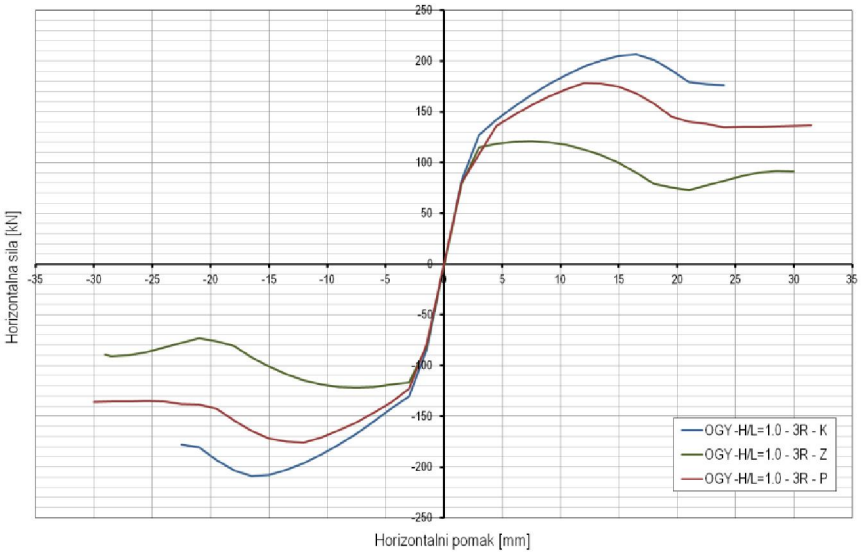


c) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50, 0.74, 1.0; R=3

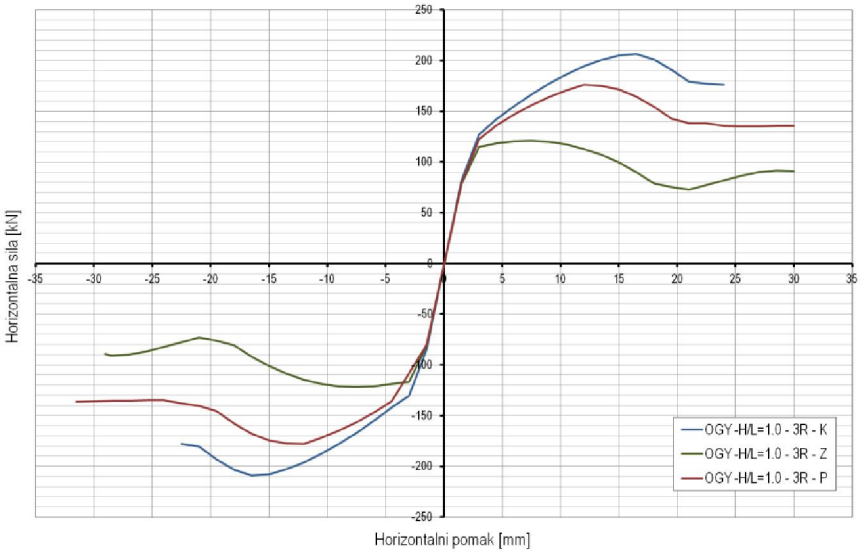
Slika A24 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L



a) Jedan raspon (1R); H/L=1.0 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

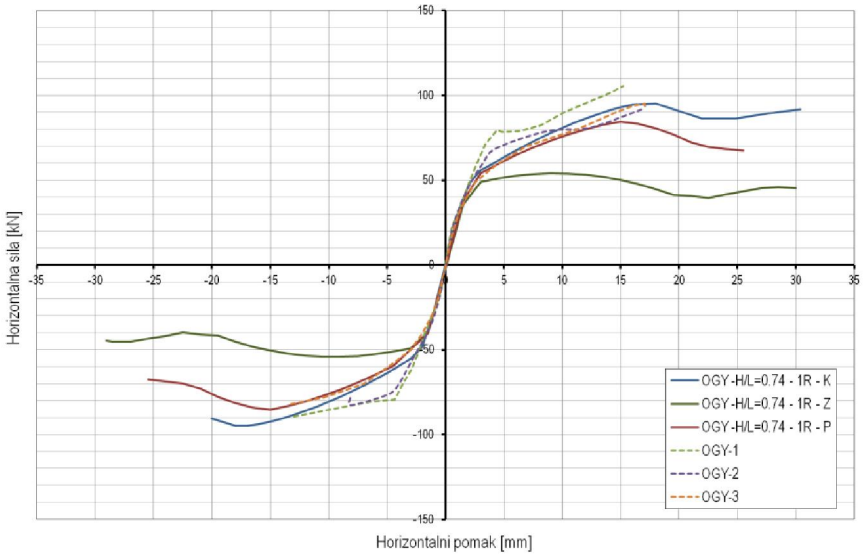


b) Dva raspona (2R); H/L=1.0 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

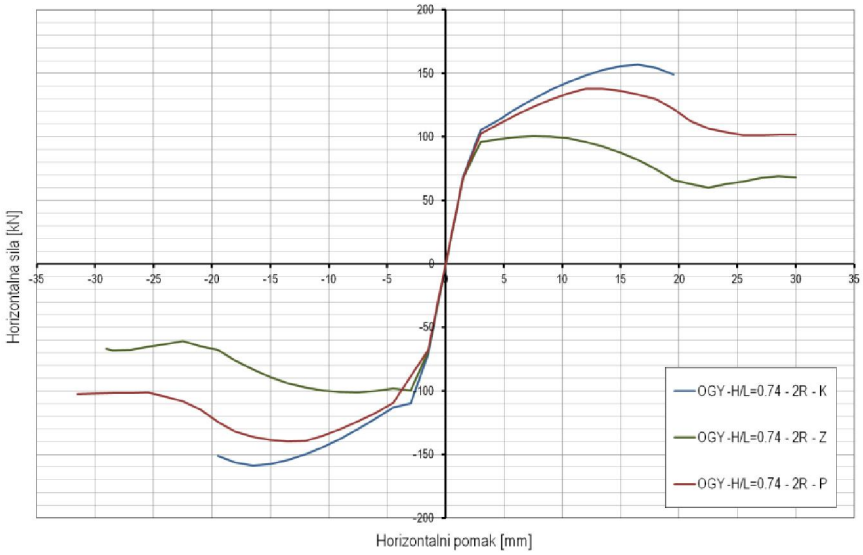


c) Tri raspona (3R); H/L=1.0 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

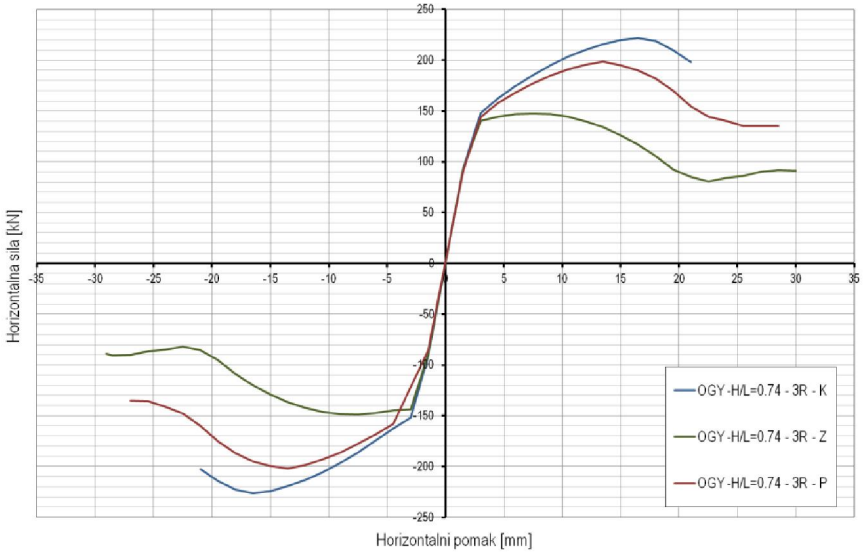
Slika A25 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona



a) Jedan raspon (1R); H/L=0.74 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

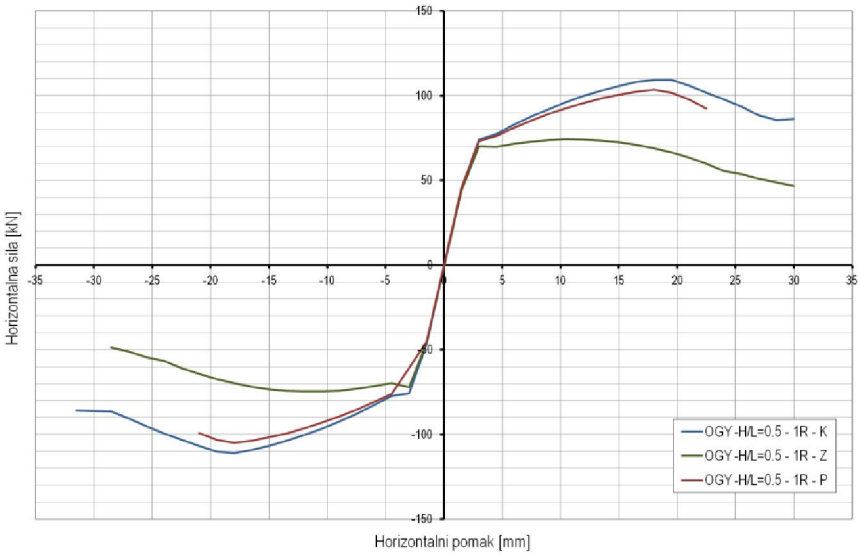


b) Dva raspona (2R); H/L=0.74 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

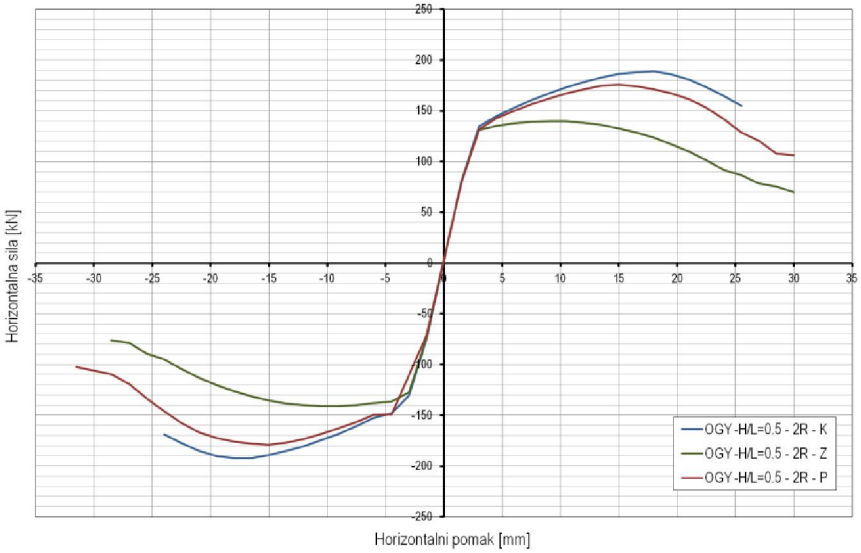


c) Tri raspona (3R); H/L=0.74 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

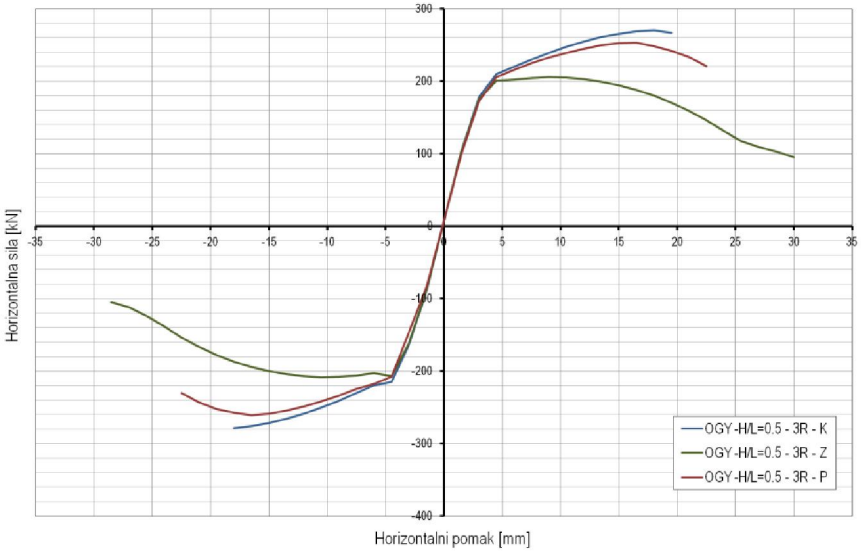
Slika A26 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona



a) Jedan raspon (1R); H/L=0.50 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

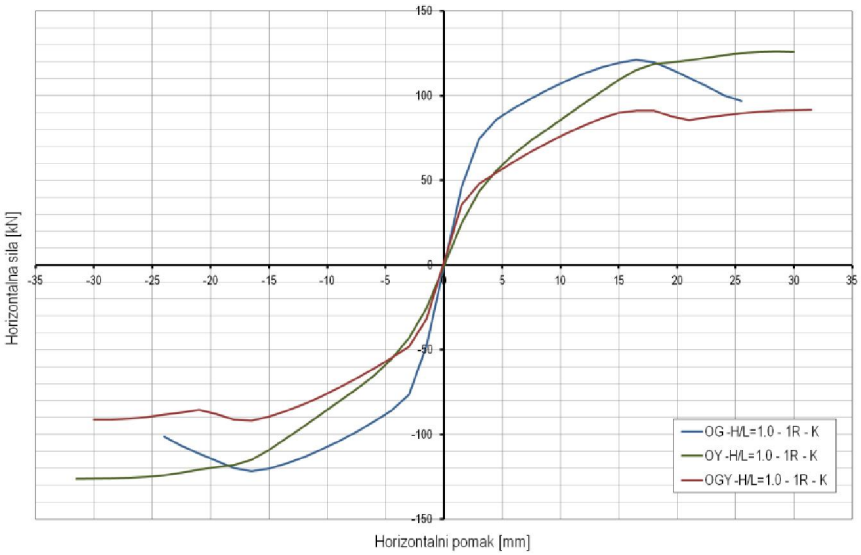


b) Dva raspona (2R); H/L=0.50 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

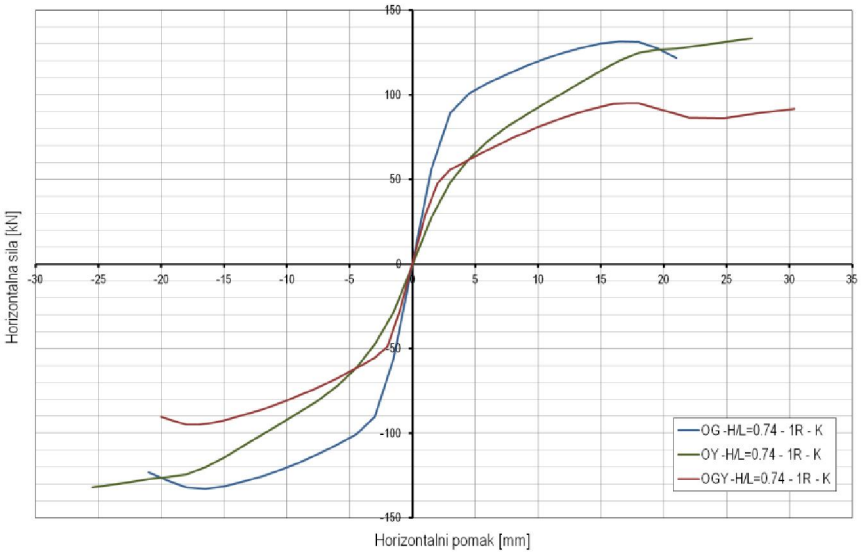


c) Tri raspona (3R); H/L=0.50 – nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z)

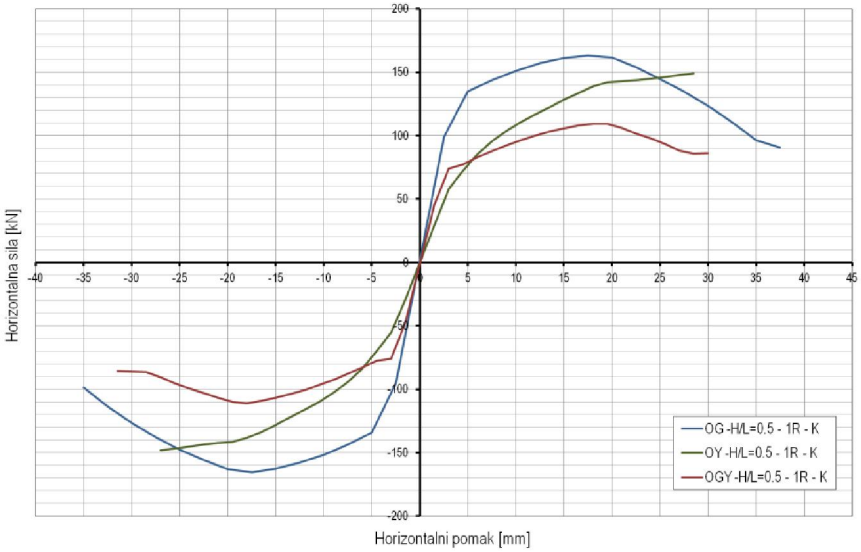
Slika A27 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=1.0; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

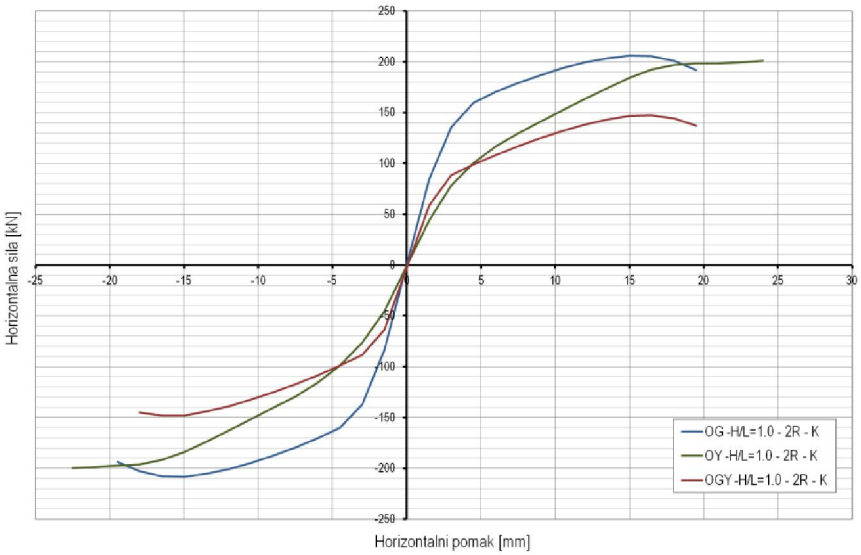


b) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.74; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

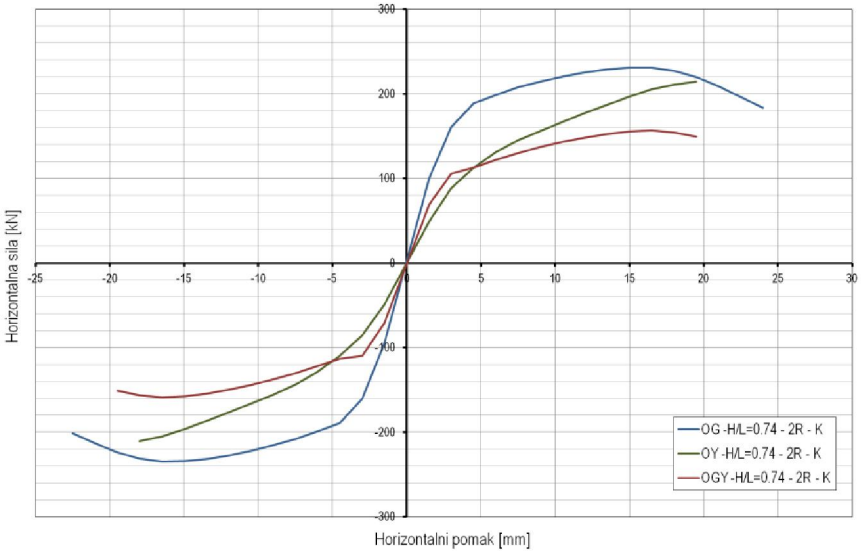


c) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.5; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

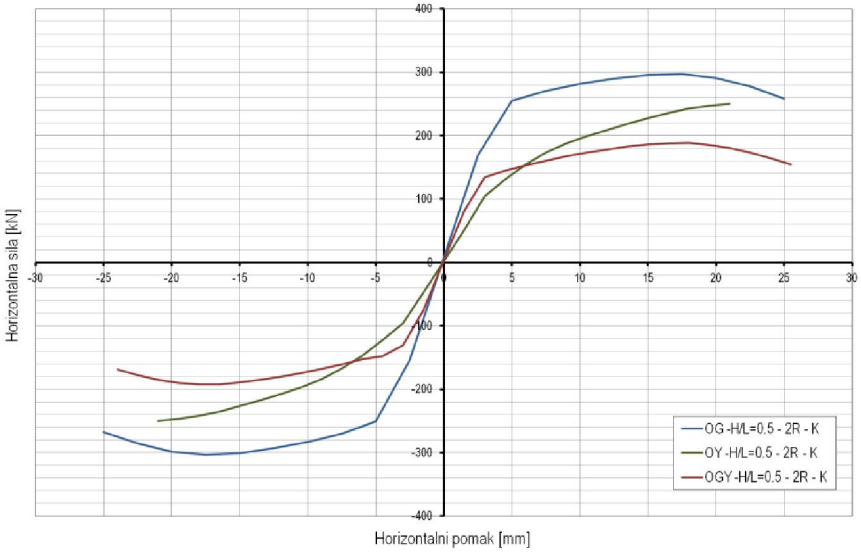
Slika A28 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna



a) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=1.0; R=2; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

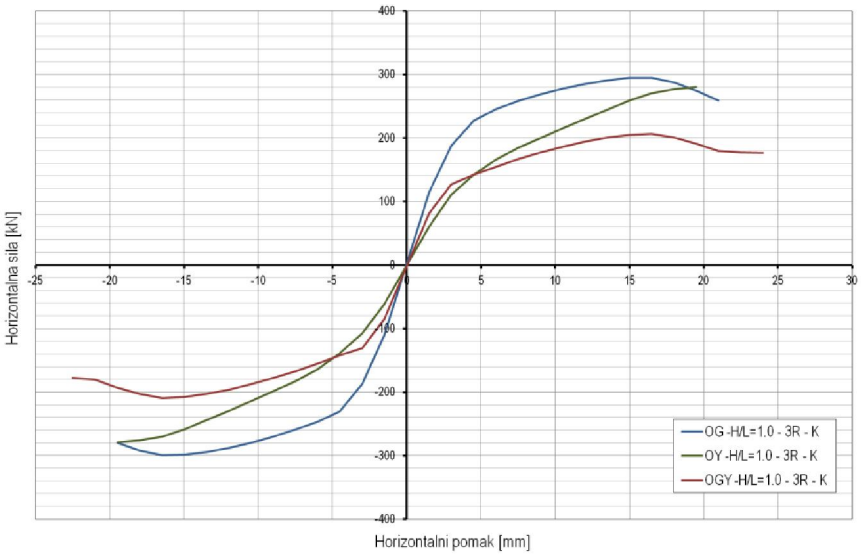


b) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.74; R=2; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

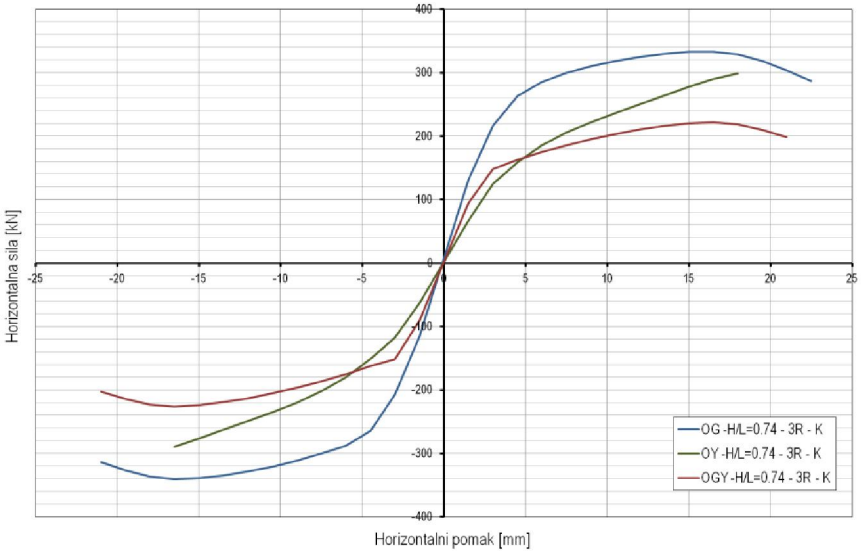


c) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.5; R=2; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

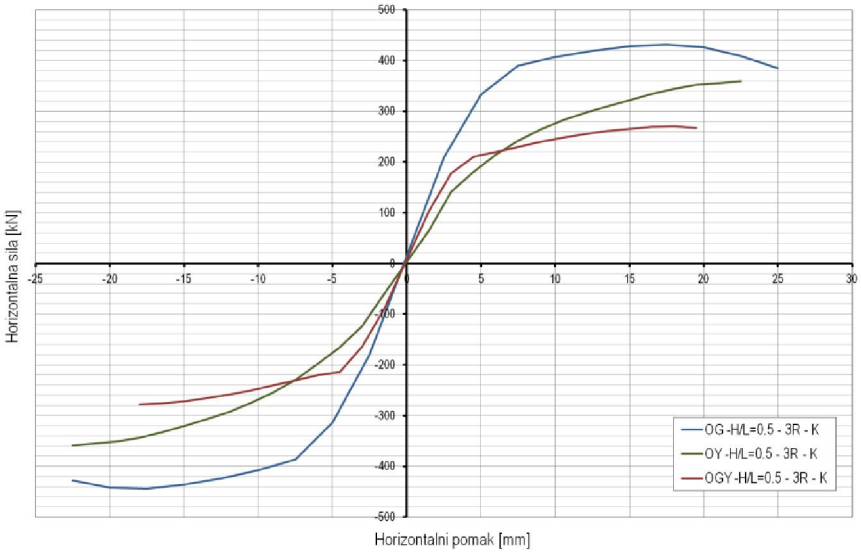
Slika A29 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna



a) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=1.0; R=3; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

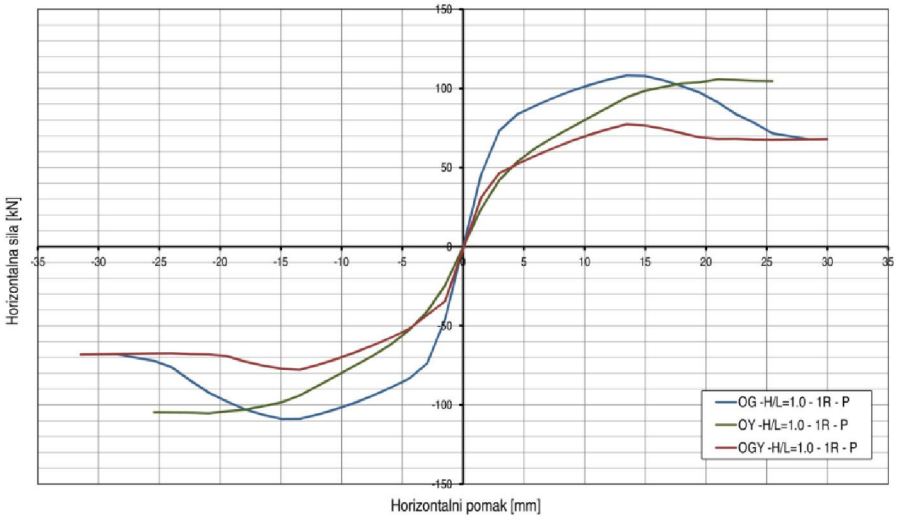


b) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.74; R=3; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

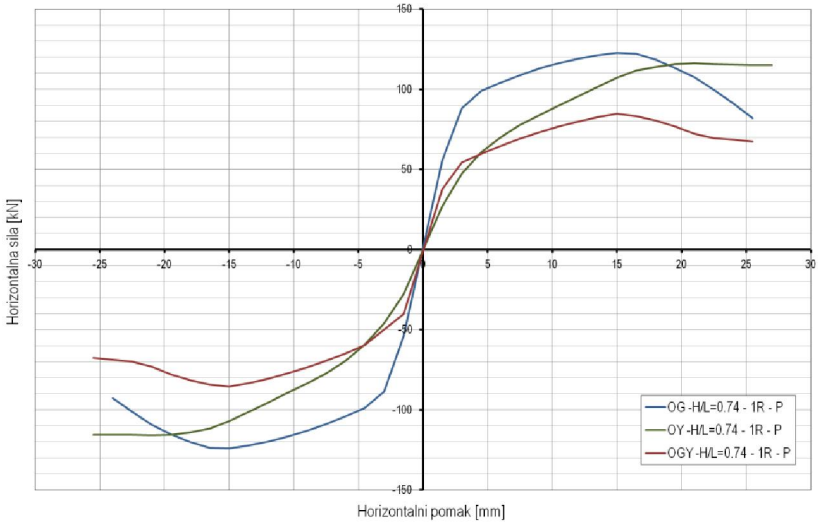


c) Nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.5; R=3; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

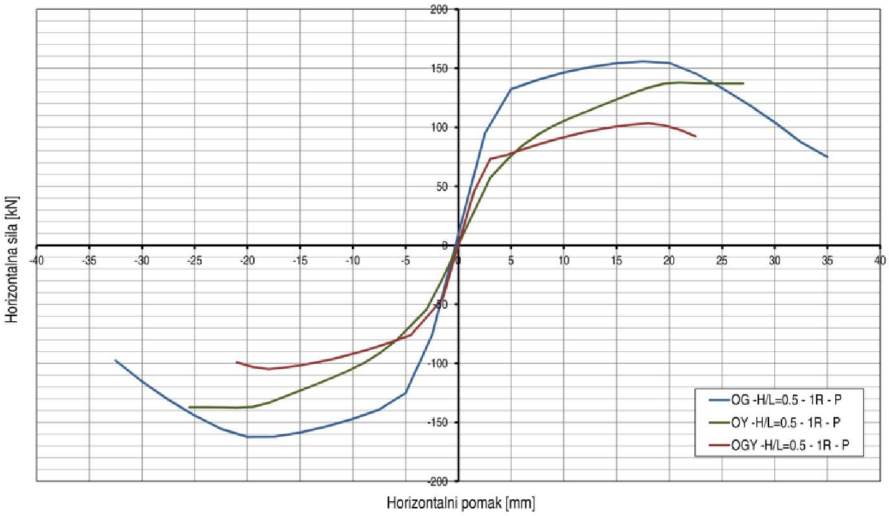
Slika A30 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna



a) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=1.0; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

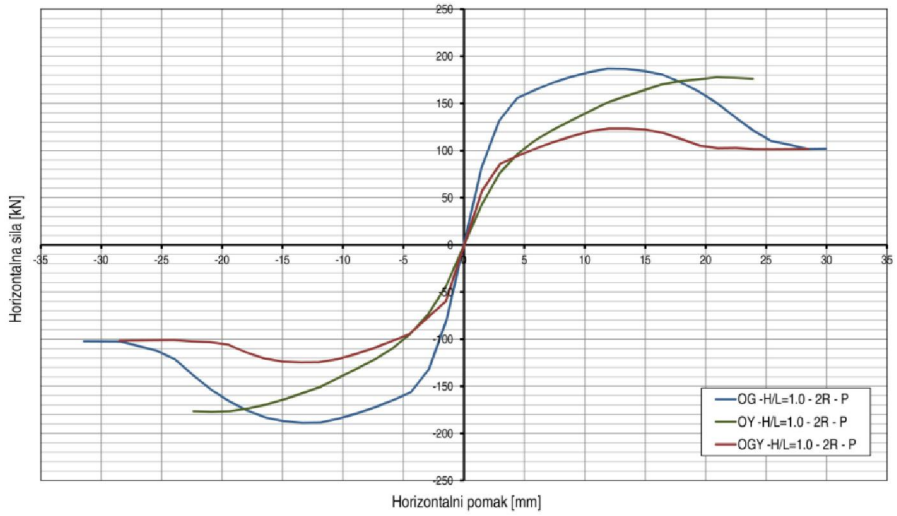


b) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.74; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

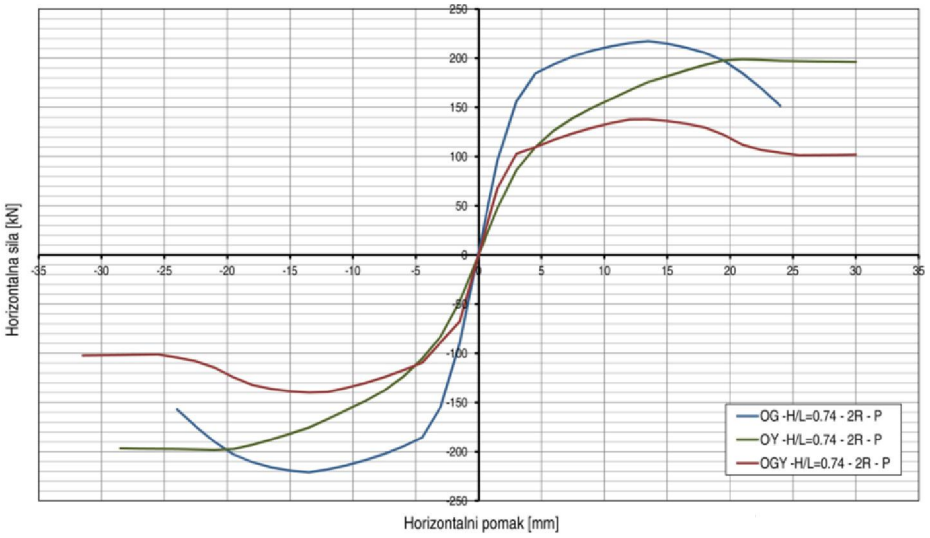


c) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.50; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

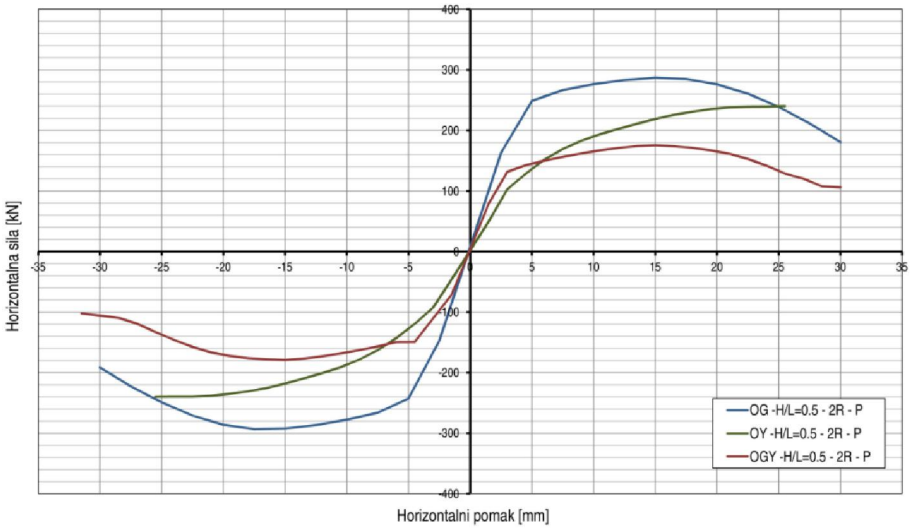
Slika A31 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna



a) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=1.0; R=2; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

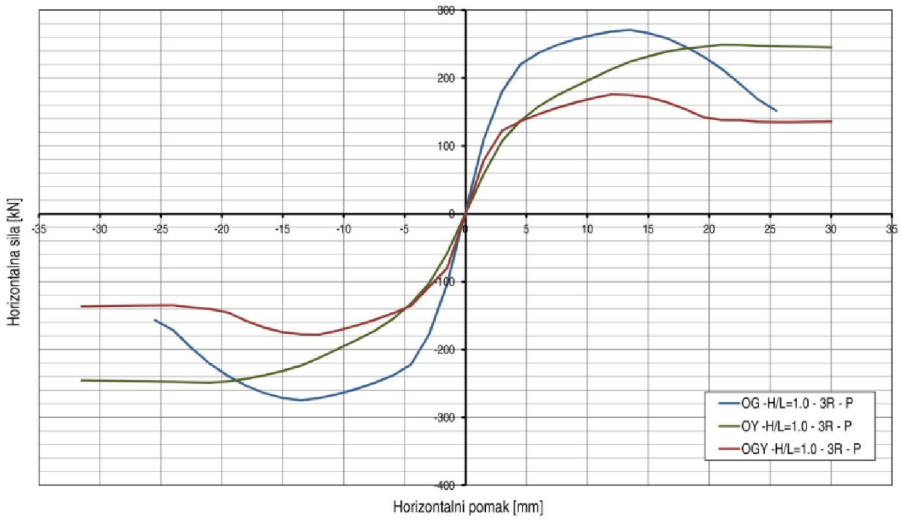


b) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.74; R=2; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

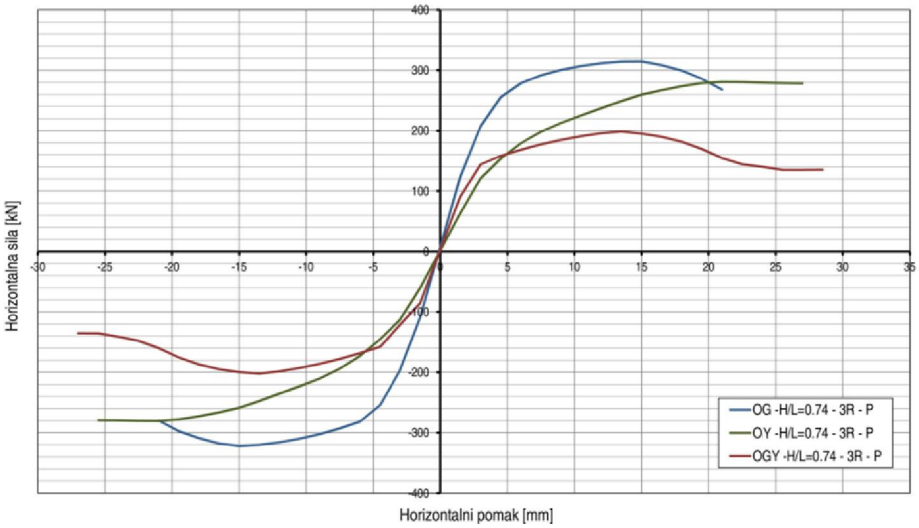


c) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.5; R=2; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

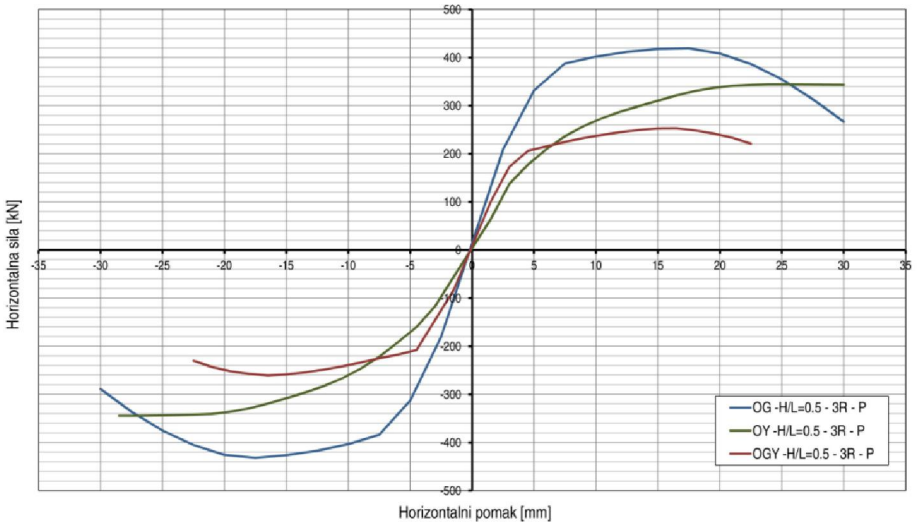
Slika A32 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna



a) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=1.0; R=3; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

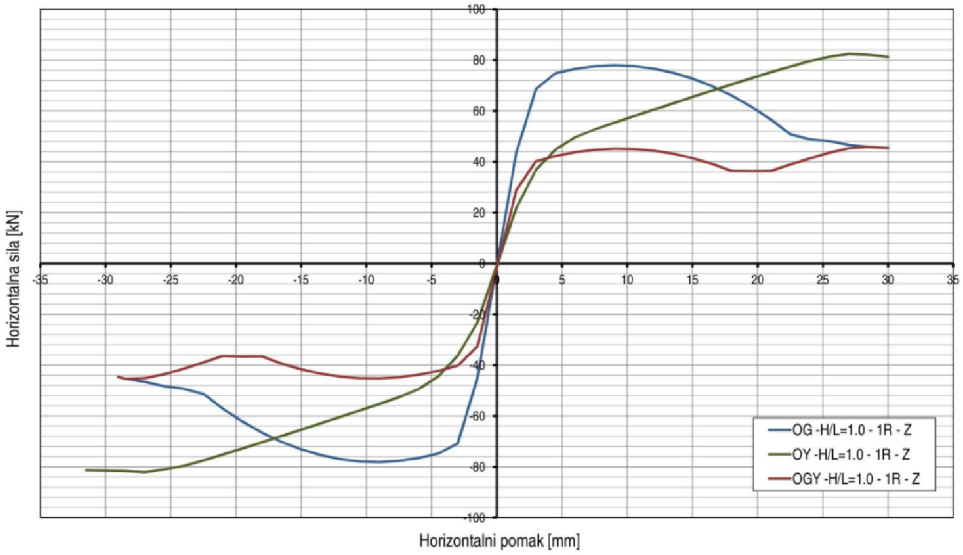


b) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.74; R=3; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

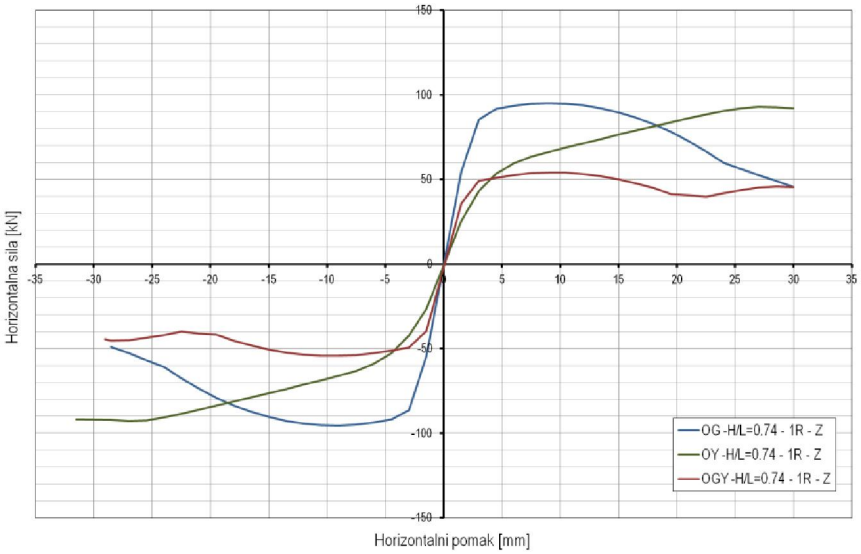


c) Djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.5; R=3; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

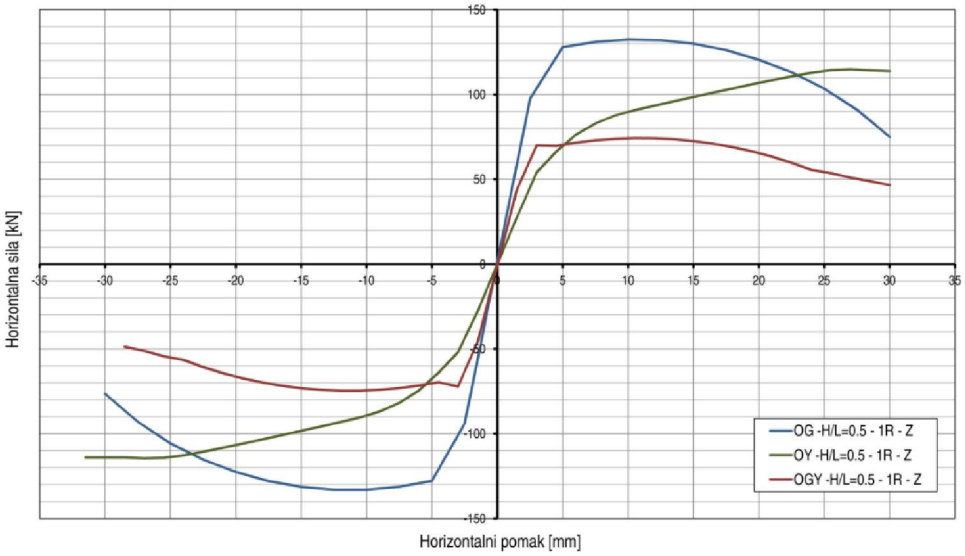
Slika A33 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna



a) Zglobni priključak (Z) – H/L=1.0; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

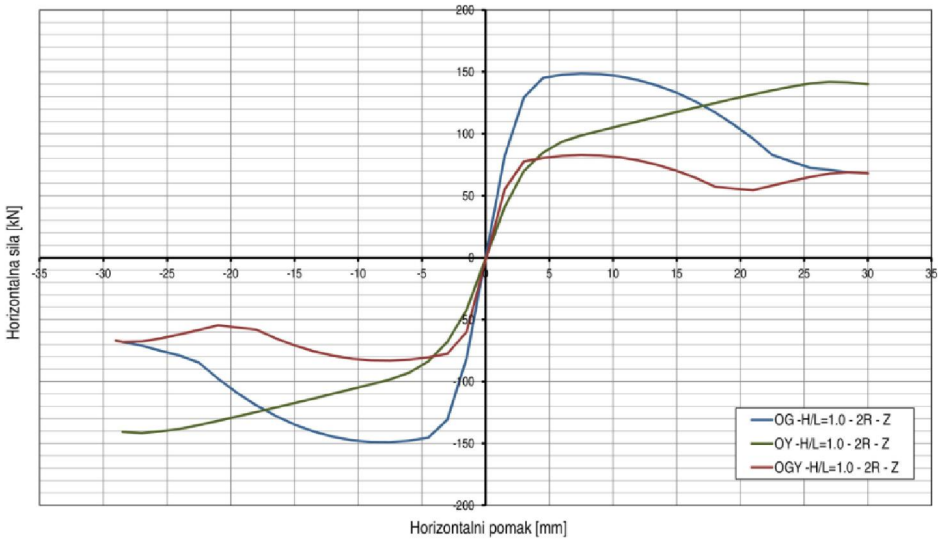


b) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.74; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

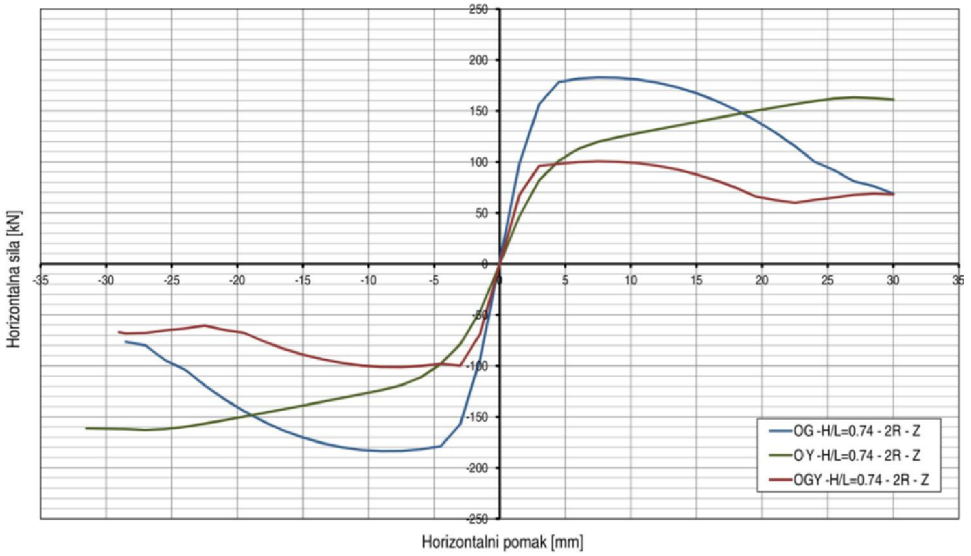


c) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.5; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

