

# Utjecaj otvora na seizmički odgovor armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom

---

**Penava, Davorin**

**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:133:214229>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



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**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK**

**Doktorski rad**

**Utjecaj otvora na seizmički odgovor armirano-betonskih okvira  
sa zidanim ispunom**

**Davorin Penava**

**Osijek, 2012.**

# DOKTORSKI RAD

## Utjecaj otvora na seizmički odgovor armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom

### PODACI O AUTORU

Ime i prezime: **Dr.sc. Davorin Penava, dipl.ing.građ.**  
Mjesto i godina rođenja: Vinkovci, 1981.  
Diplomirao: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2005.  
Magistrirao: Univerzitat u Beogradu u Republici Srbiji u suradnji s Ruhr-Universität Bochum u Republici Njemačkoj, 2008.  
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. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ.

### POSTUPAK OCJENE I OBRANA

Prijava teme: Listopad, 2011.

Povjerenstvo za ocjenu:

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

Prof.dr.sc. Ivica Kožar, redoviti profesor, Građevinski fakultet Rijeka, član

Prof.dr.sc. Ivica Guljaš, izvanredni profesor, Građevinski fakultet Osijek, član

Povjerenstvo za obranu:

Prof.dr.sc. Ivica Guljaš, izvanredni profesor, Građevinski fakultet Osijek, predsjednik

Prof.dr.sc. Ivica Kožar, redoviti profesor, Građevinski fakultet Rijeka, član

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

Mjesto i datum obrane: Građevinski fakultet Osijek, 29. kolovoza 2012.

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

**Doktorski rad**

**Utjecaj otvora na seizmički odgovor armirano-betonskih okvira  
sa zidanim ispunom**

**Davorin Penava**

**Osijek, 2012.**



Mentor rada:

Prof.dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ.

Doktorski rad ima 345 stranica.

## AUTOROV KRATKI ŽIVOTOPIS

**Dr.sc. Davorin Penava, dipl.ing.građ.**, je rođen u Vinkovcima, 15. studenoga 1981.

Pohađao je Tehničku školu Ruđera Boškovića Vinkovci i smjer Građevinski tehničar. **Diplomu inženjera građevinarstva** stekao je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2005. godine. U rujnu 2008. godine, putem međunarodnog poslijediplomskog magistarskog studija **Computational Engineering**, na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu u Republici Srbiji, u suradnji s Ruhr-Universität Bochum u Saveznoj Republici Njemačkoj, stekao je zvanje **magistra znanosti**. Poslijediplomski doktorski studij upisao je u veljači 2009. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Od listopada 2009. do siječnja 2010. godine boravi na **RWTH Aachen Universität**, Fakultät für Bauingenieurwesen, Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, Savezna Republika Njemačka, u svrhu istraživanja i usavršavanja. Pohađa seminare i tečajeve na **Ruhr-Universität Bochum** u Saveznoj Republici Njemačkoj te na **Univerzitet Sv.Kiril i Metodij** u Republici Makedoniji.

Od 2006. godine do danas, zaposlen je u zvanju **Znanstvenog novaka** na Građevinskom fakultetu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, na znanstvenom projektu **Seizmički proračun okvirnih konstrukcija s ispunom**, Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa, čiji je glavni istraživač Prof.dr.sc. Vladimir Sigmund, dipl.ing.građ. Sudjeluje u održavanju nastave u sklopu Zavoda za tehničku mehaniku. Suradnik je na znanstvenim radovima objavljenim u Republici Hrvatskoj i inozemstvu te stručnim projektima.

Nositelj je dvije DAAD stipendije, za poslijediplomski magistarski te doktorski studij, Njemačke akademske službe za razmjenu. Tijekom dodiplomskog studija, bio je dobitnik **Rektorove nagrade** i **Lions Club** nagrade.

Član je više inozemnih i domaćih udruga i društava te međunarodnih projekata, među kojima su South Eastern European Graduate School for Master and PhD Formation in Engineering (SEEFORM), Društvo građevinskih inženjera Osijek (DGIO) i Hrvatsko društvo za mehaniku (HDM).