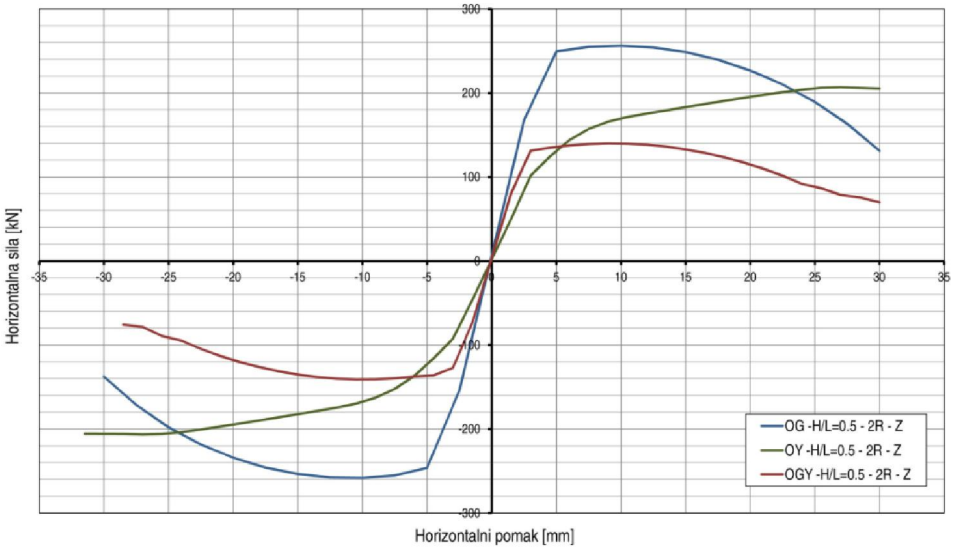
Slika A34 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna



a) Zglobni priključak (Z) – H/L=1.0; R=2; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

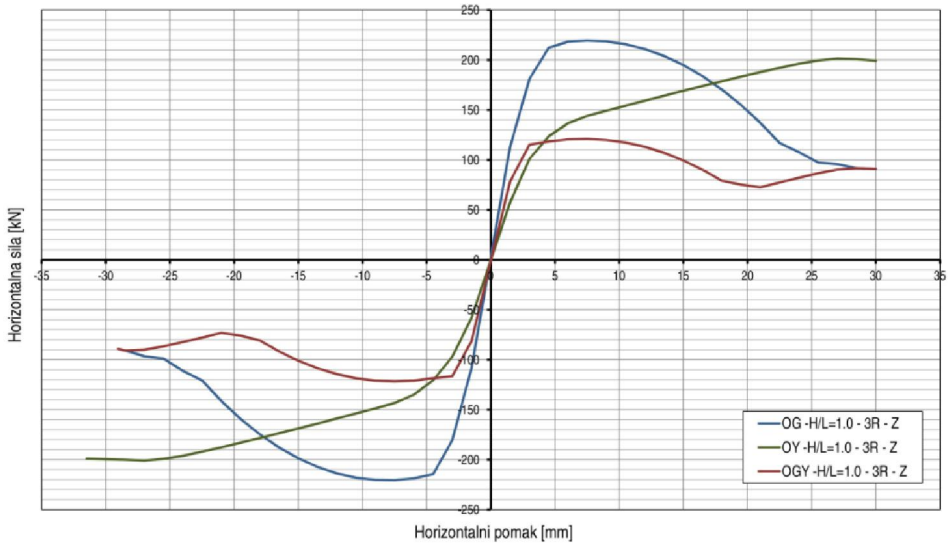


b) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.74; R=2; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

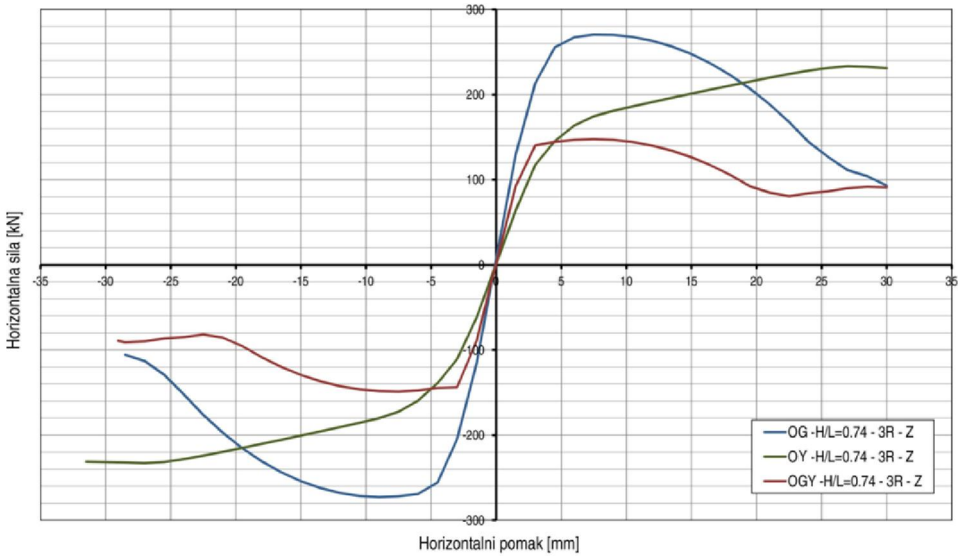


c) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.5; R=2; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

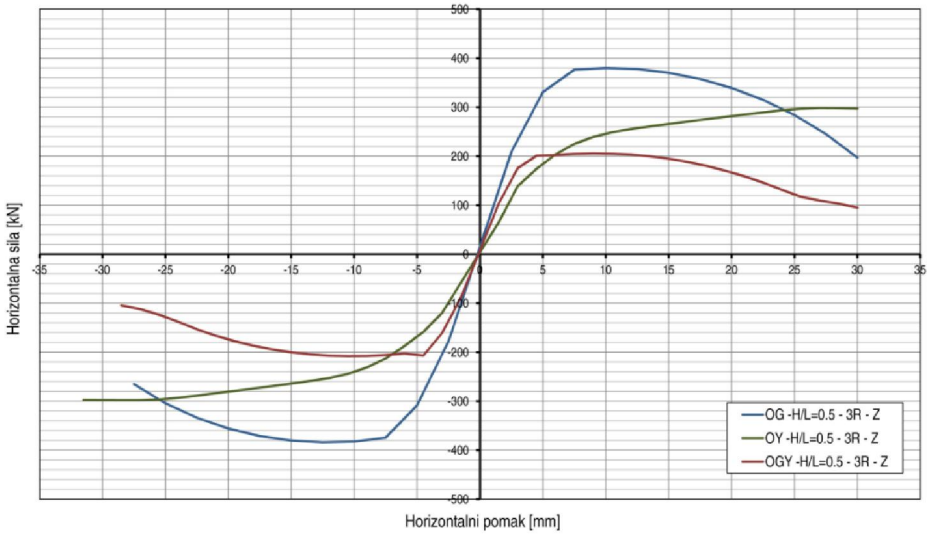
Slika A35 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna



a) Zglobni priključak (Z) – H/L=1.0; R=3; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

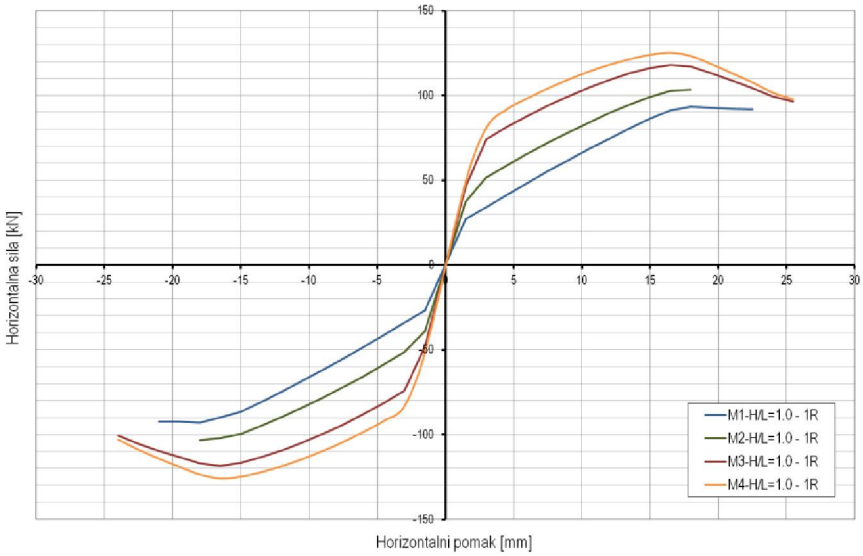


b) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.74; R=3; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

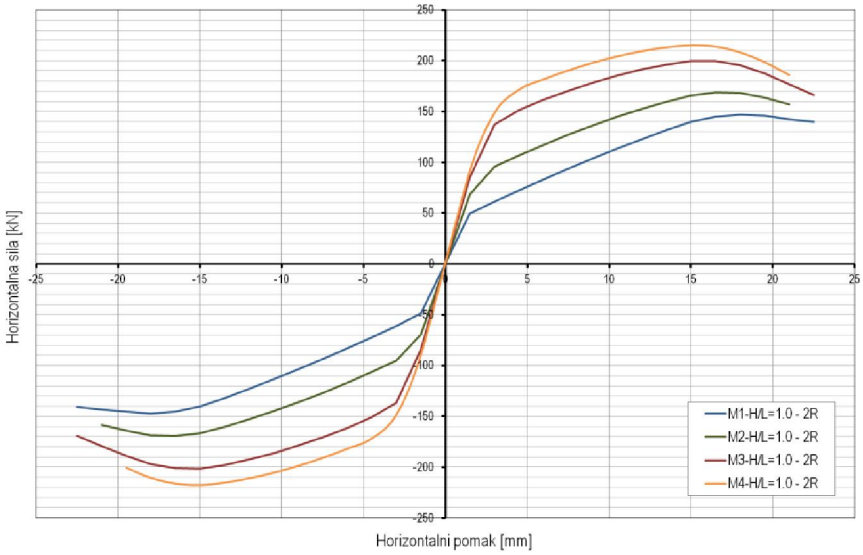


c) Zglobni priključak (Z) – H/L=0.5; R=3; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY)

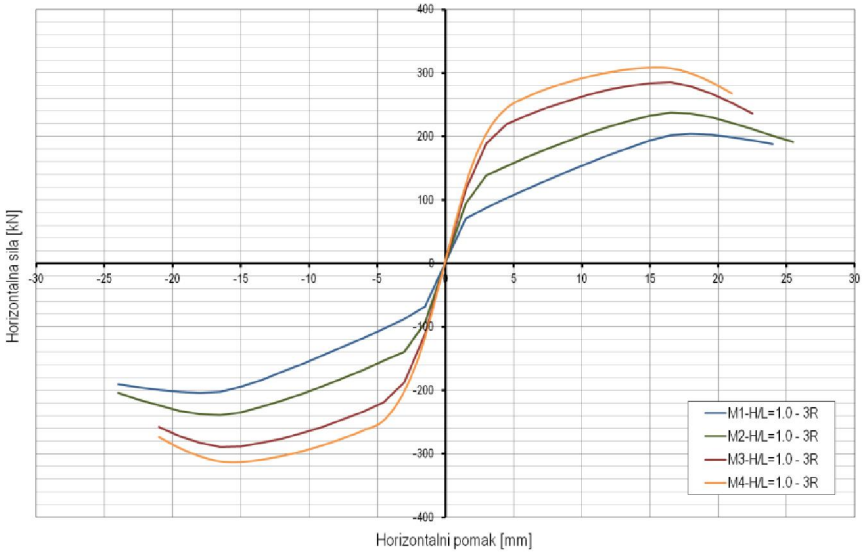
Slika A36 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna



a) Nepopustljivi priključak – H/L=1.0; R=1; M=1, 2, 3 i 4

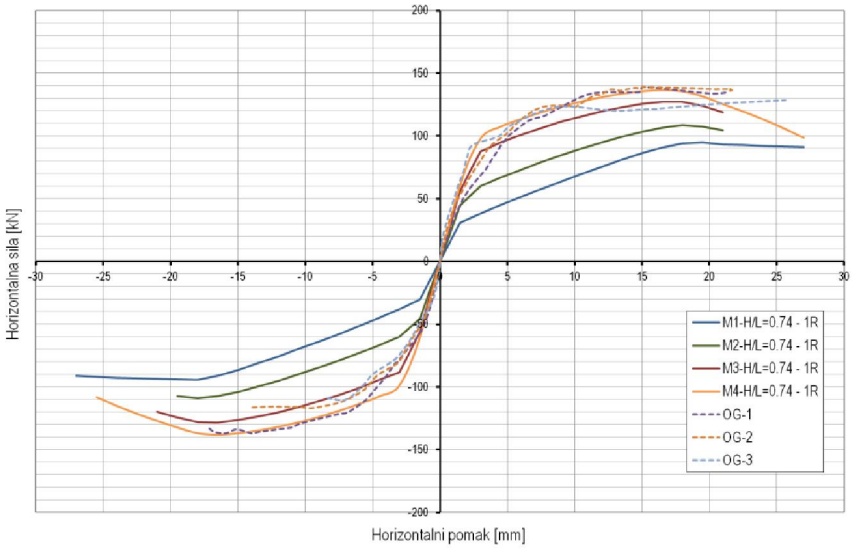


b) Nepopustljivi priključak – H/L=1.0; R=2; M=1, 2, 3 i 4

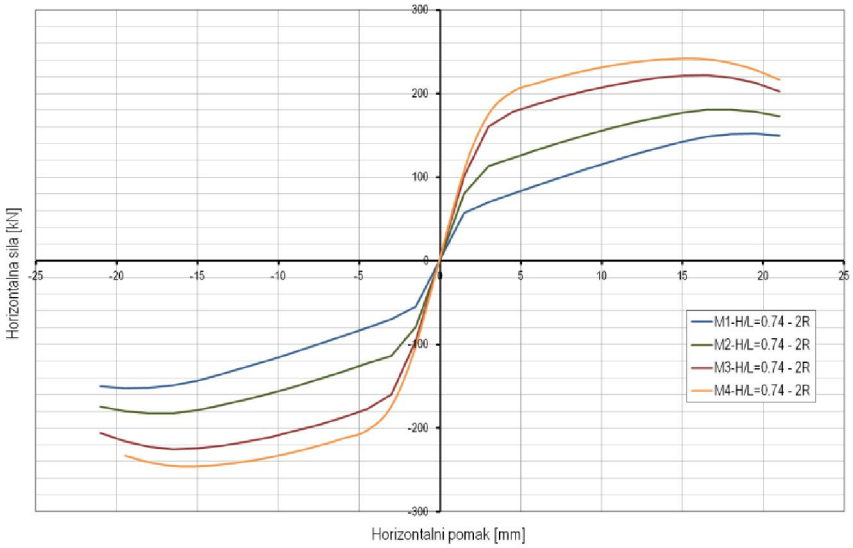


c) Nepopustljivi priključak – H/L=1.0; R=3; M=1, 2, 3 i 4

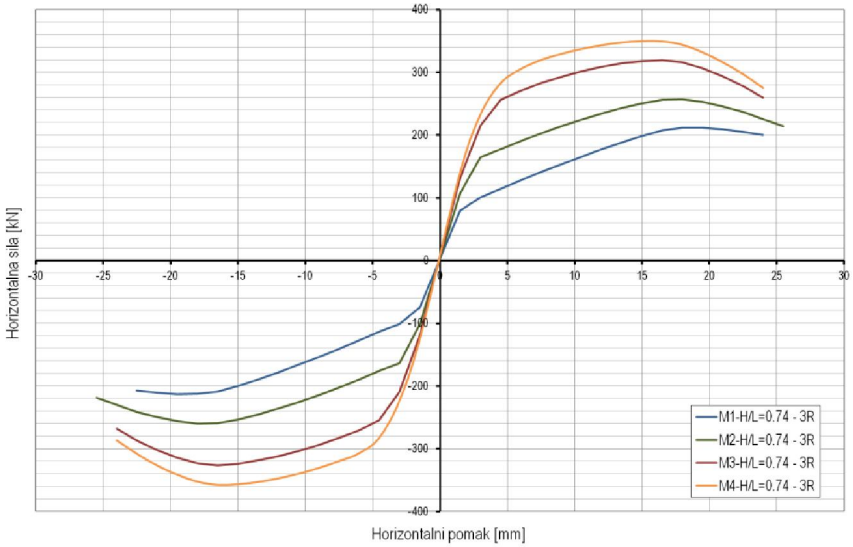
Slika A37 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija mehaničkih karakteristika ispuna



a) Nepopustljivi priključak – H/L=0.74; R=1; M=1, 2, 3 i 4

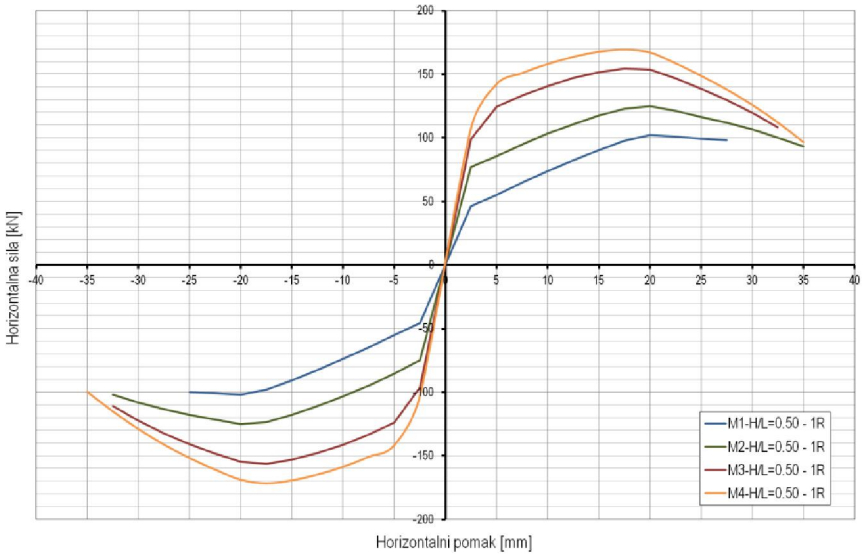


b) Nepopustljivi priključak – H/L=0.74; R=2; M=1, 2, 3 i 4

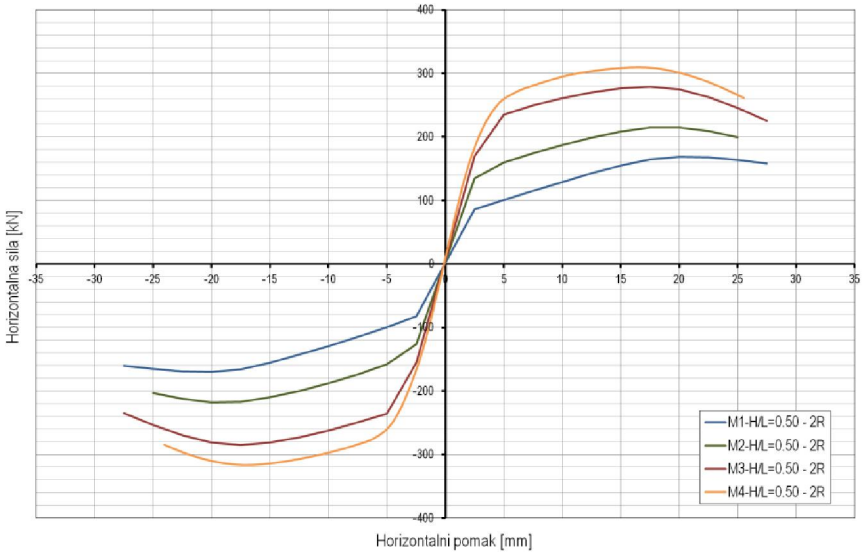


c) Nepopustljivi priključak – H/L=0.74; R=3; M=1, 2, 3 i 4

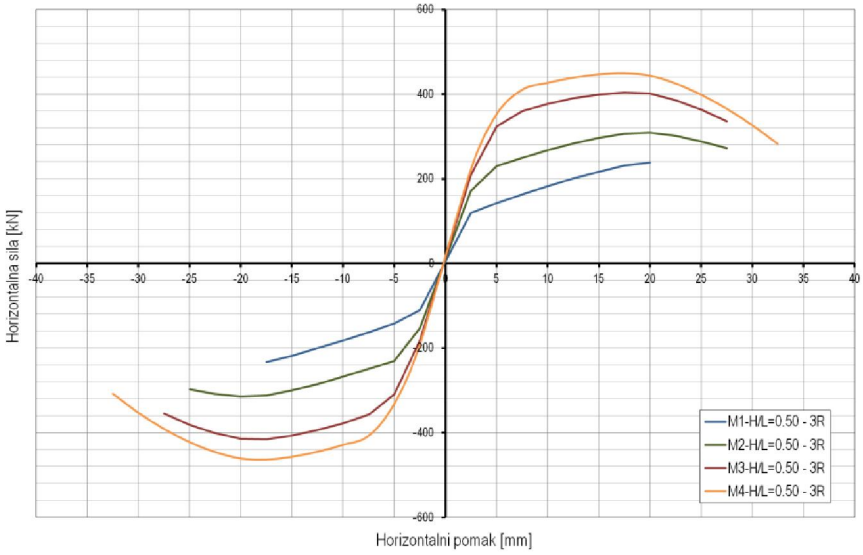
Slika A38 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija mehaničkih karakteristika ispuna



a) Nepopustljivi priključak – H/L=0.5; R=1; M=1, 2, 3 i 4

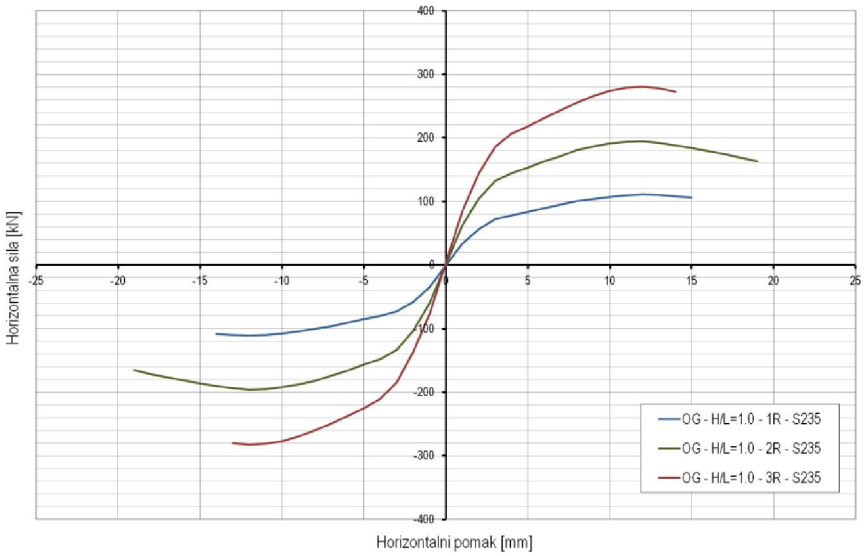


b) Nepopustljivi priključak – H/L=0.5; R=2; M=1, 2, 3 i 4

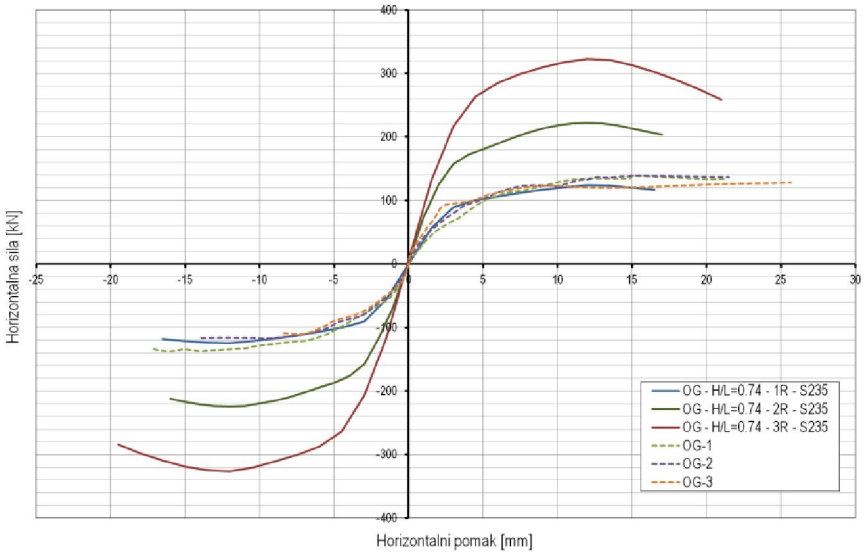


c) Nepopustljivi priključak – H/L=0.5; R=3; M=1, 2, 3 i 4

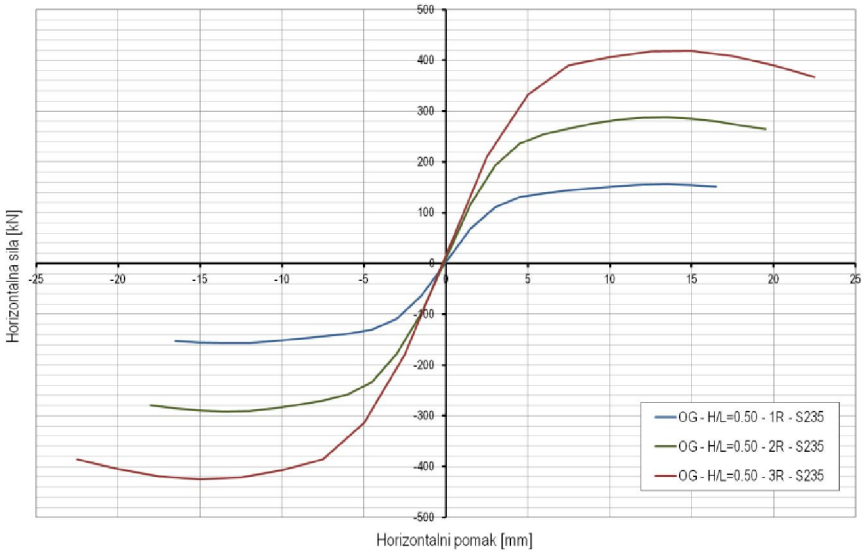
Slika A39 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija mehaničkih karakteristika ispuna



a) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=1.0; R=1, 2 i 3

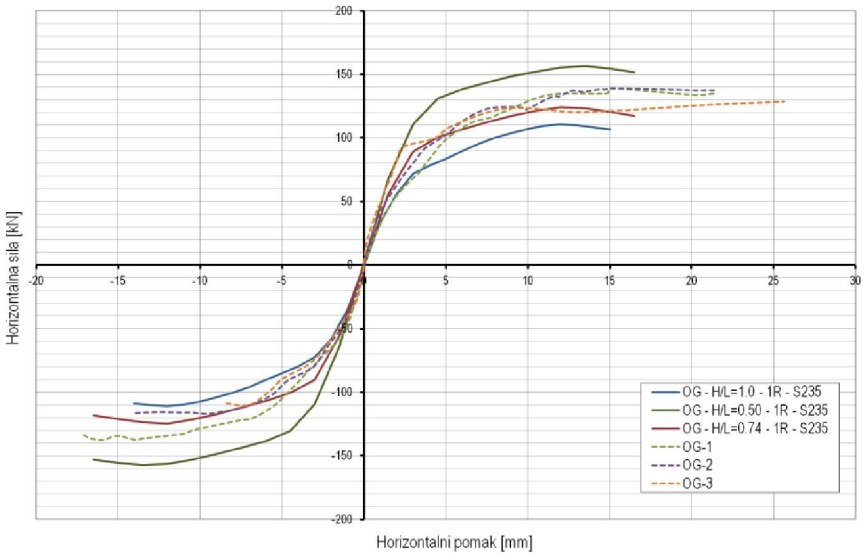


b) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.74; R=1, 2 i 3

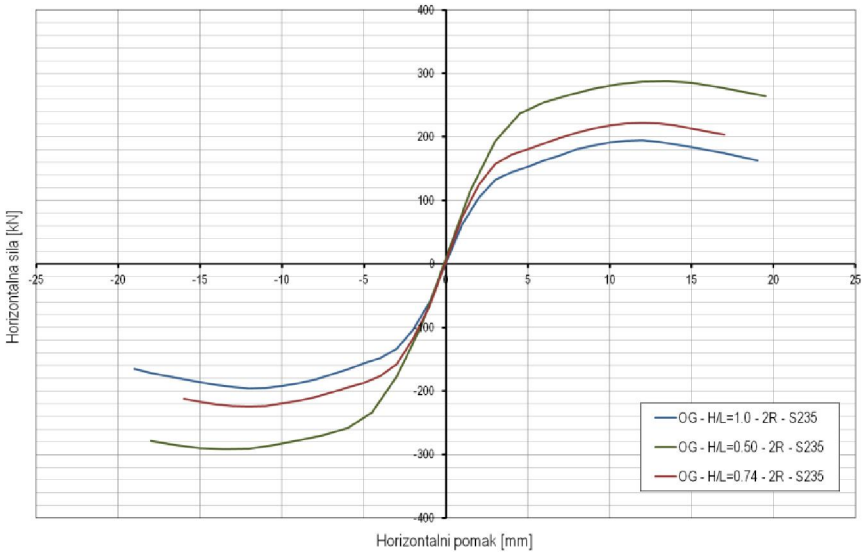


c) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5; R=1, 2 i 3

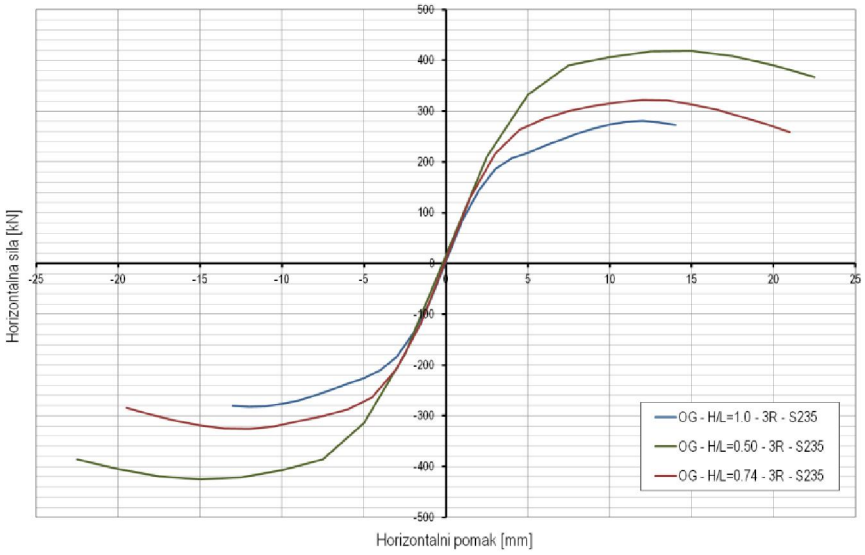
Slika A40 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=1

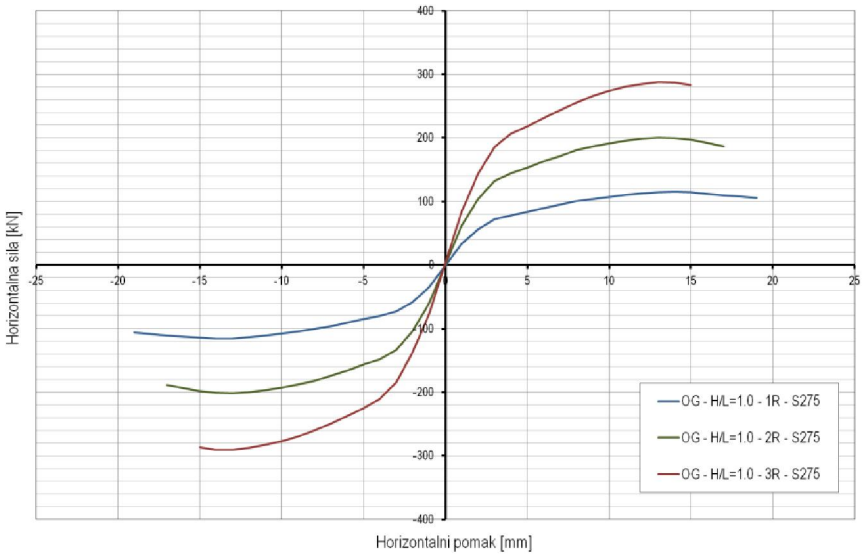


b) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=2

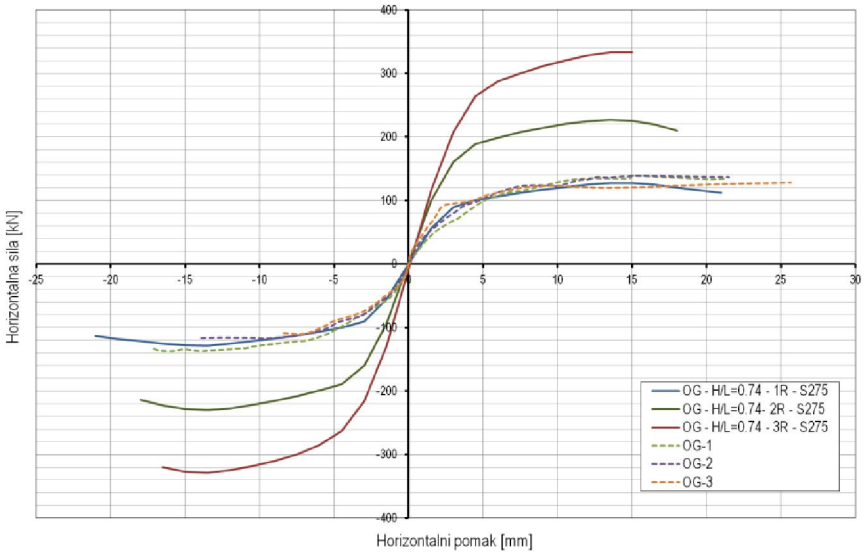


c) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=3

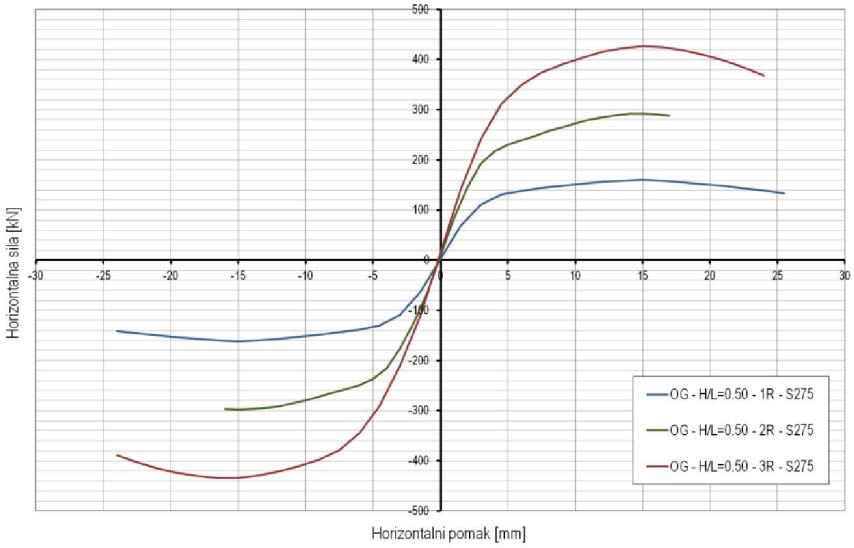
Slika A41 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=1.0; R=1, 2 i 3

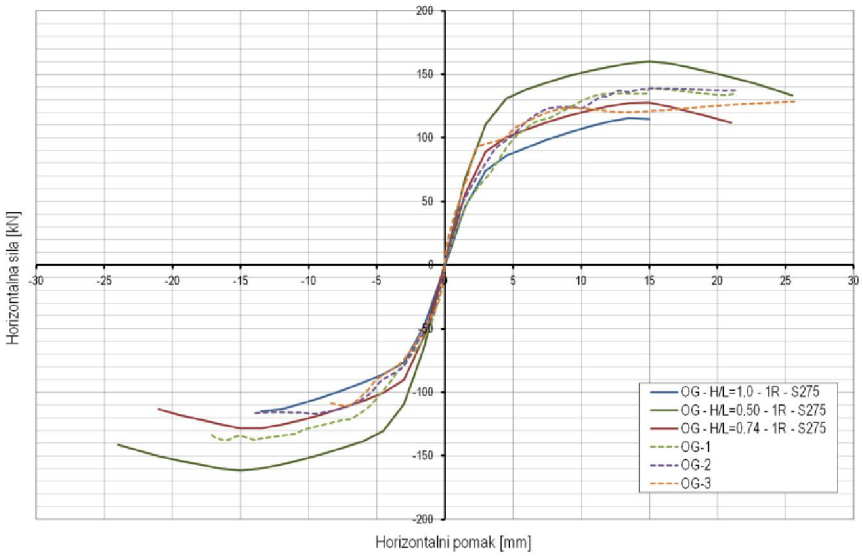


b) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.74; R=1, 2 i 3

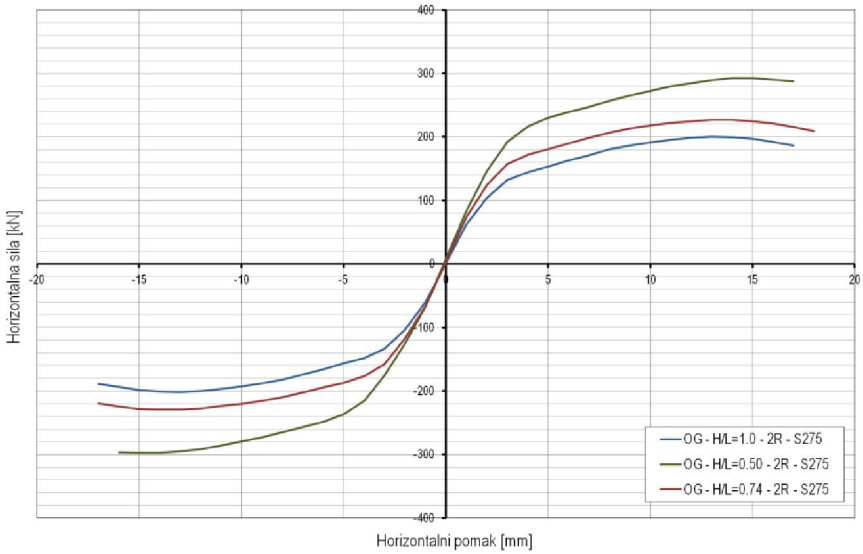


c) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5; R=1, 2 i 3

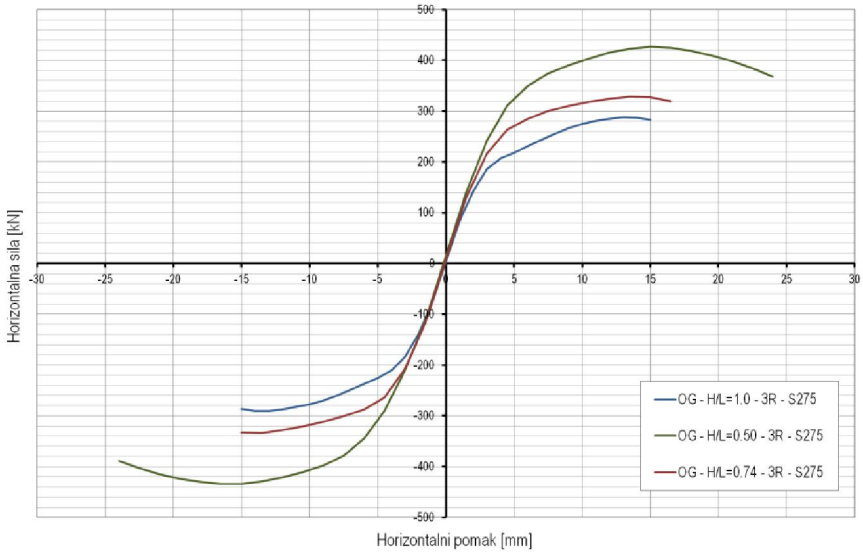
Slika A42 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=1

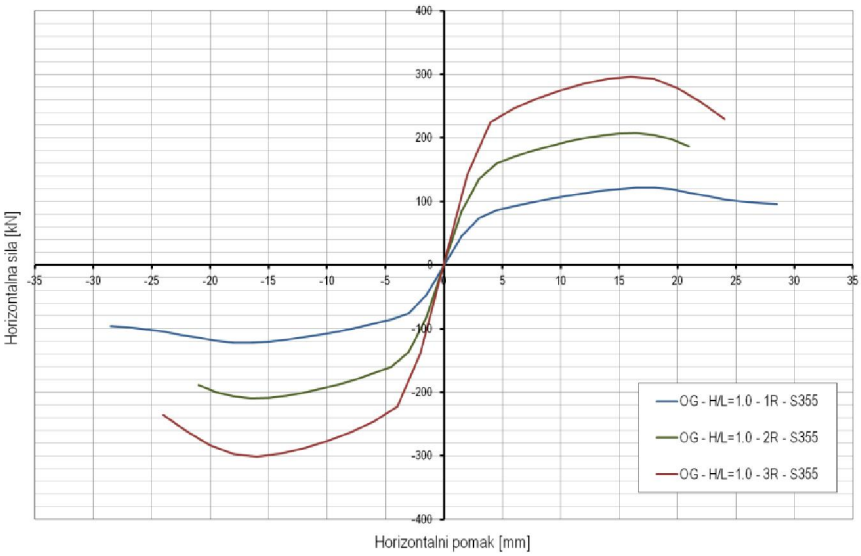


b) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=2

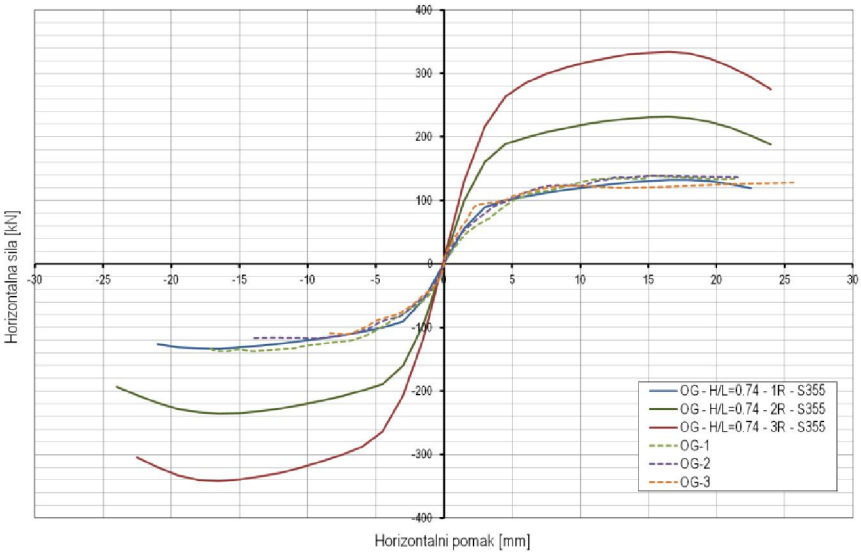


c) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=3

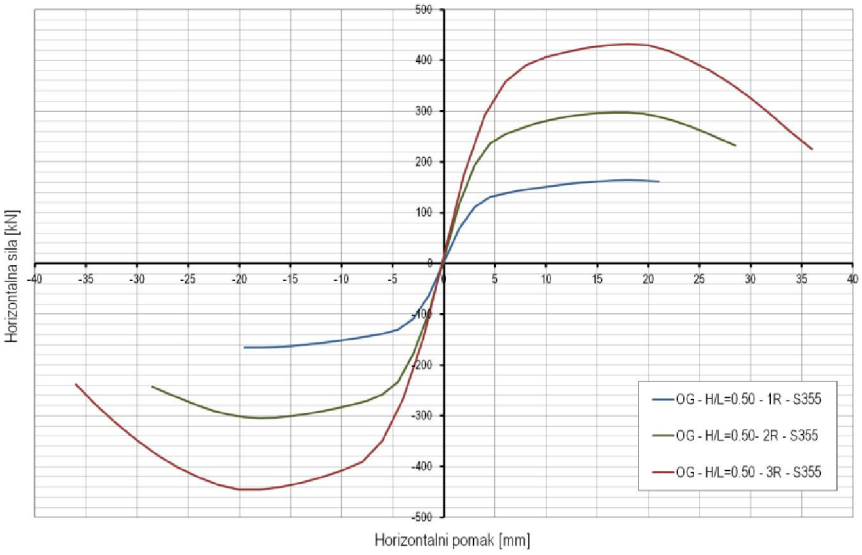
Slika A43 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=1.0; R=1, 2 i 3

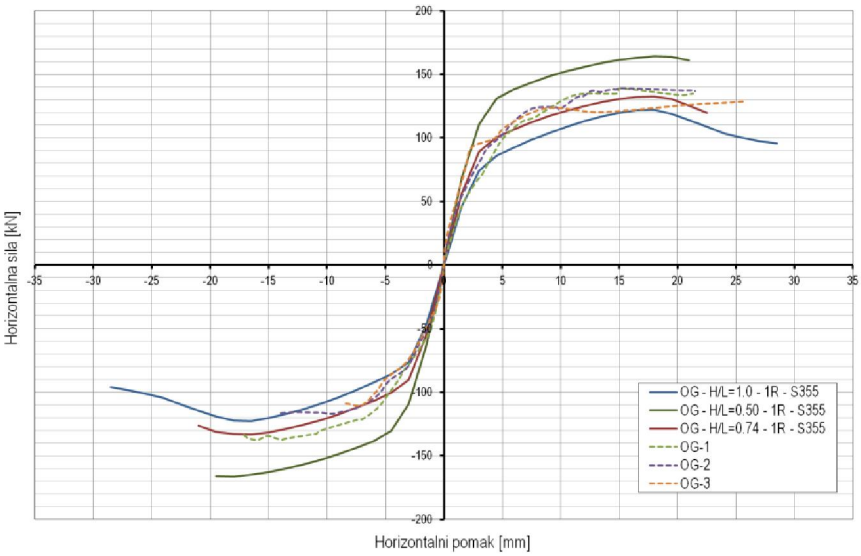


b) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.74; R=1, 2 i 3

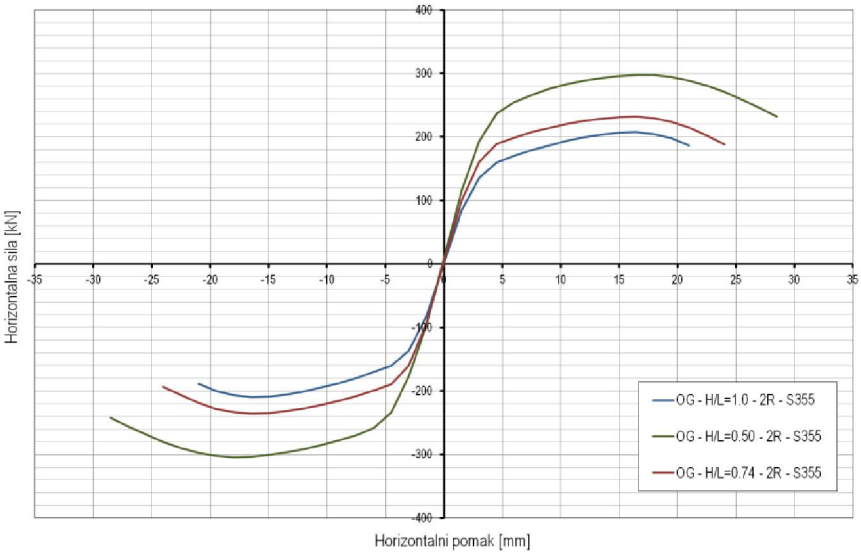


c) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5; R=1, 2 i 3

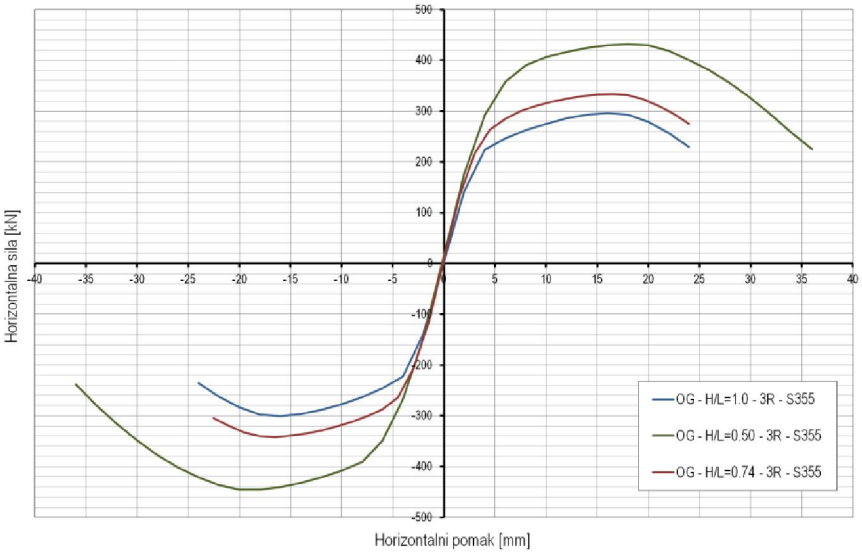
Slika A44 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=1