## PREDGOVOR

Istraživanje koje je predstavljeno u ovome doktorskom radu dio je znanstvenoga projekta Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta u Republici Hrvatskoj pod nazivom: "Seizmički proračun okvirnih konstrukcija s ispunom", bez čije potpore ovo istraživanje ne bi bilo moguće.

Ovim putem izražavam veliku zahvalnost na potpori svome mentoru, glavnom istraživaču i voditelju projekta, prof.dr.sc. Vladimiru Sigmundu, kojem dugujem iznimnu zahvalnost za pruženo znanje, mudrost, volju, potporu, savjete, strpljenje te vrijeme koje mi je podario. Zahvaljujem se dekanu Građevinskog fakulteta Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, prof.dr.sc. Damiru Markulaku, što mi je davao podršku da završim svoj doktorski rad na vrijeme. Bez njihove potpore uspješni završetak ovog rada ne bi bio moguć. Njihovu potporu iznimno cijenim te im ovime izražavam svoje najdublje poštovanje.

Mentoru, kolegama na projektu i Zavodu za tehničku mehaniku, želim se zahvaliti za potporu tijekom mojeg boravka u inozemstvu te pri radu na projektu. Međusobnom suradnjom, komunikacijom, razmjenom znanja te potporom jedni drugima uspjeli smo steći više iskustva i znanja te učiniti više nego što bi ikada uspjeli sami. Bez naše suradnje ovaj doktorski rad ne bio moguć.

Na podršci tijekom izvođenja nastave zahvaljujem se prof.dr.sc. Vladimiru Sigmundu i prof.dr.sc. Mirjani Bošnjak-Klečina iz razloga što su mi uz nastavu omogućili dovoljno vremena, pružali potporu, te imali razumijevanja za sve ovo vrijeme koje mi je bilo potrebno, a koje sam uložio u svoj doktorski rad. Zahvaljujem se prof.dr.sc. Mirjani Bošnjak-Klečina na svakom dobronamjernom savjetu, kolegijalnosti, potpori i pažnji u radu i suradnji. Tijekom istraživanja za doktorski rad, svoje vrijeme posvetili su mi i prof.dr.sc. Ivica Kožar sa Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci i prof.dr.sc. Ivica Guljaš s Građevinskog fakulteta Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, dajući mi svoje smjernice i savjete te su ulagali svoj trud i znanje pri rješavanju problema tijekom pojedinih dijelova istraživanja. Svima se zahvaljujem, što ste mi pomogli da uspješno završim svoj rad.

Također se zahvaljujem svim suradnicima i djelatnicima našeg Fakulteta. Zahvaljujem se Njemačkoj akademskoj službi za razmjenu DAAD, na potpori i suradnji.

I na kraju se zahvaljujem svojoj supruzi Dijani, svome ocu i obitelji Lončar. Doktorski rad posvećujem svojoj supruzi Dijani, koja je vjerovala u mene, davala mi potporu i snagu do samog kraja rada.

## SAŽETAK DOKTORSKOGA RADA

### Utjecaj otvora na seizmički odgovor armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom

Okviri s ispunom su kompozitne konstrukcije koje se sastoje od okvira (armirano-betonski ili čelični) i ispune za koju se u Hrvatskoj uobičajeno rabe blok opeke ili čak betonski blokovi. Sličan konstruktivni sistem čine i zidovi s vertikalnim i horizontalnim serklažima uz razliku što se kod okvira s ispunom se prvo naprave okviri, a tek se onda zida ispun, a kod zidova s serklažima se prvo sazidaju zidovi, a onda se izvode serklaži (okviri). Ispuna bitno mijenja odgovor konstrukcije na potres i njen se utjecaj mora na odgovarajući način uzeti u proračun. Dosadašnji propisi ne sadrže pojašnjenja o tome kako se i na koji način to čini. Uz vrlo detaljan prikaz proračuna okvira i drugih uobičajenih armirano-betonskih konstrukcija i suvremene metode proračuna na raspolaganju projektantima, nedostatak pojašnjenja za okvire s ispunom se može pripisati nedovoljnom razumijevanju njihova utjecaja kao i velikom broju nejasnoća uključenih u modeliranje djelovanja ispune.