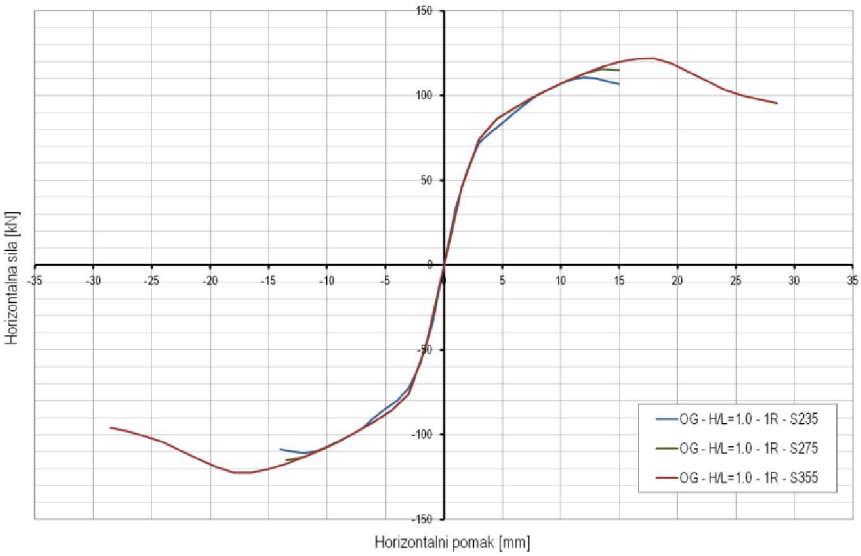


b) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=2

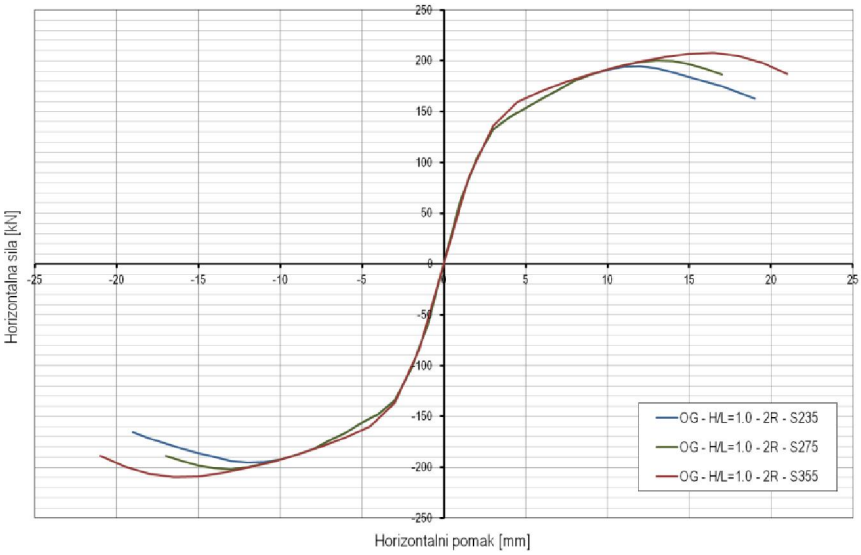


c) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=3

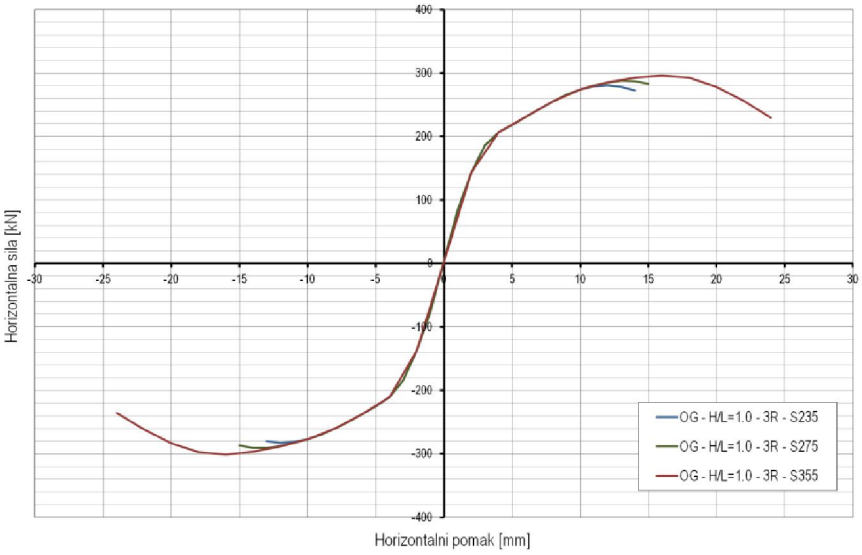
Slika A45 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=1.0; R=1

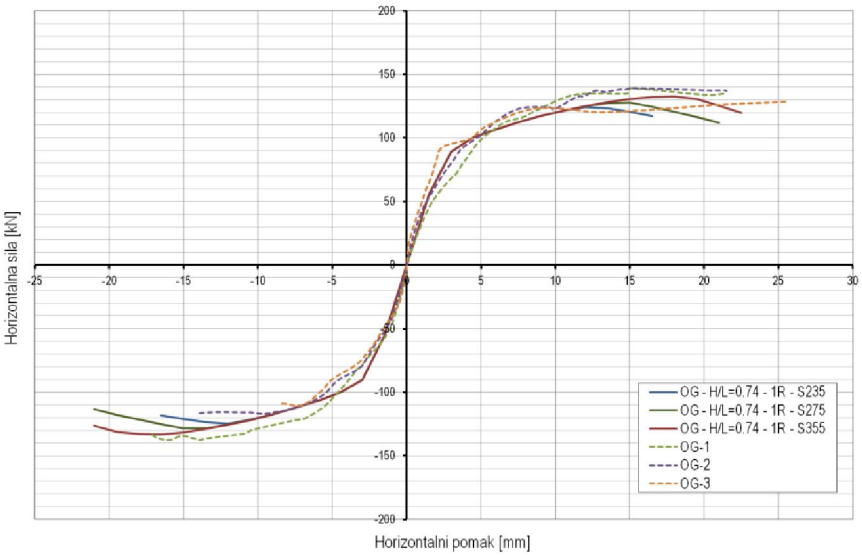


b) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=1.0; R=2

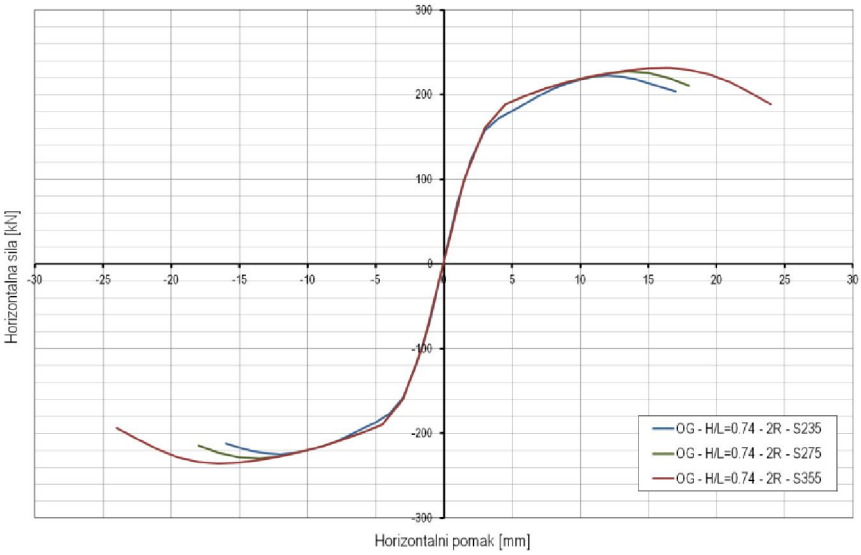


c) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=1.0; R=3

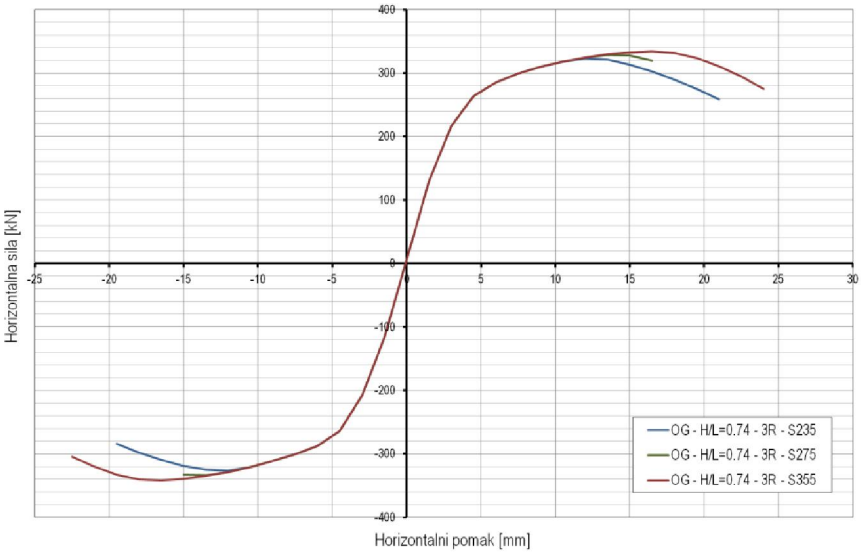
Slika A46 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom – varijacija kvalitete čelika



a) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=1

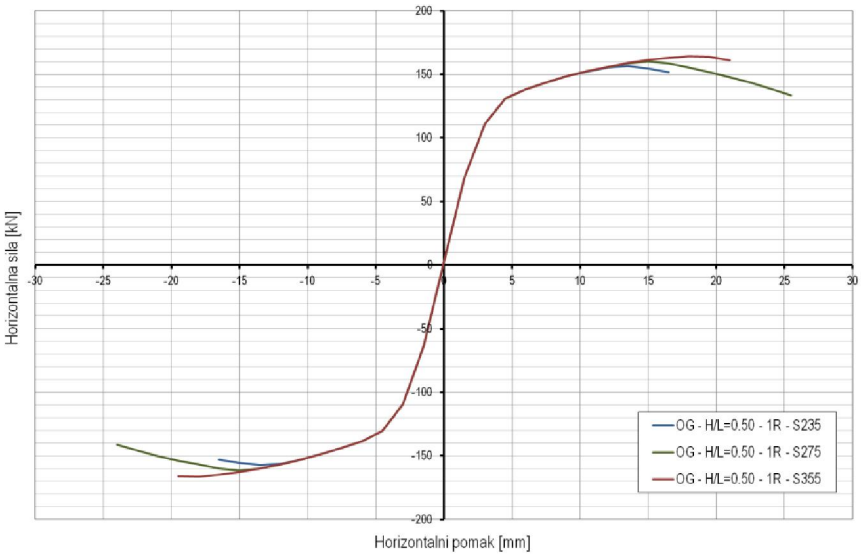


b) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=2

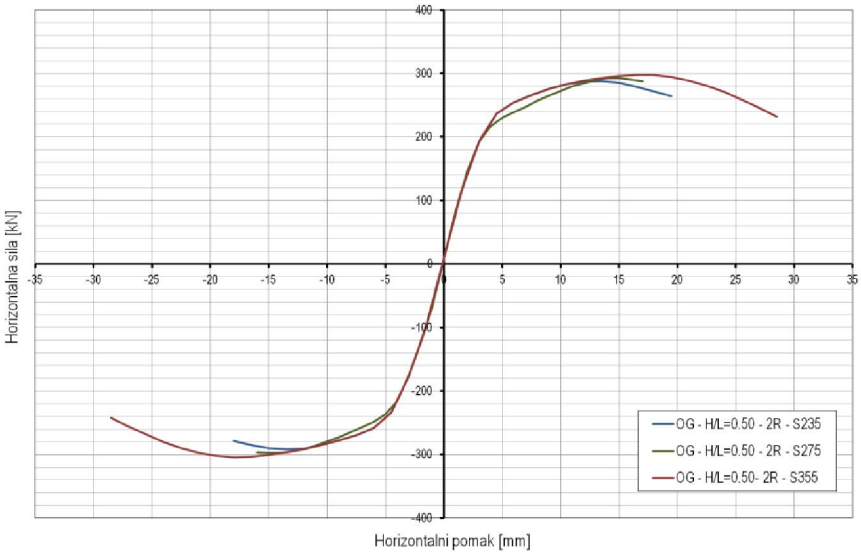


c) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=3

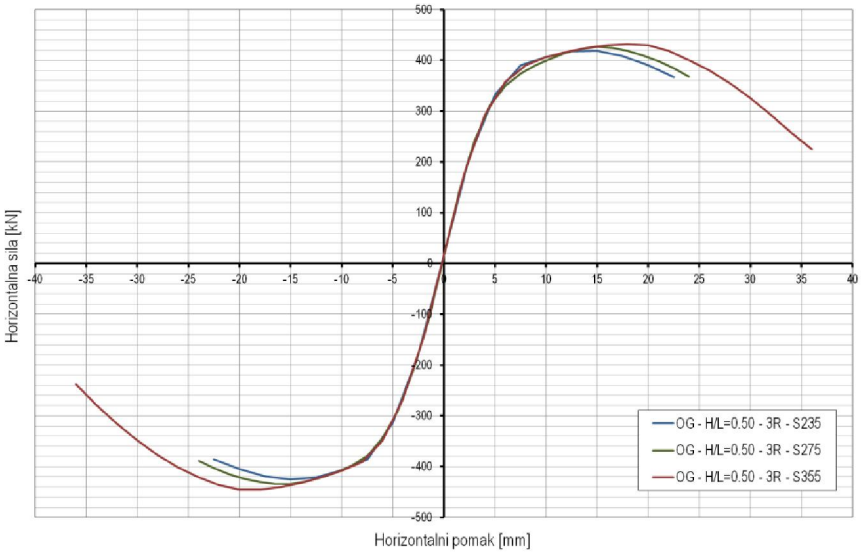
Slika A47 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom – varijacija kvalitete čelika



a) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.50; R=1

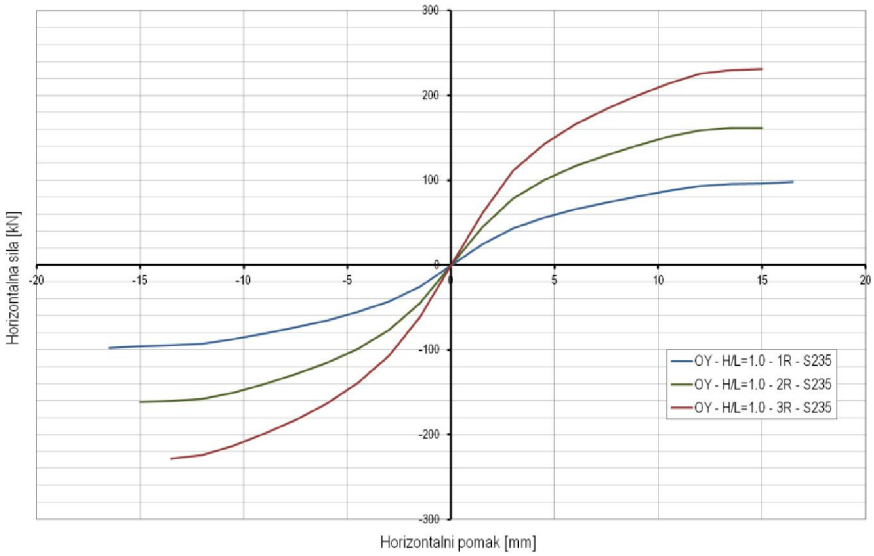


b) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.50; R=2

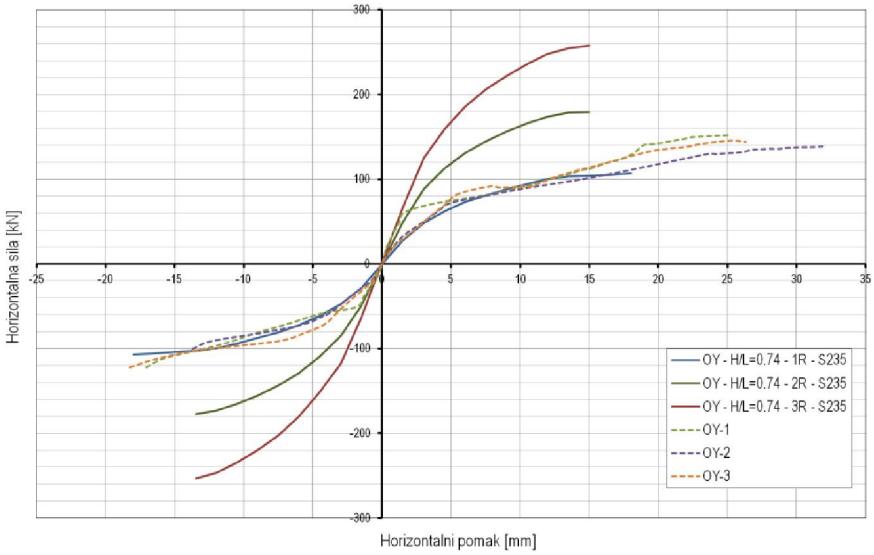


c) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.50; R=3

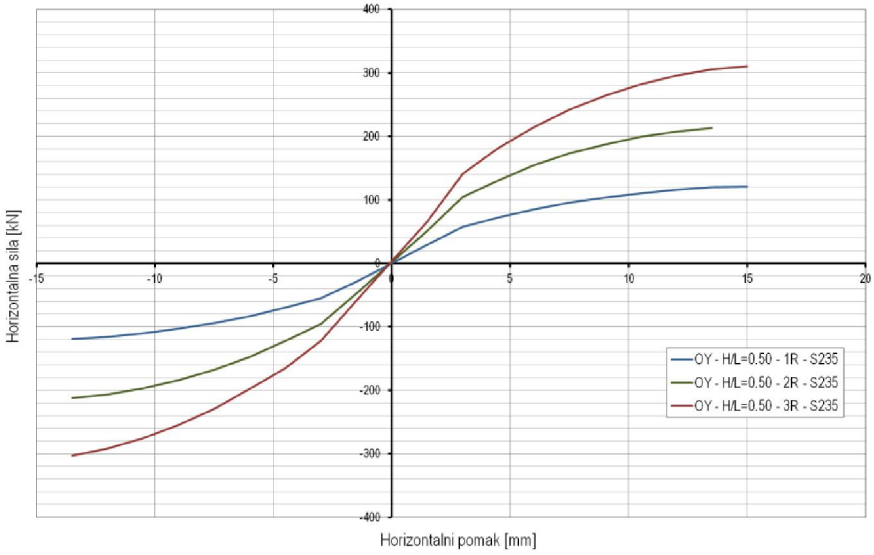
Slika A48 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom – varijacija kvalitete čelika



a) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=1.0; R=1, 2 i 3

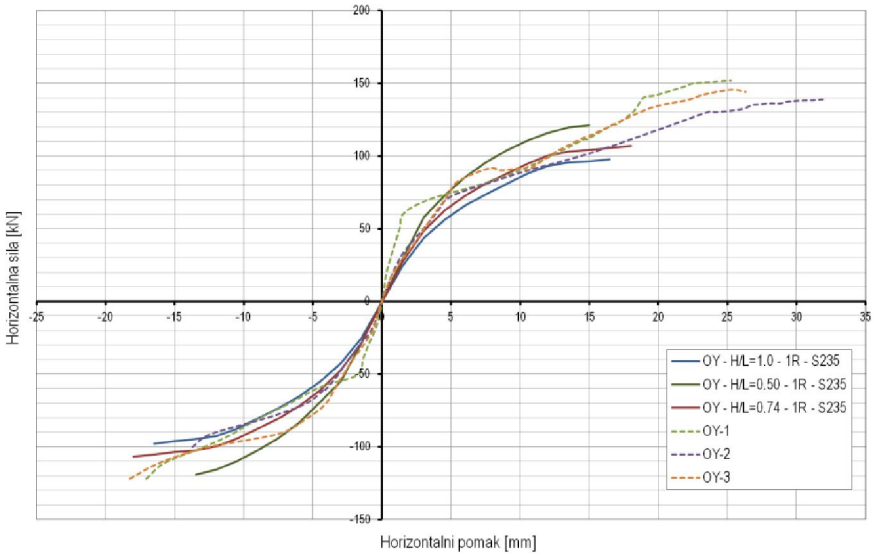


b) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.74; R=1, 2 i 3

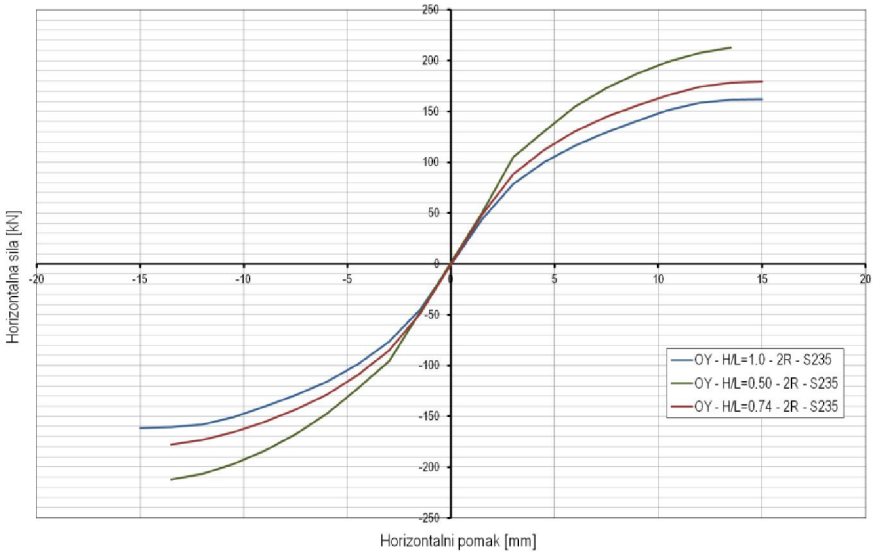


c) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5; R=1, 2 i 3

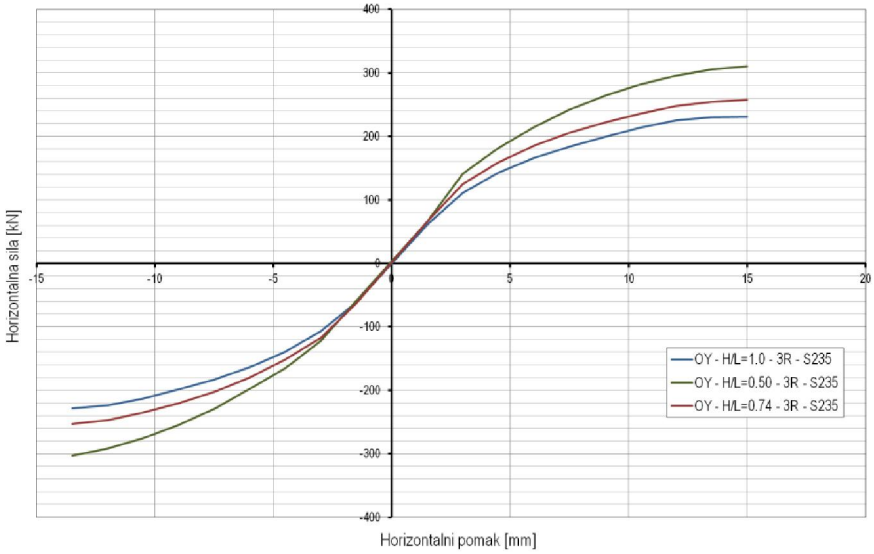
Slika A49 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=1

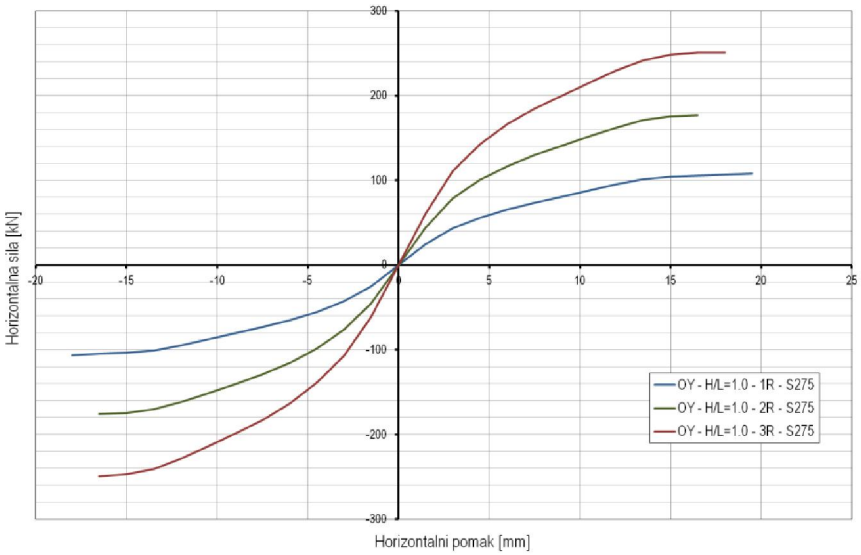


b) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=2

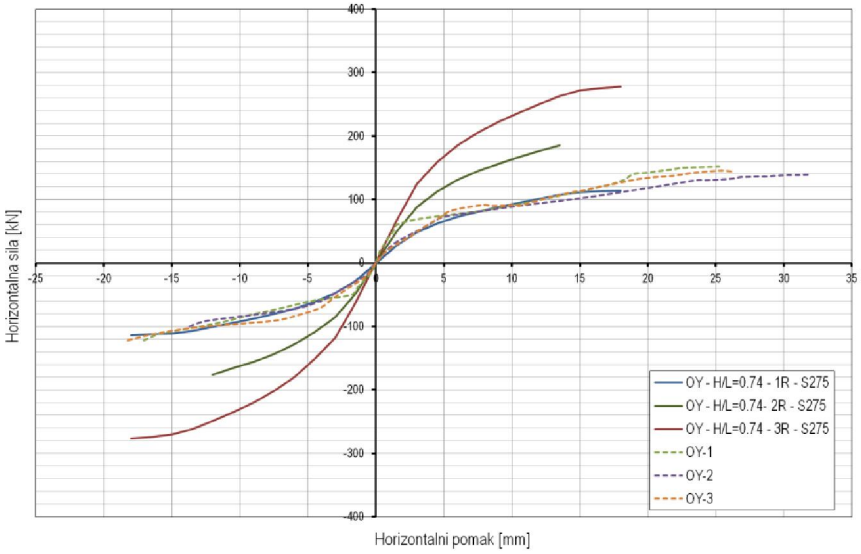


c) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=3

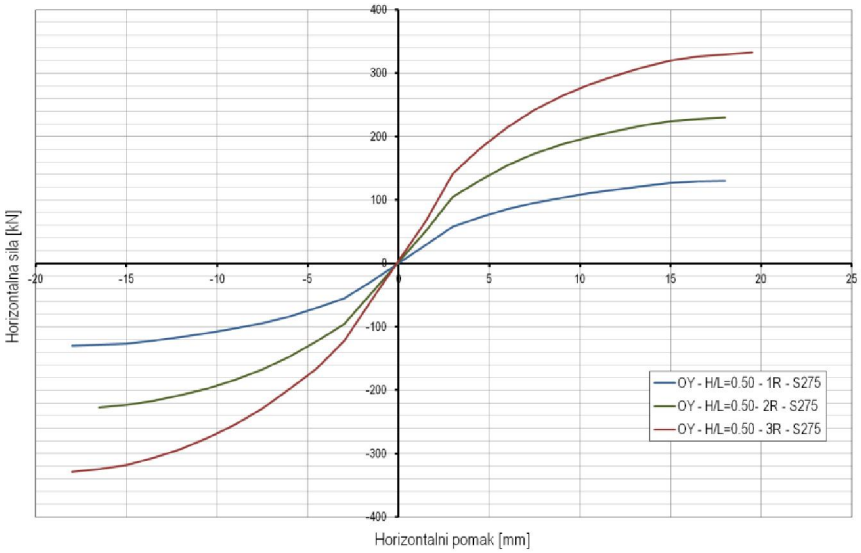
Slika A50 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=1.0; R=1, 2 i 3

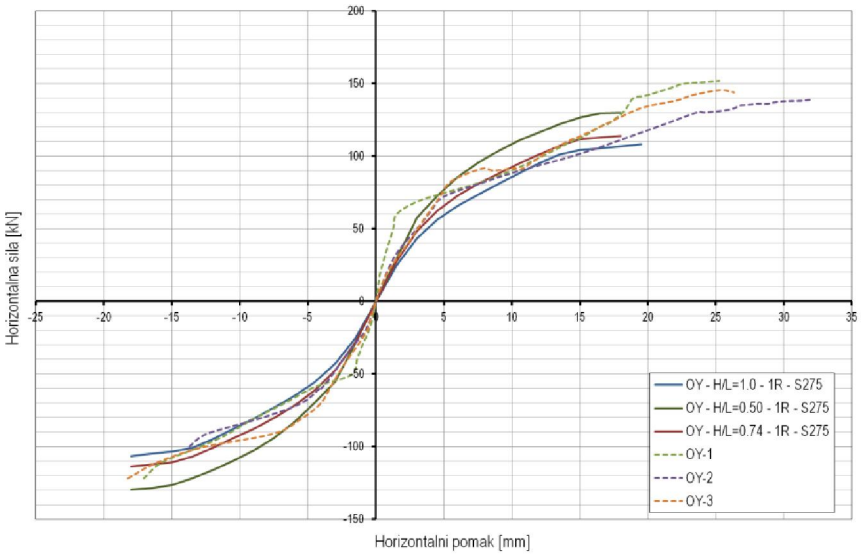


b) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.74; R=1, 2 i 3

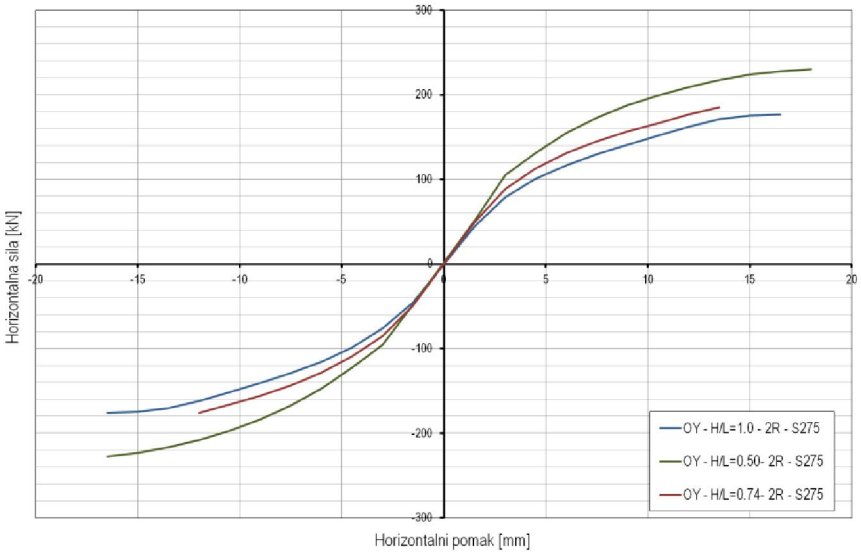


c) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5; R=1, 2 i 3

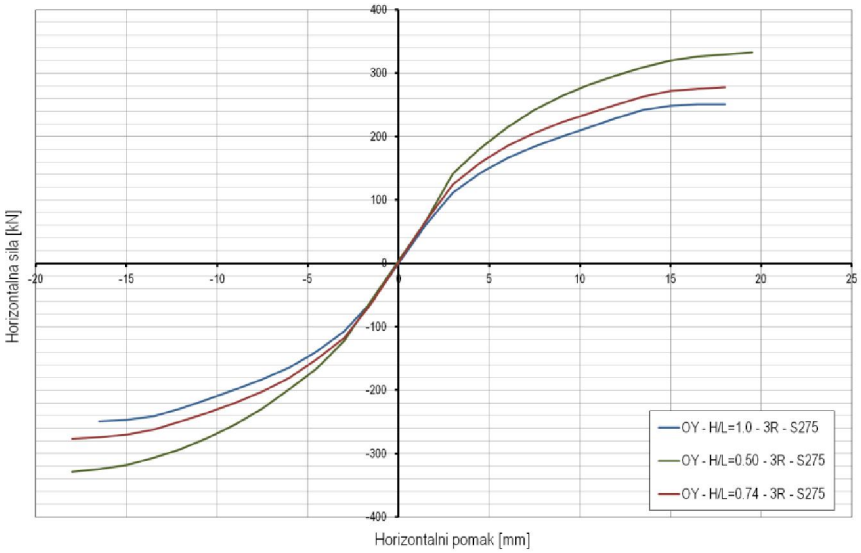
Slika A51 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=1

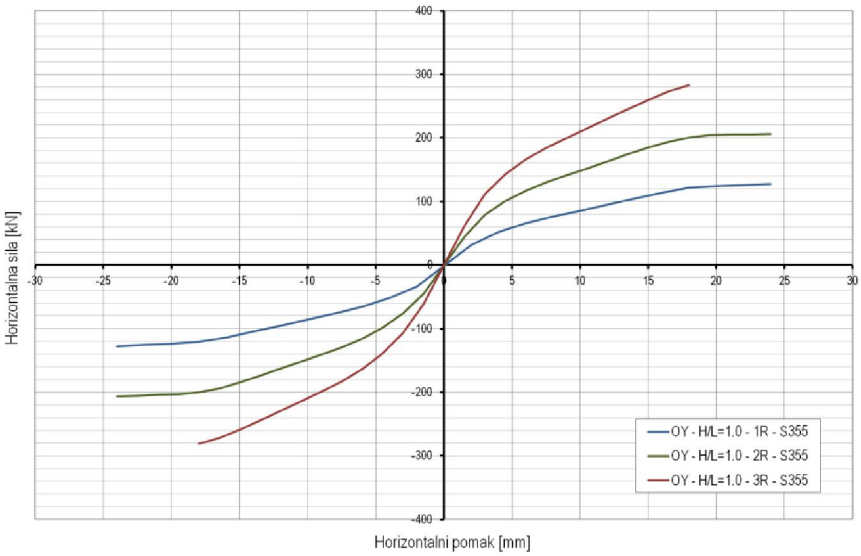


b) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=2

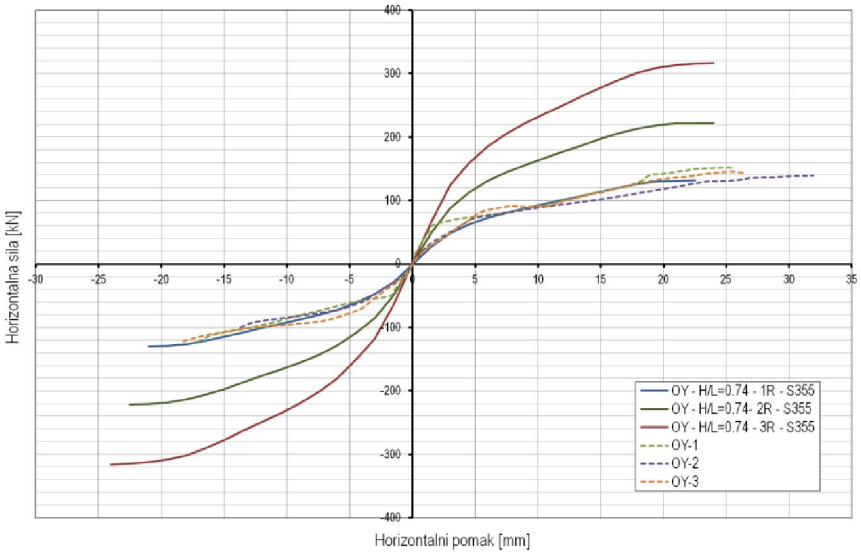


c) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=3

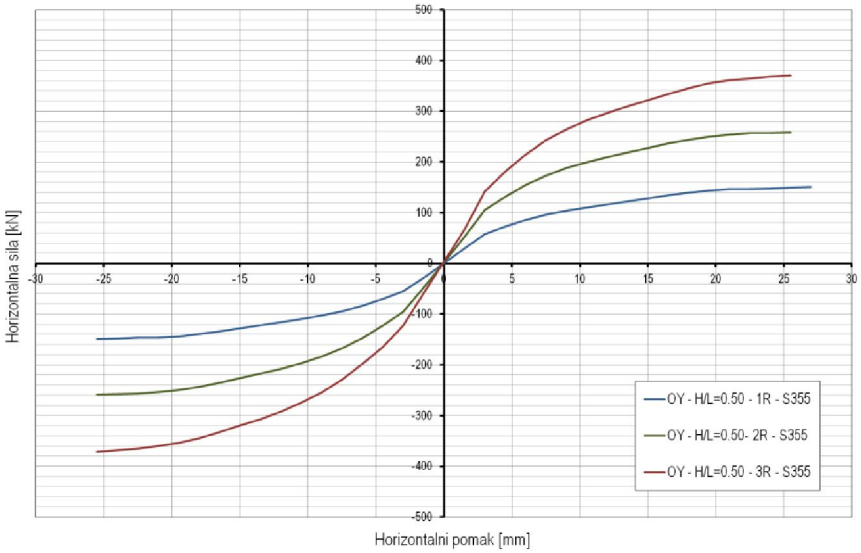
Slika A52 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=1.0; R=1, 2 i 3

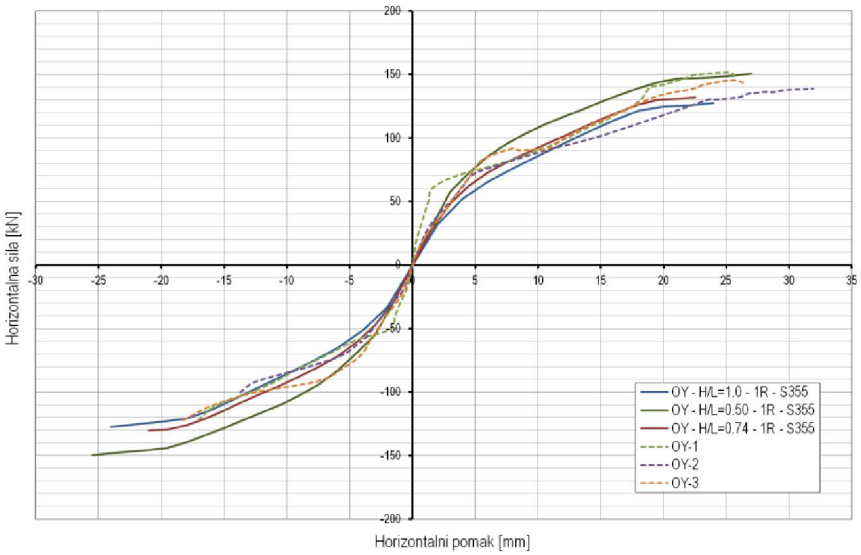


b) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.74; R=1, 2 i 3

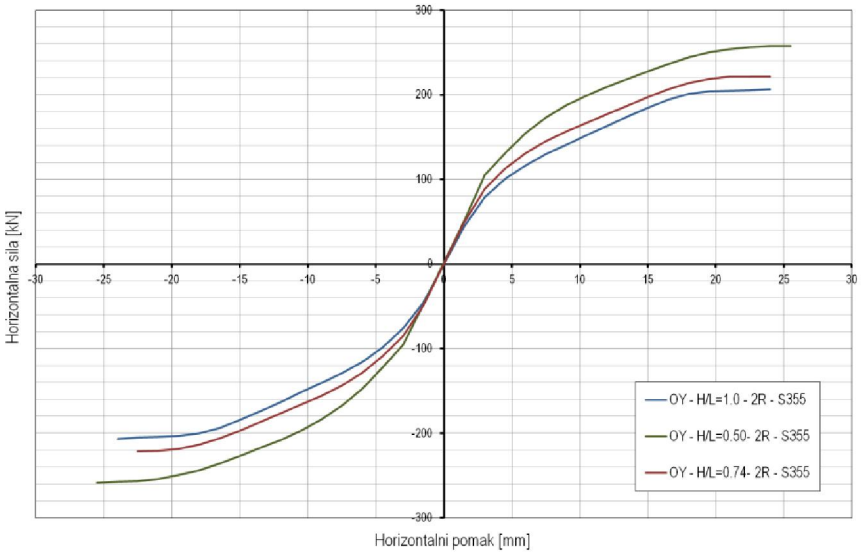


c) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5; R=1, 2 i 3

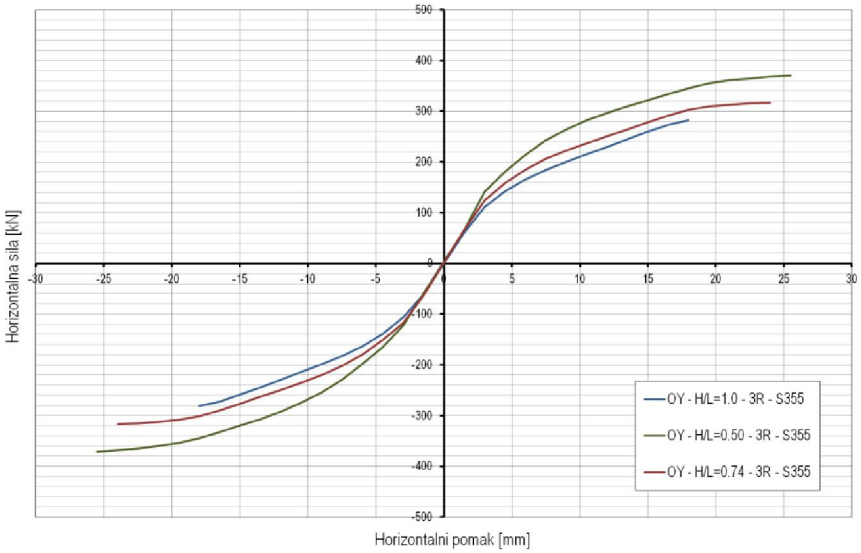
Slika A53 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=1

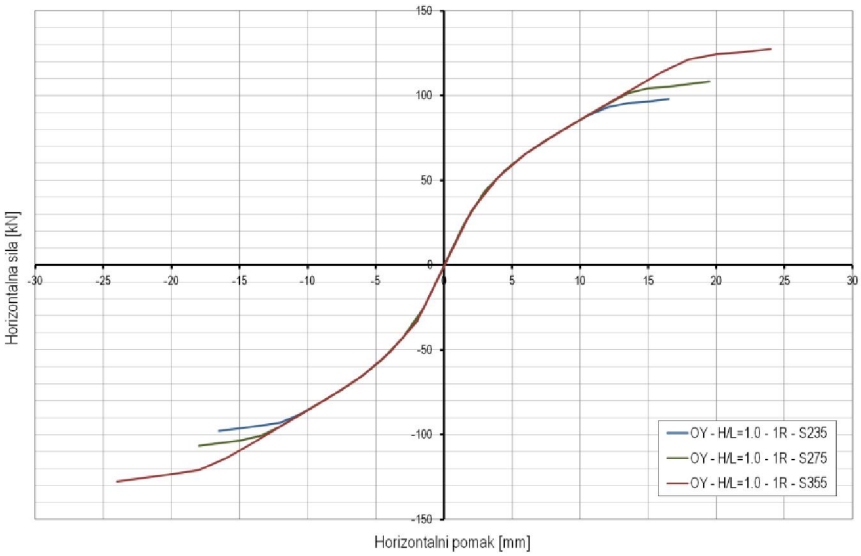


b) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=2

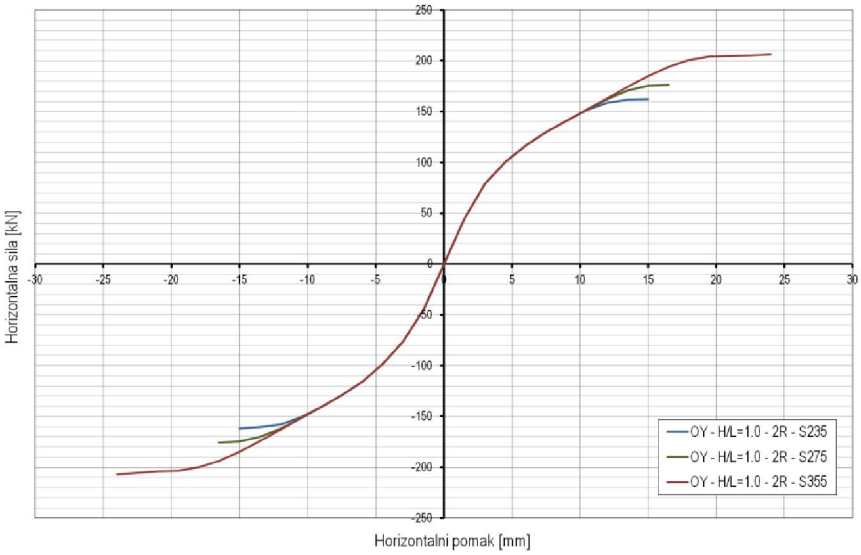


c) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=3

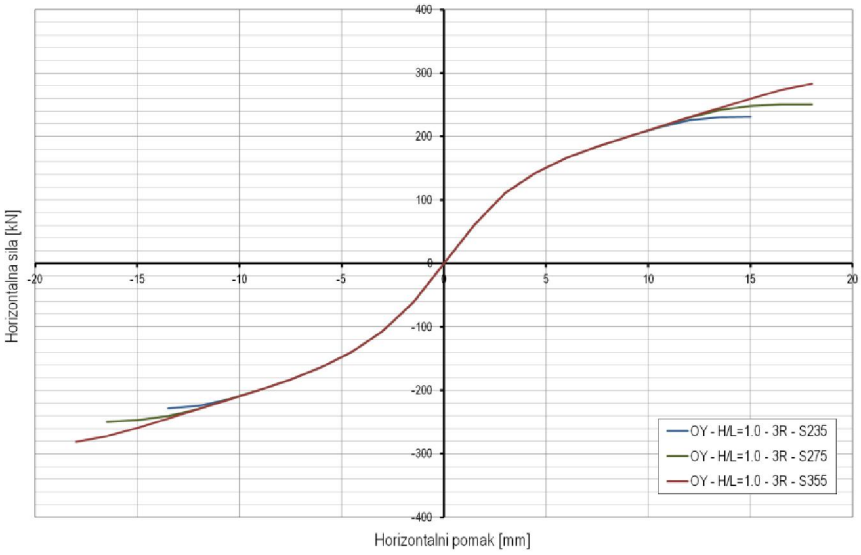
Slika A54 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=1.0; R=1

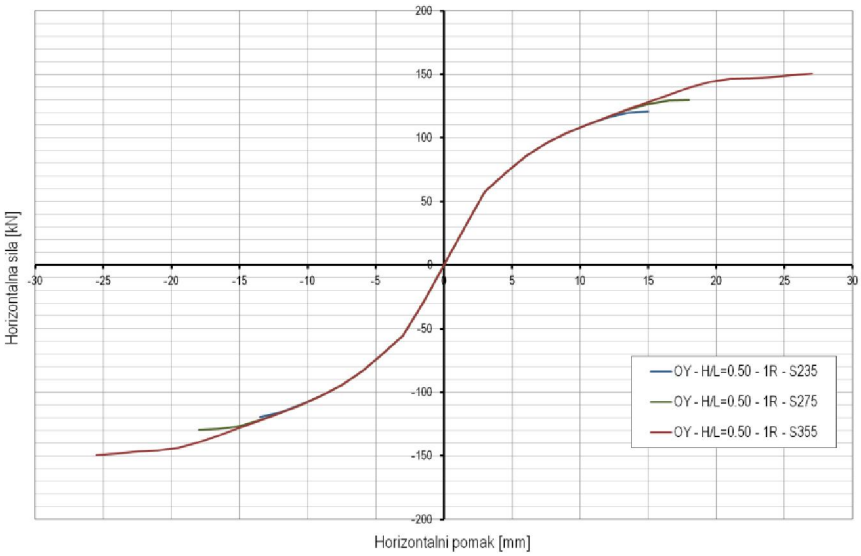


b) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=1.0; R=2

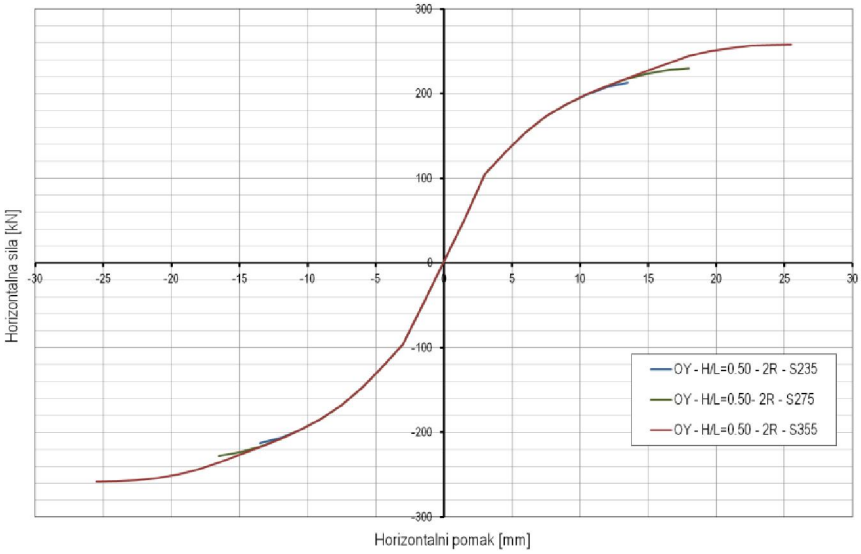


c) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=1.0; R=3

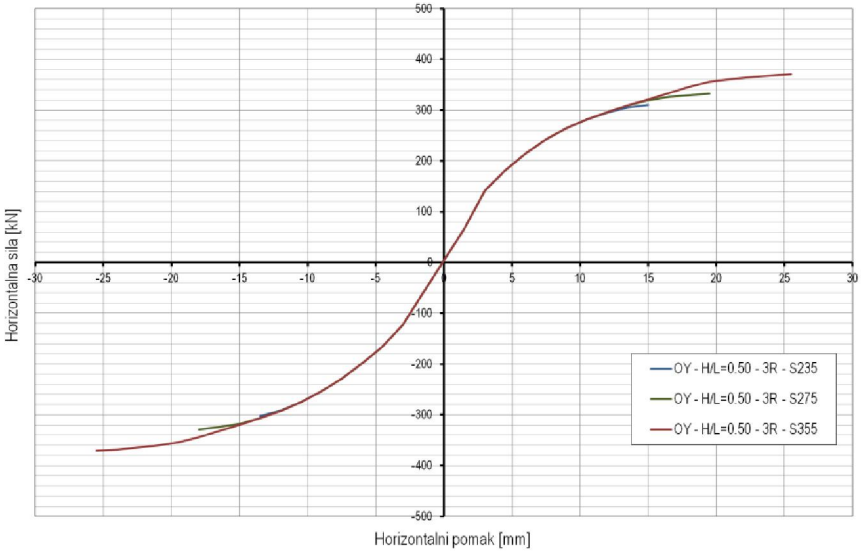
Slika A55 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika



a) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.50; R=1

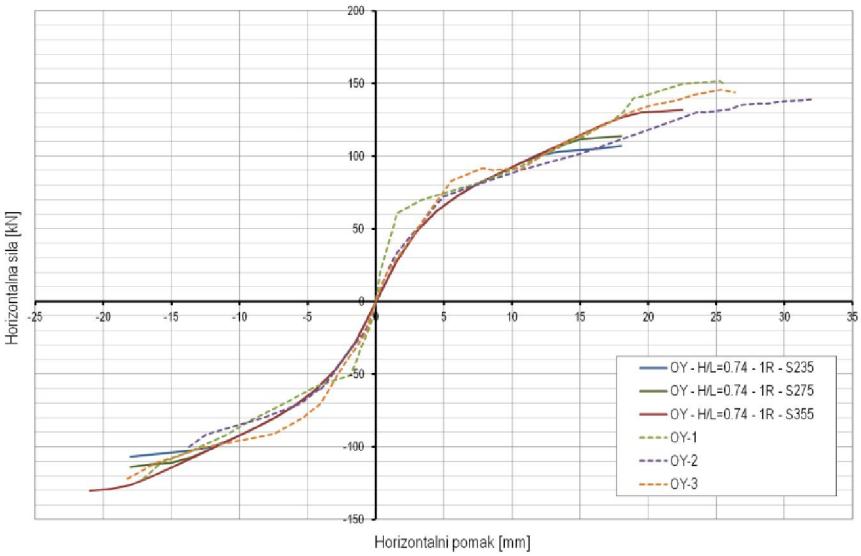


b) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.50; R=2

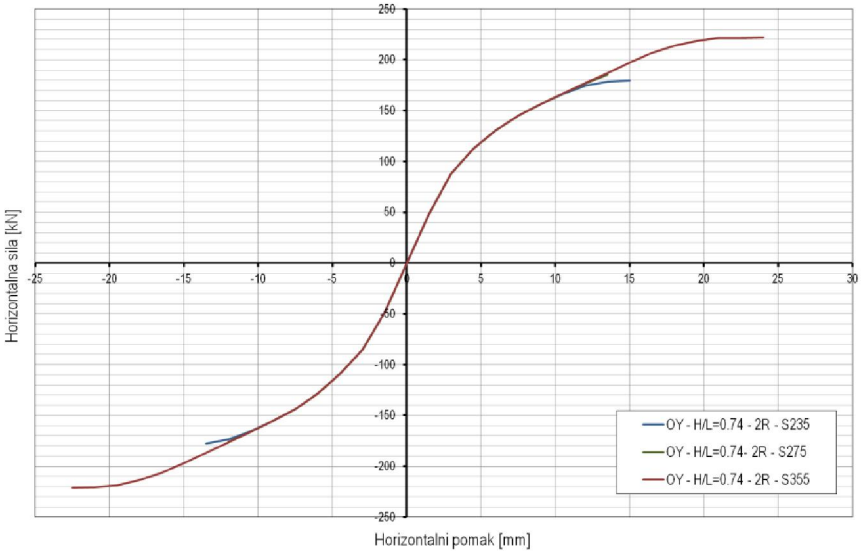


c) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.50; R=3

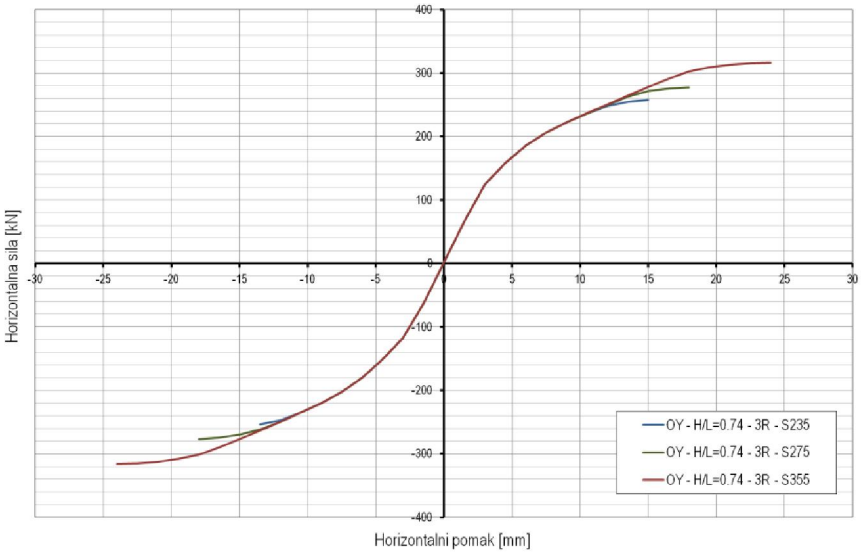
Slika A56 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika



a) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=1

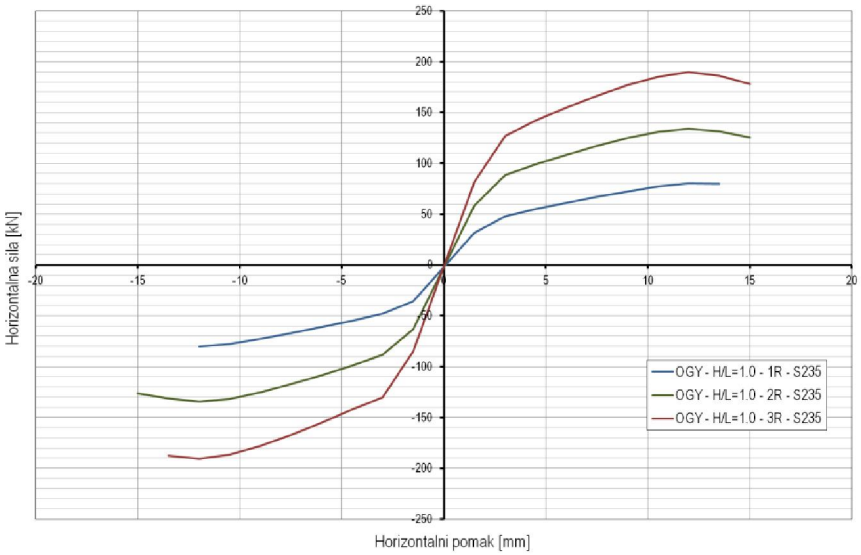


b) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=2

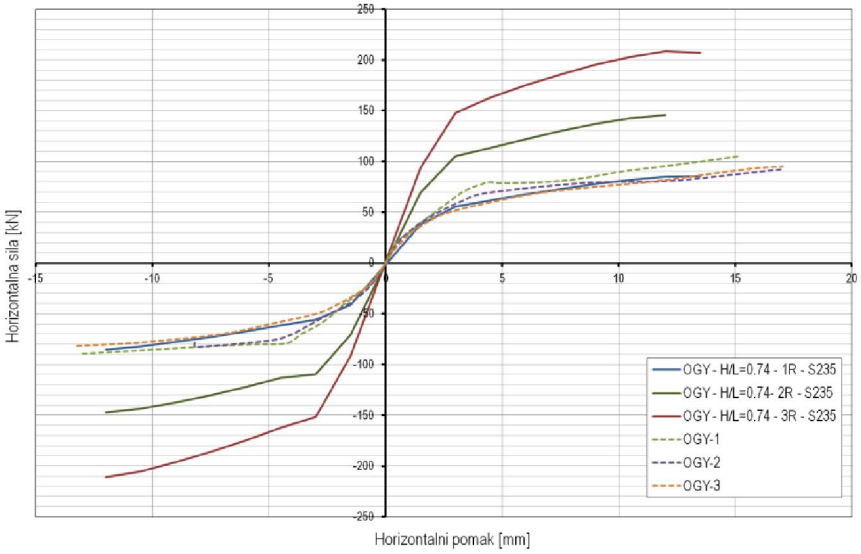


c) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=3

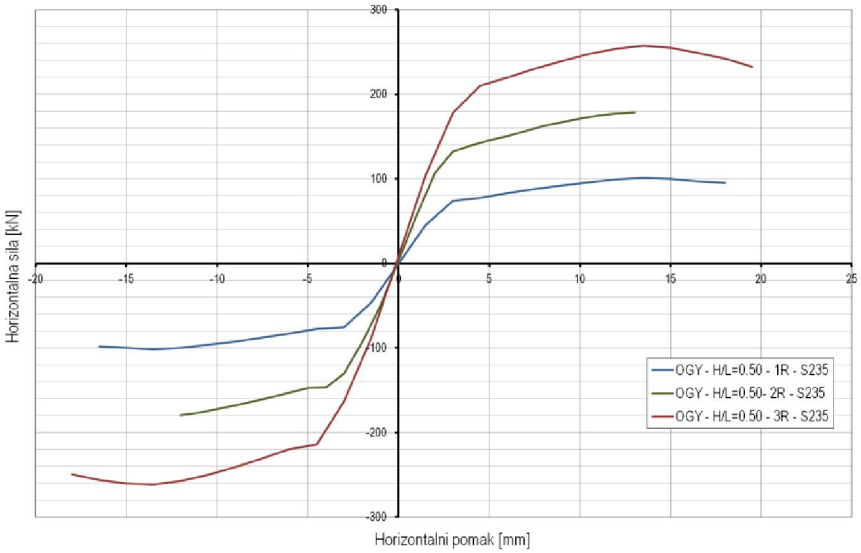
Slika A57 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika



a) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=1.0; R=1, 2 i 3

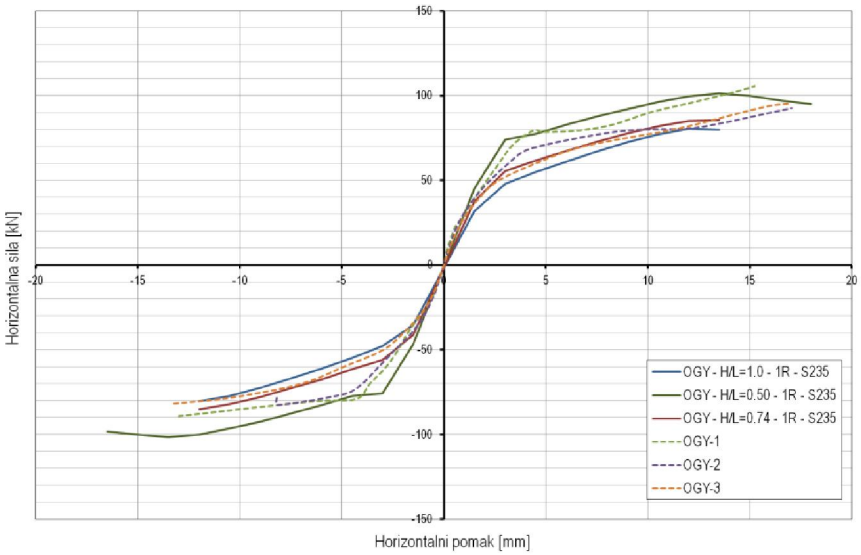


b) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.74; R=1, 2 i 3

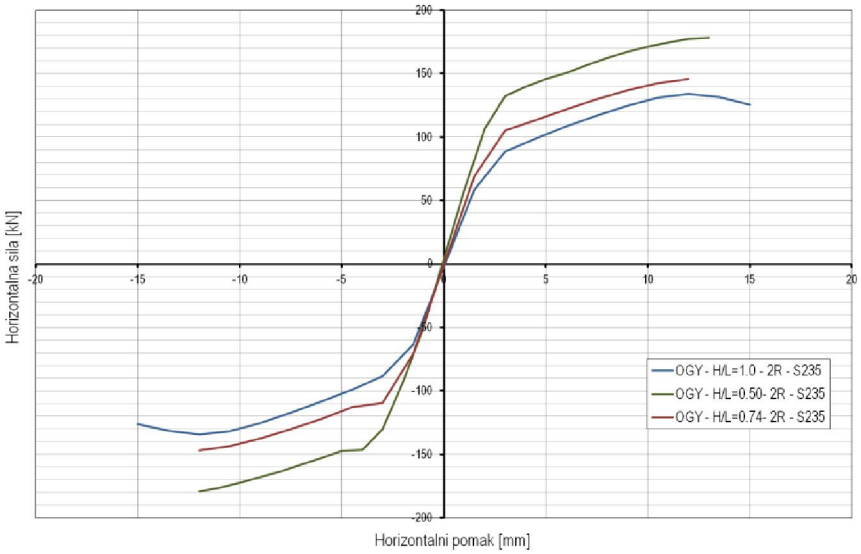


c) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5; R=1, 2 i 3

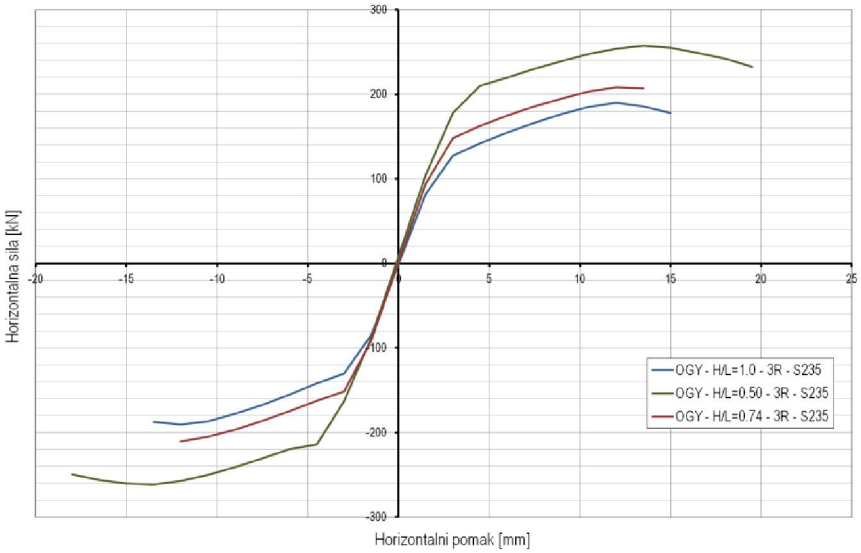
Slika A58 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=1

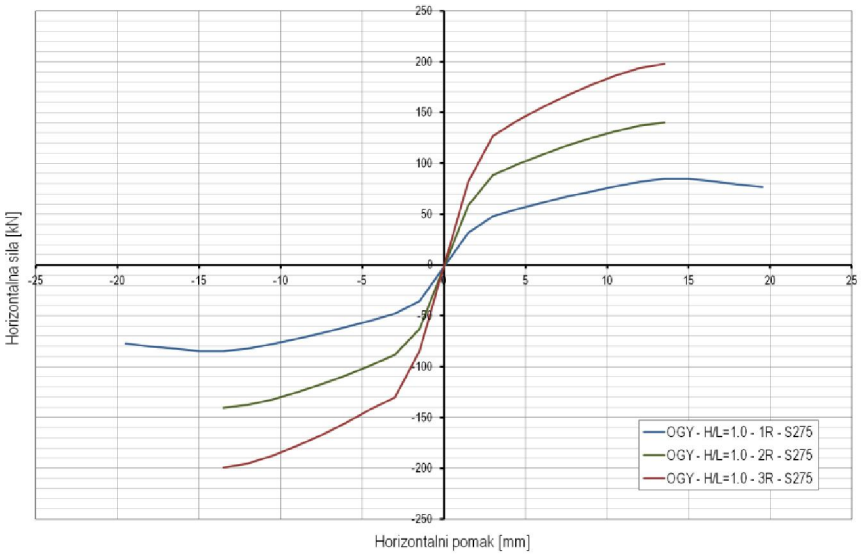


b) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=2

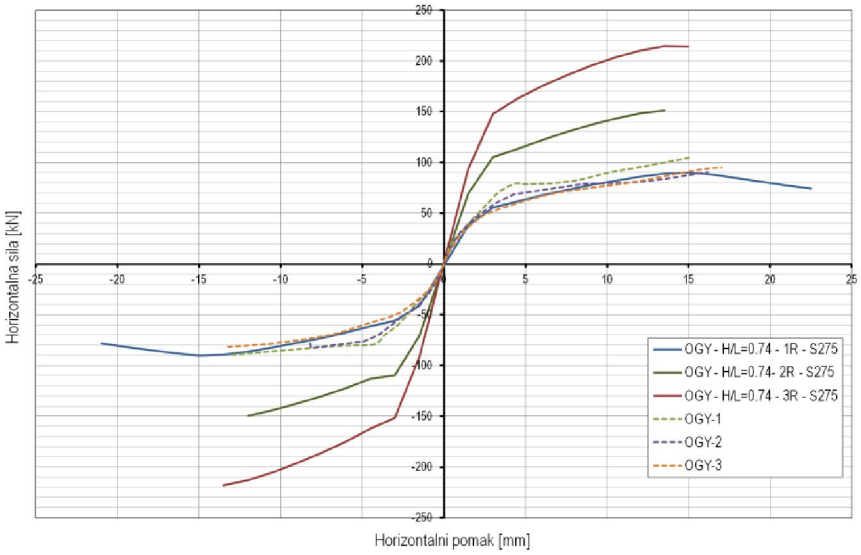


c) Nepopustljivi priključak – S235; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=3

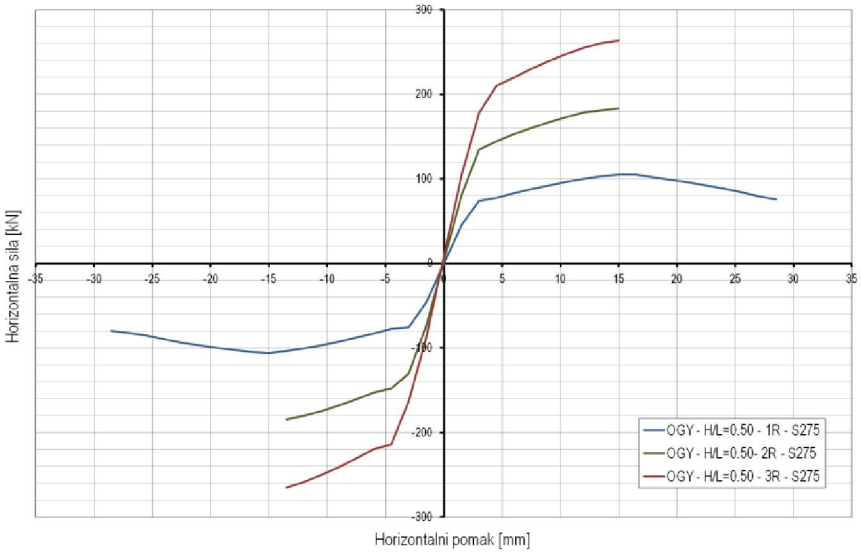
Slika A59 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=1.0; R=1, 2 i 3

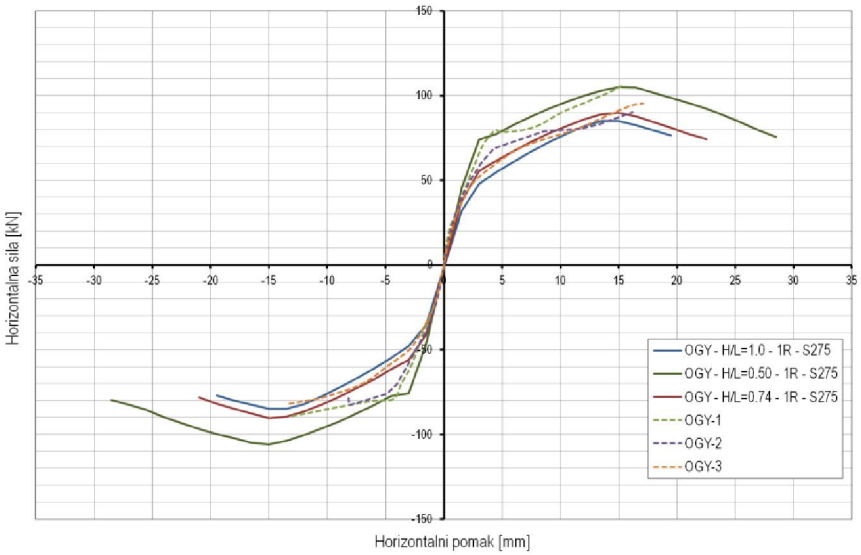


b) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.74; R=1, 2 i 3

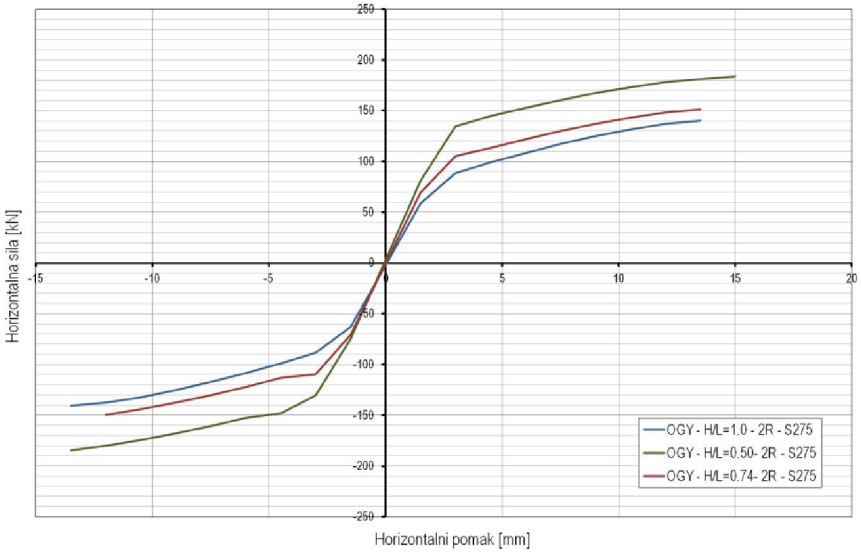


c) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5; R=1, 2 i 3

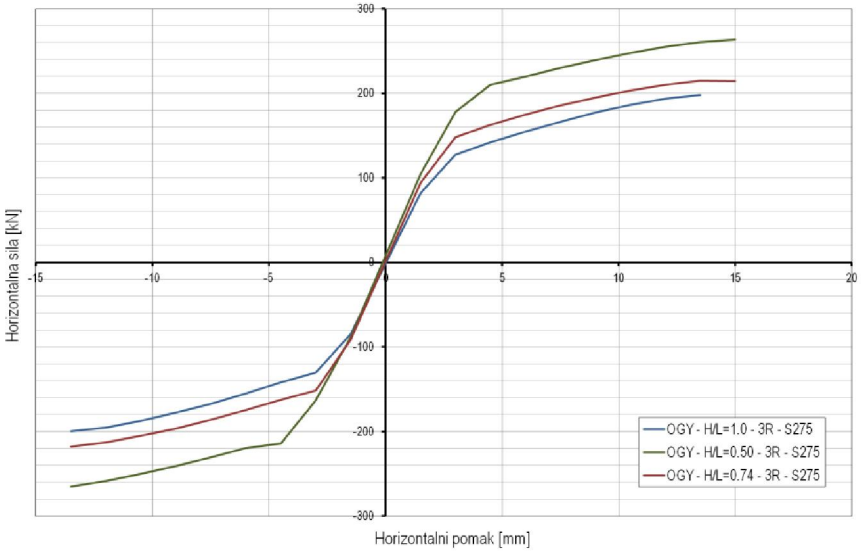
Slika A60 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=1

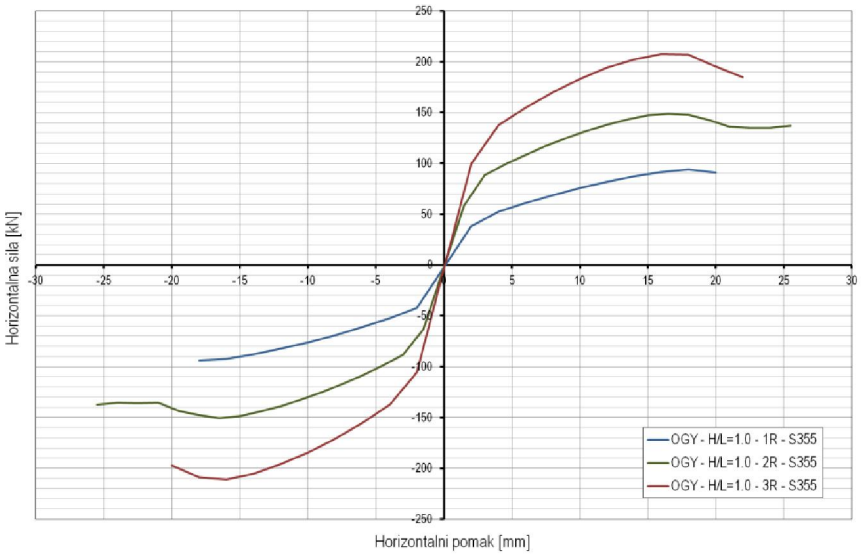


b) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=2

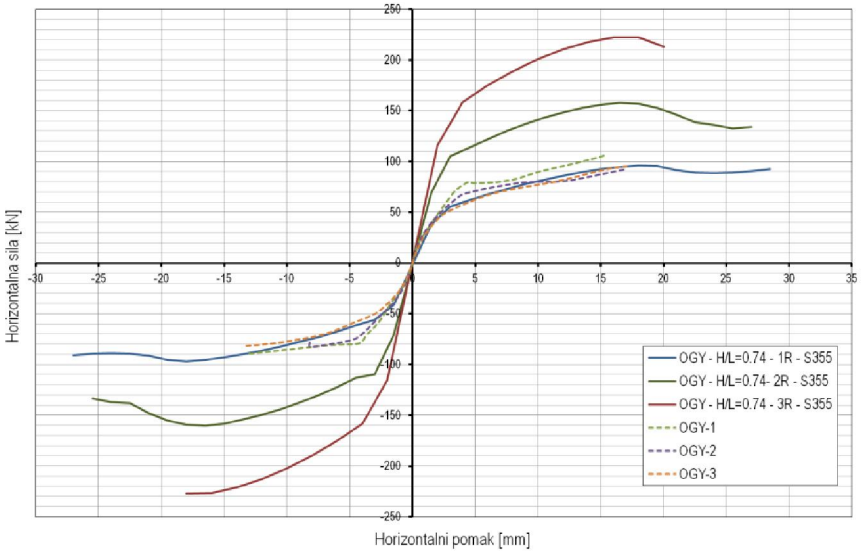


c) Nepopustljivi priključak – S275; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=3

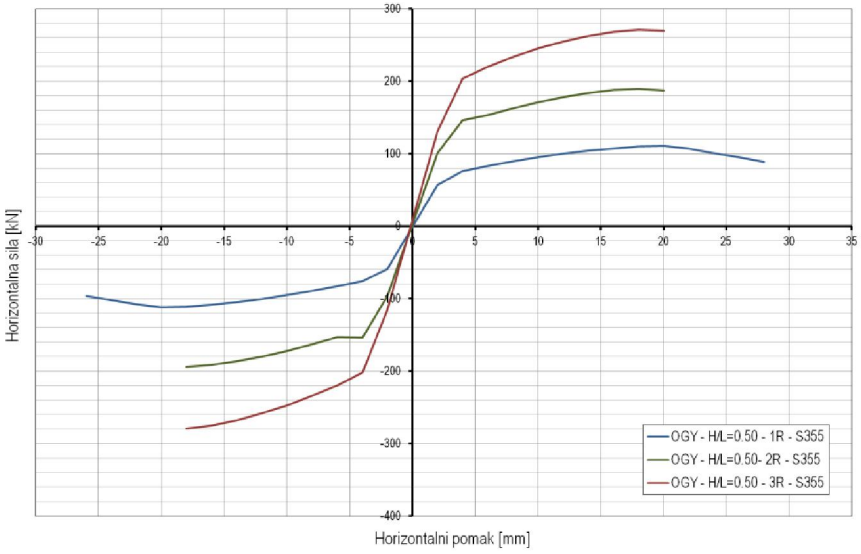
Slika A61 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=1.0; R=1, 2 i 3

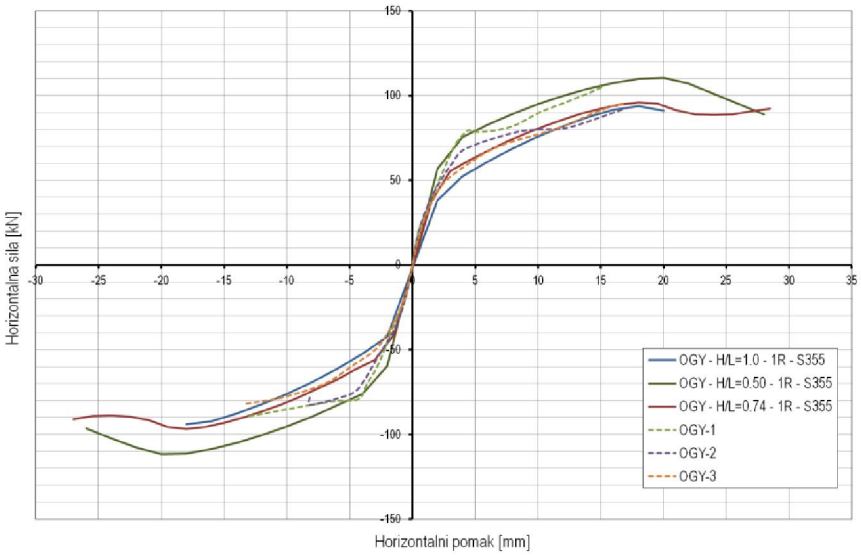


b) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.74; R=1, 2 i 3

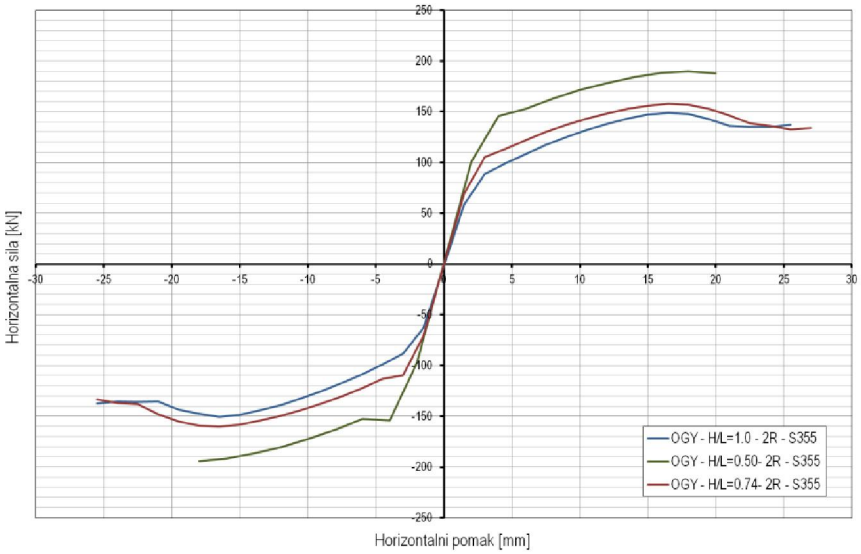


c) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5; R=1, 2 i 3

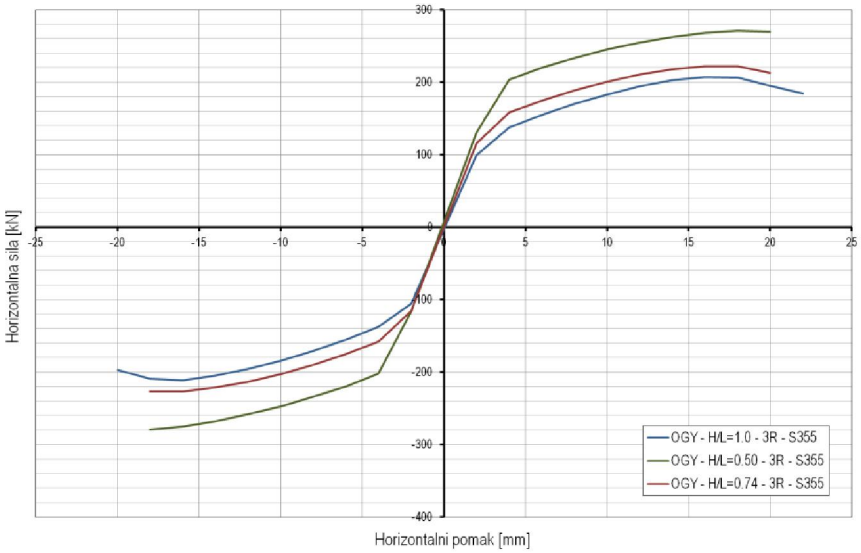
Slika A62 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona



a) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=1

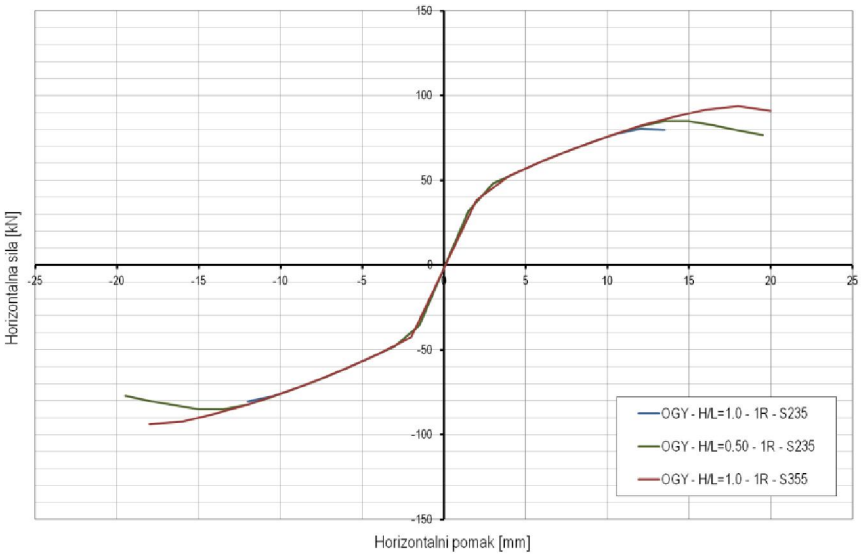


b) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=2

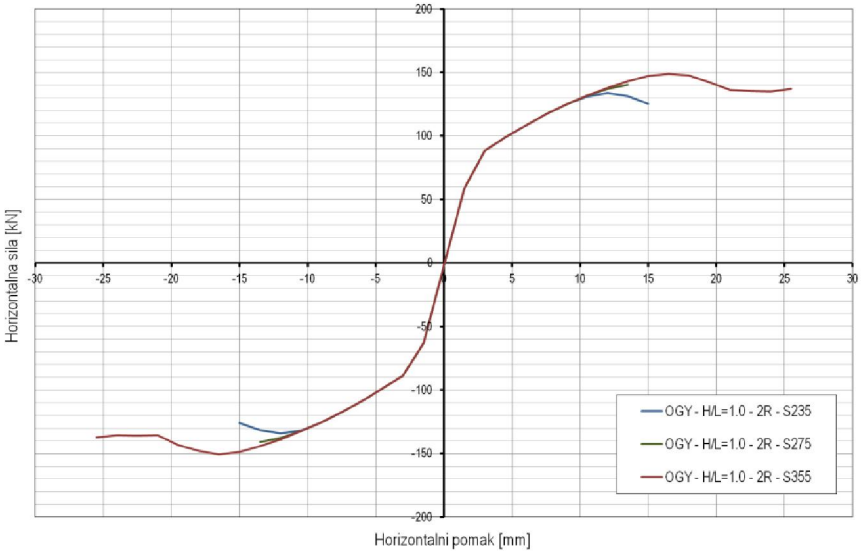


c) Nepopustljivi priključak – S355; H/L=0.5, 0.75 i 1.0; R=3

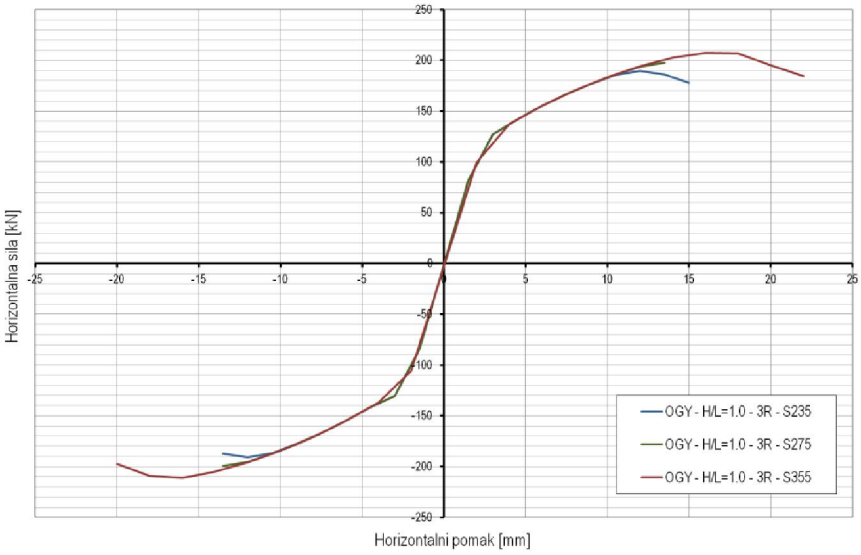
Slika A63 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L



a) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=1.0; R=1

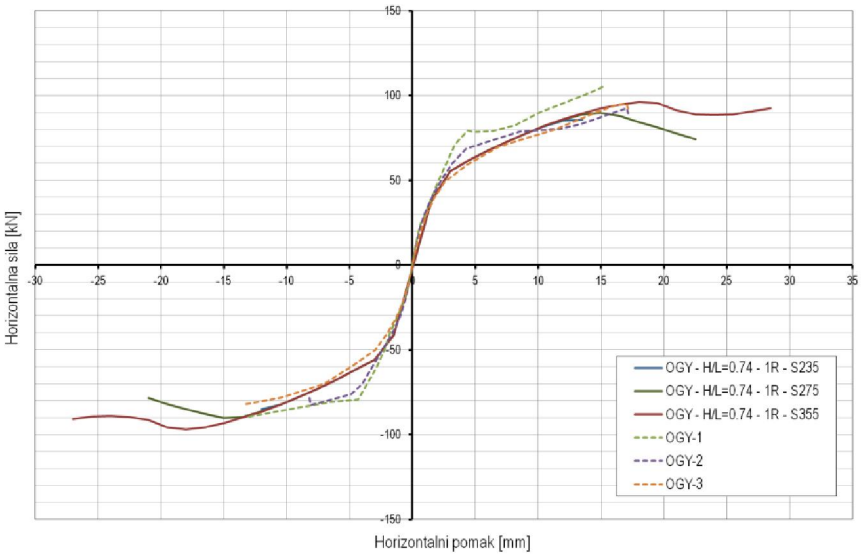


b) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=1.0; R=2

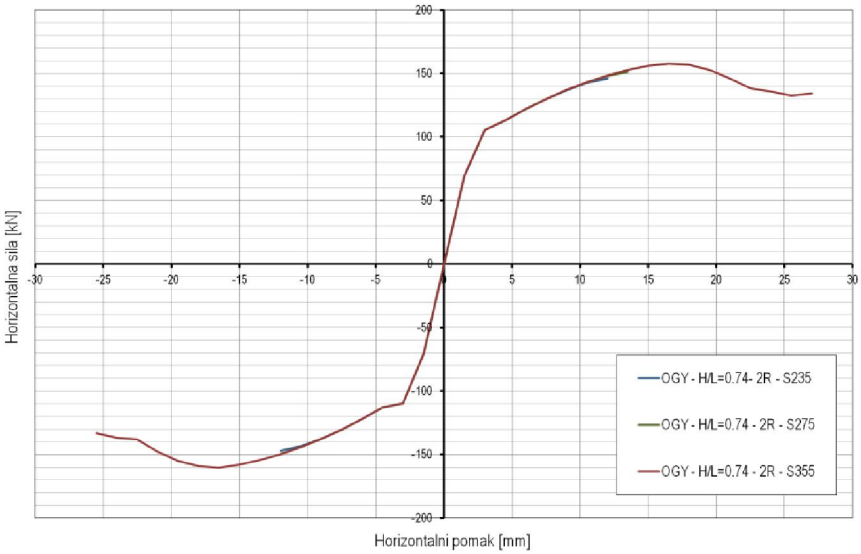


c) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=1.0; R=3

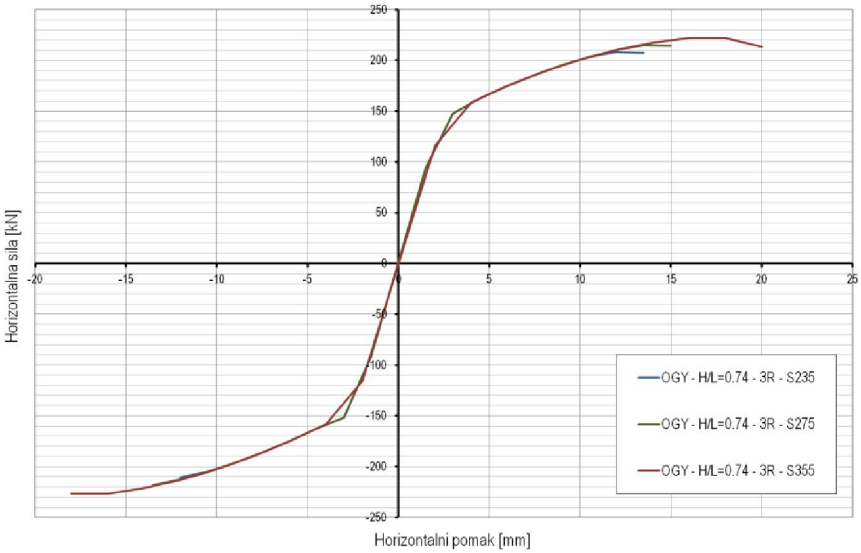
Slika A64 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika



a) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=1

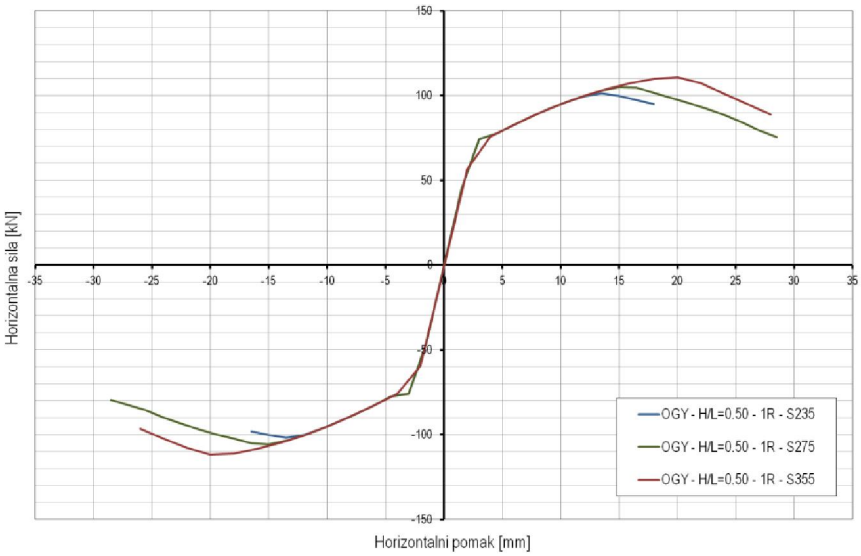


b) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=2

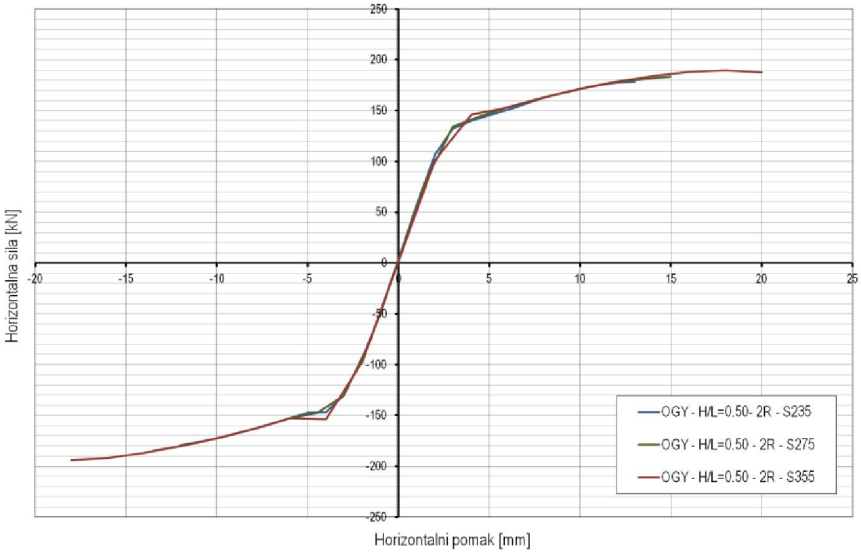


c) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=3

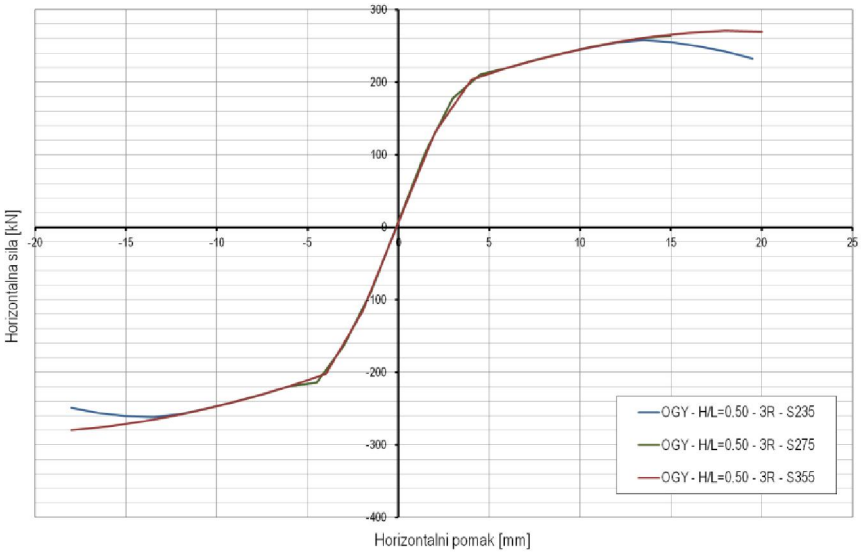
Slika A65 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika



a) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.50; R=1

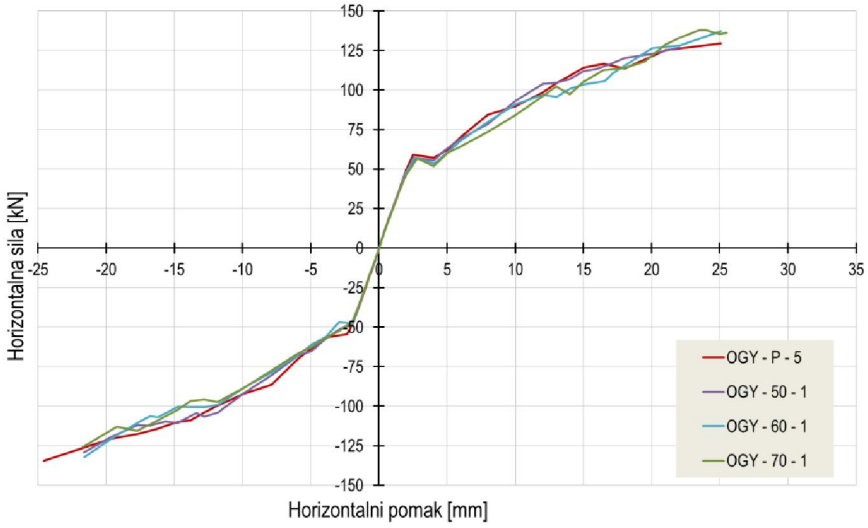


b) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.50; R=2

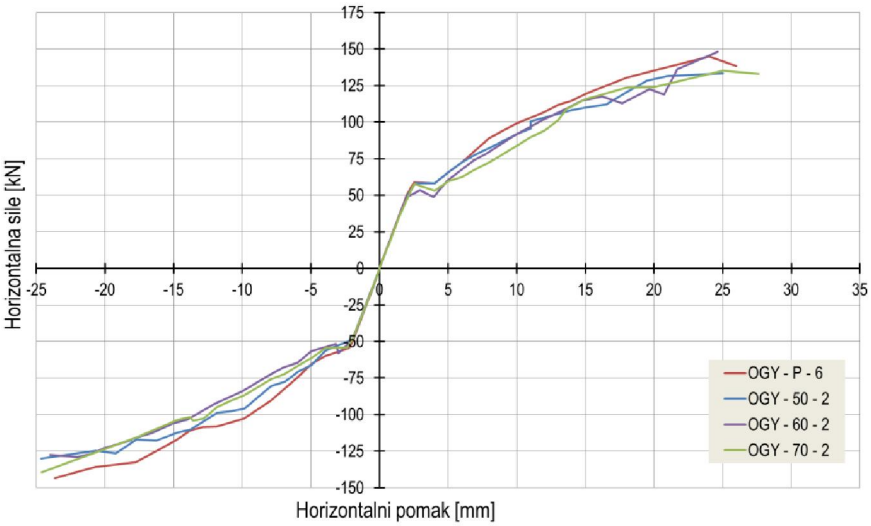


c) Nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.50; R=3

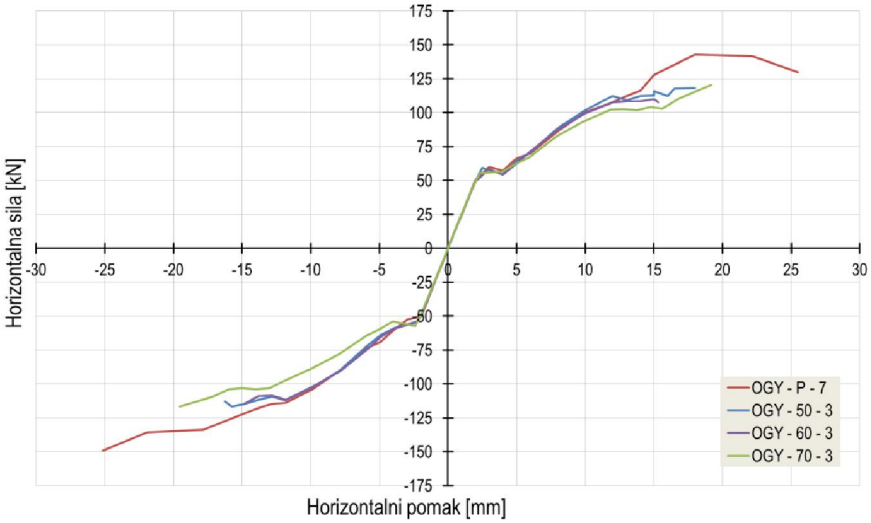
Slika A66 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika



a) P, 50, 60, 70; čvrstoće 1 i 5

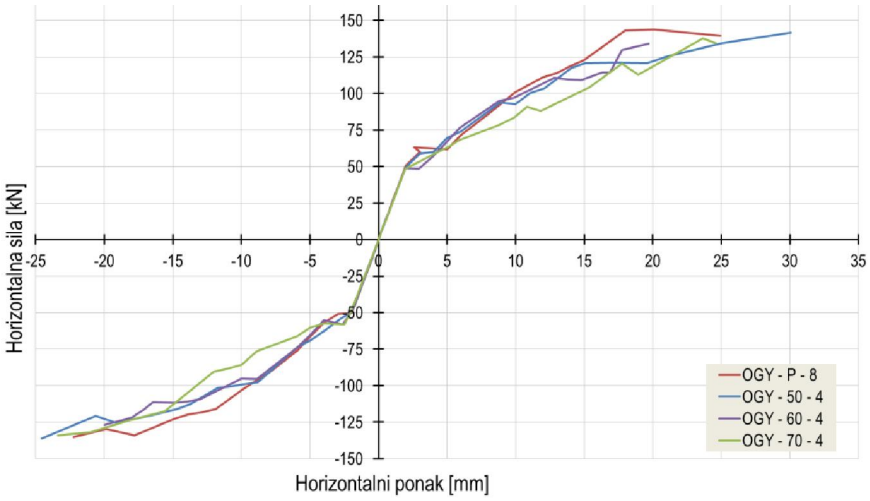


b) P, 50, 60, 70; čvrstoće 2 i 6

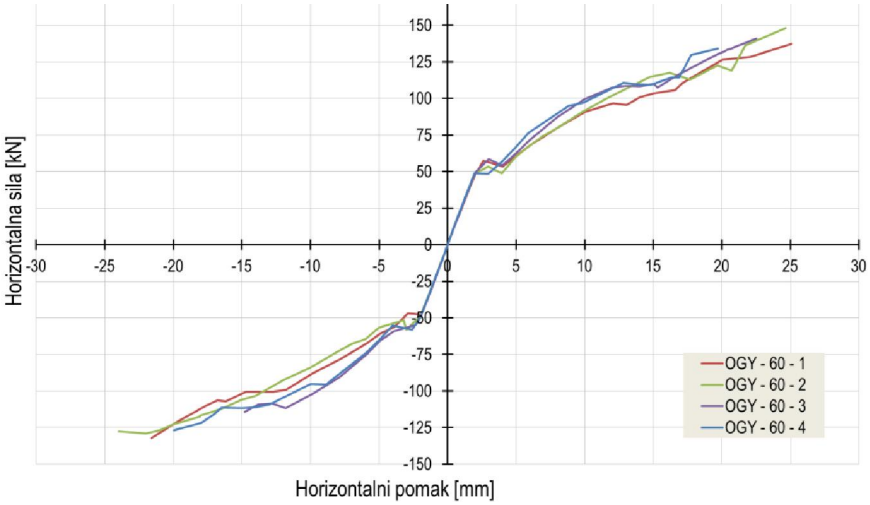


c) P, 50, 60, 70; čvrstoće 3 i 7

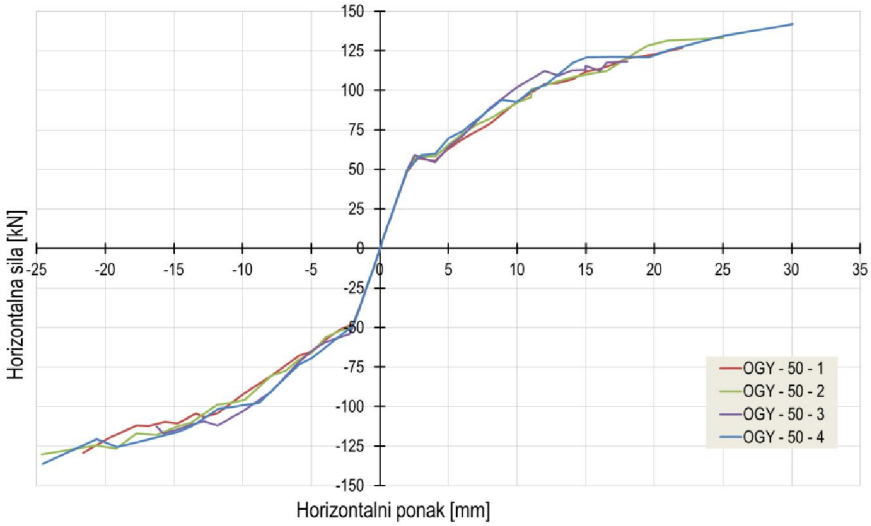
Slika A67 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije oslabljenja porobetonskih elemenata