Iskustva iz prijašnjih potresa su pokazala i povoljna i nepovoljna ponašanja konstrukcija okvira s ispunom. Međutim suvremeni propisi su uglavnom orijentirani na nepovoljna djelovanja odakle rezultiraju predimenzionirane i neekonomične konstrukcije. Interakcija između nearmirane ispune i okvira može dovesti do neuobičajenih ponašanja okvira bilo lokalno (efekt kratkog stupa, posmični slom čvora) ili globalno (nastanak meke etaže). Zbog svoje složenosti, pozitivna i negativna djelovanja ispune još uvijek predstavljaju kontroverznu temu na kojoj treba poraditi, a poseban su problem okviri s ispunom s otvorima.

Disertacija detaljnije istražuje utjecaj otvora u zidanom ispunu pomoću ispitivanja modela i numeričkih istraživanja. Eksperimentalni dio disertacije se sastoji iz provedenih ispitivanja na modelima jedno-katnih i jedno-rasponskih okvira sa zidanim ispunom izloženih djelovanju konstantnog vertikalnog i promjenjivog horizontalnog opterećenja. Program ispitivanja uključivao je deset jednakih uzoraka modela armirano-betonskih okvira, sa i bez otvora u zidanom ispunu. Okviri su bili dimenzionirani prema europskim normama bez uzimanja u obzir efekta ispuna. Nakon njihova betoniranja, oni su bili ispunjeni sa zidanim ispunom jednakih materijalnih svojstava, ali različitog smještaja, vrste i izmjera otvora te sa ili bez izvedbe vertikalnog serklaža oko otvora. Izvedba uzoraka, provedba ispitivanja i dobiveni rezultati povećali su razumijevanje ponašanja ovakvih konstrukcija.

Obzirom na nužnu ograničenost eksperimentalnog ispitivanja te neophodnost generalizacije zaključaka, eksperimentalni rezultati su nadopunjeni s numeričkima primjenom nelinearne metode konačnih elemenata primjenjene u programu ATENA ver. 4.3. Radi pouzdanosti numeričkih rezultata, isti su prvo kalibrirana na izmjerenim vrijednostima, a

zatim su takvi kalibrirani modeli iskorišteni za proširivanje opsega istraživanja. Numerička analiza je obuhvatila otvore drugih izmjera i smještaja, druge izmjere i vrste materijala ispuna te količine poprečne armature okvira. Na osnovi takove proširene slike ponašanja, dobiveni su parametri utjecaja zidanog ispuna s otvorima i bez njih na armirano-betonski okvir. Razumijevanje mehanizma i slijeda gubitka nosivosti, pomoći će u praktičnom uzimanju u obzir utjecaja zidanog ispuna s otvorima. To u konačnici omogućava primjenu okvira sa zidanim ispunom s i bez otvora, kao konstruktivnog elementa, što će rezultirati u većoj ekonomičnosti i pouzdanosti u procjeni ponašanja armirano-betonskih okvira s ispunom na djelovanje potresa.

## **ABSTRACT OF THE DISSERTATION**

### **Influence of openings on the seismic response of reinforced concrete frames with masonry infill**

Infilled frames are composite structures that consist of a frame (reinforced concrete or steel) and infill for which is the clay or even concrete block commonly used in Croatia. A similar structural system called confined masonry consists of the masonry walls with vertical and horizontal confining elements. In infilled frame systems the infill is built after frame is hardened. As opposed to the infilled frame system, in the case of confined masonry, the masonry walls are built first and then confining elements around them. Infill significantly alters the structural response under earthquake load and its influence must be taken into account. Current regulations do not provide explanations about it and how it should be calculated. With a very detailed explanation of frames and other common reinforced concrete structures and modern regulations available to designers, the lack of explanation on the infilled frames can be attributed to insufficient understanding of their influence as well as to a number of uncertainties involved in infill modeling.

The experiences from past earthquakes have shown the favorable and unfavorable behavior of infilled frame structures. However, modern regulations are mainly oriented to the adverse effects, which results with oversized and uneconomical design. The interaction between unreinforced infill and the frame can lead to unusual behavior of the latter whether locally (the effect of short columns, node shear failure) or globally (the occurrence of soft floors). Because of its complexity, the positive and negative effects of the infill are still the controversial topic that requires serious attention. Special problem are infilled frames with openings.