Slika A68 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije oslabljenja porobetonskih elemenata – P, 50, 60, 70; čvrstoće 4 i 8

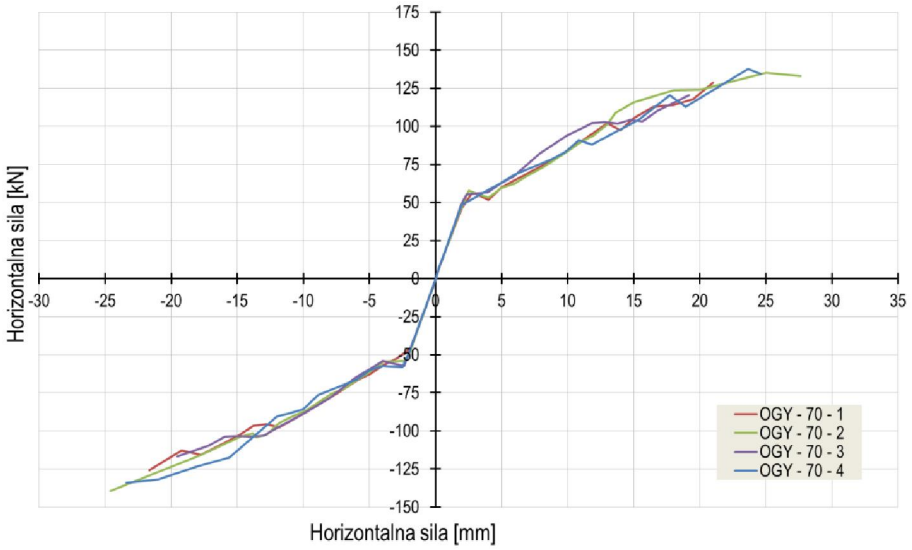


OGY - 1, 2, 3, 4; debljina oslabljenja 60 mm

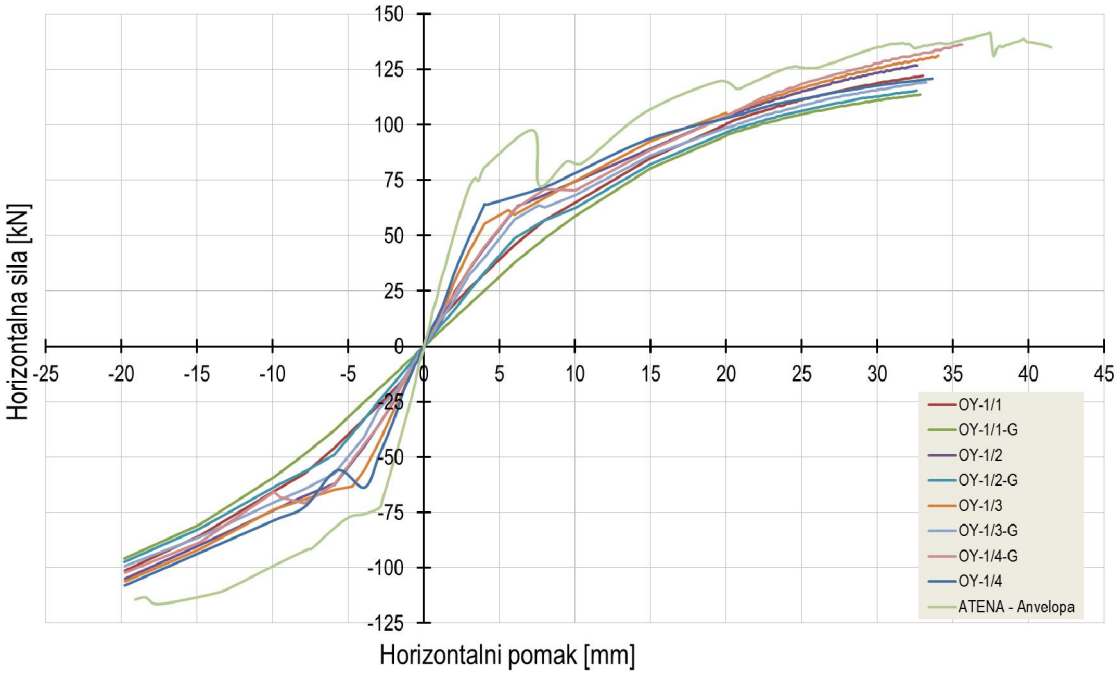


OGY - 1, 2, 3, 4; debljina oslabljenja 50 mm

Slika A69 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije kvalitete porobetonskih elemenata

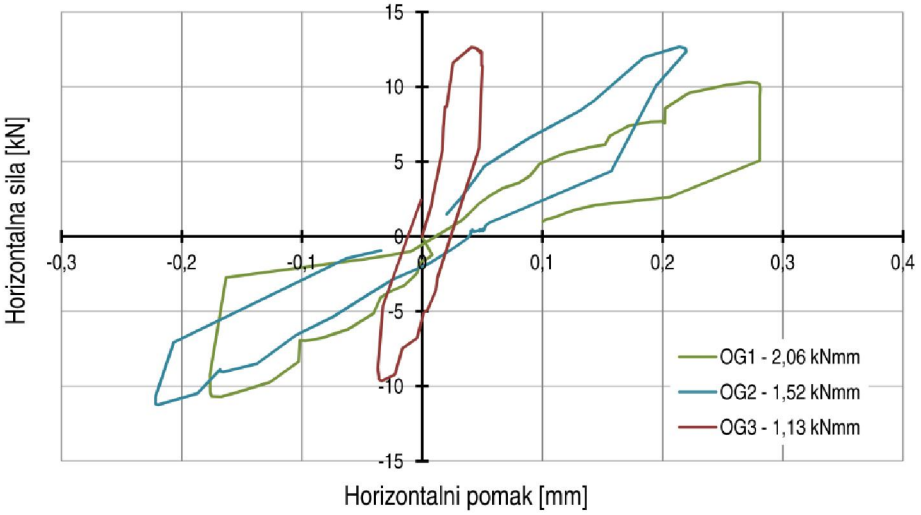


Slika A70 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije kvalitete porobetonskih elemenata – 1, 2, 3, 4; debljina oslabljenja 70 mm

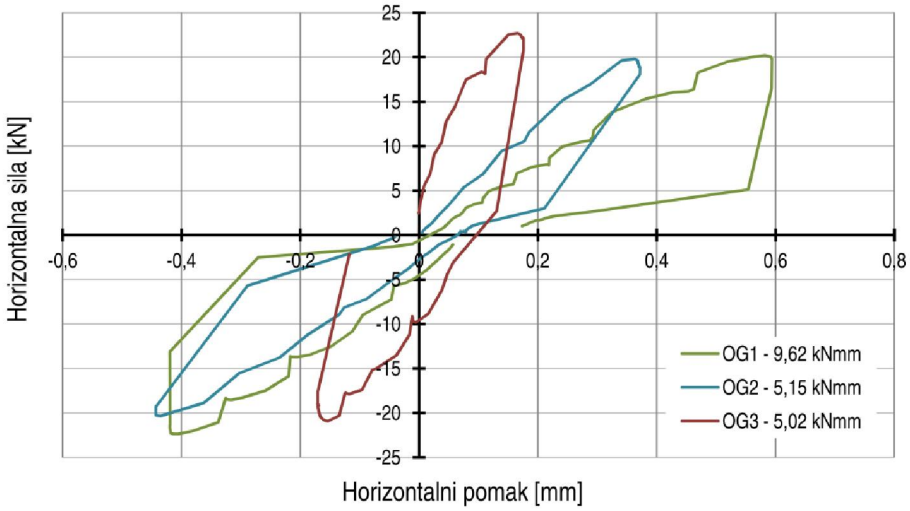


Slika A71 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije položaja nepovezanosti ispuna s čeličnim okvirom - OY-1/1, OY-1/1-G, OY-1/2, OY-1/2-G, OY-1/3, OY-1/3-G, OY-1/4, OY-1/4-G

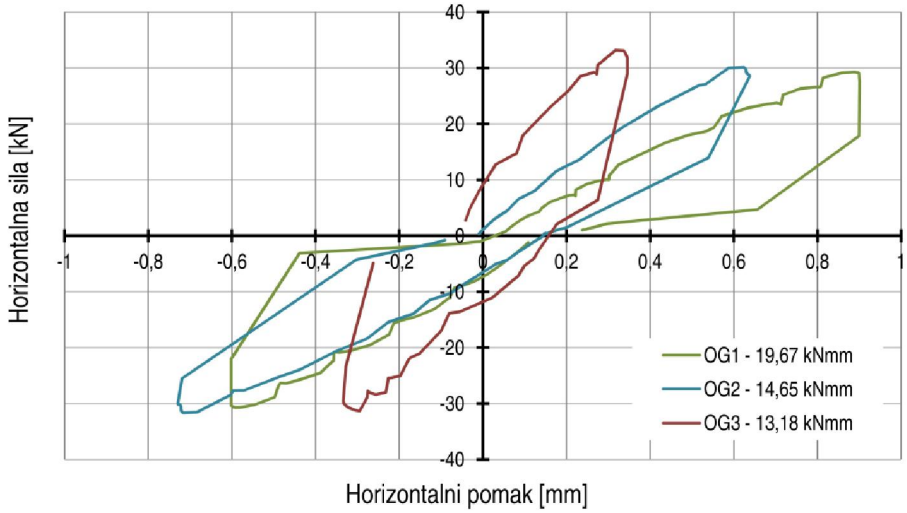
PRILOG B – DISIPACIJA ENERGIJE ISPITIVANIH OKVIRA S ISPUNOM



a) 1. ciklus opterećivanja

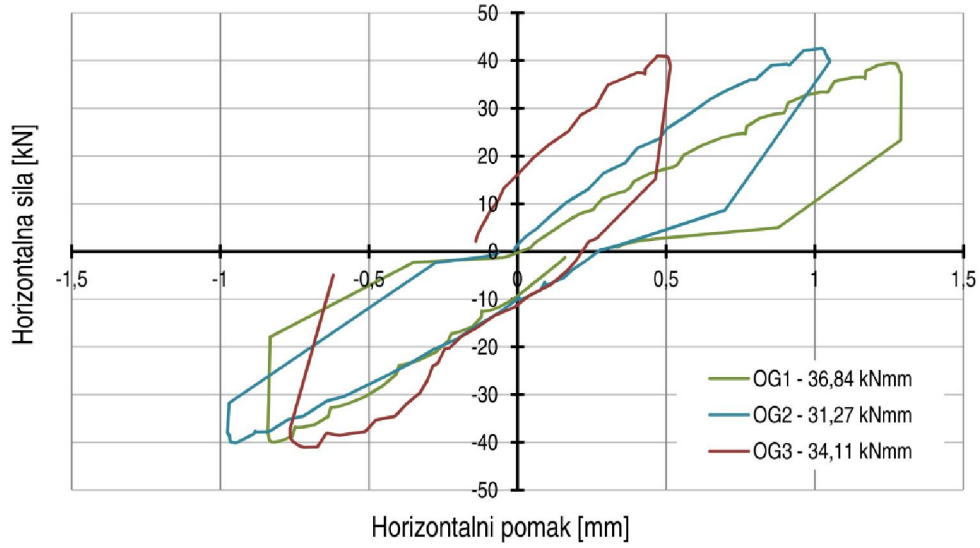


b) 2. ciklus opterećivanja

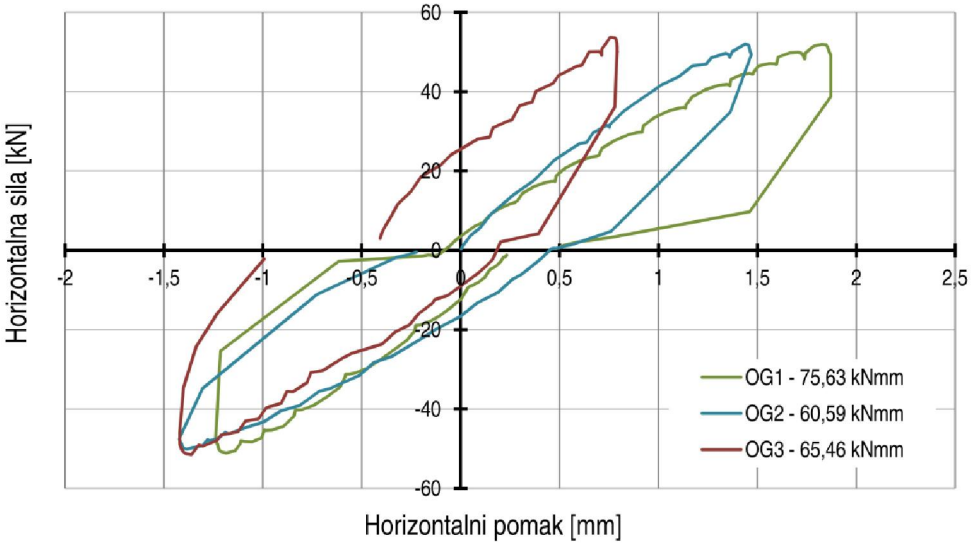


c) 3. ciklus opterećivanja

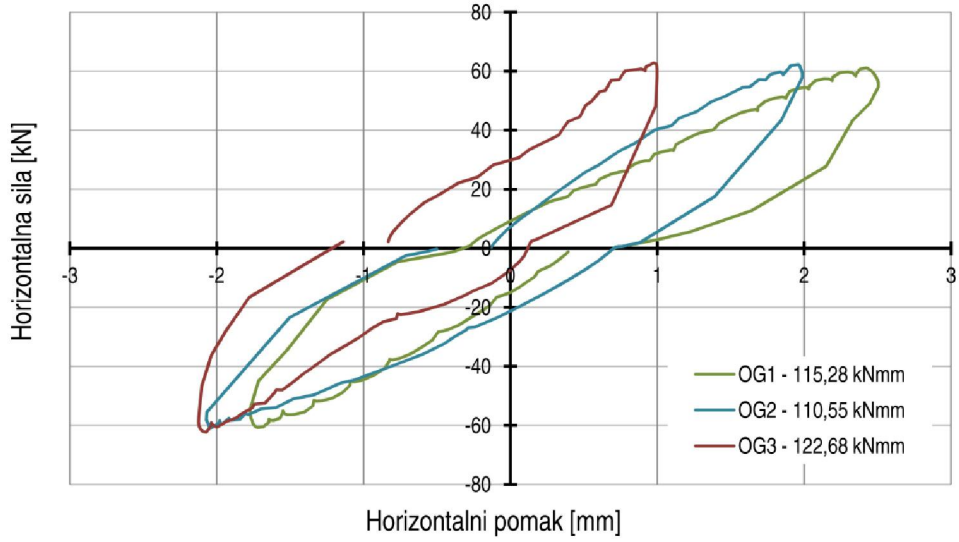
Slika B1 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 1. ciklus, b) 2. ciklus i c) 3. ciklus opterećivanja



a) 4. ciklus opterećivanja

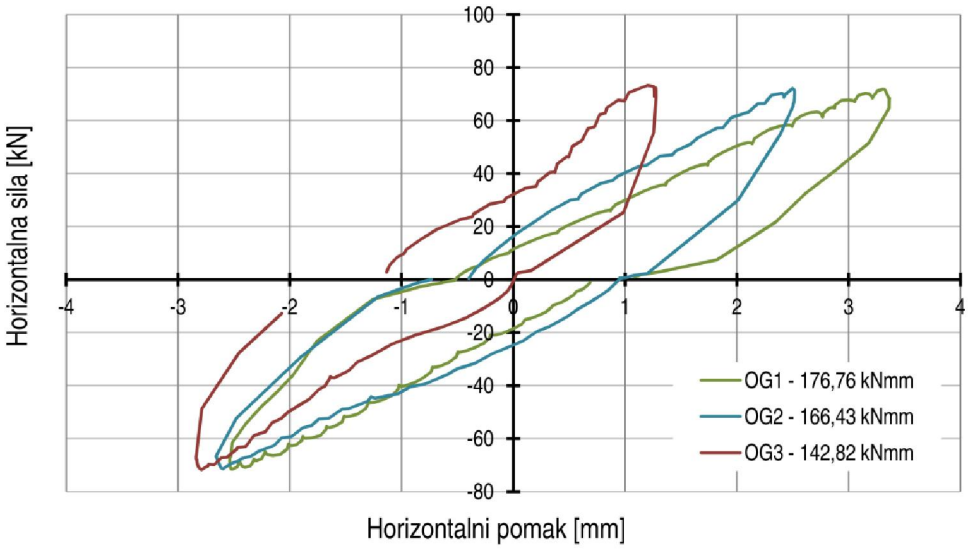


b) 5. ciklus opterećivanja

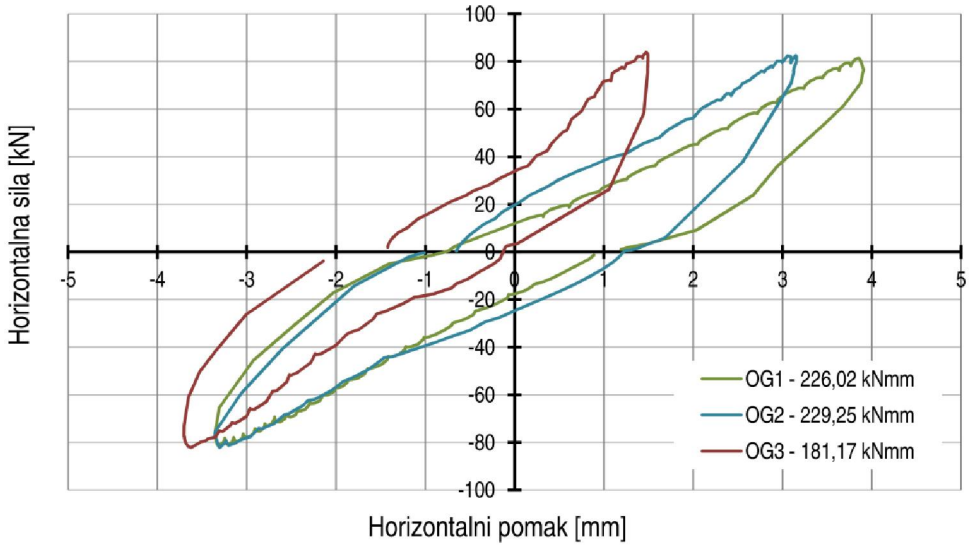


c) 6. ciklus opterećivanja

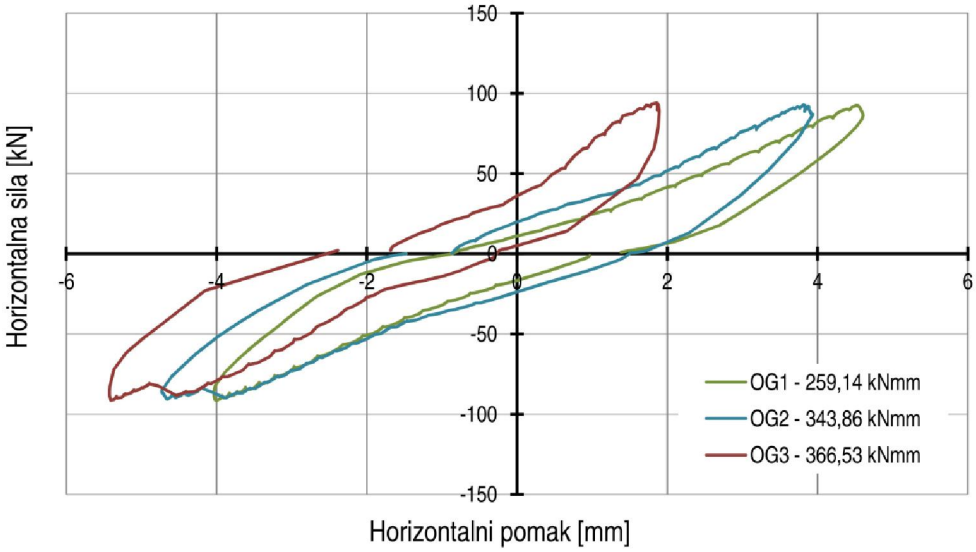
Slika B2 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 4. ciklus, b) 5. ciklus i c) 6. ciklus opterećivanja



a) 7. ciklus opterećivanja

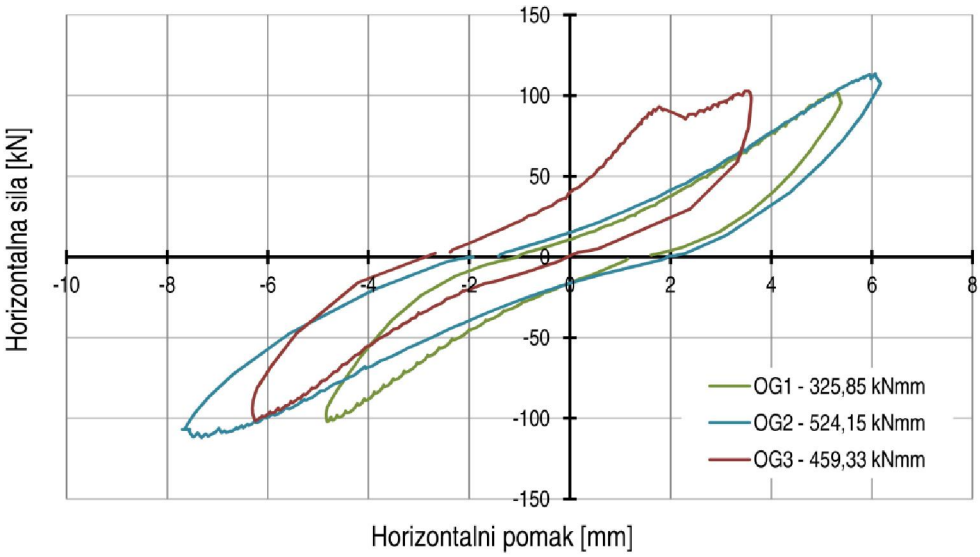


b) 8. ciklus opterećivanja

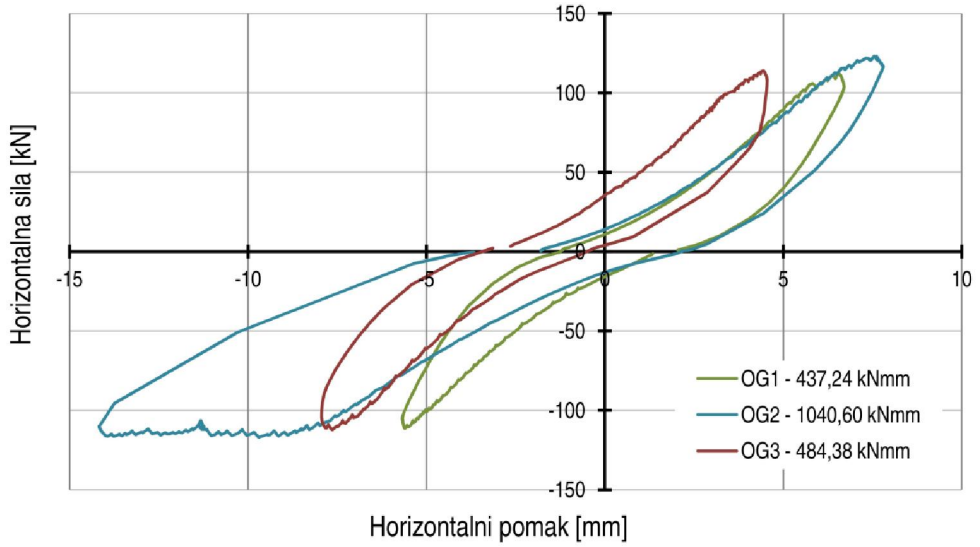


c) 9. ciklus opterećivanja

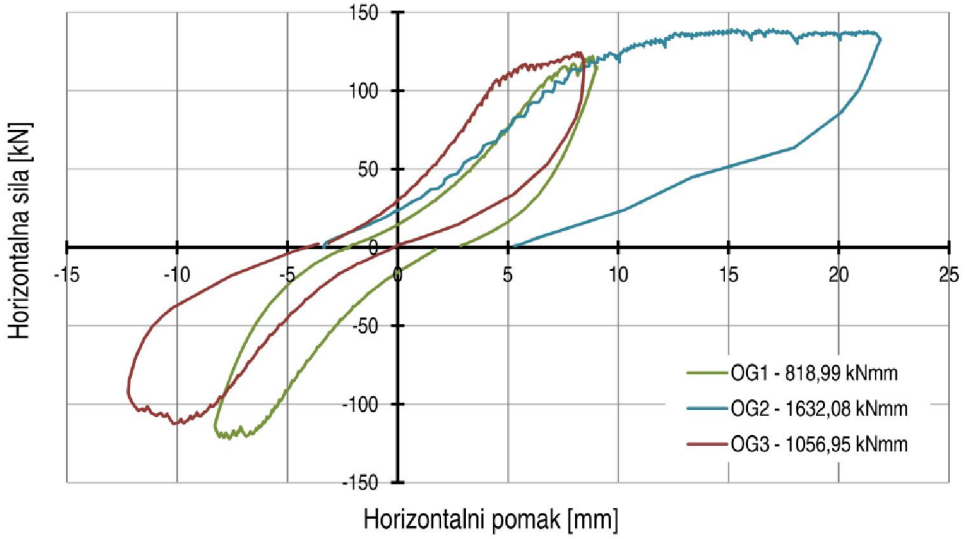
Slika B3 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 7. ciklus, b) 8. ciklus i c) 9. ciklus opterećivanja



a) 10. ciklus opterećivanja

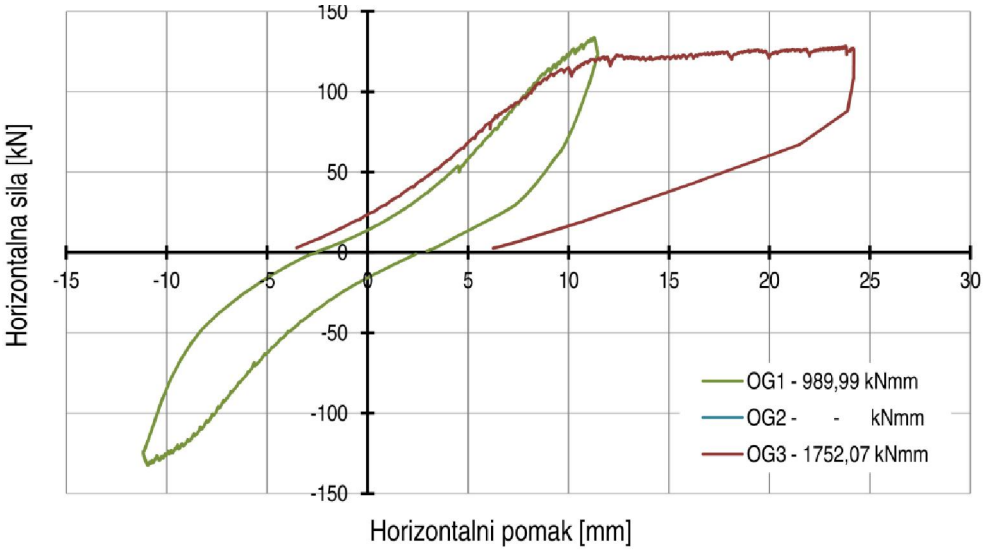


b) 11. ciklus opterećivanja

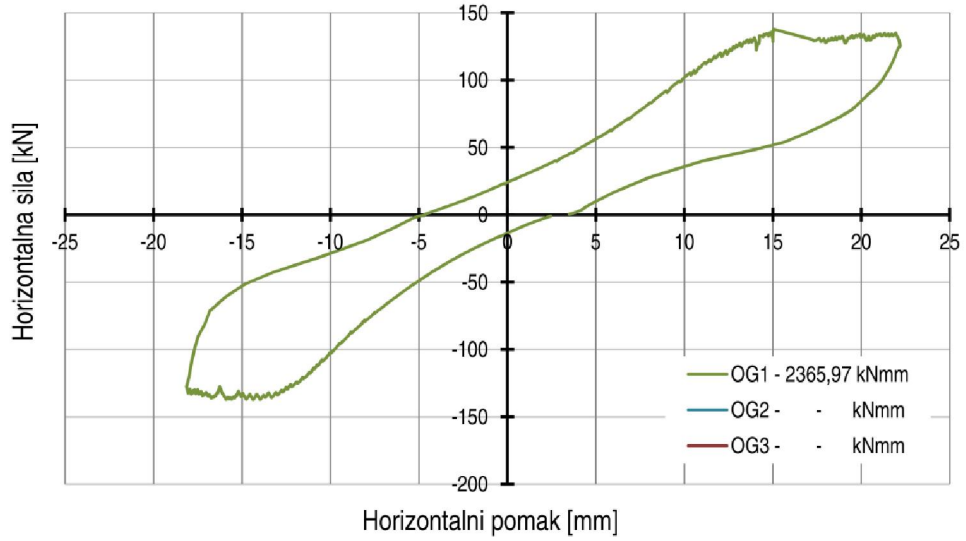


c) 12. ciklus opterećivanja

Slika B4 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 10. ciklus, b) 11. ciklus i c) 12. ciklus opterećivanja

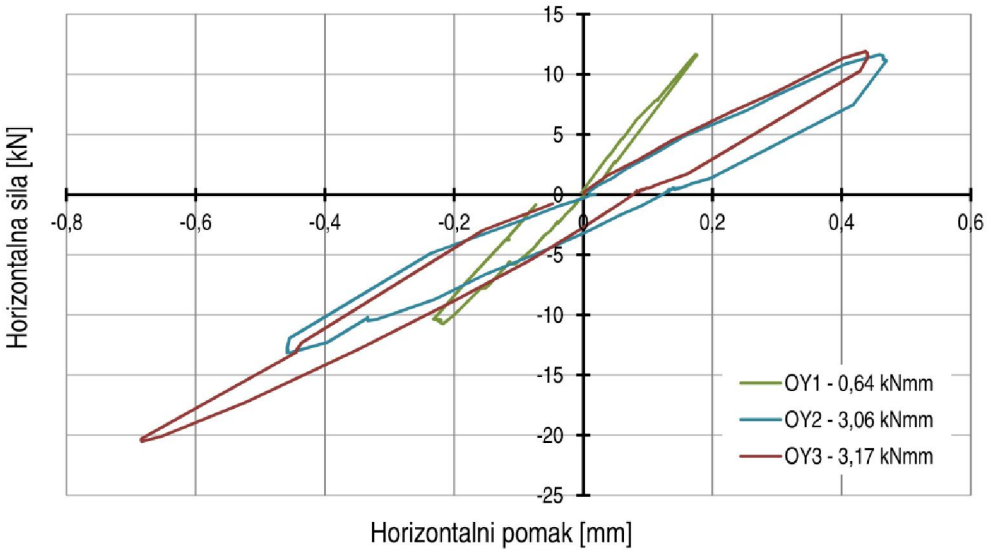


a) 13. ciklus opterećivanja

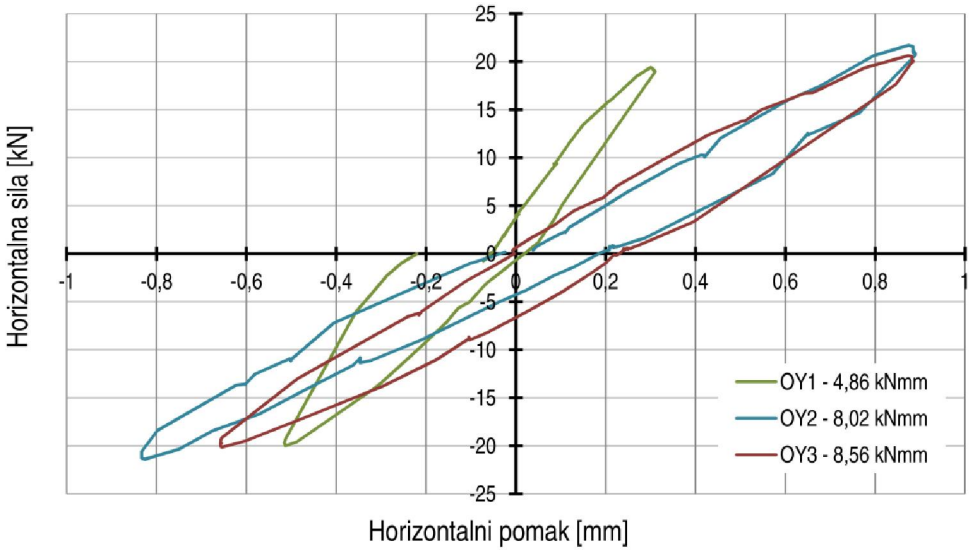


b) 14. ciklus opterećivanja

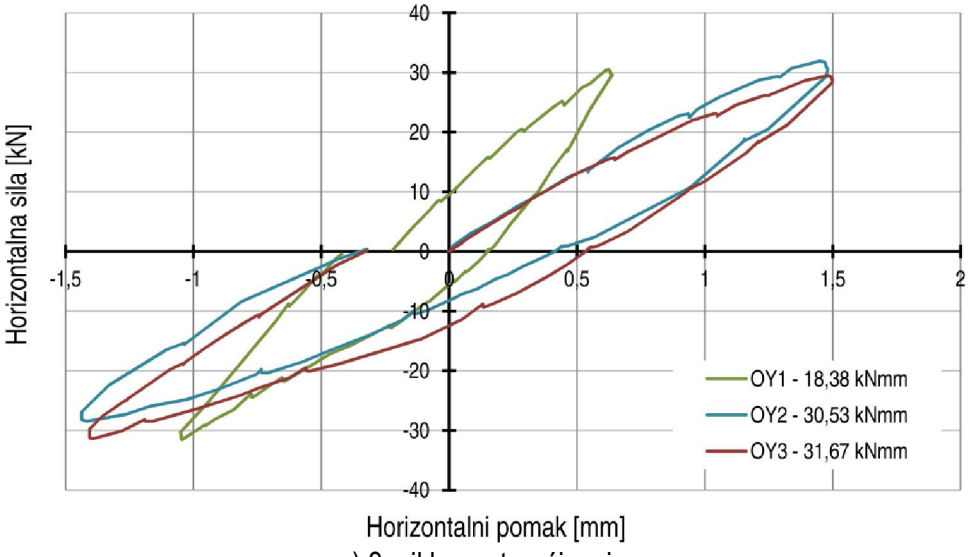
Slika B5 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 13. ciklus i b) 14. ciklus opterećivanja



a) 1. ciklus opterećivanja

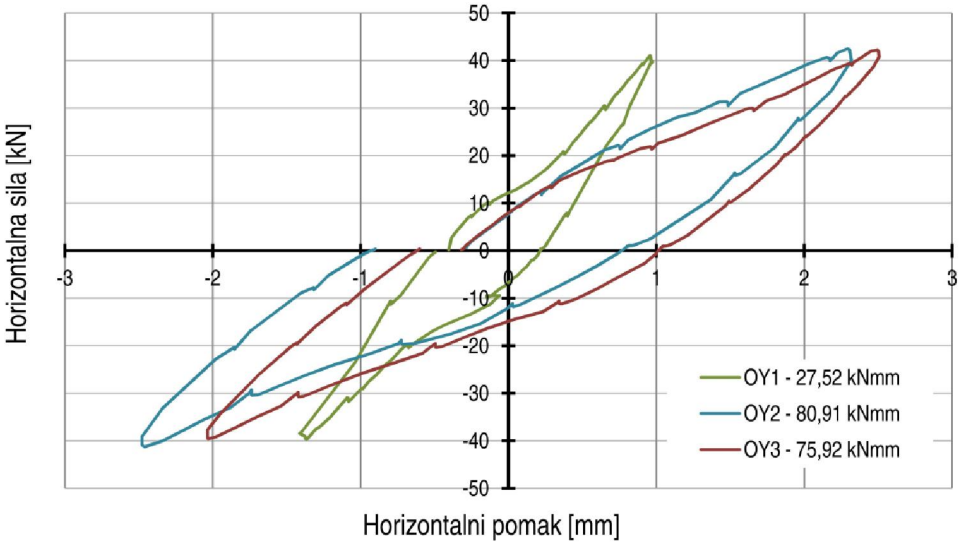


b) 2. ciklus opterećivanja

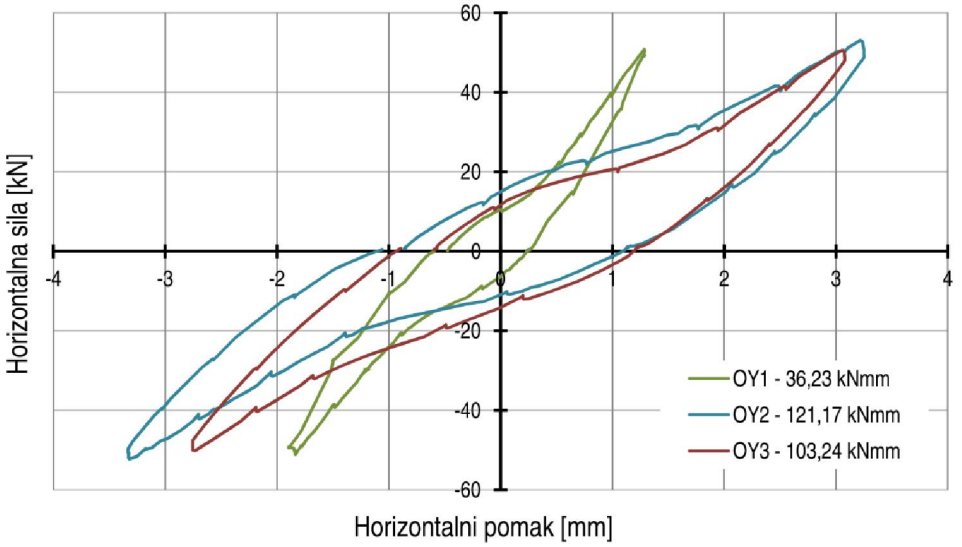


c) 3. ciklus opterećivanja

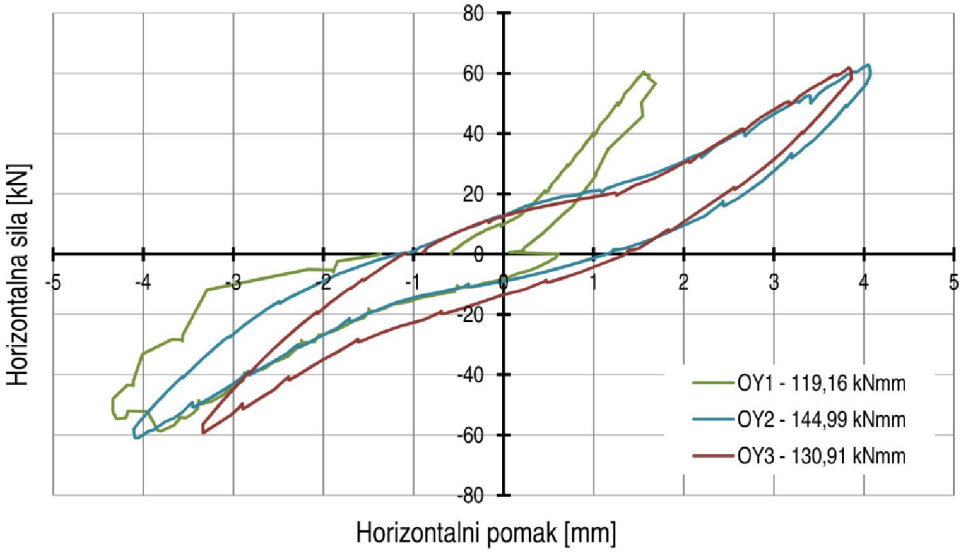
Slika B6 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom: a) 1. ciklus, b) 2. ciklus i c) 3. ciklus opterećivanja



a) 4. ciklus opterećivanja

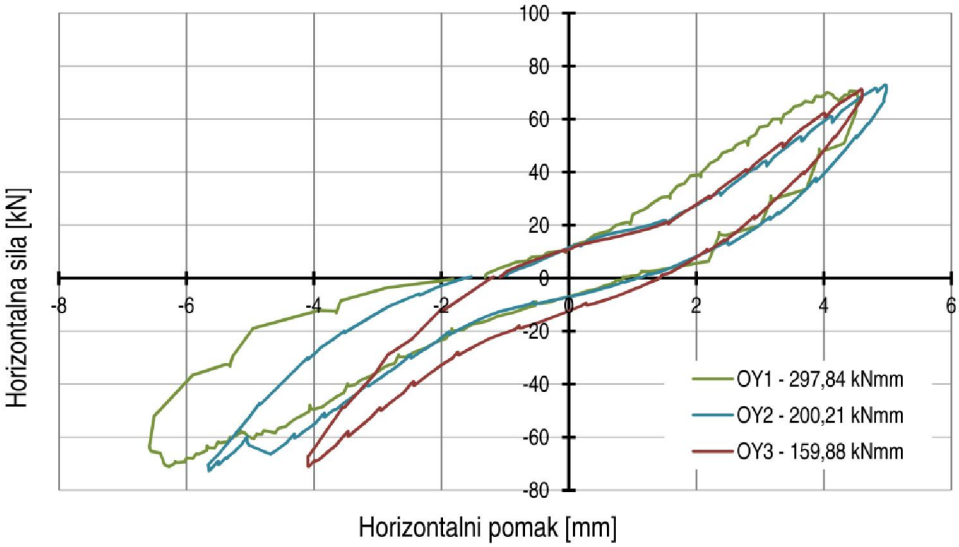


b) 5. ciklus opterećivanja

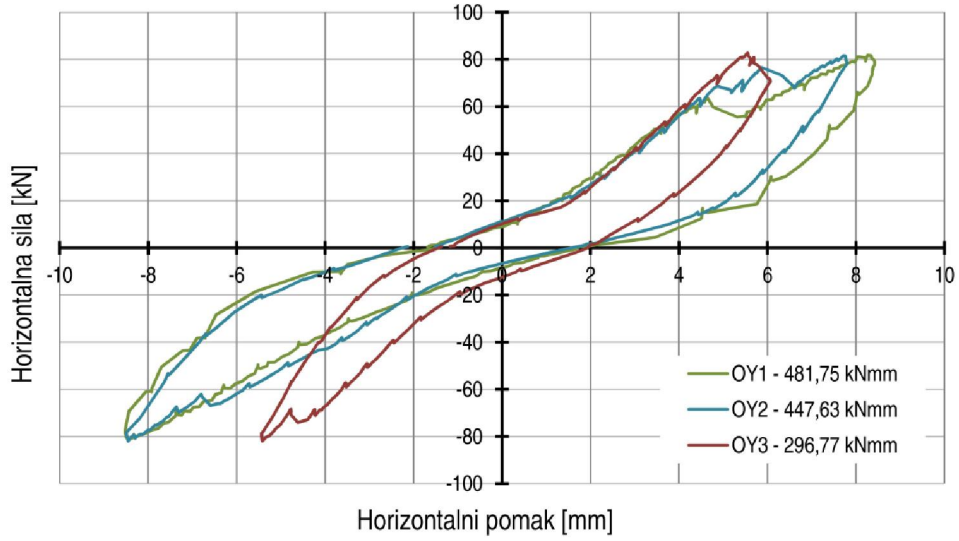


c) 6. ciklus opterećivanja

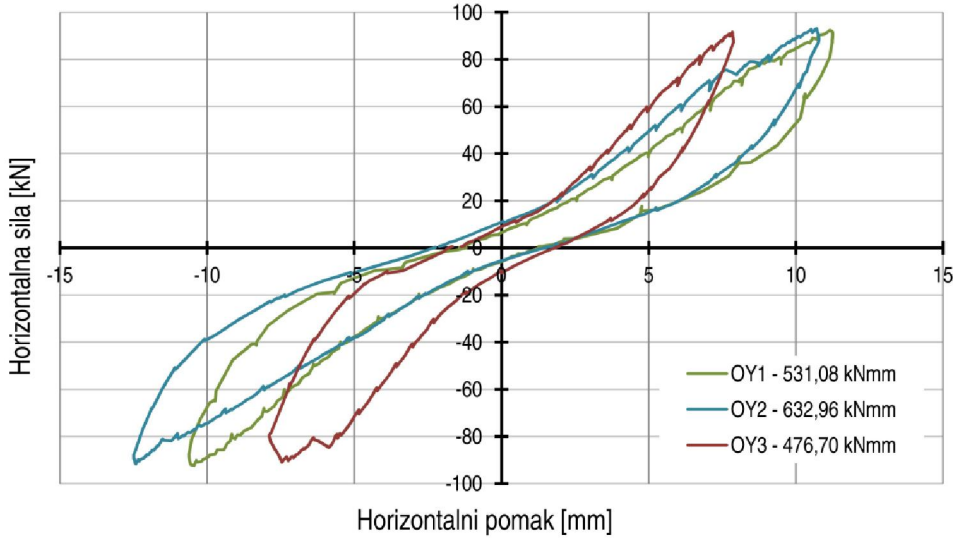
Slika B7 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom: a) 4. ciklus, b) 5. ciklus i c) 6. ciklus opterećivanja