The dissertation further investigates the influence of openings in the masonry infill using experiments tests and numerical studies. The experimental part of the dissertation consists of tests performed on models of single-storey single-span frame with masonry infill when subjected to constant vertical and horizontal cyclic loads. The program tests involved ten equal specimens of reinforced concrete frame models, with or without openings in the masonry infill. The frames were designed according to European standards, without taking into account the effect of the infill. After their casting they were filled with masonry infill of equal material properties, but with different position, types and opening dimensions, with or without the performance of the vertical confinement around the opening. Performance of specimens, experiments and test results obtained have increased the understanding of the behavior of such structures.

Given the necessary limitations of the experimental tests and the necessity of generalization of the conclusions, the experimental results are supplemented with numerical studies, through nonlinear finite element method applied in ATENA ver. 4.3. For the reliability of numerical results, they were first calibrated with the experiments, and then such calibrated models were used to expand the scope of research. Numerical analysis included the openings of other dimensions and position, other dimensions and types of infill material and the amount of transverse reinforcement of the frame. Concluding the results of the overall picture of behavior, influence parameters were obtained for masonry infill with and without openings on the reinforced concrete frame. Understanding of the mechanism and the sequence of the failure will help to take into account the influence of masonry infill with openings in the practice. This eventually enables the use of frame with a masonry infill, with and without opening, as structural element, which will result in greater efficiency and reliability in assessing the its behavior in case of seismic action.

## RESUMEN DE LA TESIS

### Influencia de las aberturas en la respuesta sísmica de pórticos de hormigón armado con relleno de albañilería

Los pórticos rellenos son estructuras compuestas cuales consisten de un bastidor (de hormigón armado o acero) y relleno para el cual en Croacia normalmente se utiliza arcilla o incluso bloques de hormigón. Una estructura similar es la albañilería confinada con muros de fábrica y elementos confinados horizontales y verticales. Al contrario de los pórticos rellenos, en el caso de la albañilería confinada, los muros de mampostería se construyen primeros y luego los elementos estructurales alrededor. El relleno cambia significativamente la respuesta estructural de cargas sísmicas y su influencia hay que tomar en cuenta. Las normas actuales no ofrecen descripciones de la última y cómo hay que calcularla. Con una descripción detallada de los pórticos y los demás estructuras de hormigón armado comunes y las normas modernas disponibles para los diseñadores, la ausencia de descripción de los pórticos rellenos se puede explicar con la falta de comprensión suficiente de su influencia, así como de la cantidad de incertidumbres involucrados en el modelo del relleno.

La experiencia de terremotos pasados ha demostrado el comportamiento favorable y desfavorable de las estructuras de pórticos rellenos. Sin embargo, las normas modernas se orientan principalmente en sus efectos adversos, lo que resulta en un diseño sobredimensionado y antieconómico. La interacción entre el relleno sin refuerzo por armadura y el pórtico puede causar comportamiento raro del último, bien localmente (el efecto de columnas cortadas o fallos en los nudos por fuerzas cortantes) o bien globalmente (el caso de plantas "debiles", sin relleno en conjunto con plantas rellenas). Debido a su complejidad, los efectos positivos y negativos del relleno siguen siendo un tema polémico que requiere atención seria. Un problema especial son los pórticos rellenos con aberturas.

La siguiente tesis investiga la influencia de las aberturas en el relleno de fábrica, a través de experimentos y estudios numéricos. La parte experimental de la tesis consiste de pruebas realizadas con modelo de pórtico sencillo de una sola planta sometido a cargas verticales constantes y cargas horizontales cíclicas. Las pruebas informáticas involucran diez modelos de muestras iguales de modelos de pórticos de hormigón armado, con o sin huecos en el relleno de albañilería. Los pórticos fueron diseñados según los estándares europeos, sin tomar en cuenta el efecto del relleno. Después de su fundición, fueron rellenos de materiales de propiedades iguales pero en posiciones, tipos y dimensiones de las aberturas distintas, con o sin la ejecución de refuerzos verticales alrededor del hueco. La actuación de las muestras, los experimentos y los resultados obtenidos han aumentado la comprensión del comportamiento de estructuras de este tipo.