a) 7. ciklus opterećivanja

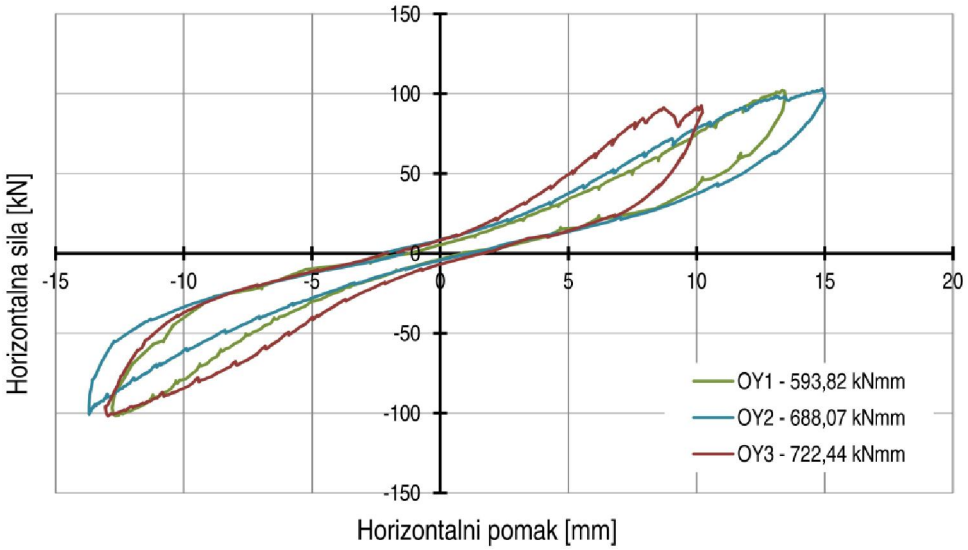


b) 8. ciklus opterećivanja

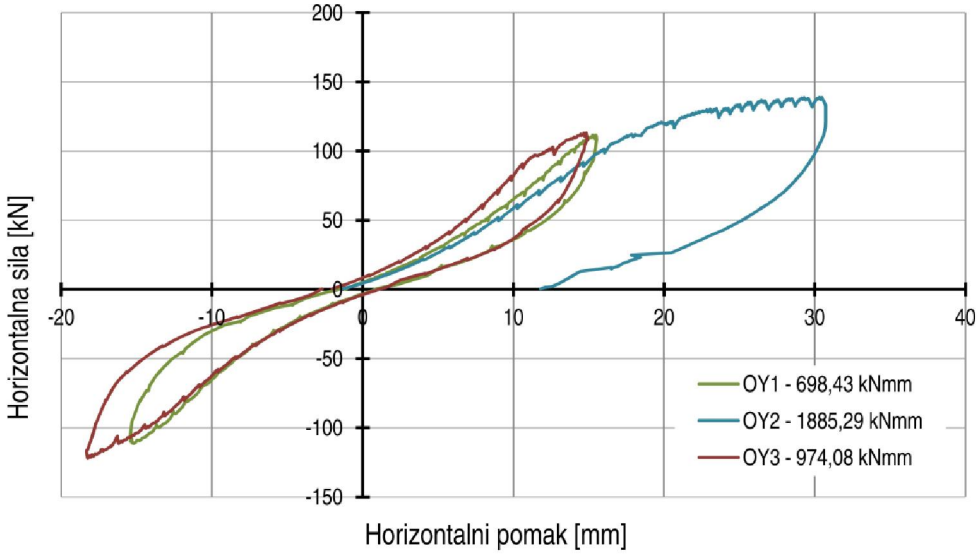


c) 9. ciklus opterećivanja

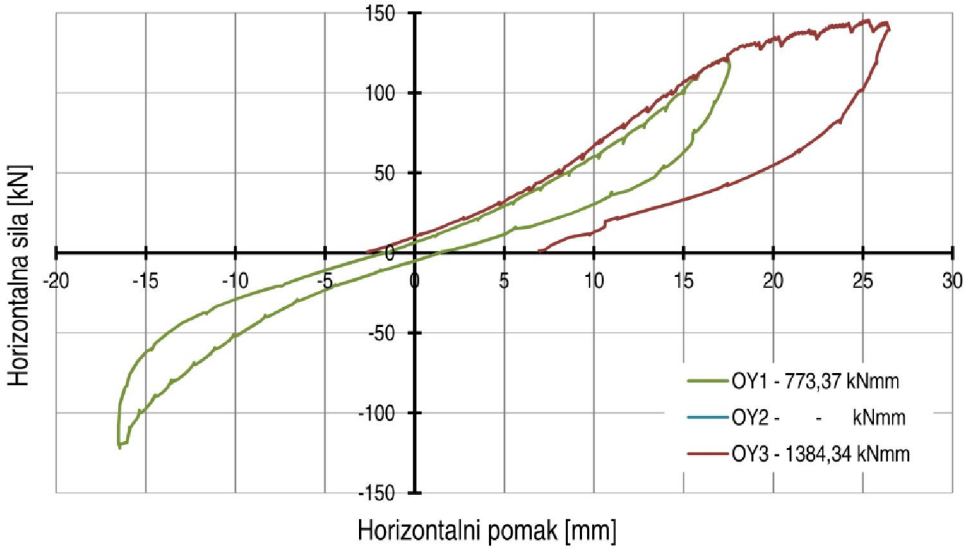
Slika B8 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom: a) 7. ciklus, b) 8. ciklus i c) 9. ciklus opterećivanja



a) 10. ciklus opterećivanja

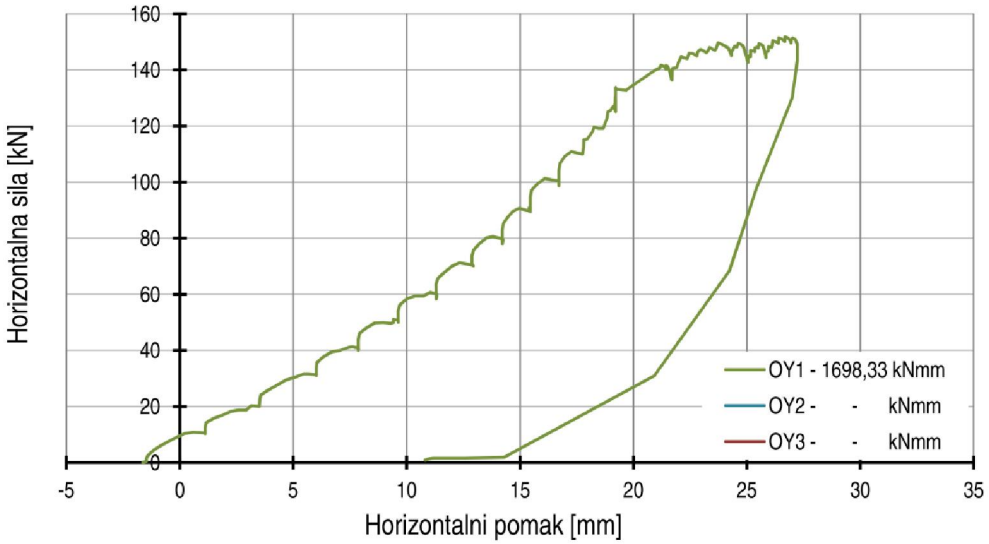


b) 11. ciklus opterećivanja

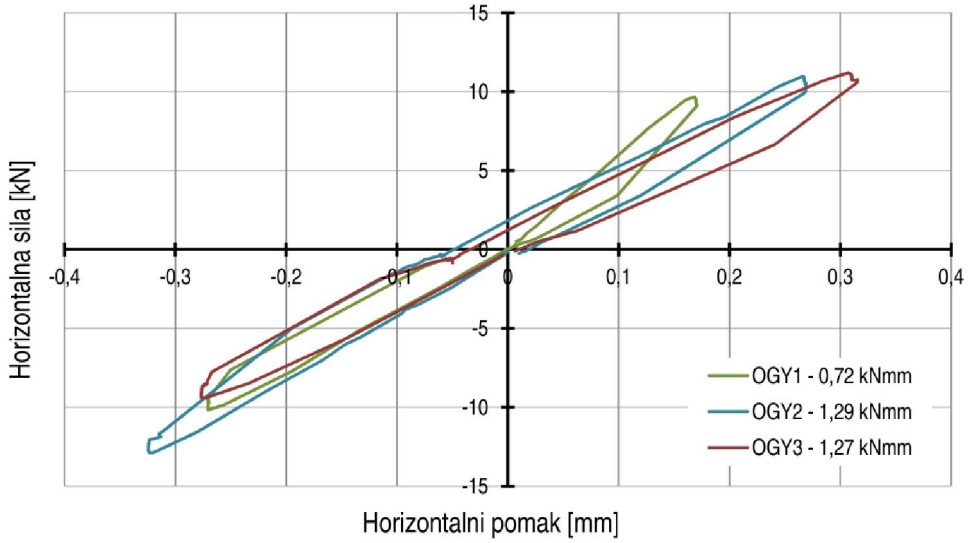


c) 12. ciklus opterećivanja

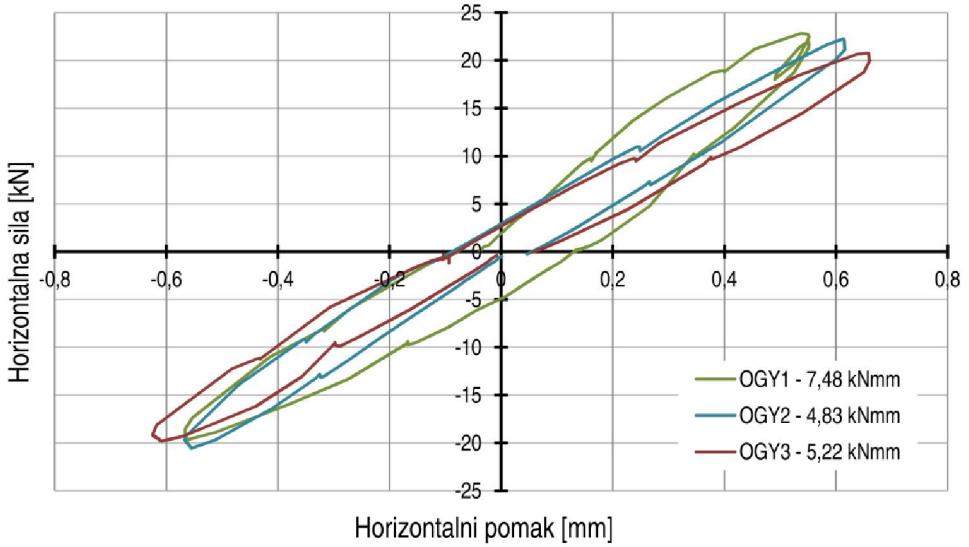
Slika B9 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom: a) 10. ciklus, b) 11. ciklus i c) 12. ciklus opterećivanja



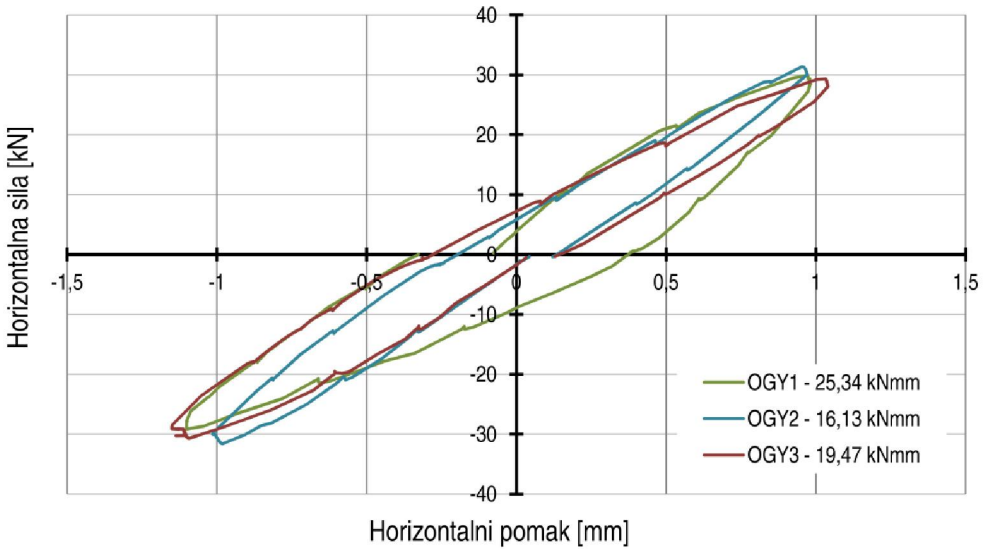
Slika B10 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom u 13. ciklusu opterećivanja



a) 1. ciklus opterećivanja

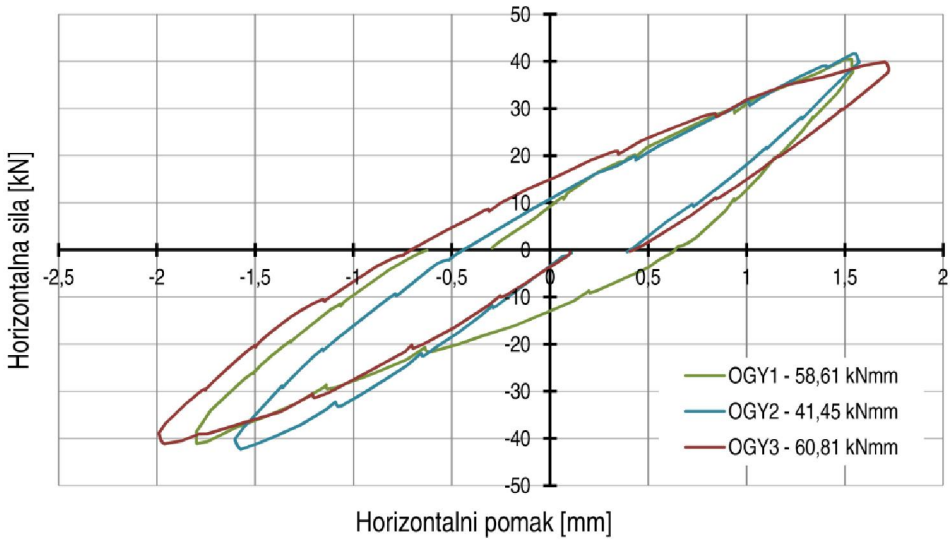


b) 2. ciklus opterećivanja

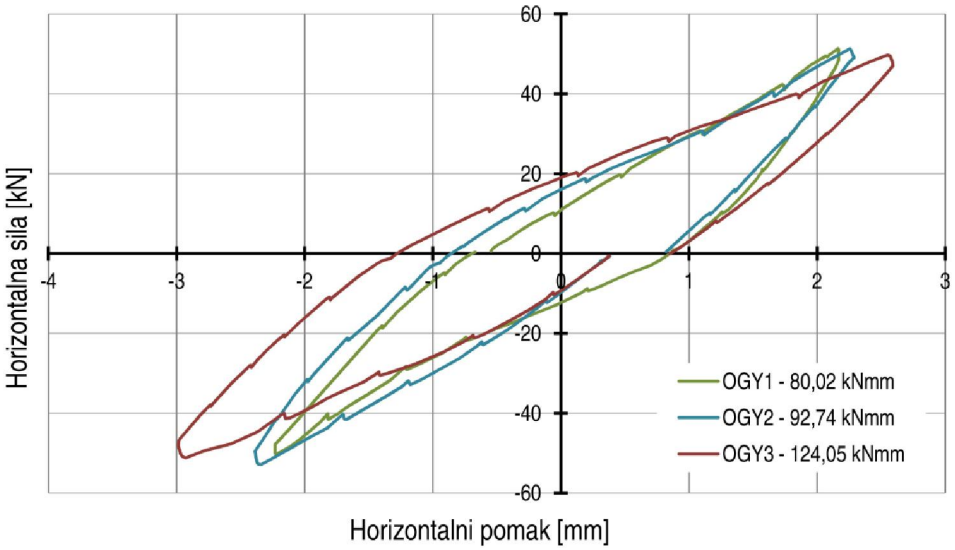


c) 3. ciklus opterećivanja

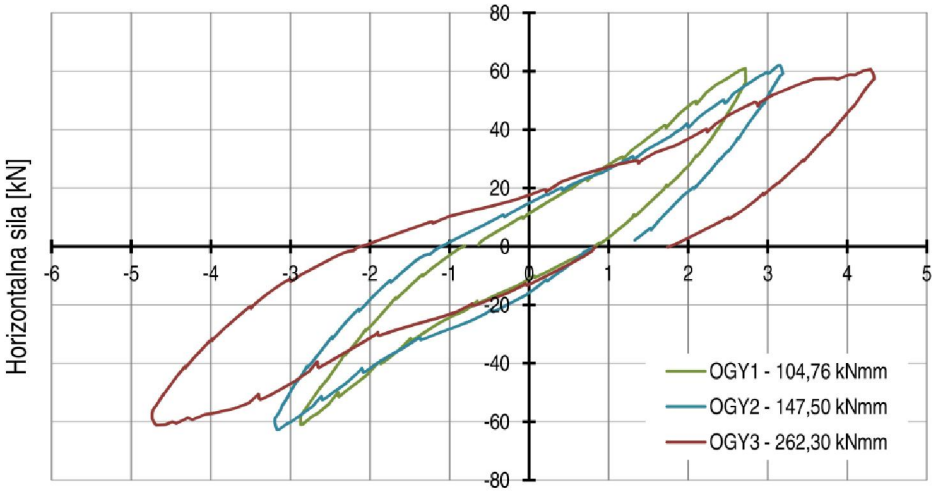
Slika B11 – Disipacija energije okvira s kombiniranim ispunom: a) 1. ciklus, b) 2. ciklus i c) 3. ciklus opterećivanja



a) 4. ciklus opterećivanja

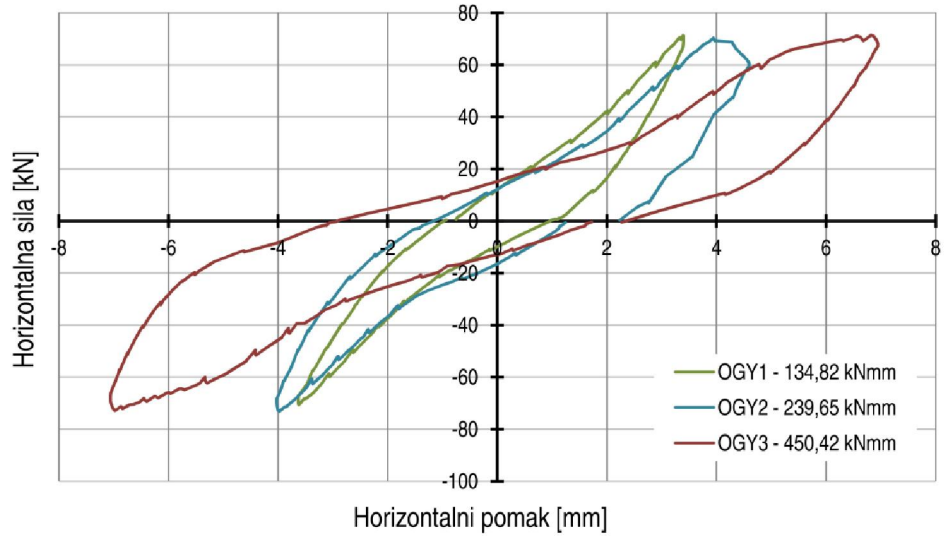


b) 5. ciklus opterećivanja

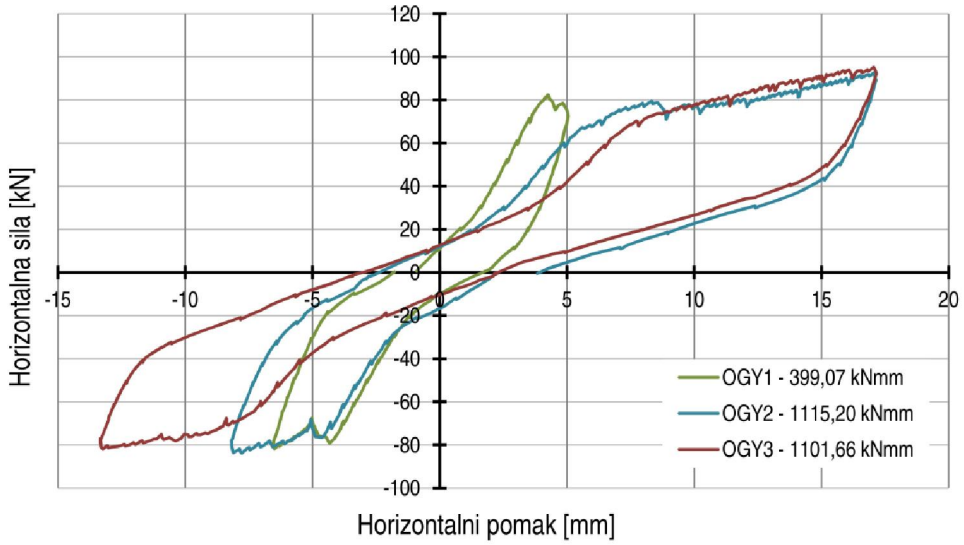


c) 6. ciklus opterećivanja

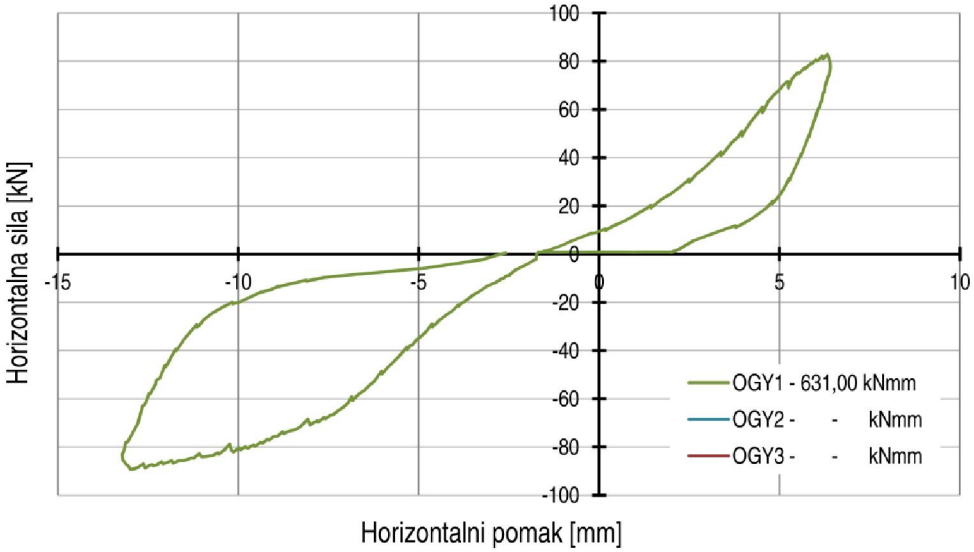
Slika B12 – Disipacija energije okvira s kombiniranim ispunom: a) 4. ciklus, b) 5. ciklus i c) 6. ciklus opterećivanja



a) 7. ciklus opterećivanja

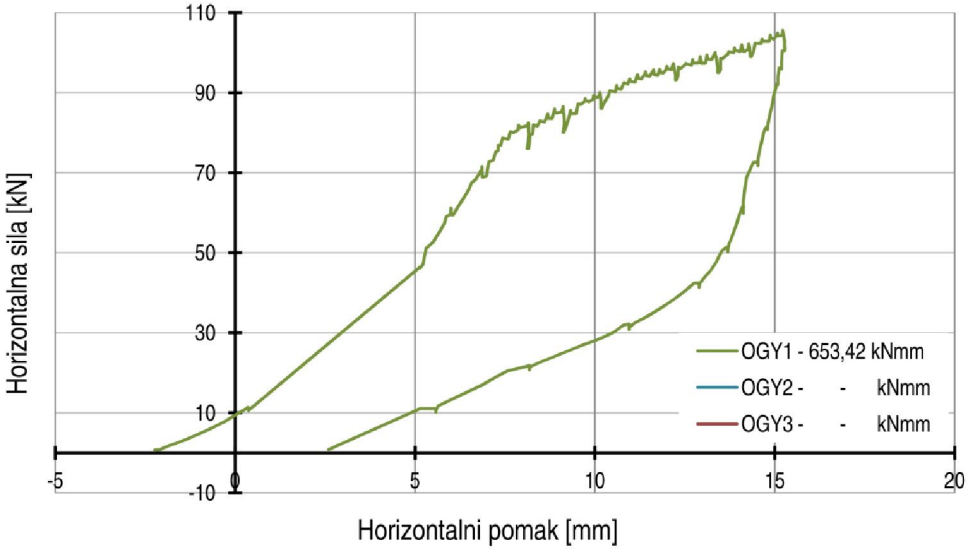


b) 8. ciklus opterećivanja



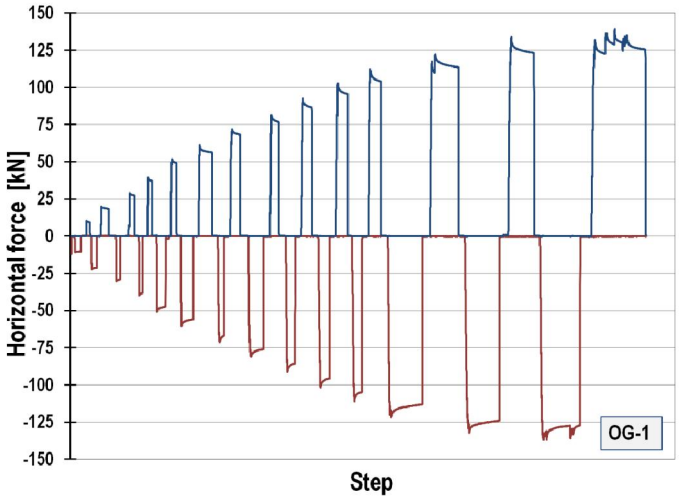
c) 9. ciklus opterećivanja

Slika B13 – Disipacija energije okvira s kombiniranim ispunom: a) 7. ciklus, b) 8. ciklus i c) 9. ciklus opterećivanja

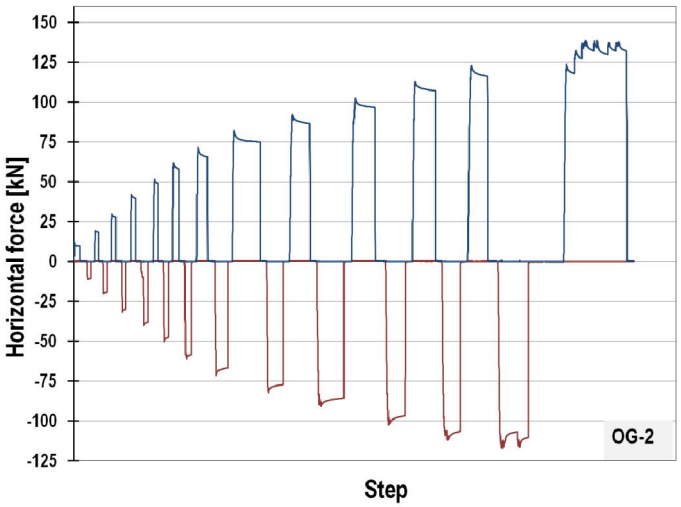


Slika B14 – Disipacija energije okvira s kombiniranim ispunom u 10. ciklusu opterećivanja

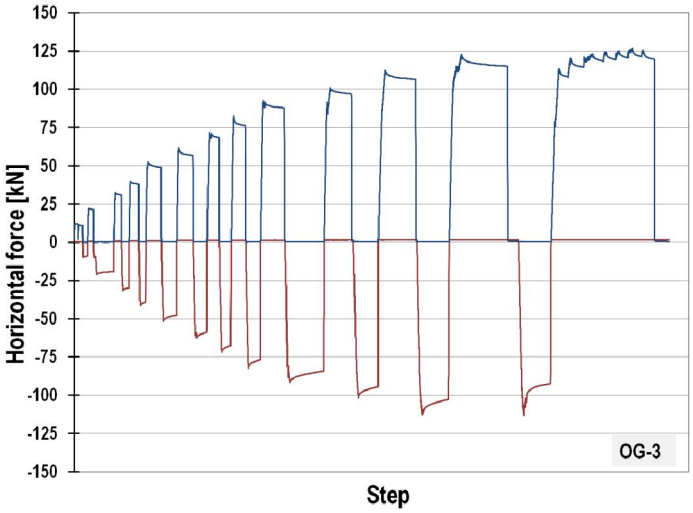
PRILOG C – OPTEREĆIVANJE OKVIRA S ISPUNOM PRILIKOM ISPITIVANJA



a) OG-1

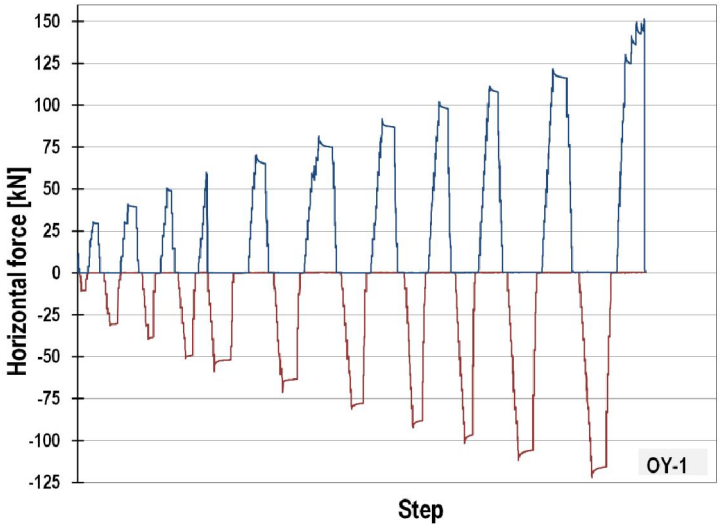


b) OG-2

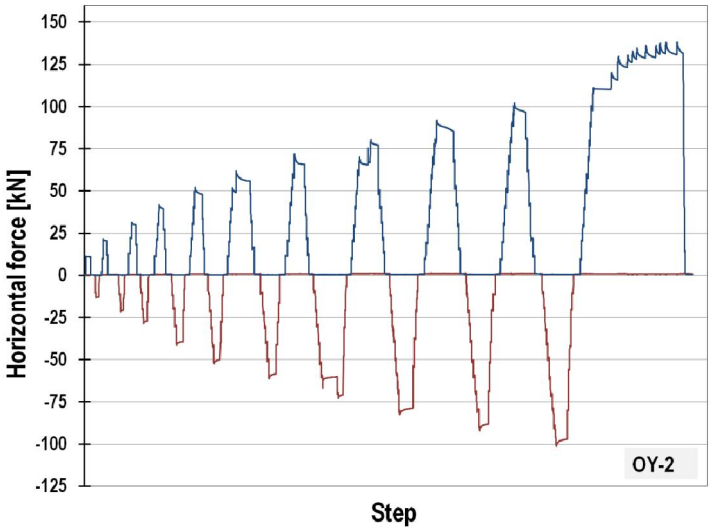


c) OG-3

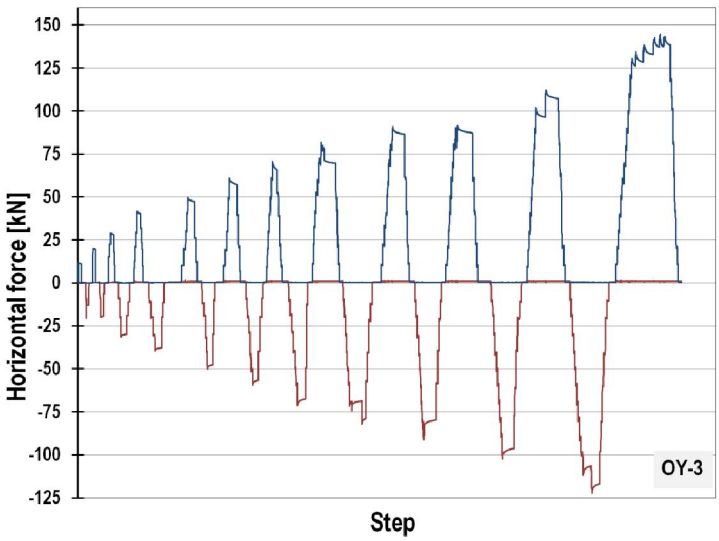
Slika C1 – Opterećivanje okvira s glinenim ispunom: a) OG-1, b) OG-2 i c) OG-3



a) OY-1

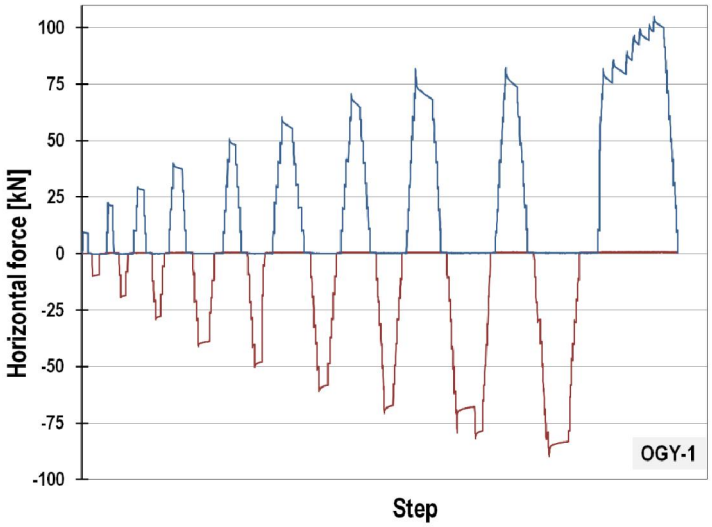


b) OY-2

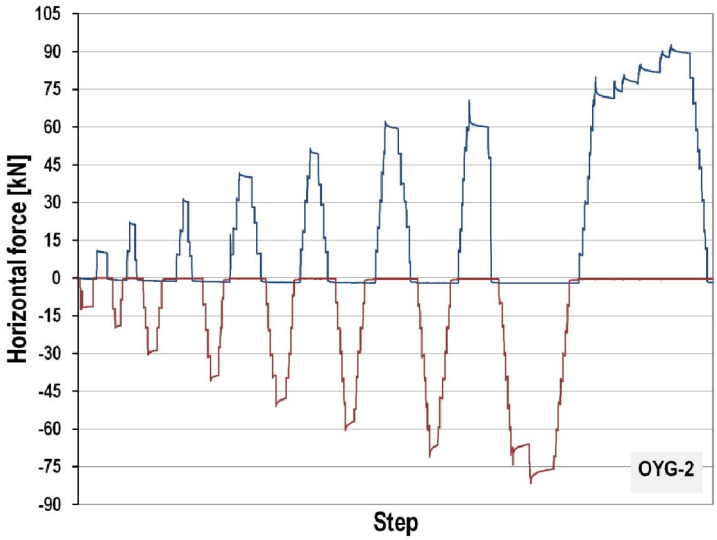


c) OY-3

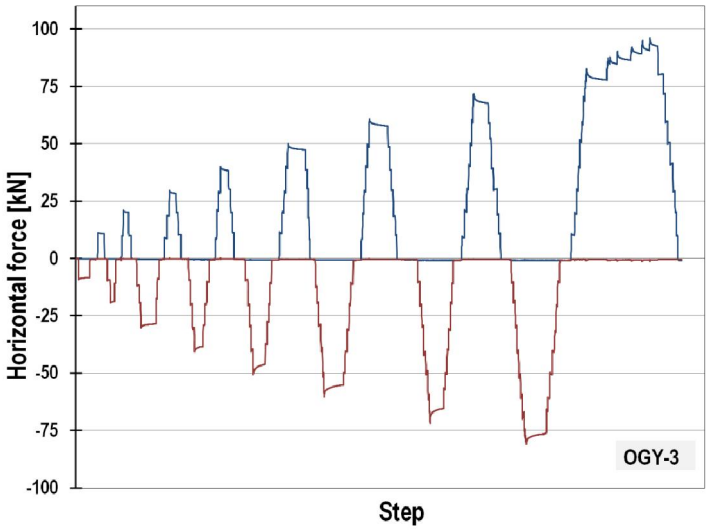
Slika C2 – Opterećivanje okvira s porobetonskim ispunom: a) OY-1, b) OY-2 i c) OY-3



a) OGY-1



b) OGY-2



c) OGY-3

Slika C3 – Opterećivanje okvira s kombiniranim ispunom: a) OGY-1, b) OGY-2 i c) OGY-3

PRILOG D – PRORAČUN NOSIVOSTI VIŠEETAŽNE ČELIČNE KONSTRUKCIJE

Za višeetažnu (P+3) čeličnu konstrukciju, koja je korištena u poglavlju 7, u ovome prilogu pregledno se daje postupak dimenzioniranja stupa i grede za prvu etaže okvira B.

Ukupna visina konstrukcije je 17,0 m, širina je 14,0 m, a dužina 12,0 m. Lokacija objekta je grad Osijek (VII. seizmička zona), a razred tla je C. Za seizmičku analizu korišten je tip spektra 1 (površinska magnituda potresa veća od 5,5). Faktor važnosti građevine iznosi γ_I=1,0. Predviđeno je da u objektu budu smješteni uredi (kategorija namjene objekta B), krov je ravan neprohodan (kategorija H).
Za konstrukcijske elemente korišten je čelik kvalitete S235.

STATIČKI PRORAČUN KONSTRUKCIJE

ANALIZA DJELOVANJA

Parcijalni faktori:

- za djelovanja:

$$\gamma_{Gmax} = 1,35$$
$$\gamma_{Gmin} = 1,0$$
$$\gamma_{Q} = 1,50$$

- za otpornost poprečnih presjeka i elemenata konstrukcije:

$$\gamma_{M0} = 1,0$$
$$\gamma_{M1} = 1,0$$

Faktori kombinacija:

$\psi_0 = 0,5$ - za opterećenje snijegom (nadmorske visine do 1000 m)
$\psi_0 = 0,6$ - za opterećenje vjetrom
$\psi_0 = 0,7$ - za uporabno opterećenje

Stalno djelovanje

- vlastita težina čeličnih nosača uzeta je u obzir programom *Autodesk Robot*

Strop krova:

- slojevi ravnog neprohodnog krova	$1,50\ kN/m^2$
- Hoesch Additiv strop	$3,0\ kN/m^2$
	$\Delta G = 4,50\ kN/m^2$

Stalno opterećenje krovne konstrukcije po jedinici duljine: $\Delta G = 6,0 \cdot 4,50 = 27,0 \ kN/m$.

Stropovi međukatnih konstrukcija:

- slojevi poda	$1,00 \ kN/m^2$
- Hoesch Additiv strop	$3,0 \ kN/m^2$
	$g_k = 4,0 \ kN/m^2$

Stalno opterećenje međukatnih konstrukcija po jedinici duljine $g_k = 6,0 \cdot 4,0 = 24,0 \ kN/m$.

Promjenjiva djelovanja

- **Uporabno opterećenje**

  - <u>*Strop krova*</u>

    - ravni neprohodni krov → prema dostupnosti *kategorija H* → $q_k = 0,4 \ kN/m^2$

    Uporabno opterećenje krovne konstrukcije po jedinici duljine:

    $q_k = 6,0 \cdot 0,4 = 2,40 \ kN/m$

  - <u>*Stropovi međukatnih konstrukcija*</u>

    - uredski prostori → prema namjeni prostora *kategorija B* → $q_k = 3,0 \ kN/m^2$

    Uporabno opterećenje međukatnih konstrukcija po jedinici duljine:

    $q_k = 6,0 \cdot 3,0 = 18,0 \ kN/m$

- **Opterećenje snijegom (EN 1991-1-3)**

  Opterećenje snijegom na krovu *S*:

  $$S = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

  gdje je:

  C_e – koeficijent izloženosti (1,0)

  C_t – toplinski koeficijent (1,0)

  μ_i – koeficijent oblika za opterećenje snijegom

  s_k – karakteristična vrijednost opterećenja snijegom

Tablica D1 - Vrijednosti opterećenja snijegom u ovisnosti o području i nadmorskoj visini

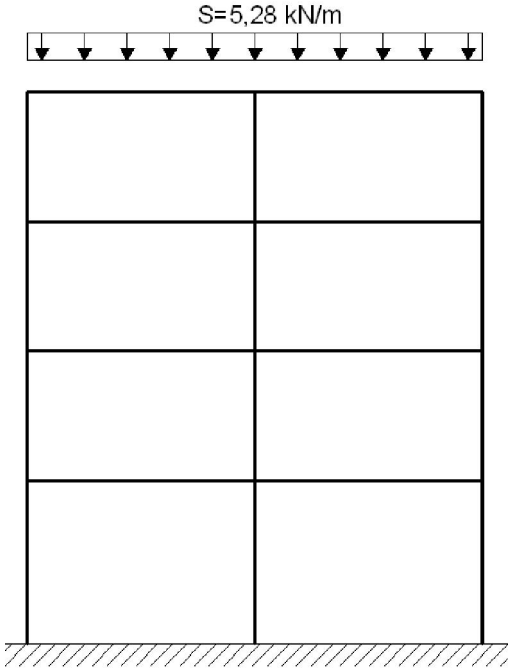
Nadmorska visina do (m)	I. područje	II. područje	III. područje	IV. područje
100	**1,10**	1,10	0,45	0,35
200	1,30	1,40	0,80	0,50
300	1,55	1,75	1,20	0,70
400	1,80	2,20	1,65	0,90
500	2,05	2,65	2,15	1,15
600	2,35	3,15	2,70	--

Lokacija objekta je Osijek (nadmorska visina 90 m) → područje I → karakteristično opterećenje snijegom $s_k = 1{,}10 \ kN/m^2$.

$$\alpha = 0° \rightarrow \mu_1 = 0{,}8 \ \rightarrow \ S = 0{,}8 \cdot 1{,}10 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 = 0{,}88 \ kN/m^2$$

Opterećenje snijegom po jedinici duljine:

$$S = 0{,}88 \cdot 6{,}0 = 5{,}28 \ kN/m$$



Slika D1 - Prikaz opterećenja snijegom

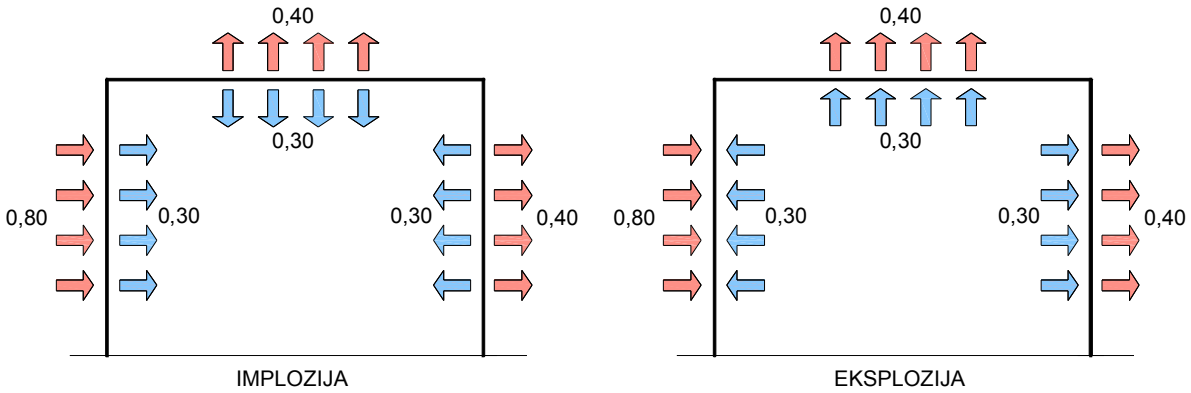
- **Opterećenje vjetrom (HRN)**

$$W = w_0 \cdot c_i$$

gdje je:

c_i – koeficijent oblika

w_0 – osnovno opterećenje vjetrom

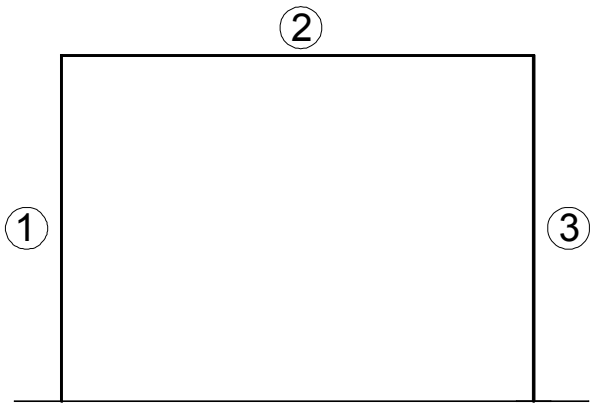


Slika D2 - Koeficijenti oblika za opterećenje vjetrom

Tablica D2 - Karakteristična vrijednost opterećenja vjetrom

Visina objekta iznad terena	Stupanj zaštićenosti objekta	Djelovanje vjetra w_0 [kN/m²] po zonama		
		I.	II.	III.
do 10 m	zaštićen	0,30	0,40	0,55
	poluzaštićen	0,40	0,55	0,80
	izložen	0,45	0,70	1,10
10 – 30 m	poluzaštićen	0,50	0,75	1,10
	izložen	**0,60**	0,90	1,30
30 – 60 m	izložen	0,70	1,05	1,50
60 – 100 m	izložen	0,80	1,20	1,70

Lokacija objekta je Osijek $\rightarrow$ zona I
Visina objekta iznad terena $H = 17{,}0$ m
Objekt je izložen
$\Rightarrow \quad w_0 = 0{,}60 \ \text{kN/m}^2$



Implozija

$$W_1 = (0{,}8 + 0{,}3) \cdot 0{,}60 = 0{,}66 \ \text{kN/m}^2$$
$$W_2 = (0{,}4 - 0{,}3) \cdot 0{,}60 = 0{,}06 \ \text{kN/m}^2$$
$$W_3 = (0{,}4 - 0{,}3) \cdot 0{,}60 = 0{,}06 \ \text{kN/m}^2$$

Eksplozija

$$W_1 = (0{,}8 - 0{,}3) \cdot 0{,}60 = 0{,}30 \ \text{kN/m}^2$$
$$W_2 = (0{,}4 + 0{,}3) \cdot 0{,}60 = 0{,}42 \ \text{kN/m}^2$$
$$W_3 = (0{,}4 + 0{,}3) \cdot 0{,}60 = 0{,}42 \ \text{kN/m}^2$$

Opterećenje vjetrom po jedinici duljine:

Implozija

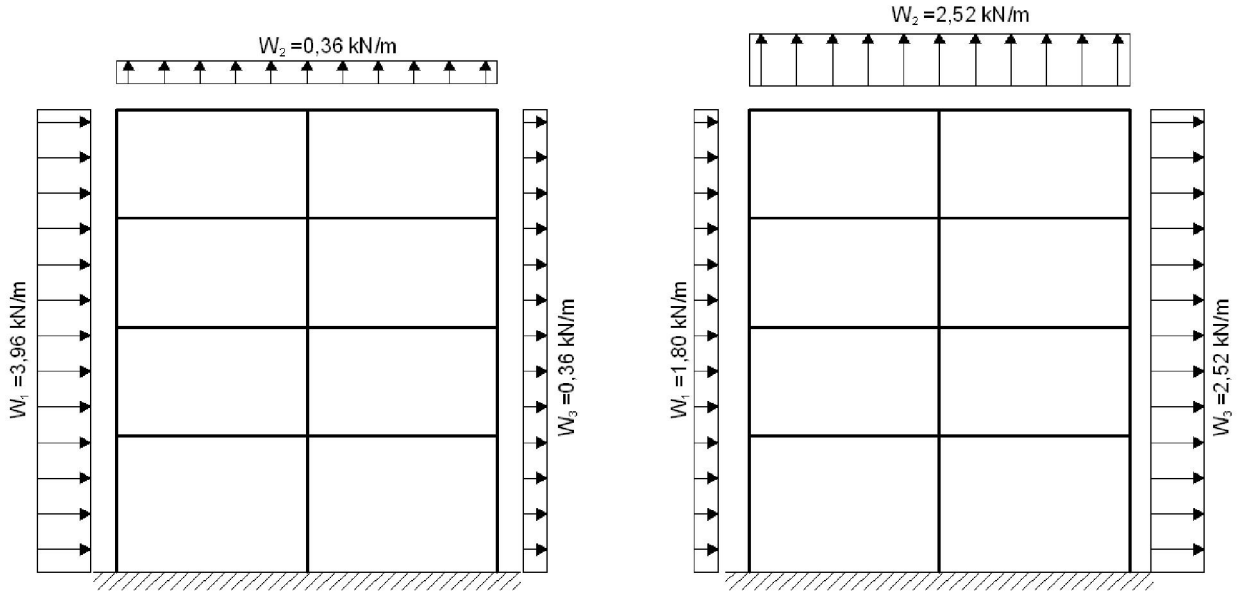
$$W_1 = 6,0 \cdot 0,66 = 3,96 \ \text{kN/m}$$

$$W_2 = W_3 = 6,0 \cdot 0,06 = 0,36 \ \text{kN/m}$$

Eksplozija

$$W_1 = 6,0 \cdot 0,30 = 1,80 \ \text{kN/m}$$

$$W_2 = W_3 = 6,0 \cdot 0,42 = 2,52 \ \text{kN/m}$$



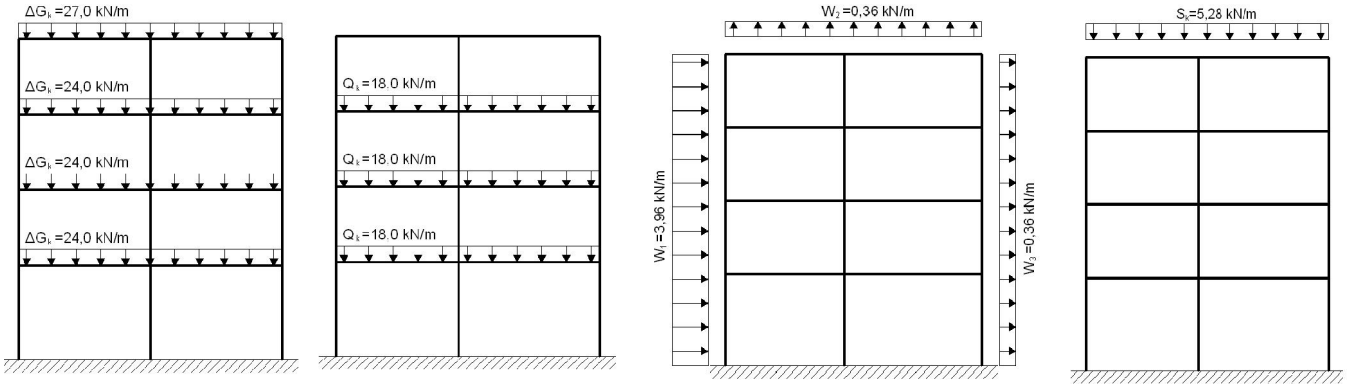
Slika D3 - Prikaz opterećenja vjetrom

DIMENZIONIRANJE ELEMENATA OKVIRA

Analiza opterećenja provedena je u programskom paketu Autodesk Robot Structural Analysis, [67].