Debido a las limitaciones necesarias de las pruebas experimentales y la necesidad de generalización de las conclusiones, los resultados experimentales fueron complementados por estudios numéricos, a través de “non linear” método de elementos finitos, aplicado en ATENA, ver. 4.3. Por su fiabilidad, los resultados numéricos fueron primero calibrados con los experimentos, y entonces los modelos calibrados de esta manera fueron usados para extender el alcance de la investigación. Los análisis numéricos incluyeron aberturas de otras dimensiones y posiciones, materiales del relleno de otros tipos y dimensiones y distintas cantidades de la armadura transversal del pórtico. Concluyendo los resultados de la imagen general del comportamiento, fueron obtenidos parámetros de influencia para el relleno de albañilería en el pórtico de hormigón armado, con o sin aberturas. Comprender el mecanismo y la secuencia del fallo ayudará tomar en cuenta la influencia del relleno de albañilería con aberturas en la práctica. Así eventualmente se permite usar el pórtico con relleno de fábrica con o sin aberturas como elemento estructural, lo que resulta en mayor eficacia y fiabilidad en la evaluación su comportamiento en el caso de actividad sísmica.

## ZUSAMMENFASSUNG DER DISSERTATION

### Einfluss der Öffnungen auf die seismische Antwort der Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachung

Rahmen mit Ausfachung sind Verbundstrukturen, die aus einem Rahmen (Stahlbeton oder Stahl) und Ausfachung bestehen, wofür man in Kroatien normalerweise Ton oder Betonblöcke verwendet. Ein ähnliches Tragwerksystem bekannt als eingeschlossenes Mauerwerk besteht aus Mauerwerk mit vertikalen und horizontalen konstruktiven Abgrenzungen. In den ausgefachten Rahmensystemen wird das Feld erst nachdem Einhärtens des Tragwerks vermauert. Im Gegenteil zu dem ausgefachten Mauerwerksystem, bei dem eingeschlossenen Mauerwerk, wird zu erst vermauert und erst dann baut man den umliegenden Grenzelementen. Die Ausfachung verändert wesentlich das Tragwerkverhalten unter Erdbebenlast und man muss ihren Einfluss in Betracht nehmen. Die aktuellen Baunormen geben keine eindeutige Definitionen und Rechnungsverfahren dafür. Im Gegenteil dazu stehen den Entwerfer lauter Definitionen für Stahlbetonrahmen und andere gewöhnliche Baukonstruktionen in den modernen Baunormen zur Verfügung, also die Mangel an solche für die Mauerwerksausfachung kann man nur durch die unzureichenden Kenntnisse für ihren Einfluss erklären, wie auch durch die zahlreichen Unsicherheiten beteiligt an dem statischen Model.

Die Erfahrung von vergangenen Erdbeben hat die Vor- und Nachteile im Tragverhalten der Rahmenkonstruktionen gezeigt. Jedoch orientieren sich die heutigen Baunormen mehr an die negativen Auswirkungen, was in Überdimensionierung und Unwirtschaftlichkeit resultiert. Die Wechselwirkung der Ausfachung und des Rahmens könnte zu einem nicht gewöhnlichen Verhalten von dem letzten führen – lokal (Das Effekt der Kürzung von Stützen, Knotenversagen) oder global (Erscheinung von „weichen“ Stockwerken). Wegen der Kompliziertheit der Ausfachung verbleiben ihre positiven und negativen Auswirkungen umstrittenes Thema und verlangen ernsthafte Kenntnisnahme. Ein Sonderproblem sind die ausgefachten Rahmen mit Öffnungen.

Die folgende Dissertation untersucht den Einfluss der Öffnungen in der Mauerwerksausfachung mit der Hilfe von Experimenten und numerischen Studien. Das experimentele Teil der Dissertation besteht aus Testen ausgeführt mit eingeschossigem Rahmen mit einseitiger Verspannung und Mauerwerksausfachung, konstanten Vertikallasten und zyklischen Horizontallasten unterworfen. Die Programteste bestanden aus zehn gleichen Variationen des Stahlbetonrahmens mit oder ohne Öffnungen in der Mauerwerksausfachung. Die Rahmen sind nach den europäischen Standarten entworfen, ohne irgendwelche Auswirkungen der Ausfachung zu berücksichtigen. Nach dem Abguss wurden sie von innen

mit Materialien mit gleichen Eigenschaften vermauert, jedoch in unterschiedlichen Positionen, Arten und Abmessungen der Öffnungen, mit oder ohne das Einführen von vertikaler Stützung um sie herum. Die Leistung der Variationen, die Experimente und die dokumentierten Ergebnisse haben das Verstehen des Verhaltens solcher Tragwerksysteme verbessert.

Bestimmt durch die vorgegebene Beschränkungen der experimentellen Versuche und die Notwendigkeit für Verallgemeinerung der Schlussfolgerungen, wurden die Ergebnisse der Experimente durch numerische Studien ergänzt – durch das Method der nicht lineare Finite-Elemente verwendet in ATENA ver. 4.3. Um die Zuverlässigkeit der numerischen Ergebnisse zu sichern, wurden sie zu erst mit den Experimenten kalibriert, und erst dann wurden die kalibrierten Modelle genutzt um den Umfang der Forschung aufzudehnen. Die numerischen Analysen bestanden aus Öffnungen mit unterschiedlichen Abmessungen und Typen des Materials der Ausfachung und die Anzahl der Querbewehrung im Rahmen. Dank der Schlussfolgerungen vom Gesamtbild des Verhaltens wurden Einflussparameter für Mauerwerksausfachung im Stahlbetonrahmen mit oder ohne Öffnungen erreicht. Das Verstehen der Mechanik und der Sequenz der Fehler wird die praktische Berücksichtigung des Einflusses der Mauerwerksausfachung mit Öffnungen vereinfachen. Das vereinfacht im Endeffekt das Benutzen von Rahmen mit Mauerwerksausfachung mit oder ohne Öffnungen, als Tragwerkselement, was auch in höher Effizienz und Zuverlässigkeit im Bemessungsverfahren für Erdbebenfälle resultiert.

## SADRŽAJ

PODACI O AUTORU, RADU, OCJENI I OBRANI DOKTORSKOG RADA.....	II
NASLOVNI LIST .....	III
MENTOR I OPSEG DOKTORSKOGA RADA .....	IV
AUTOROV KRATKI ŽIVOTOPIS.....	V
PREDGOVOR .....	VI
SAŽETAK DOKTORSKOGA RADA .....	VII
ABSTRACT OF THE DISSERTATION ( <i>engleski jezik</i> ).....	IX
RESUMEN DE LA TESIS ( <i>španjolski jezik</i> ).....	XI
VORWORT DER DISSERTATION ( <i>njemački jezik</i> ) .....	XIII
SADRŽAJ .....	XV
POPIS SLIKA.....	XXI
POPIS TABLICA.....	XXVIII
POPIS SIMBOLA.....	XXXV

### Poglavlje 1.0.

UVOD .....	1
1.1.  Obrazloženje motiva .....	1
1.2.  Pregled dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja .....	3
1.3.  Dostupni numerički modeli.....	4
1.4.  Pregled istraživanja .....	6
1.5.  Ciljevi istraživanja .....	6
1.6.  Znanstvene metode, metodologija i plan istraživanja .....	7
1.7.  Očekivani izvorni doprinos istraživanja .....	7
1.8.  Primjena rezultata istraživanja .....	8
1.9.  Hipoteza.....	9

### Poglavlje 2.0.

PROVEDBA ISPITIVANJA NA ARMIRANO-BETONSKIM OKVIRIMA SA ZIDANIM ISPUNOM.....	10
2.1.  Uvod .....	10

2.2.	Pregled ispitivanih modela.....	10
2.3.	Opis i izmjere ispitivanih modela .....	12
2.3.1.	Opis prototipa.....	12
2.3.2.	Izmjere i smještaj otvora u zidanom ispunu .....	14
2.3.3.	Izmjere uzoraka i plan armature.....	16
2.3.4.	Primijenjena gradiva i materijalna svojstva .....	31
2.3.5.	Priprema uzoraka.....	45
2.3.6.	Način ispitivanja i raspored mjernih uređaja .....	48
2.4.	Sažetak i zaključak poglavlja .....	61