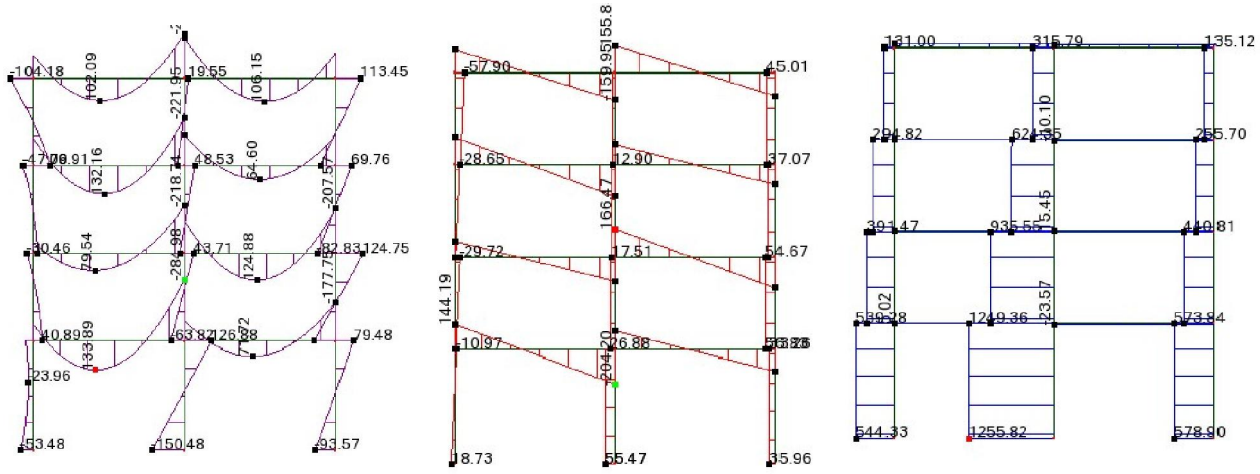
1) Dimenzioniranje stupa

Mjerodavna kombinacija: $\gamma_{Gmax} \cdot G_k$ "+" $\gamma_Q \cdot Q_k$ "+" $\psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot W_{imp}$ "+" $\psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot S_k$



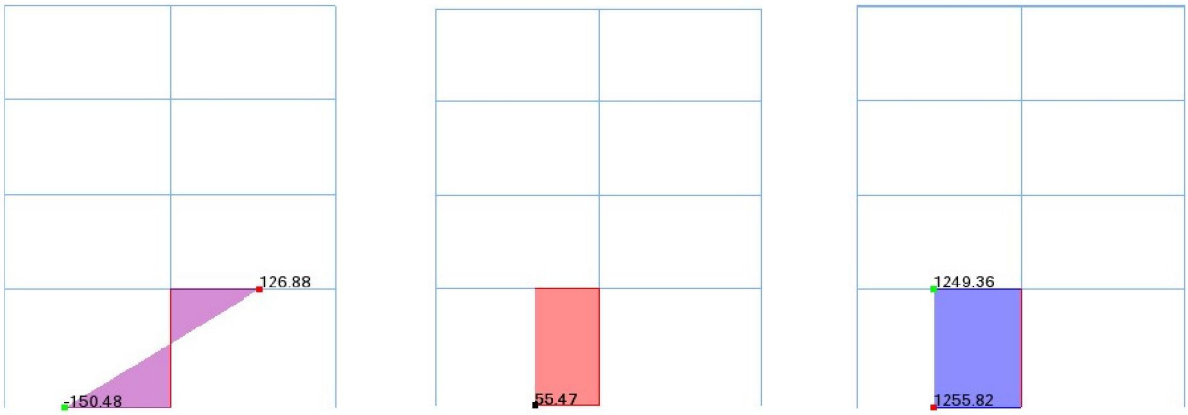
$\gamma_{Gmax} \cdot G_k$ $\gamma_Q \cdot Q_k$ $\psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot W_{imp}$ $\psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot S_k$

Slika D4 - Shema opterećenja za mjerodavnu kombinaciju



$M_{y,Ed}$ [kNm] $V_{z,Ed}$ [kN] N_{Ed} [kN]

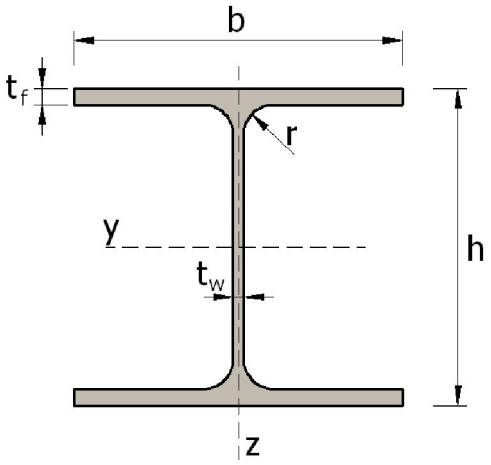
Slika D5 - Dijagrami unutarnjih sila za mjerodavnu kombinaciju opterećenja



$M_{y,Ed}$ [kNm] $V_{z,Ed}$ [kN] N_{Ed} [kN]

Slika D6 - Dijagrami reznih sila na najkritičnijem elementu (stupu) konstrukcije

Podatci o poprečnom presjeku stupa



HEA 320

- površina presjeka:	$A= 112,5\ cm^2$
- visina presjeka:	$h = 310\ mm$
- širina pojasnice:	$b = 300\ mm$
- debljina pojasnice:	$t_f = 15,50\ mm$
- debljina hrpta:	$t_w = 9,0\ mm$
- radijus zaobljenja	$r = 27,0\ mm$
- momenti inercije:	$I_y = 22\ 930\ cm^4$
	$I_z = 6\ 985\ cm^4$
- momenti otpora:	$W_{el,y} = 1\ 479\ cm^3$
	$W_{el,z} = 466\ cm^3$
	$W_{pl,y} = 1\ 628\ cm^3$
	$W_{pl,z} = 708\ cm^3$
- torzijska konstanta	$I_t = 108\ cm^4$
- konstanta krivljenja	$I_w = 1\ 512\ 000\ cm^6$

Kvaliteta materijala

- kvaliteta čelika S235
- najveća debljina je $t=t_f=21,0$ mm < 40 mm
  - granica popuštanja: $f_y = 235\ N/mm^2$
  - vlačna čvrstoća: $f_u = 360\ N/mm^2$
  - modul elastičnosti: $E = 210\ 000\ N/mm^2$
  - modul posmika: $G = 81\ 000\ N/mm^2$

Klasa poprečnog presjeka

a) Hrbat

$$\frac{c}{t} = \frac{225}{9,0} = 25,0 < 33 \cdot \varepsilon = 33,0 \rightarrow \text{hrbat je klasa 1}$$

b) Pojasnica

$$\frac{c}{t} = \frac{118,5}{15,50} = 7,65 < 9 \cdot \varepsilon = 9,0 \rightarrow \text{pojasnica je klase 1}$$

Poprečni presjek je klase 1.

Otpornost poprečnog presjeka

1) Otpornost poprečnog presjeka na tlak

$$N_{c,Rd} = 2922,65 \ \text{kN} > N_{Ed} = 1255,82 \ \text{kN}$$

2) Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{pl,y,Rd} = 382,63 \ \text{kNm} > M_{y,Ed} = 150,48 \ \text{kNm}$$

3) Otpornost poprečnog presjeka na poprečne sile

- provjera mogućnosti izbočivanja hrpta:

$$\frac{h_w}{t_w} = 31,0 < 72\frac{\varepsilon}{\eta} = 60,0 \rightarrow \text{nema opasnosti od izbočivanja hrpta}$$

$$V_{pl,z,Rd} = 558,08 \ \text{kN} > V_{z,Ed} = 55,47 \ \text{kN}$$

4) Interakcija M – V – N

- uvjet nereduciranja otpornosti poprečnog presjeka na savijanje uslijed poprečne sile:

$$0,5 \cdot V_{pl,z,Rd} = 279,04 \ \text{kN} > V_{z,Ed} = 55,47 \ \text{kN} \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$$

- uvjeti nereduciranja otpornosti poprečnog presjeka na savijanje uslijed uzdužne sile:

$$0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 748,16 \ \text{kN} < N_{Ed} = 1255,82 \ \text{kN} \rightarrow \text{uvjet nije zadovoljen}$$

$$\frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 295,04 \ \text{kN} < N_{Ed} = 1255,82 \ \text{kN} \rightarrow \text{uvjet nije zadovoljen}$$

$$M_{V,N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}}{1 - 0,5\left(\frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A}\right)} = 238,92 \ \text{kNm} > M_{y,Ed} = 150,48 \ \text{kNm}$$

Otpornost elementa izloženog tlaku i savijanju

1) Otpornost elementa na izvijanje

	os y-y	os z-z
- duljine izvijanja:	$L_{cr,y} = 653$ cm	$L_{cr,z} = 500$ cm
- Eulerove kritične sile:	$N_{cr,y} = 11154$ kN	$N_{cr,z} = 5791$ kN
- bezdimenzionalne vitkosti:	$\bar{\lambda}_y = 0,51$	$\bar{\lambda}_z = 0,71$
- mjerodavne linije izvijanja:	b	c
- faktor redukcije:	$\chi_y = 0,88$	$\chi_z = 0,72$
- otpornost elementa na izvijanje:	$N_{b,Rd} = 2099,15$ kN $> N_{Ed} = 1255,82$ kN	

2) Otpornost elementa na bočno torzijsko izvijanje

- razmak bočnih pridržanja: $L_{cr,LT} = 500$ cm
- faktori C_1 i C_2: $C_1 = 2,70$, $C_2 = 0,0$
- kritični moment: $M_{cr} = 2962,95$ kNm
- bezdimenzionalna vitkosti: $\bar{\lambda}_{LT} = 0,36$
- mjerodavna linija izvijanja: a
- faktor redukcije: $\chi_{LT} = 0,96$
- otpornost elementa na bočno izvijanje: $M_{b,Rd} = 368,55$ kN $> M_{y,Ed} = 150,48$ kN

3) Interakcija savijanja i uzdužne sile na razini elementa (Metoda 2)

- faktor jednolikog ekvivalentnog momenta: $C_{my} = 0,90$
- interakcijski faktori: $k_{yy} = 1,04$, $k_{zy} = 0,93$
- 1. uvjet nosivosti:

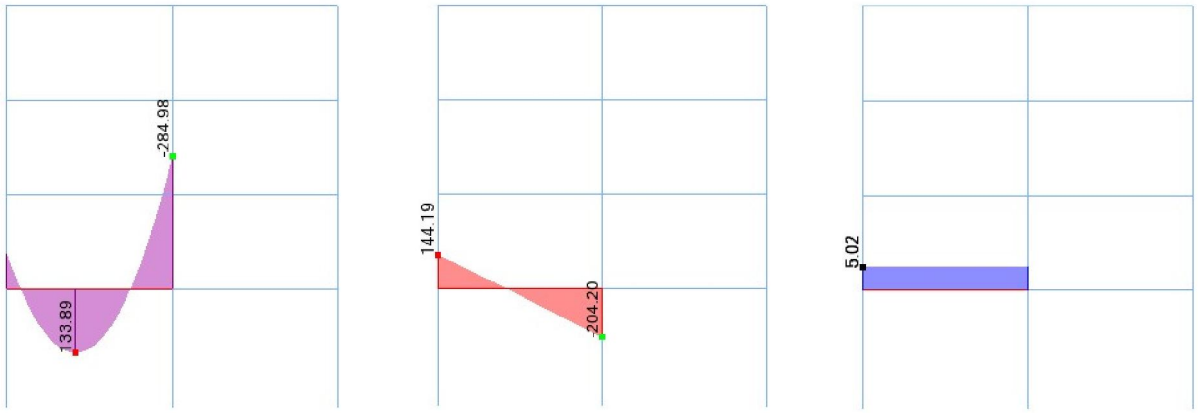
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} = 0,91 < 1,0$$

- 2. uvjet nosivosti:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} = 0,98 < 1,0$$

2) Dimenzioniranje grede

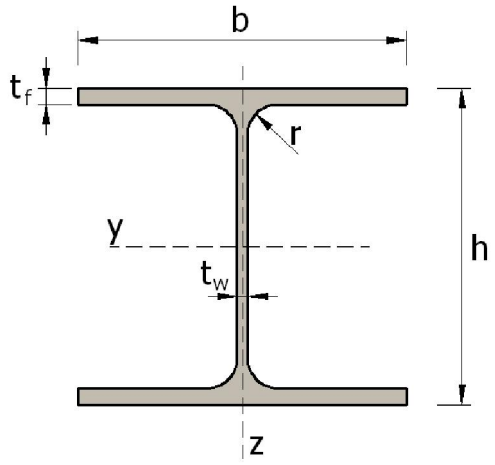
Mjerodavna kombinacija: $\gamma_{G\max} \cdot G_k$ "+" $\gamma_Q \cdot Q_k$ "+" $\psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot W_{imp}$ "+" $\psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot S_k$



$M_{y,Ed}$ [kNm] $V_{z,Ed}$ [kN] N_{Ed} [kN]

Slika D7 - Dijagrami unutarnjih sila na najkritičnijem elementu (gredi) konstrukcije

Podatci o poprečnom presjeku



HEA 300

- površina presjeka: A= 112,5 cm^2
- visina presjeka: h = 290 mm
- širina pojasnice: b = 300 mm
- debljina pojasnice: t_f = 14,0 mm
- debljina hrpta: t_w = 8,5 mm
- radijus zaobljenja r = 27,0 mm
- momenti inercije: I_y = 18 260 cm^4
  I_z = 6 310 cm^4
- momenti otpora: $W_{el,y}$ = 1 260 cm^3
  $W_{el,z}$ = 420,6 cm^3
  $W_{pl,y}$ = 1383 cm^3
  $W_{pl,z}$ = 642,2 cm^3
- torzijska konstanta I_t = 85,17 cm^4
- konstanta krivljenja I_w = 1 200 000 cm^6

Kvaliteta materijala

- kvaliteta čelika S235
- najveća debljina je t=t_f=15,5 mm < 40 mm
  - granica popuštanja: f_y = 235 N/mm^2
  - vlačna čvrstoća: f_u = 360 N/mm^2
  - modul elastičnosti: E = 210 000 N/mm^2
  - modul posmika: G = 81 000 N/mm^2

Klasa poprečnog presjeka

a) Hrbat

$$\frac{c}{t} = \frac{208,0}{8,50} = 25,0 < \frac{396 \cdot \varepsilon}{(13\alpha - 1)} = 70,99 \rightarrow \text{hrbat je klasa 1}$$

b) Pojasnica

$$\frac{c}{t} = \frac{118,75}{14,0} = 8,48 < 9 \cdot \varepsilon = 9,0 \rightarrow \text{pojasnica je klase 1}$$

Poprečni presjek je klase 1.

Otpornost poprečnog presjeka

1) Otpornost poprečnog presjeka na tlak

$$N_{t,Rd} = 2644,41 \text{ kN} > N_{Ed} = 5,02 \text{ kN} \qquad \text{(vlak)}$$

2) Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{pl,y,Rd} = 325,10 \text{ kNm} > M_{y,Ed} = 320,72 \text{ kNm}$$

3) Otpornost poprečnog presjeka na poprečne sile

- provjera mogućnosti izbočivanja hrpta:

$$\frac{h_w}{t_w} = 30,82 < 72\frac{\varepsilon}{\eta} = 60,0 \rightarrow \text{nema opasnosti od izbočivanja hrpta}$$

$$V_{pl,z,Rd} = 505,78 \text{ kN} > V_{z,Ed} = 238,34 \text{ kN}$$

4) Interakcija M – V – N

- uvjet nereduciranja otpornosti poprečnog presjeka na savijanje uslijed poprečne sile:

$$0,5 \cdot V_{pl,z,Rd} = 252,89 \text{ kN} < V_{z,Ed} = 238,34 \text{ kN} \rightarrow \text{uvjet nije zadovoljen}$$

- uvjeti nereduciranja otpornosti poprečnog presjeka na savijanje uslijed uzdužne sile:

$$0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 661,10 \text{ kN} < N_{Ed} = 5,02 \text{ kN} \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$$

$$\frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 261,67 \text{ kN} < N_{Ed} = 5,02 \text{ kN} \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$$

Budući da se radi o vlačnom elementu kod kojega je gornja pojasnica pridržana betonskom pločom, nema potrebe provjeravati njegovu otpornost na razini elementa.

SEIZMIČKI PRORAČUN PRIMJENOM EKVIVALENTNOG STATIČKOG DJELOVANJA

Da bi se ova metoda proračuna mogla koristiti, odziv konstrukcije mora biti takav da ne postoji znatan doprinos viših oblika osciliranja (uzima se samo utjecaj prvog oblika osciliranja).

Zahtjev se smatra ispunjenim ako su zadovoljena sljedeća dva uvjeta:

1) osnovni period osciliranja konstrukcije T_1 mora biti manji od $4T_c$ odnosno od 2,0 *s*;
2) konstrukcija mora zadovoljavati kriterije regularnosti po visini i tlocrtu.

Prema [34] osnovni period konstrukcije T_1 za zgrade čija ukupna visina ne prelazi 40 m, može se približno odrediti koristeći izraz:

$$T_1 = C_t \cdot H^{3/4}$$

gdje je:

T_1 - osnovni period konstrukcije u sekundama

C_t - koeficijent koji ima sljedeće vrijednosti:

0,085 - za prostorne čelične okvirne konstrukcije bez dijagonala

0,075 - za prostorne betonske okvirne konstrukcije bez dijagonala i čelične konstrukcije s ekscentričnim dijagonalama

0,050 - za sve druge konstrukcije

H - visina građevine u metrima

$$T_1 = C_t \cdot H^{3/4} = 0,085 \cdot 17,0^{3/4} = 0,71 \text{ s}$$

$$T_1 \le \begin{cases} 4T_C = 4 \cdot 0,6 = 2,4 \text{ s} \\ 2,0 \text{ s} \end{cases} \qquad \Rightarrow \quad T_1 = 0,71 \text{ s} < 2,0 \text{ s}$$

Oba uvjeta su zadovoljena, te se proračun metodom ekvivalentnih statičkih sila može provesti.

Ukupna horizontalna seizmička sila F_b određuje se prema izrazu:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda$$

gdje je:

$S_d(T_1)$ - ordinata projektnog spektra za period T_1

m - ukupna masa građevine

λ - korekcijski faktor koji iznosi o,85 ako je $T_1 \le 2T_C$ i ako je konstrukcija višekatna (u ostalim slučajevima λ =1,0)

Vrijednost faktora ponašanja *q*:

za razred duktilnosti DCM i okvir bez dijagonala → *q*=4,0

Izračun masa po katovima

1. Vlastita težina konstrukcije

- grede konstrukcije → HEA 300 → G=88,30 kg/m
- stupovi konstrukcije → HEA 400 → G=125,0 kg/m
- betonska ploča i slojevi poda:
  - krov → 4,0 kN/m^2=408 kg/m^2
  - katovi → 4,5 kN/m^2=459 kg/m^2

- 1. kat: $14,0 \cdot 88,30 + 3 \cdot 5,0 \cdot 125,0 + 6,0 \cdot 14,0 \cdot 408 = 37383 \text{ kg} = 37,38 \text{ t}$
- 2. i 3. kat: $14,0 \cdot 88,30 + 3 \cdot 4,0 \cdot 125 + 6,0 \cdot 14,0 \cdot 408 = 37008 \text{ kg} = 37,01 \text{ t}$
- 4. kat: $14,0 \cdot 88,30 + 3 \cdot 4,0 \cdot 125 + 6,0 \cdot 14,0 \cdot 459 = 41292 \text{ kg} = 41,29 \text{ t}$

2. Korisno djelovanje

- za kategoriju objekta B:
  - 1. i 2. kat zauzeti neovisno → $\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i} = 0,5 \cdot 0,3 = 0,15$
  - 3. kat → $\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i} = 1,0 \cdot 0,3 = 0,30$
- 1. i 2. kat: $14,0 \cdot 6,0 \cdot 0,15 \cdot 3,0 = 37,8 \text{ kN} = 3,85 \text{ t}$
- 3. kat: $14,0 \cdot 6,0 \cdot 0,30 \cdot 3,0 = 75,6 \text{ kN} = 7,71 \text{ t}$

Tablica D3 - Ukupna masa konstrukcije po katovima

Kat	m_G [t]	m_Q[t]	m_j [t]
1. kat	37,38	3,85	41,23
2. kat	37,01	3,85	40,86
3. kat	37,01	7,71	44,72
4. kat	41,29	0	41,29
Ukupna masa:			m=168,10 t

Vrijednost ordinate proračunskog spektra

Proračunski spektar odziva definiran je sljedećim izrazima:

$$0 \le T \le T_B \qquad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B < T \le T_C \qquad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C < T \le T_D \qquad S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \dfrac{2,5}{q}\left[\dfrac{T_C}{T}\right] \\ \ge \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D < T \qquad S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \dfrac{2,5}{q}\left[\dfrac{T_C \cdot T_D}{T}\right] \\ \ge \beta \cdot a_g \end{cases}$$

Tablica D4 - Vrijednosti parametara tla

RAZRED TLA	S	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	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	1,4	0,15	0,5	2,0

- za T_C=0,6 s < T_1=0,71 s < T_D=2,0 s

$$S_d(T_1) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \dfrac{2,5}{q}\left[\dfrac{T_C}{T_1}\right] = 2,0 \cdot 1,15 \cdot \dfrac{2,5}{4,0}\left[\dfrac{0,6}{0,71}\right] = 1,21 \\ \ge \beta \cdot a_g = 0,2 \cdot 2,0 = 0,4 \end{cases} \qquad \rightarrow S_d(T_1) = 1,21$$

Ukupna horizontalna seizmička sila F_B:

za T_1=0,71 s < $2T_C$=1,20 s i višeetažnu konstrukciju ⟶ λ =0,85

$$F_B = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda = 1,21 \cdot 168,10 \cdot 0,85 = 172,89 \text{ kN}$$

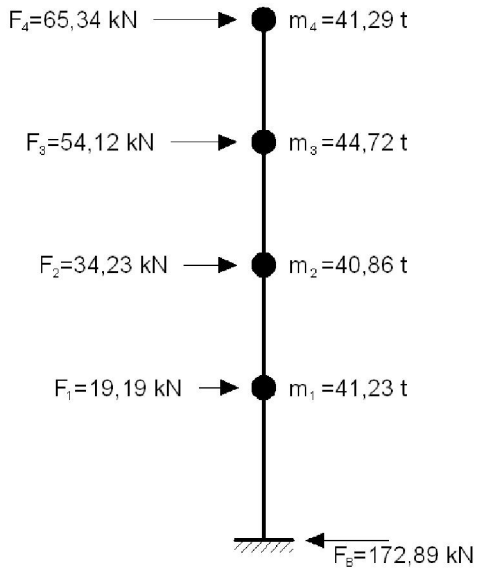
Raspodjela potresne sile po visini konstrukcije

$$F_i = F_B \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j}$$

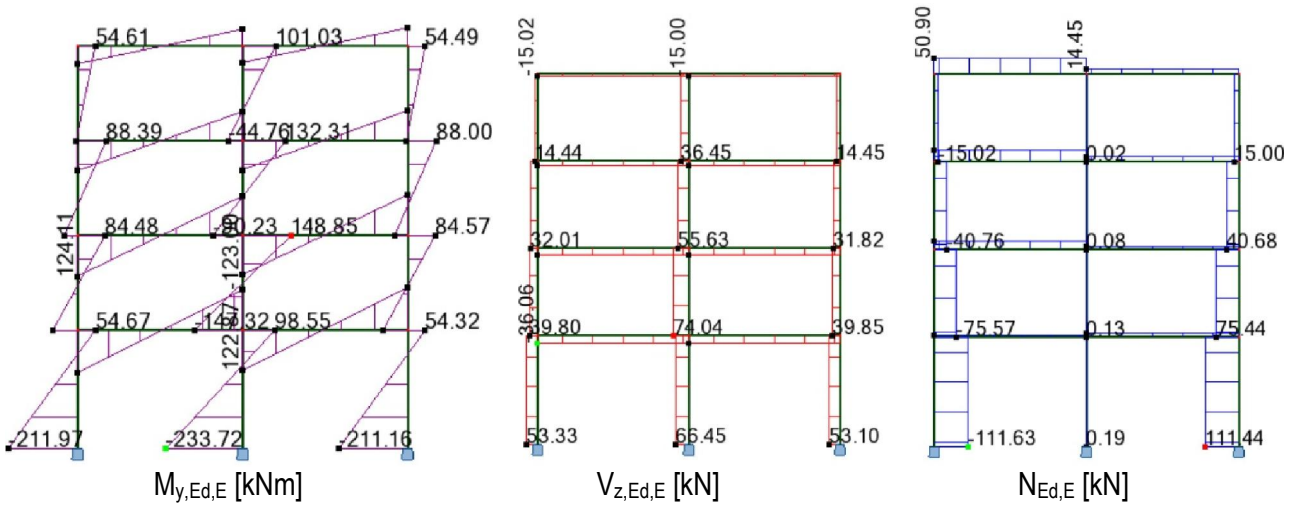
$$\sum z_j \cdot m_j = 41,23 \cdot 5,0 + 40,89 \cdot 9 + 44,72 \cdot 13,0 + 41,29 \cdot 17,0 = 1857 \text{ tm}$$

Tablica D5 - Raspodjela potresne sile po visini konstrukcije

Kat	m_i [t]	z_i [m]	$z_j m_j$ [tm]	$\Sigma z_j m_j$ [tm]	$\frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j}$	F_i [kN]
1. kat	41,23	5,0	206,15	1857,18	0,111	19,19
2. kat	40,86	9,0	367,74	1857,18	0,198	34,23
3. kat	44,72	13,0	581,36	1857,18	0,313	54,12
4. kat	41,29	17,0	701,93	1857,18	0,378	65,34
						Σ= 172,89 kN

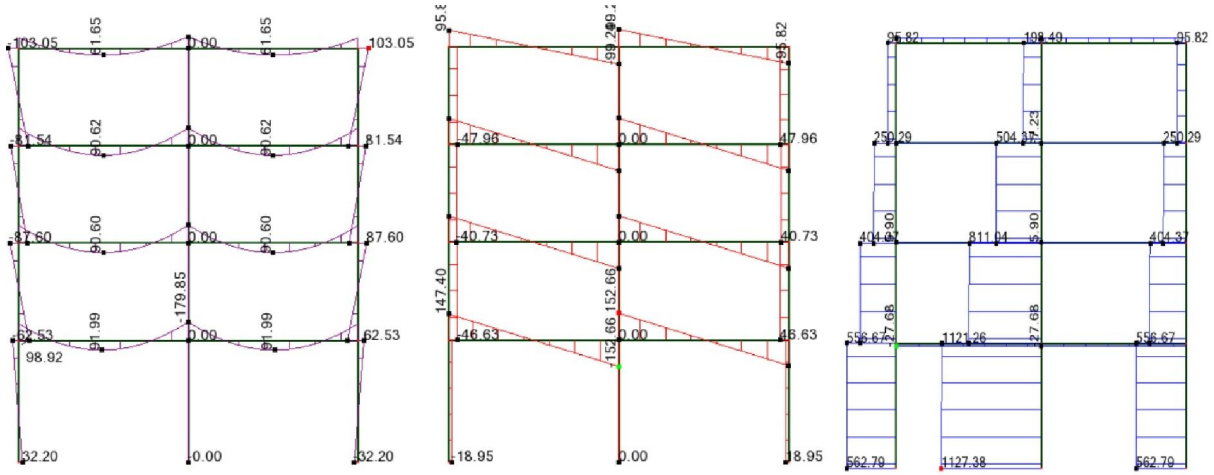


Slika D8 - Prikaz potresnih sila po visini konstrukcije



$M_{y,Ed,E}$ [kNm] $V_{z,Ed,E}$ [kN] $N_{Ed,E}$ [kN]

Slika D9 - Dijagrami unutarnjih sila uslijed potresa



$M_{y,Ed,G+\psi Q}$ [kNm] $V_{z,Ed,G+\psi Q}$ [kN] $N_{Ed,G+\psi Q}$ [kN]

D10 - Dijagrami unutarnjih sila uslijed stalnog i korisnog opterećenja

Utjecaji drugog reda mogu se zanemariti, ako je zadovoljen slijedeći uvjet za sve katove konstrukcije:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} < 0{,}10$$

gdje je:

- θ - koeficijent osjetljivost međukatnog pomaka
- P_{tot} - ukupno vertikalno opterećenje iznad promatranog kata i na njemu
- d_r - proračunski međukatni pomak
- V_{tot} - ukupna proračunska potresna sila
- h - visina kata

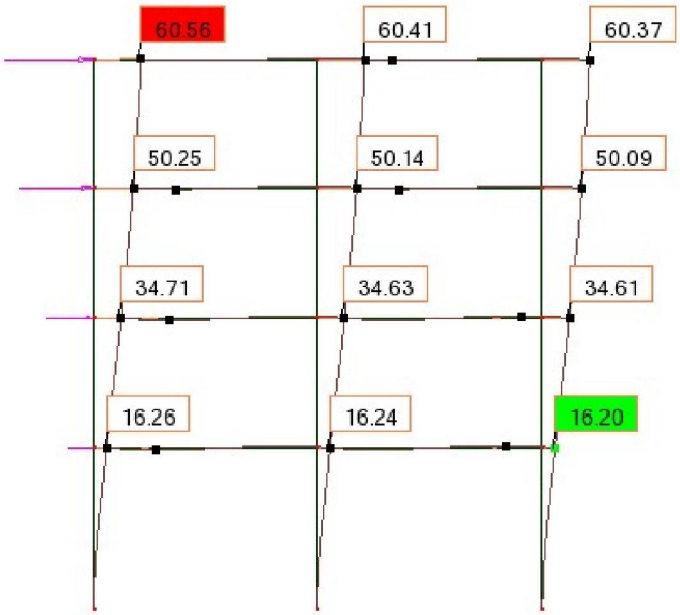
Vertikalno opterećenje iznad promatranog kata i na njemu:

$$P_{tot,4} = m_4 \cdot g = 41{,}29 \cdot 9{,}81 = 405{,}05 \text{ kN}$$

$$P_{tot,3} = P_{tot,4} + m_3 \cdot g = 405{,}05 + 44{,}72 \cdot 9{,}81 = 843{,}76 \text{ kN}$$

$$P_{tot,2} = P_{tot,3} + m_2 \cdot g = 843{,}76 + 40{,}86 \cdot 9{,}81 = 1244{,}59 \text{ kN}$$

$$P_{tot,1} = P_{tot,2} + m_1 \cdot g = 1244{,}59 + 41{,}23 \cdot 9{,}81 = 1649{,}06 \text{ kN}$$



Slika D11 - Pomaci konstrukcije (u *mm*) uslijed potresnog opterećenja

Tablica D6 - Apsolutni d_s i relativni d_r pomaci konstrukcije [mm] i koeficijenti osjetljivosti θ

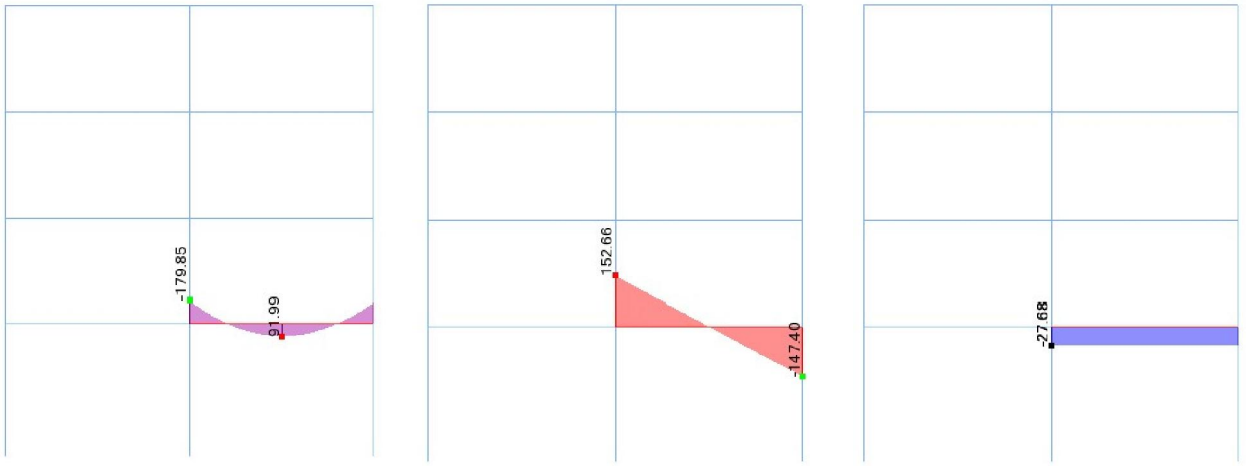
KAT	d_s [mm]	d_r [mm]	P_{tot} [kN]	V_{tot} [kN]	h [mm]	θ
4	60,56	10,31	405,05	19,19	4000	0,054
3	50,25	15,54	843,76	53,43	4000	0,061
2	34,71	18,45	1244,59	107,55	4000	0,053
1	16,26	16,26	1649,06	172,89	5000	0,031

Za sve katove koeficijent osjetljivosti manji je od 0,1 te se utjecaji drugoga reda mogu zanemariti.

Provjera otpornosti elemenata konstrukcije na potresno djelovanje

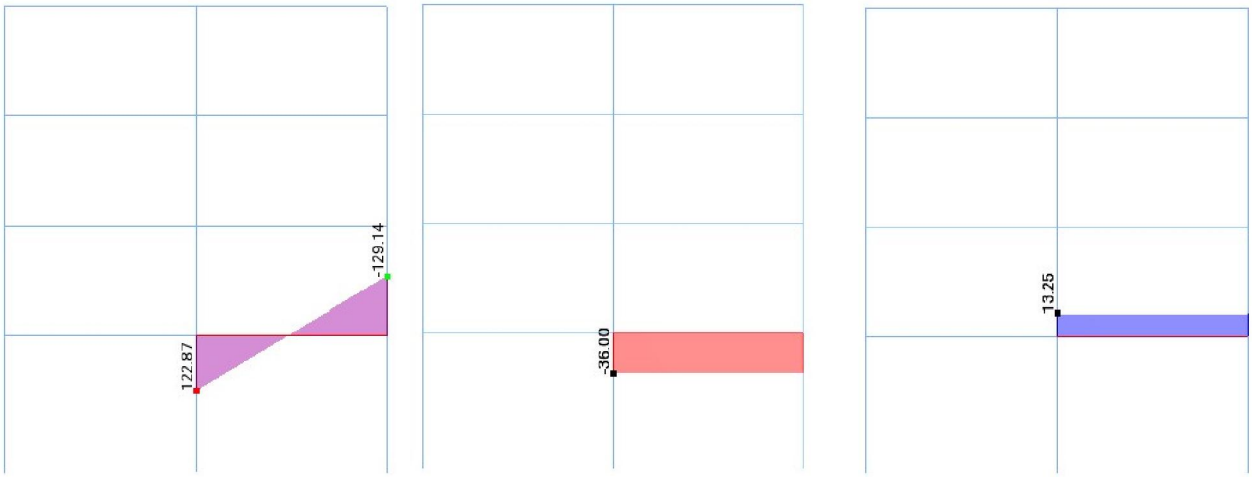
1) Provjera otpornosti grede

a)



$M_{y,Ed,G+\psi Q}$ [kNm] $V_{z,Ed,G+\psi Q}$ [kN] $N_{Ed,G+\psi Q}$ [kN]

b)



$M_{y,Ed,E}$ [kNm] $V_{z,Ed,E}$ [kN] $N_{Ed,E}$ [kN]

Slika D12 - Dijagrami unutarnjih sila u najkritičnijem elementu: uslijed stalnog i korisnog opterećenja (a), te uslijed potresa (b)

Proračunske rezne sile u gredi:

$$M_{y,Ed} = M_{y,Ed,G+\psi Q} + M_{y,Ed,E} = 179,85 + 122,87 = 302,72 \ \text{kNm}$$

$$V_{z,Ed} = V_{z,Ed,G+\psi Q} + V_{z,Ed,E} = 152,66 + \frac{(122,87 + 129,14)}{7,0} = 188,66 \ \text{kN}$$

$$N_{Ed} = N_{Ed,G+\psi Q} + N_{Ed,E} = 27,68 - 13,25 = 14,43 \ \text{kN} \quad \text{(vlak)}$$

Klasifikacija poprečnog presjeka

Lokalna duktilnost elemenata u tlaku ili savijanju osigurava se kroz klasifikaciju poprečnog presjeka.
U tablici D7 prikazane su zahtijevane klase poprečnog presjeka u ovisnosti o klasi duktilnosti i faktoru ponašanja konstrukcije.

Tablica D7 - Zahtjevana klasa poprečnog presjeka u ovisnosti o klasi duktilnosti

Klasa duktilnosti	Faktor ponašanja *q*	Zahtijevana klasa presjeka
DCM	1,5 < q ≤ 2,0	1, 2 ili 3
	2,0 < q ≤ 4,0	1 ili 2
DCH	q > 4,0	1

Za klasu duktilnosti DCM i faktor ponašanja q=4,0 zahtijeva se klasa presjeka 1 ili 2.

Klasifikacija poprečnog presjeka

a) Hrbat

$$\frac{c}{t} = \frac{208}{8,50} = 24,47 < 33 \cdot \varepsilon = 33,0 \rightarrow \text{hrbat je klasa 1}$$

b) Pojasnica

$$\frac{c}{t} = \frac{118,75}{14,0} = 8,48 < 9 \cdot \varepsilon = 9,0 \rightarrow \text{pojasnica je klase 1}$$

Poprečni presjek je klase 1 → ostvarena je zahtijevana klasa presjeka

Otpornost poprečnog presjeka

Na mjestima očekivane pojave plastičnih zglobova treba zadovoljiti sljedeće uvjete:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \le 1,0\,, \quad \frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \le 0,50\,, \quad \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \le 0,15$$

1) Otpornost poprečnog presjeka na vlak

$$N_{pl,Rd} = N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{112,5 \cdot 23,5}{1,0} = 2643,75 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{14,43}{2643,75} = 0,005 < 0,15$$

2) Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 32500,5 \text{ kNcm} = 325,01 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{302,72}{325,01} = 0,93 < 1,0$$

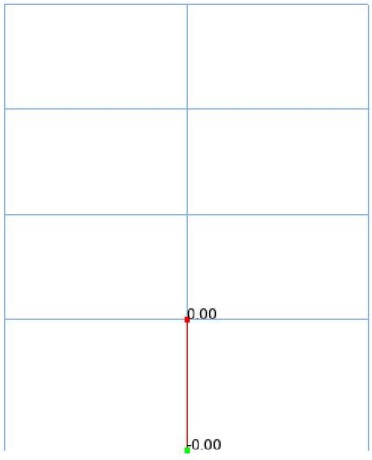
3) Otpornost poprečnog presjeka na poprečne sile

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{V,z} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 506,40 \text{ kN}$$

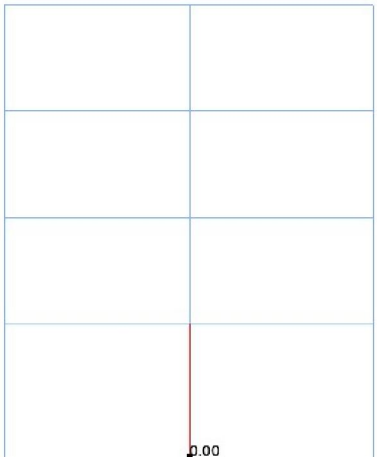
$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{188,66}{506,40} = 0,37 < 0,50$$

2) Provjera otpornosti stupa

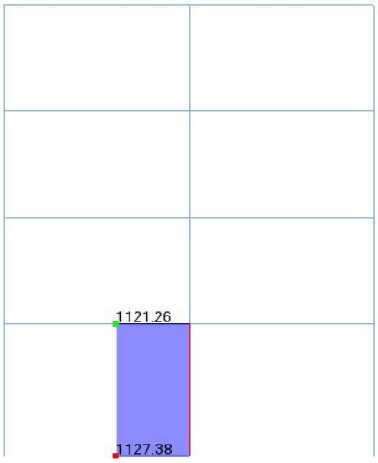
a)



$M_{y,Ed,G+\psi Q}$ [kNm]

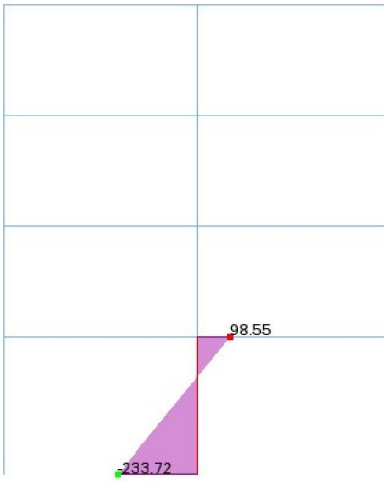


$V_{z,Ed,G+\psi Q}$ [kN]

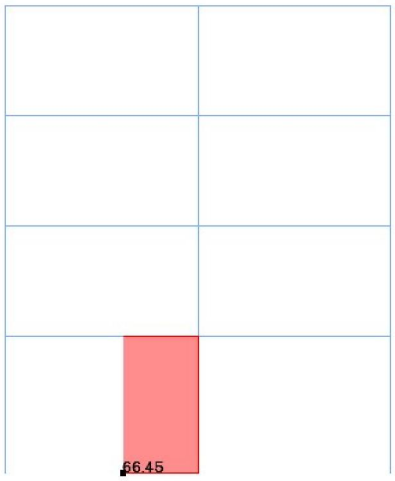


$N_{Ed,G+\psi Q}$ [kN]

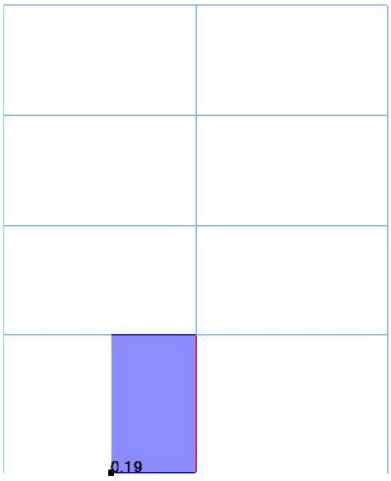
b)



$M_{y,Ed,E}$ [kNm]



$V_{z,Ed,E}$ [kN]



$N_{Ed,E}$ [kN]

Slika D13 -Dijagrami unutarnjih sila u najkritičnijem elementu uslijed stalnog i korisnog opterećenja (a), te uslijed potresa (b)

Proračunske rezne sile u stupu:

$$M_{y,Ed} = M_{y,Ed,G+\psi Q} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot M_{y,Ed,E}$$

$$V_{z,Ed} = V_{z,Ed,G+\psi Q} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot V_{z,Ed,E}$$

$$N_{Ed} = N_{Ed,G+\psi Q} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E}$$

$\gamma_{ov} = 1,25$ (preporučena vrijednost prema [34])

$$\Omega = \frac{M_{pl,Rd,i}}{M_{Ed,i}} = \frac{325,01}{302,72} = 1,07$$

$$M_{y,Ed} = M_{y,Ed,G+\psi Q} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot M_{y,Ed,E} = 0,0 + 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,07 \cdot 233,72 = 343,86 \text{ kNm}$$

$$V_{z,Ed} = V_{z,Ed,G+\psi Q} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot V_{z,Ed,E} = 0,0 + 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,07 \cdot 66,45 = 97,76 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = N_{Ed,G+\psi Q} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E} = 1127,38 + 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,19 \cdot 0,19 = 1127,69 \text{ kN}$$

Klasifikacija poprečnog presjeka

a) Hrbat

$$\frac{c}{t} = \frac{298}{11,0} = 27,09 < 33 \cdot \varepsilon = 33,0 \rightarrow \text{hrbat je klasa 1}$$

b) Pojasnica

$$\frac{c}{t} = \frac{117,50}{19,0} = 6,18 < 9 \cdot \varepsilon = 9,0 \rightarrow \text{pojasnica je klase 1}$$

Poprečni presjek je klase 1 → ostvarena je zahtijevana klasa presjeka

Otpornost poprečnog presjeka

Na mjestima očekivane pojave plastičnih zglobova treba zadovoljiti sljedeće uvjete:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \le 1,0, \quad \frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \le 0,50, \quad \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \le 1,0$$

1) Otpornost poprečnog presjeka na tlak

$$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{159 \cdot 23,5}{1,0} = 3736,50 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{1127,69}{3736,50} = 0,30 < 1,0$$

2) Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 60207 \text{ kNcm} = 602,07 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{343,86}{602,07} = 0,57 < 1,0$$

3) Otpornost poprečnog presjeka na poprečne sile

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{V,z} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 777,81 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{97,76}{777,81} = 0,13 < 1,0$$

4) Interakcija M – V – N

- uvjet nereduciranja otpornosti poprečnog presjeka na savijanje uslijed poprečne sile:

$$0,5 \cdot V_{pl,z,Rd} = 388,91 \text{ kN} > V_{z,Ed} = 97,76 \text{ kN} \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$$

- uvjeti nereduciranja otpornosti poprečnog presjeka na savijanje uslijed uzdužne sile:

$$0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 934,13 \text{ kN} < N_{Ed} = 1127,69 \text{ kN} \rightarrow \text{uvjet nije zadovoljen}$$

$$\frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 454,36 \text{ kN} < N_{Ed} = 1127,69 \text{ kN} \rightarrow \text{uvjet nije zadovoljen}$$

$$M_{V,N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}}{1 - 0,5\left(\frac{A - 2 \cdot b \cdot t_f}{A}\right)} = 490,92 \text{ kNm} > M_{y,Ed} = 343,86 \text{ kNm}$$

Otpornost elementa izloženog tlaku i savijanju

1) Otpornost elementa na izvijanje

	os y-y	os z-z
- duljine izvijanja:	$L_{cr,y} = 760$ cm	$L_{cr,z} = 500$ cm
- Eulerove kritične sile:	$N_{cr,y} = 16160,62$ kN	$N_{cr,z} = 7099,82$ kN
- bezdimenzionalne vitkosti:	$\overline{\lambda}_y = 0,48$	$\overline{\lambda}_z = 0,73$
- mjerodavne linije izvijanja:	a	b
- faktor redukcije:	$\chi_y = 0,93$	$\chi_z = 0,77$
- otpornost elementa na izvijanje:	$N_{b,Rd} = 2873,61 \text{ kN} > N_{Ed} = 1144,14 \text{ kN}$	

2) Otpornost elementa na bočno torzijsko izvijanje

- razmak bočnih pridržanja: $L_{cr,LT} = 500 \ \text{cm}$
- faktori C_1 i C_2: $C_1 = 2,56$, $C_2 = 0,0$
- kritični moment: $M_{cr} = 4311,09 \ \text{kNm}$
- bezdimenzionalna vitkosti: $\overline{\lambda}_{LT} = 0,37$
- mjerodavna linija izvijanja: a
- faktor redukcije: $\chi_{LT} = 0,96$
- otpornost elementa na bočno izvijanje: $M_{b,Rd} = 577,99 \ \text{kN} > M_{y,Ed} = 343,86 \ \text{kN}$

3) Interakcija savijanja i uzdužne sile na razini elementa (Metoda 2)

- faktor jednolikog ekvivalentnog momenta: $C_{my} = 0,90$
- interakcijski faktori: $k_{yy} = 0,98$, $k_{zy} = 0,59$
- 1. uvjet nosivosti:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} = 0,90 < 1,0$$

- 2. uvjet nosivosti:

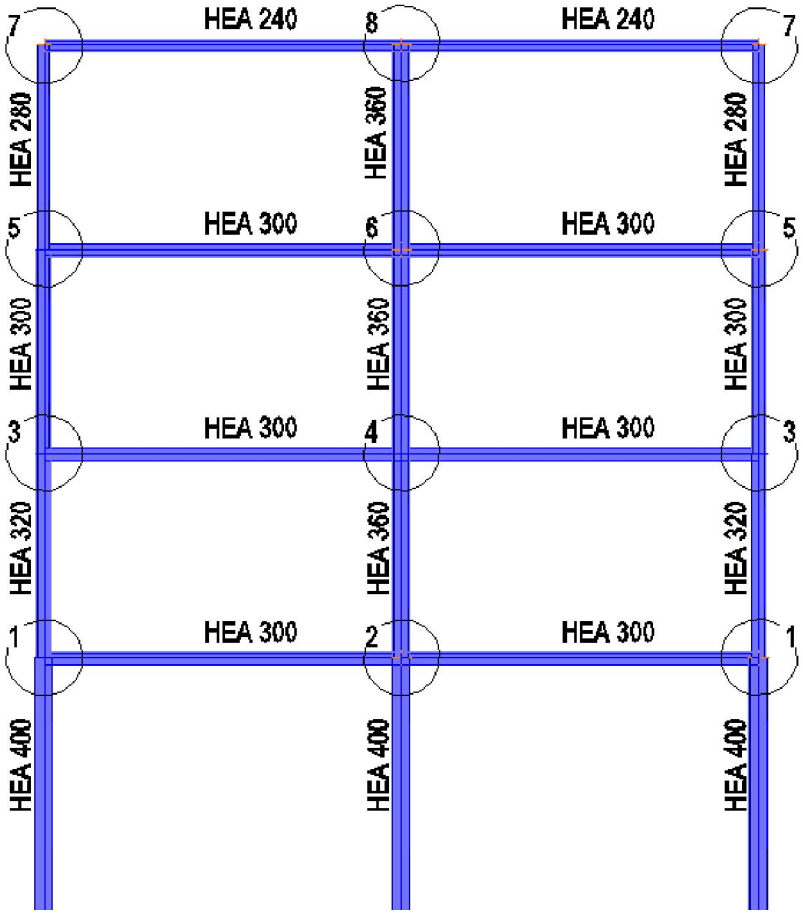
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} = 0,74 < 1,0$$

Osiguranje od pojave „mekog“ kata

Prema [34] (4.4.2.3(4)), da bi se izbjegao mehanizam „mekog“ kata, u svakom priključku konstrukcije mora biti zadovoljen sljedeći uvjet:

$$\frac{\sum M_{Rc}}{\sum M_{Rb}} \geq 1,3$$

gdje su $\sum M_{Rc}$ i $\sum M_{Rb}$ proračunske otpornosti na savijanje stupova, odnosno greda koje se spajaju u priključku. (Iz provjere se može izostaviti zadnji kat konstrukcije.)