## **Poglavlje 3.0.**

<b>REZULTATI PROVEDENIH ISPITIVANJA .....</b>	<b>62</b>	
3.1.	Uvod .....	62
3.2.	Razine oštećenosti i način sloma .....	62
3.2.1.	Uzorci grupe I.....	62
3.2.2.	Uzorci grupe II.....	73
3.2.3.	Uzorci grupe III.....	82
3.2.4.	Cjelokupni prikaz.....	86
3.3.	Kose vlačne pukotine na zidanom ispunu .....	88
3.3.1.	Uzorci grupe I.....	88
3.3.2.	Uzorci grupe II.....	89
3.3.3.	Uzorci grupe III.....	89
3.4.	Svojstva histereznih i primarnih krivulja.....	89
3.4.1.	Uzorci grupe I.....	92
3.4.2.	Uzorci grupe II.....	93
3.4.3.	Uzorci grupe III.....	94
3.5.	Pojednostavljene primarne krivulje .....	94
3.5.1.	Početna krutost .....	95
3.5.2.	Granica tečenja i pripadni katni pomak .....	95
3.5.3.	Granica sloma i krajnji katni pomak .....	95
3.6.	Sažetak i zaključak poglavlja .....	98

## **Poglavlje 4.0.**

<b>DISKUSIJA REZULTATA ISPITIVANJA .....</b>	<b>100</b>	
4.1.	Uvod .....	100
4.2.	Razine oštećenosti i način sloma .....	100

4.2.1.	Pregled razina oštećenosti.....	100
4.2.2.	Uzorci grupe I.....	101
4.2.3.	Uzorci grupe II.....	103
4.2.4.	Uzorci grupe III.....	105
4.3.	Način i oblik sloma uzoraka .....	106
4.3.1.	Uzorci grupe I.....	106
4.3.2.	Uzorci grupe II.....	108
4.3.3.	Uzorci grupe III.....	110
4.4.	Nosivost uzoraka u horizontalnom smjeru.....	111
4.4.1.	Uvod.....	111
4.4.2.	Uzorci grupe I.....	112
4.4.3.	Uzorci grupe II.....	116
4.4.4.	Uzorci grupe III.....	120
4.5.	Krutost uzoraka u horizontalnom smjeru .....	122
4.5.1.	Uvod.....	122
4.5.2.	Uzorci grupe I.....	123
4.5.3.	Uzorci grupe II.....	127
4.5.4.	Uzorci grupe III.....	131
4.6.	Histerezna energija uzoraka .....	133
4.6.1.	Uvod.....	133
4.6.2.	Uzorci grupe I.....	134
4.6.3.	Uzorci grupe II.....	138
4.6.4.	Uzorci grupe III.....	142
4.7.	Cjelokupni prikaz .....	144
4.7.1.	Nosivost u horizontalnom smjeru .....	144
4.7.2.	Krutost u horizontalnom smjeru .....	145
4.7.3.	Histerezna energija .....	146
4.8.	Sažetak i zaključak poglavlja .....	147

## **Poglavlje 5.0.**

### **NUMERIČKO MODELIRANJE PRIMJENOM METODE KONAČNIH ELEMENATA .....**

5.1.	Uvod .....	148
5.2.	Izvedba numeričkog modela.....	148
5.2.1.	Modeliranje zidanog ispuna .....	148
5.2.2.	Modeliranje betona, armature i njihove veze .....	153
5.2.3.	Pregled odabranih početnih svojstava materijala.....	155

5.2.4.	Primijenjeni konačni elementi.....	156
5.2.5.	Mreža konačnih elemenata .....	157
5.2.6.	Odabir pristupa rješavanja nelinearnih jednadžbi .....	158
5.2.7.	Modeliranje rubnih uvjeta na numeričkom modelu.....	160
5.2.8.	Osvrt na primijenjeni numerički model .....	161
5.3.	Usklađivanje numeričkog i fizikalnog modela .....	163
5.3.1.	Uvod.....	163
5.3.2.	Uzorci grupe III.....	163
5.4.	Provjera usvojenog numeričkog modela.....	170
5.4.1.	Uvod.....	170
5.4.2.	Uzorci grupe I.....	171
5.4.3.	Uzorci grupe II.....	179
5.5.	Sažetak i zaključak poglavlja .....	185