Slika D14 - Oznake priključaka

Priključak 1

$$\sum M_{Rc} = \left(W_{pl,y,HEA400} + W_{pl,y,HEA320}\right) \cdot f_y = \left(2562 + 1682\right) \cdot 23{,}5 = 98465 \text{ kNcm}$$

$$\sum M_{Rb} = W_{pl,y,HEA300} \cdot f_y = 1383 \cdot 23{,}5 = 32501 \text{ kNcm}$$

$$\frac{\sum M_{Rc}}{\sum M_{Rb}} = \frac{98465}{32501} = 3{,}03 > 1{,}3 \quad \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$$

Priključak 2

$$\sum M_{Rc} = \left(W_{pl,y,HEA400} + W_{pl,y,HEA360}\right) \cdot f_y = \left(2562 + 2088\right) \cdot 23{,}5 = 109275 \text{ kNcm}$$

$$\sum M_{Rb} = 2 \cdot W_{pl,y,HEA300} \cdot f_y = 2 \cdot 1383 \cdot 23{,}5 = 65002 \text{ kNcm}$$

$$\frac{\sum M_{Rc}}{\sum M_{Rb}} = \frac{109275}{65002} = 1{,}68 > 1{,}3 \quad \rightarrow \text{uvjet zadovoljen}$$

Tablica D8 – Proračunske otpornosti stupova i greda u priključcima za provjeru osiguranja od pojave „meke" etaže

Priključak	Stup,d	Stup,g	Greda,l	Greda,d	$\Sigma M_{pl,b}$	$\Sigma M_{pl,c}$	$\frac{\sum M_{Rc}}{\sum M_{Rb}}$
1	HEA400	HEA320	-	HEA300	98465	32501	3,03
2	HEA400	HEA360	HEA300	HEA300	109275	65001	1,68
3	HEA320	HEA300	-	HEA300	70759	32501	2,18
4	HEA360	HEA360	HEA300	HEA300	98136	65001	1,51
5	HEA300	HEA280	-	HEA300	58633	32501	1,80
6	HEA360	HEA360	HEA300	HEA300	98136	65001	1,51
7	HEA280	-	-	HEA240	26132	17498	1,49
8	HEA360	HEA360	HEA240	HEA240	98136	34996	2,80

POPIS SLIKA

Poglavlje 1.

Nema slika.

Poglavlje 2.

Slika 2.1 - Model sa zamjenskim dijagonalama ... 5
Slika 2.2 - Kontaktna duljina i raspodjela naprezanja na kontaktu okvira i ispuna ... 7
Slika 2.3 - Ponašanje zamjenske dijagonale prema [8] ... 7
Slika 2.4 - Model zidanog ispuna prema [16] ... 9
Slika 2.5 - Ponašanje zidanog ispuna prema [16] ... 10
Slika 2.6 - Model sa šest dijagonala [20] ... 11
Slika 2.7 - Anvelopa nosivosti zidanog ispuna (a) i histerezna petlja (b) prema [20] ... 12
Slika 2.8 - Ispitivanje okvira sa zidanim ispunom ... 14
Slika 2.9 - Modeliranje zidanog ispuna nelinearnim dijagonalama ... 16
Slika 2.10 - Načini otkazivanja nosivosti zidanog ispuna ... 19

Poglavlje 3.

Slika 3.1 - Čelični kalup za izradu prizmi morta ... 28
Slika 3.2 - Ispitivanje prizmi morta na savijanje ... 29
Slika 3.3 - Uzorci ziđa za ispitivanje tlačne čvrstoća ziđa ... 30
Slika 3.4 - Odnos naprezanje-deformacija za tlačno opterećeno ziđe ... 33
Slika 3.5 - Posmično ispitivanje ziđa ... 35
Slika 3.6 - Mogući oblici sloma pri ispitivanju posmične čvrstoće ziđa ... 37
Slika 3.7 - Posmična čvrstoća i kut unutarnjeg trenja ... 38
Slika 3.8 - Ispitivanje vlačne čvrstoće ziđa ... 41
Slika 3.9 - Dijagram karakteristične posmične čvrstoće ziđa u ovisnosti o vertikalnom naprezanju ... 41

Poglavlje 4.

Slika 4.1 - Shema reaktivnog okvira i ispitivanog čeličnog okvira sa zidanim ispunom ... 42
Slika 4.2 - Standardni šuplji glineni blok tipa V5 i izrezani blok korišten u modelima OG-i i OGY-i ... 44
Slika 4.3 - Priprema šupljih glinenih zidnih elemenata za ispitivanje tlačne čvrstoće ... 44
Slika 4.4 - Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata: a) zidni element u tlačnoj preši, b) i c) zidni elementi nakon sloma ... 45
Slika 4.5 - Zidni elementi od porobetona: a) puna veličina, b) izrezani portobetonski blok ... 46
Slika 4.6 - Ispitivanje punog zidnog elementa od porobetona (a), porobetonski blok nakon sloma (b) ... 46
Slika 4.7 - Izbušeni porobetonski blokovi ... 47

Slika 4.8 - Ispitivanje izbušenih porobetonskih blokova ... 47
Slika 4.9 - Uzorci morta: a) izrada prizmi, b) prizme nakon očvršćenja ... 48
Slika 4.10 - Ispitivanje prizmi: a) vlačno ispitivanje, b) ispitani uzorci ... 48
Slika 4.11 - Ispitivanje prizmi: a) tlačno ispitivanje, b) ispitani uzorci ... 49
Slika 4.12 - Ispitivanje čeličnih epruveta ... 50
Slika 4.13 - Geometrija čeličnih epruveta osnovnog materijala ... 51
Slika 4.14 - Radni dijagrami čelika dobiven ispitivanjem ... 51
Slika 4.15 - Ispitani uzorci čelika ... 52
Slika 4.16 - Ispitivanje tlačne čvrstoće šupljih glinenih blokova: a) Uzorak pri ispitivanju, b) uzorak od porobetona nakon sloma ... 53
Slika 4.17 - Ispitivanje tlačne čvrstoće porobetonskih blokova a) Uzorak pri ispitivanju, b) uzorak od porobetona nakon sloma ... 54
Slika 4.18 - Ispitivanje tlačne čvrstoće u horizontalnom smjeru šupljih glinenih blokova: a) uzorak pri ispitivanju, b) uzorak nakon sloma ... 55
Slika 4.19 - Ispitivanje posmične čvrstoće zidnih prizmi: a) dimenzije uzorka, b) postavke mjerne opreme ... 56
Slika 4.20 - Ispitivanje posmične čvrstoće: a) nepravilan oblik sloma, b) pravilan oblik sloma ... 57
Slika 4.21 - Određivanje posmične čvrstoće – ispitani uzorci ... 57
Slika 4.22 - Srednje vrijednosti posmične čvrstoće pri različitim normalnim naprezanjima ... 58
Slika 4.23 - Ispitivanje vlačne čvrstoće ziđa od šupljih glinenih blokova: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon sloma ... 59
Slika 4.24 - Ispitivanje vlačne čvrstoće ziđa od porobetonskih blokova: a) uzorak prije ispitivanja, b) uzorak nakon sloma ... 60
Slika 4.25 - Reaktivni okvir ... 62
Slika 4.26 - Detalj ležaja ... 63
Slika 4.27 - Unošenje opterećenja u čelični okvir ... 64
Slika 4.28 - Način nanošenja horizontalnog opterećenja ... 65
Slika 4.29 - Geometrijske izmjere ispitivanih čeličnih okvira sa zidanim ispunom ... 66
Slika 4.30 - Položaji mjernih instrumenata ... 67
Slika 4.31 - LVDT-i za mjerenje horizontalnih i vertikalnih pomaka ... 68
Slika 4.32 - Mjerenje produljenja/skraćenja dijagonala zidanog ispuna ... 68
Slika 4.33 - Mjerenje produljenja/skraćenja dijagonala čeličnog okvira ... 69
Slika 4.34 - Mjerenje relativnih deformacija čeličnog okvira ... 69
Slika 4.35 - Ispitivanje čeličnog okvira sa zidanim ispunom od šupljih glinenih blokova (OG-i) ... 70
Slika 4.36 - Ispitivanje čeličnog okvira sa zidanim ispunom od porobetonskih blokova (OY-i) ... 70
Slika 4.37 - Ispitivanje čeličnog okvira s kombiniranom ispunom od glinenih i porobetonskih blokova (OGY-i) ... 70
Slika 4.38 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom i čeličnog okvira bez ispuna ... 71
Slika 4.39 - Histerezna petlja za okvir OG-1 ... 73
Slika 4.40 - Pomaci dijagonala – okvir OG-1 ... 73
Slika 4.41 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OG-1 ... 73
Slika 4.42 - Histerezna petlja za okvir OG-2 ... 74
Slika 4.43 - Pomaci dijagonala – okvir OG-2 ... 75
Slika 4.44 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OG-2 ... 75
Slika 4.45 - Histerezna petlja za okvir OG-3 ... 76
Slika 4.46 - Pomaci dijagonala – okvir OG-3 ... 76
Slika 4.47 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OG-3 ... 77
Slika 4.48 - Histerezna petlja za okvir OY-1 ... 78
Slika 4.49 - Pomaci dijagonala – okvir OY-1 ... 78

Slika 4.50 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OY-1 ... 79
Slika 4.51 - Histerezna petlja za okvir OY-2 ... 80
Slika 4.52 - Pomaci dijagonala – okvir OY-2 ... 80
Slika 4.53 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OY-2 ... 80
Slika 4.54 - Histerezna petlja za okvir OY-3 ... 81
Slika 4.55 - Pomaci dijagonala – okvir OY-3 ... 82
Slika 4.56 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OY-3 ... 82
Slika 4.57 - Histerezna petlja za okvir OGY-1 ... 83
Slika 4.58 - Pomaci dijagonala – okvir OGY-1 ... 84
Slika 4.59 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OGY-1 ... 84
Slika 4.60 - Histerezna petlja za okvir OGY-2 ... 85
Slika 4.61 - Pomaci dijagonala – okvir OGY-2 ... 85
Slika 4.62 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OGY-2 ... 86
Slika 4.63 - Histerezna petlja za okvir OGY-3 ... 87
Slika 4.64 - Pomaci dijagonala – okvir OGY3 ... 87
Slika 4.65 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OGY-3 ... 87
Slika 4.66 - Histerezna petlja za okvir OS ... 88
Slika 4.67 - Deformacije pri dnu stupa – okvir OS ... 89
Slika 4.68 - Plastifikacija čeličnog stupa ... 89
Slika 4.69 - Histerezna ovojnica čeličnih okvira s ispunom od šupljih glinenih blokova (serija OG-i) ... 90
Slika 4.70 - Histerezna ovojnica čeličnih okvira s ispunom od porobetonskih blokova (serija OY-i) ... 91
Slika 4.71 - Histerezna ovojnica čeličnih okvira s kombiniranim ispunom (serija OGY-i) ... 91
Slika 4.72 Histerezne ovojnice svih ispitivanih sustava ... 92
Slika 4.73 - Oštećenja okvira sa zidanim ispunom: a) okvir OG-1, b) okvir OG-2 ... 92
Slika 4.74 - Oštećenja okvira sa zidanim ispunom: a) okvir OG-3, b) okvir OY-1 ... 92
Slika 4.75 - Oštećenja okvira sa zidanim ispunom: a) okvir OY-2, b) okvir OY-3 ... 93
Slika 4.76 - Oštećenja okvira sa zidanim ispunom – OGY-1 ... 93
Slika 4.77 - Oštećenja okvira sa zidanim ispunom – OGY-2 ... 93
Slika 4.78 - Oštećenja okvira sa zidanim ispunom – OGY-3 ... 94
Slika 4.79 - Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OG-1 ... 94
Slika 4.80 - Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OG-2 ... 94
Slika 4.81 - Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OG-3 ... 95
Slika 4.82 - Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OY-1 ... 95
Slika 4.83 - Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OY-2 ... 95
Slika 4.84 - Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OY-3 ... 96
Slika 4.85 - Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OGY-1 ... 96
Slika 4.86 - Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OGY-2 ... 96
Slika 4.87 - Prikaz pukotina na prednjoj i stražnjoj strani okvira OGY-3 ... 97
Slika 4.88 - Promjena sekantne krutosti ispitivanih čeličnih okvira sa zidanim ispunom ... 97
Slika 4.89 - Trošenje energije pri određenim vrijednostima katnih pomaka ... 99
Slika 4.90 - Prijedlog sustava za pridržavanje kombiniranog zidanog ispuna od ispadanja izvan ravnine ... 102

Poglavlje 5.

Slika 5.1 - Anvelopa nosivosti zidanog ispuna ... 105

Slika 5.2 - Štapni model s jednom zamjenskom dijagonalom..... 107
Slika 5.3 - Zadavanje nelinearnog zgloba - Autodesk Robot Structural Analysis..... 107
Slika 5.4 - Anvelopa nosivosti zidanog ispuna od šupljih glinenih blokova..... 110
Slika 5.5 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OG-i i modela sustava sa zamjenskom dijagonalom..... 111
Slika 5.6 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i model sa zamjenskom dijagonalom..... 111
Slika 5.7 - Anvelopa nosivosti zidanog ispuna od porobetonskih blokova..... 113
Slika 5.8 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela sustava sa zamjenskom dijagonalom..... 114
Slika 5.9 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OY-i i model sa zamjenskom dijagonalom.. 114
Slika 5.10 - Anvelopa nosivosti kombiniranog zidanog ispuna..... 116
Slika 5.11 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela sustava sa zamjenskom dijagonalom..... 117
Slika 5.12 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OGY-i i model sa zamjenskom dijagonalom..... 117
Slika 5.13 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak numeričkih modela s jednom zamjenskom dijagonalom..... 118
Slika 5.14 - Model s tri zamjenske dijagonale..... 119
Slika 5.15 - Pojednostavljeni tri-linearni dijagram (a) naprezanje – deformacija za zidani ispun (b) sila – pomak za ekvivalentne dijagonale..... 120
Slika 5.16 - Ortotropni model zidanog ispuna..... 121
Slika 5.17 - Štapni model s tri zamjenske dijagonale..... 123
Slika 5.18 - Anvelope nosivosti ispuna od šupljih glinenih blokova: a) vanjske dijagonale, b) unutarnja dijagonala..... 126
Slika 5.19 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OG-i i modela sustava s tri zamjenske dijagonale..... 127
Slika 5.20 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i model s tri zamjenske dijagonale..... 127
Slika 5.21 - Anvelope nosivosti ispuna od porobetonskih blokova: a) vanjske dijagonale, b) unutarnja dijagonala..... 130
Slika 5.22 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela sustava s tri zamjenske dijagonale..... 130
Slika 5.23 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i model s tri zamjenske dijagonale..... 131
Slika 5.24 - Anvelope nosivosti kombiniranog zidanog ispuna: a) vanjske dijagonale, b) unutarnja dijagonala..... 133
Slika 5.25 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela sustava s tri zamjenske dijagonale..... 133
Slika 5.26 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OGY-i i model s tri zamjenske dijagonale... 134
Slika 5.27 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak numeričkih modela s jednom i tri zamjenske dijagonale..... 135
Slika 5.28 - Panel element – tlačne/vlačne i posmične dijagonale..... 136
Slika 5.29 - Smanjenje površine ekvivalentne dijagonale uslijed pukotina..... 138
Slika 5.30 - Štapni elementi: a) lokalne osi, b) oznake i smjerovi reznih sila..... 145
Slika 5.31 - Menegotto-Pinto model čeličnog materijala..... 146
Slika 5.32 - Izgled modela u *SeismoStruct*-u..... 146
Slika 5.33 - Opterećenje modela u *SeismoStruct*-u..... 147
Slika 5.34 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OG-i i modela izrađenog u *SesimoStruct*-u..... 149
Slika 5.35 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i model iz *SeismoStruct*-a..... 150
Slika 5.36 - Sile u dijagonalama glinenog zidanog ispuna iz modela u *SeismoStruct*-u..... 150
Slika 5.37 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela izrađenog u *SesimoStruct*-u..... 152
Slika 5.38 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OY-i i model iz *SeismoStruct*-a..... 153
Slika 5.39 - Sile u dijagonalama glinenog zidanog ispuna iz modela u *SeismoStruct*-u..... 153
Slika 5.40 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OGY-i i modela izrađenog u *SesimoStruct*-u..... 155
Slika 5.41 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OGY-i i model iz *SeismoStruct*-a..... 155

Slika 5.42 - Sile u dijagonalama kombiniranog zidanog ispuna iz modela u *SeismoStruct*-u..... 156
Slika 5.43 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak numeričkih modela iz *SeismoStruct*-a..... 157
Slika 5.44 - Jednoosni dijagram neprezanje-deformacija za beton..... 159
Slika 5.45 - Eksponencijalna zakonitost širenja pukotine..... 161
Slika 5.46 - Linearna zakonitost širenja pukotine..... 161
Slika 5.47 - Linearno omekšanje temeljeno na deformacijama..... 162
Slika 5.48 - Model temeljen na energiji loma..... 162
Slika 5.49 - Model temeljen na deformaciji..... 163
Slika 5.51 - Dijagram naprezanje-deformacija SBETA modela izloženog tlačnim naprezanjima..... 164
Slika 5.52 - Zakonitost omekšanja deformacija u tlaku..... 166
Slika 5.53 - Ploha sloma kontaktnog elementa..... 167
Slika 5.54 - Primjer zakonitosti omekšavanja za vlak i koheziju..... 168
Slika 5.55 - Model čeličnog okvira sa zidanim ispunom izrađen programskom paketu u ATENA 2D..... 169
Slika 5.56 - Konačni elementi korišteni pri modeliranju čeličnih okvira sa zidanim ispunom..... 170
Slika 5.57 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OG-i i modela iz programskog paketa ATENA 2D..... 172
Slika 5.58 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OG-i i modela ATENA 2D..... 173
Slika 5.59 - Horizontalni pomaci čeličnog okvira s glinenim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,10 %..... 174
Slika 5.60 - Normalna naprezanja u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %..... 174
Slika 5.61 - Posmična naprezanja u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %..... 174
Slika 5.62 - Horizontalni pomaci čeličnog okvira s glinenim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 175
Slika 5.63 - Normalna naprezanja u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 175
Slika 5.64 - Posmična naprezanja u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 175
Slika 5.65 - Raspored pukotina: a) model okvira s glinenim zidanim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,50 %, b) raspored pukotina ispitnog uzorka OG-1..... 176
Slika 5.66 - Horizontalni pomaci čeličnog okvira (a) i normalna naprezanja (b) u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 176
Slika 5.67 - Posmična naprezanja (a) i raspored pukotina (b) u glinenom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 177
Slika 5.68 - Horizontalni pomaci okvira (a) i normalna naprezanja (b) u glinenom ispunu pri slomu..... 177
Slika 5.69 - Posmična naprezanja (a) i raspored pukotina (b) u glinenom ispunu pri slomu..... 177
Slika 5.70 - Normalna (a) i posmična naprezanja (b) u čeličnom okviru pri slomu..... 178
Slika 5.71 - Plastične deformacije čeličnog okvira s glinenim zidanim ispunom pri slomu..... 178
Slika 5.72 - Model čeličnog okvira sa ispunom od porobetonskih blokova u ATENA 2D..... 178
Slika 5.73 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela iz programskog paketa ATENA 2D..... 180
Slika 5.74 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OY-i i modela ATENA 2D..... 181
Slika 5.75 - Horizontalni pomaci okvira s porobetonskim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,10 %..... 181
Slika 5.76 - Normalna naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %..... 182
Slika 5.77 - Posmična naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %..... 182
Slika 5.78 - Horizontalni pomaci okvira s porobetonskim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 182
Slika 5.79 - Normalna naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 183
Slika 5.80 - Posmična naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 183
Slika 5.81 - Raspored pukotina u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 183
Slika 5.82 - Horizontalni pomaci okvira s porobetonskim ispunom pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 184
Slika 5.83 - Normalna naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 184
Slika 5.84 - Posmična naprezanja u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 184
Slika 5.85 - Raspored pukotina u porobetonskom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 184

Slika 5.86 - Horizontalni pomaci okvira (a) i normalna naprezanja (b) u porobetonskom ispunu pri slomu..... 185
Slika 5.87 - Posmična naprezanja u porobetonskom ispunu pri slomu..... 185
Slika 5.88 - Raspored pukotina: a) model okvira s porobetonskim zidanim ispunom pri slomu, b) raspored pukotina ispitnog uzorka OY-1..... 185
Slika 5.89 - Normalna (a) i posmična naprezanja (b) u čeličnom okviru pri slomu..... 186
Slika 5.90 - Plastične deformacije čeličnog okvira s porobetonskim zidanim ispunom pri slomu..... 186
Slika 5.91 - Model čeličnog okvira kombiniranim ispunom u ATENA 2D..... 187
Slika 5.92 - Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak za okvire OY-i i modela ATENA 2D..... 189
Slika 5.93 - Nosivost i krutost ispitivanih okvira OY-i i modela iz programskog paketa ATENA 2D..... 190
Slika 5.94 - Horizontalni pomaci okvira s kombiniranim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,10 %..... 190
Slika 5.95 - Normalna naprezanja u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %..... 191
Slika 5.96 - Posmična naprezanja u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,10 %..... 191
Slika 5.97 - Horizontalni pomaci okvira s kombiniranim ispunom pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 192
Slika 5.98 - Normalna naprezanja u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 192
Slika 5.99 - Posmična naprezanja u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 192
Slika 5.100 Raspored pukotina u kombiniranom zidanom ispunu pri međukatnom pomaku od 0,50 %..... 193
Slika 5.101 Horizontalni pomaci okvira (a) i normalna naprezanja (b) u kombiniranom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 193
Slika 5.102 Posmična naprezanja u porobetonskom ispunu pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 193
Slika 5.103 Raspored pukotina: a) model okvira s kombiniranim zidanim ispunom pri katnom pomaku od 1,0 %, b) raspored pukotina ispitnog uzorka OGY-3..... 194
Slika 5.104 Normalna (a) i posmična naprezanja (b) u čeličnom okviru pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 194
Slika 5.105 Plastične deformacije čeličnog okvira s porobetonskim zidanim ispunom pri međukatnom pomaku od 1,0 %..... 194
Slika 5.106 Dijagram horizontalna sila - horizontalni pomak MKE modela iz *ATENA 2D*..... 195
Slika 5.107 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata čeličnih okvira s glinenim ispunom..... 198
Slika 5.108 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata čeličnih okvira s porobetonskim ispunom..... 198
Slika 5.109 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata čeličnih okvira s kombiniranim ispunom 199

Poglavlje 6.

Slika 6.1 - Varijacije odnosa visine i širine čeličnog okvira sa zidanim ispunom..... 201
Slika 6.2 - Varijacije broja raspona u parametarskoj analizi..... 202
Slika 6.3 - Model priključka stup-greda izrađen u programskom paketu CoP (lijevo) i M-Φ dijagram priključka stup-greda dobiven analizom u programskom paketu CoP (desno)..... 204
Slika 6.4 - Modeli okvira s nepovezanim ispunom: a) OY-1/1, b) OY-1/1-G, c) OY-1/2 i d) OY-1/2-G..... 207
Slika 6.5 - Ponašanje čeličnog okvira u ovisnosti o razini uzdužne tlačne sile u stupovima..... 208
Slika 6.6 - Nosivost čeličnog okvira u ovisnosti o razini uzdužne tlačne sile u stupovima..... 209
Slika 6.7 - Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom – nepopustljivi priključak (K), H/L=0.74; R=1, 2 i 3..... 209
Slika 6.8 - Porast nosivosti čeličnih okvira s glinenim ispunom s brojem raspona..... 210
Slika 6.9 - Porast nosivosti čeličnih okvira s glinenim ispunom sa smanjenjem omjera H/L..... 211
Slika 6.10 - Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), R=1, H/L=0.50, 0.74 i 1.0..... 211
Slika 6.11 - Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom –H/L=0.74; R=1; nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z) 212
Slika 6.12 - Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira H/L, broja raspona i vrste priključka..... 214

Slika 6.13 - Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom – nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=1 215
Slika 6.14 - Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira H/L, broja raspona i kvalitete materijala 215
Slika 6.15 - Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), H/L=0.74; R=1, 2 i 3 217
Slika 6.16 - Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), R=1, H/L=0.50, 0.74 i 1.0 218
Slika 6.17 - Usporedba početnih krutosti rezultata numeričke analize i eksperimentalnih rezultata 219
Slika 6.18 - Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim zidanim ispunom –H/L=0.74; R=1; nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z) 219
Slika 6.19 - Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=1 220
Slika 6.20 - Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira H/L, broja raspona i vrste priključka 222
Slika 6.21 - Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira H/L, broja raspona i kvalitete materijala 222
Slika 6.22 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), H/L=0.74; R=1, 2 i 3 224
Slika 6.23 - Porast nosivosti čeličnih okvira s kombiniranim ispunom s brojem raspona 225
Slika 6.24 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K), R=1, H/L=0.50, 0.74 i 1.0 226
Slika 6.25 - Smanjenje početne krutosti čeličnih okvira s kombiniranim ispunom s povećanjem omjera H/L 226
Slika 6.26 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim zidanim ispunom – H/L=0.74; R=1; nepopustljivi (K), djelomično nepopustljivi (P) i zglobni priključak (Z) 227
Slika 6.27 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – nepopustljivi priključak – S235, S275 i S355; H/L=0.74; R=1 228
Slika 6.28 - Vrijednosti nosivosti i horizontalnih pomaka u prosjeku i za odabrane modele (OGY, H/L=0,74, 1R) čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika 229
Slika 6.29 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira H/L, broja raspona i vrste priključka 232
Slika 6.30 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira H/L, broja raspona i kvalitete materijala 232
Slika 6.31 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – nepopustljivi priključak (K) – H/L=0.74; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY) 234
Slika 6.32 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – djelomično nepopustljivi priključak (P) – H/L=0.74; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY) 234
Slika 6.33 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – nominalno zglobni priključak (Z) – H/L=0.74; R=1; glineni (OG), porobetonski (OY) i kombinirani ispun (OGY) 235
Slika 6.34 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – nepopustljivi priključak – H/L=0.74; R=1; M=1, 2, 3 i 4 236
Slika 6.35 - Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom - varijacija omjera visine i širine okvira H/L i broja raspona 239
Slika 6.36 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije oslabljenja porobetonskih elemenata – P, 50, 60, 70; čvrstoće 3 i 7 241
Slika 6.37 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije kvalitete porobetonskih elemenata – 1, 2, 3, 4; debljina oslabljenja 60 241
Slika 6.38 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije kvalitete porobetonskih elemenata – 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 242
Slika 6.39 - Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije položaja nepovezanosti ispuna s čeličnim okvirom - OY-1/1, OY-1/1-G, OY-1/2, OY-1/2-G, OY-1/3, OY-1/3-G, OY-1/4, OY-1/4-G 243

Poglavlje 7.

Slika 7.1 – Analizirana konstrukcija: a) tlocrt karakteristične etaže, b) glavni okviri A i B..... 248
Slika 7.2 – Model višeetažne čelične konstrukcije u programskom paketu *SeismoStruct*..... 251
Slika 7.3 – Prvi oblik osciliranja: a) čelične konstrukcije OS-N, b) čelične konstrukcije s glinenim ispunom – OG-N..... 252
Slika 7.4 Dijagram ukupna horizontalna sila – horizontalni pomak vrha zgrade za sustave Oi-N..... 253
Slika 7.5 Maksimalne dosegnute horizontalne sile i početne krutosti sustava Oi-N..... 254
Slika 7.6 – Dijagram uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija glinenog zidanog ispuna OG-N..... 255
Slika 7.7 – Dijagram uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija porobetonskog zidanog ispuna OY-N..... 255
Slika 7.8 – Dijagram uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija kombiniranog zidanog ispuna OGY-N..... 255
Slika 7.9 – Dijagram uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija zidanih ispuna OG-N, OY-N i OGY-N..... 256
Slika 7.10 – Dijagram posmična sila - horizontalni pomak glinenog zidanog ispuna OG-N..... 256
Slika 7.11 – Dijagram posmična sila - horizontalni pomak porobetonskog zidanog ispuna OY-N..... 257
Slika 7.12 – Dijagram posmična sila - horizontalni pomak kombiniranog zidanog ispuna OGY-N..... 257
Slika 7.13 – Dijagram posmična sila - horizontalni pomak zidanih ispuna OG-N, OY-N i OGY-N..... 257
Slika 7.14 – Prikaz plastificiranih presjeka: a) čelična konstrukcija OS-N, b) čelična konstrukcija s glinenim ispunom OG-N..... 258
Slika 7.15 – Prikaz plastificiranih presjeka: a) čelična konstrukcija s porobetonskim ispunom OY-N, b) čelična konstrukcija s kombiniranim ispunom OGY-N..... 258
Slika 7.16 – Dijagram ukupna horizontalna sila – horizontalni pomak vrha zgrade za sustave Oi-P..... 259
Slika 7.17 – Maksimalne dosegnute horizontalne sile i početne krutosti sustava Oi-P..... 260
Slika 7.18 – Dijagrami uzdužna sila u dijagonali – uzdužna deformacija zidanih ispuna OG-i, OY-i i OGY-i..... 260
Slika 7.19 – Prikaz plastificiranih presjeka: a) čelična konstrukcija OS-P, b) čelična konstrukcija s glinenim ispunom OG-P..... 261
Slika 7.20 – Prikaz plastificiranih presjeka: a) čelična konstrukcija s porobetonskim ispunom OY-P, b) čelična konstrukcija s kombiniranim ispunom OGY-P..... 261
Slika 7.21 – Maksimalne dosegnute horizontalne sile i početne krutosti sustava Oi-N i Oi-P..... 262
Slika 7.22 – Dijagram ukupna horizontalna sila – horizontalni pomak vrha zgrade za sustave Oi-N i Oi-P..... 262
Slika 7.23 – Dijagram toka – metoda proračuna okvirnih konstrukcija s kombiniranim zidanim ispun..... 264

Poglavlje 8.

Slika 8.1 - Idealizacija eksperimentalne anvelope otpornosti pomoću bilinearnog odnosa..... 267
Slika 8.2 - Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti: a) uzorak OG-1, b) uzorak OG-2..... 269
Slika 8.3 - Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti: a) uzorak OG-3, b) uzorak OY-1..... 269
Slika 8.4 - Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti: a) uzorak OY-2, b) uzorak OY-3..... 270
Slika 8.5 - Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti: a) uzorak OGY-1, b) uzorak OGY-2... 270
Slika 8.6 - Eksperimentalna i idealizirana bi-linearna anvelopa nosivosti - uzorak OGY-3..... 270

Poglavlje 9.

Nema slika.

Prilog A

Slika A1 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 282
Slika A2 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 283
Slika A3 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 284
Slika A4 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 285
Slika A5 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 286
Slika A6 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 287

Slika A7 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona..... 288
Slika A8 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona..... 289
Slika A9 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona..... 290
Slika A10 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 291
Slika A11 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 292
Slika A12 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 293
Slika A13 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 294
Slika A14 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 295
Slika A15 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 296
Slika A16 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona..... 297
Slika A17 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona..... 298
Slika A18 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona..... 299
Slika A19 – Nosivost čeličnih okvira sa kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 300
Slika A20 – Nosivost čeličnih okvira sa kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 301
Slika A21 – Nosivost čeličnih okvira sa kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 302
Slika A22 – Nosivost čeličnih okvira sa kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 303
Slika A23 – Nosivost čeličnih okvira sa kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 304
Slika A24 – Nosivost čeličnih okvira sa kombiniranim ispunom – varijacija broja raspona i omjera H/L..... 305
Slika A25 – Nosivost čeličnih okvira sa kombiniranim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona..... 306
Slika A26 – Nosivost čeličnih okvira sa kombiniranim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona..... 307
Slika A27 – Nosivost čeličnih okvira sa kombiniranim ispunom – varijacija vrste priključka i broja raspona..... 308
Slika A28 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna..... 309
Slika A29 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna..... 310
Slika A30 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna..... 311
Slika A31 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna..... 312
Slika A32 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna..... 313
Slika A33 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna..... 314
Slika A34 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna..... 315
Slika A35 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna..... 316
Slika A36 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija omjera H/L i vrste ispuna..... 317
Slika A37 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija mehaničkih karakteristika ispuna..... 318
Slika A38 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija mehaničkih karakteristika ispuna..... 319
Slika A39 – Nosivost čeličnih okvira sa zidanim ispunom – varijacija mehaničkih karakteristika ispuna..... 320
Slika A40 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona..... 321
Slika A41 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L..... 322
Slika A42 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona..... 323
Slika A43 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L..... 324
Slika A44 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona..... 325
Slika A45 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim zidanim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L..... 326
Slika A46 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom – varijacija kvalitete čelika..... 327
Slika A47 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom – varijacija kvalitete čelika..... 328
Slika A48 – Nosivost čeličnih okvira s glinenim ispunom – varijacija kvalitete čelika..... 329
Slika A49 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona..... 330
Slika A50 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L..... 331
Slika A51 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona..... 332

Slika A52 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L..... 333
Slika A53 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona..... 334
Slika A54 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L..... 335
Slika A55 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika..... 336
Slika A56 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika..... 337
Slika A57 – Nosivost čeličnih okvira s porobetonskim ispunom – varijacija kvalitete čelika..... 338
Slika A58 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona..... 339
Slika A59 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L..... 340
Slika A60 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona..... 341
Slika A61 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L..... 342
Slika A62 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i broja raspona..... 343
Slika A63 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika i omjera H/L..... 344
Slika A64 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika..... 345
Slika A65 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika..... 346
Slika A66 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacija kvalitete čelika..... 347
Slika A67 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije oslabljenja porobetonskih elemenata 348
Slika A68 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije oslabljenja porobetonskih elemenata – P, 50, 60, 70; čvrstoće 4 i 8..... 349
Slika A69 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije kvalitete porobetonskih elemenata..... 349
Slika A70 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije kvalitete porobetonskih elemenata – 1, 2, 3, 4; debljina oslabljenja 70 mm..... 350
Slika A71 – Nosivost čeličnih okvira s kombiniranim ispunom – varijacije položaja nepovezanosti ispuna s čeličnim okvirom - OY-1/1, OY-1/1-G, OY-1/2, OY-1/2-G, OY-1/3, OY-1/3-G, OY-1/4, OY-1/4-G..... 350

Prilog B

Slika B1 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 1. ciklus, b) 2. ciklus i c) 3. ciklus opterećivanja..... 351
Slika B2 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 4. ciklus, b) 5. ciklus i c) 6. ciklus opterećivanja..... 352
Slika B3 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 7. ciklus, b) 8. ciklus i c) 9. ciklus opterećivanja..... 353
Slika B4 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 10. ciklus, b) 11. ciklus i c) 12. ciklus opterećivanja 354
Slika B5 – Disipacija energije okvira s glinenim ispunom: a) 13. ciklus i b) 14. ciklus opterećivanja..... 355
Slika B6 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom: a) 1. ciklus, b) 2. ciklus i c) 3. ciklus opterećivanja..... 356
Slika B7 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom: a) 4. ciklus, b) 5. ciklus i c) 6. ciklus opterećivanja..... 357
Slika B8 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom: a) 7. ciklus, b) 8. ciklus i c) 9. ciklus opterećivanja..... 358
Slika B9 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom: a) 10. ciklus, b) 11. ciklus i c) 12. ciklus opterećivanja..... 359
Slika B10 – Disipacija energije okvira s porobetonskim ispunom u 13. ciklusu opterećivanja..... 360
Slika B11 – Disipacija energije okvira s kombiniranim ispunom: a) 1. ciklus, b) 2. ciklus i c) 3. ciklus opterećivanja..... 361
Slika B12 – Disipacija energije okvira s kombiniranim ispunom: a) 4. ciklus, b) 5. ciklus i c) 6. ciklus opterećivanja..... 362
Slika B13 – Disipacija energije okvira s kombiniranim ispunom: a) 7. ciklus, b) 8. ciklus i c) 9. ciklus opterećivanja..... 363
Slika B13 – Disipacija energije okvira s kombiniranim ispunomu 10. ciklusu opterećivanja..... 364

Prilog C

Slika C1 – Opterećivanje okvira s glinenim ispunom: a) OG-1, b) OG-2 i c) OG-3..... 365
Slika C2 – Opterećivanje okvira s porobetonskim ispunom: a) OY-1, b) OY-2 i c) OY-3..... 366
Slika C3 – Opterećivanje okvira s kombiniranim ispunom: a) OGY-1, b) OGY-2 i c) OGY-3..... 367

Prilog D

Slika D1 – Prikaz opterećenja snijegom..... 370
Slika D2 – Koeficijenti oblika za opterećenje vjetrom..... 371
Slika D3 – Prikaz opterećenja vjetrom..... 372
Slika D4 – Shema opterećenja za mjerodavnu kombinaciju 373
Slika D5 – Dijagrami unutarnjih sila za mjerodavnu kombinaciju opterećenja..... 373
Slika D6 Dijagrami reznih sila na najkritičnijem elementu (stupu) konstrukcije..... 374
Slika D7 – Dijagrami unutarnjih sila na najkritičnijem elementu (gredi) konstrukcije..... 377
Slika D8 – Prikaz potresnih sila po visini konstrukcije..... 382
Slika D9 – Dijagrami unutarnjih sila uslijed potresa..... 382
Slika D10 – Dijagrami unutarnjih sila uslijed stalnog i korisnog opterećenja..... 383
Slika D11 – Pomaci konstrukcije (u mm) uslijed potresnog opterećenja..... 384
Slika D12 – Dijagrami unutarnjih sila u najkritičnijem elementu: uslijed stalnog i korisnog opterećenja (a), te uslijed potresa (b) 385
Slika D13 – Dijagrami unutarnjih sila u najkritičnijem elementu uslijed stalnog i korisnog opterećenja (a), te uslijed potresa (b) 387
Slika D14 – Oznake priključaka……..... 391

POPIS TABLICA

Poglavlje 1.

Nema tablica.

Poglavlje 2.

Tablica 2.1 - Istraživanja ponašanja okvira sa zidanim ispunom..... 17

Poglavlje 3.

Tablica 3.1 - Geometrijski zahtjevi za Grupe zidnih elemenata..... 23
Tablica 3.2 - Faktori pretvorbe za zidne elemente ispitane u vlažnom stanju..... 25
Tablica 3.3 - Vrijednosti koeficijenta oblika δ..... 26
Tablica 3.4 - Volumenski sastav morta prema [38] 27
Tablica 3.5 - Izmjere malih ispitnih uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće ziđa..... 30
Tablica 3.6 - Dopuštena područja čvrstoće morta unutar kojih ziđe može biti ispitano..... 31
Tablica 3.7 - Vrijednosti konstante K za proračun karakteristične tlačne čvrstoće zida..... 34
Tablica 3.8 - Izmjere gornje i donje čelične ploče..... 36
Tablica 3.9 - Izmjere uzorka za posmično ispitivanje..... 36
Tablica 3.10 - Vrijednosti karakteristične početne posmične čvrstoće f_{vk0}..... 39

Poglavlje 4.

Tablica 4.1 - Tlačne čvrstoće šupljih glinenih zidnih elemenata..... 45
Tablica 4.2 - Tlačne čvrstoće zidnih elemenata od porobetona..... 47
Tablica 4.3 - Vlačna i tlačna čvrstoća cementno-vapnenog morta..... 49
Tablica 4.4 - Vlačna i tlačna čvrstoća Ytong ljepila..... 50
Tablica 4.5 - Geometrijske i mehaničke karakteristike uzoraka za ispitivanje..... 52
Tablica 4.6 - Tlačna čvrstoća i moduli elastičnosti ziđa od šupljih glinenih blokova..... 54
Tablica 4.7 - Tlačna čvrstoća i moduli elastičnosti ziđa od porobetonskih blokova..... 55
Tablica 4.8 - Tlačna čvrstoća i moduli elastičnosti ziđa od porobetonskih blokova..... 56
Tablica 4.9 - Posmična čvrstoća ziđa od šupljih glinenih blokova..... 58
Tablica 4.10 - Vlačne i posmične čvrstoća uzoraka od glinenih i porobetonskih blokova..... 60
Tablica 4.11 - Rezultati ispitivanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom i okvira bez ispuna..... 90
Tablica 4.12 - Trošenje energije čeličnih okvira s ispunom od glinenih blokova (OG-i) 98
Tablica 4.13 - Trošenje energije čeličnih okvira s ispunom od porobetonskih blokova (OY-i) 98
Tablica 4.14 - Trošenje energije čeličnih okvira s kombiniranim ispunom (OGY-i) 99
Tablica 4.15 - Usporedba disipacije energije pri određenim vrijednostima katnih pomaka..... 99

Poglavlje 5.

Tablica 5.1 - Parametri anvelope nosivosti za zidani ispun od glinenih blokova ... 110
Tablica 5.2 - Parametri anvelope nosivosti za zidani ispun od glinenih blokova ... 113
Tablica 5.3 - Parametri anvelope nosivosti za zidani ispun od glinenih blokova ... 116
Tablica 5.4 - Parametri anvelope nosivosti zidanog ispuna od glinenih blokova za model s tri dijagonale ... 126
Tablica 5.5 - Parametri anvelope nosivosti zidanog ispuna od porobetonskih blokova modela s tri dijagonale ... 130
Tablica 5.6 - Parametri anvelope nosivosti kombiniranog zidanog ispuna modela s tri dijagonale ... 133
Tablica 5.7 - Parametri glinenog zidanog ispuna za ekvivalentne dijagonale ... 149
Tablica 5.8 - Parametri porobetonskog zidanog ispuna za ekvivalentne dijagonale ... 152
Tablica 5.9 - Parametri glinenog zidanog ispuna za ekvivalentne dijagonale ... 154
Tablica 5.10 - Vrijednosti parametara komponenti čeličnog okvira s glinenim zidanim ispunom za model u ATENA 2D ... 171
Tablica 5.11 - Vrijednosti parametara komponenti čeličnog okvira s porobetonskim zidanim ispunom za model u ATENA 2D ... 179
Tablica 5.12 - Vrijednosti parametara komponenti čeličnog okvira s kombiniranim zidanim ispunom za model u ATENA 2D ... 188

Poglavlje 6.

Tablica 6.1 - Parametri varirani u analizi za slučaj djelomično nepopustljivog i nominalno zglobnog priključka i ukupan broj izrađenih modela ... 202
Tablica 6.2 - Parametri varirani u analizi za slučaj nepopustljivog priključka i ukupan broj izrađenih modela ... 203
Tablica 6.3 - Mehaničke karakteristike analiziranih zidanih ispuna ... 205
Tablica 6.4 - Parametri zidanih ispuna M1, M2, M3 i M4 modeliranih u SeismoStruct-u ... 205
Tablica 6.5 - Parametri zidanih ispuna OG, OY i OGY modeliranih u SeismoStruct-u ... 206
Tablica 6.6 - Parametri varirani u analizi utjecaja oslabljenja i čvrstoća porobetonskih elemenata u kombiniranom ispunu ... 207
Tablica 6.7 - Nosivost i pomaci čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera H/L, broja raspona i vrste priključka ... 213
Tablica 6.8 - Nosivost i pomaci čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera H/L, broja raspona i kvalitete materijala ... 216
Tablica 6.9 - Nosivost i pomaci čeličnih okvira s porobetonskim ispunom - varijacija omjera H/L, broja raspona i vrste priključka ... 221
Tablica 6.10 - Nosivost i pomaci čeličnih okvira s porobetonskim ispunom - varijacija omjera *H/L*, broja raspona i kvalitete materijala ... 223
Tablica 6.11 - Nosivost i pomaci čeličnih okvira s kombiniranim ispunom - varijacija omjera H/L, broja raspona i vrste priključka ... 230
Tablica 6.12 - Nosivost i pomaci čeličnih okvira s kombiniranim ispunom - varijacija omjera H/L, broja raspona i kvalitete materijala ... 231
Tablica 6.13 - Nosivost i pomaci čeličnih okvira s zidanim ispunom - varijacija vrste ispuna ... 237
Tablica 6.14 - Nosivost i pomaci čeličnih okvira s glinenim ispunom - varijacija omjera H/L, broja raspona i kvalitete zidanog ispuna ... 238
Tablica 6.15 - Sažeti prikaz zaključaka izvedenih iz provedene parametarske analize ... 245

Poglavlje 7.

Tablica 7.1 - Poprečni presjeci greda i stupova čelične konstrukcije ... 248
Tablica 7.2 - Geometrijske karakteristike korištenih čeličnih profila ... 249
Tablica 7.3 - Parametri glinenog zidanog ispuna po etažama konstrukcije ... 250
Tablica 7.4 - Parametri porobetonskog zidanog ispuna po etažama konstrukcije ... 250
Tablica 7.5 - Parametri kombiniranog zidanog ispuna po etažama konstrukcije ... 251

Tablica 7.6 - Dinamička svojstva analiziranih konstrukcija..... 252

Poglavlje 8.

Tablica 8.1 - Parametri idealizirane bi-linearne anvelope nosivosti 269

Poglavlje 9.

Nema tablica.

Prilog A

Nema tablica.

Prilog B

Nema tablica.

Prilog C

Nema tablica.

Prilog D

Tablica D1 - Vrijednosti opterećenja snijegom u ovisnosti o području i nadmorskoj visini..... 370
Tablica D2 - Karakteristična vrijednost opterećenja vjetrom..... 371
Tablica D3 - Ukupna masa konstrukcije po katovima..... 380
Tablica D4 - Vrijednosti parametara tla..... 381
Tablica D5 - Raspodjela potresne sile po visini konstrukcije..... 382
Tablica D6 - Apsolutni ds i relativni dr pomaci konstrukcije [mm] i koeficijenti osjetljivosti..... 384
Tablica D7 - Zahtjevana klasa poprečnog presjeka u ovisnosti o klasi duktilnosti..... 386
Tablica D8 - Proračunske otpornosti stupova i greda u priključcima za provjeru osiguranja od pojave „meke" etaže..... 392