## **Poglavlje 6.0.**

<b>ANALIZA UTJECAJA VERTIKALNIH SERKLAŽA.....</b>	<b>187</b>	
6.1.	Uvod .....	187
6.2.	Opis i izmjere numeričkih modela.....	187
6.2.1.	Pregled numeričkih modela.....	187
6.2.2.	Svojstva materijala .....	193
6.3.	Rezultati proračuna obzirom na način sloma numeričkih modela .....	194
6.3.1.	Numerički modeli grupe IV .....	194
6.3.2.	Numerički modeli grupe V .....	203
6.3.3.	Numerički modeli grupe VI .....	204
6.4.	Diskusija o slomu zidanog ispuna.....	205
6.5.	Histerezne i primarne krivulje .....	213
6.5.1.	Numerički modeli grupe IV .....	213
6.5.2.	Numerički modeli grupe V .....	214
6.5.3.	Numerički modeli grupe VI .....	214
6.6.	Nosivost u horizontalnom smjeru.....	225
6.6.1.	Numerički modeli grupe IV .....	225
6.6.2.	Numerički modeli grupe V i VI.....	229
6.7.	Krutost u horizontalnom smjeru .....	232
6.7.1.	Numerički modeli grupe IV .....	232
6.7.2.	Numerički modeli grupe V i VI.....	236
6.8.	Histerezna energija.....	239

6.8.1. Numerički modeli grupe IV .....	239
6.8.2. Numerički modeli grupe V i VI .....	243
6.9. Diskusija rezultata proračuna .....	246
6.10. Sažetak i zaključak poglavlja .....	249

## **Poglavlje 7.0.**

<b>ANALIZA UTJECAJA KOLIČINE POPREČNE ARMATURE I MATERIJALA ZIDANOG ISPUNA.....</b>	<b>250</b>
7.1. Uvod .....	250
7.2. Pregled numeričkih modela .....	250
7.3. Rezultati numeričkih proračuna .....	251
7.3.1. Način sloma .....	251
7.3.2. Histerezne petlje i primarne krivulje .....	253
7.3.3. Nosivost u horizontalnom smjeru .....	257
7.3.4. Krutost u horizontalnom smjeru .....	257
7.3.5. Histerezna energija .....	259
7.4. Sažetak i zaključak poglavlja .....	262

## **Poglavlje 8.0.**

<b>PREGLED UTJECAJNIH FAKTORA NA ODGOVOR OKVIRA SA ISPUNOM .....</b>	<b>263</b>
8.1. Uvod .....	263
8.2. Pregled faktora utjecaja na nosivost u horizontalnom smjeru armirano-betonskih okvira, $F_H$ (kN).....	263
8.2.1. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,72$ .....	263
8.2.2. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,59$ .....	266
8.2.3. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,93$ .....	268
8.2.4. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna s drugim materijalima zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,72$ .....	269
8.3. Pregled faktora utjecaja na krutost u horizontalnom smjeru armirano-betonskih okvira, $K$ (kN/mm) .....	270
8.3.1. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,72$ .....	270
8.3.2. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,59$ .....	273
8.3.3. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,93$ .....	275
8.3.4. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna s drugim materijalima zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,72$ .....	275



8.4.	Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju u horizontalnom smjeru armirano-betonskih okvira, E (kNmm) .....	277
8.4.1.	Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,72$ .....	277
8.4.2.	Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,59$ .....	280
8.4.3.	Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,93$ .....	282
8.4.4.	Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna s drugim materijalima zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,72$ .....	283
8.5.	Sažetak i zaključak poglavlja .....	284

## **Poglavlje 9.0.**

<b>UZIMANJE U OBZIR OTVORA U ISPUNU .....</b>	<b>285</b>	
9.1.	Uvod .....	285
9.2.	Pojednostavljeni proračun okvira s punim ispunom .....	285
9.3.	Pojednostavljeni proračun okvira s otvorima u ispunu .....	286
9.3.1.	Bitni parametri .....	286
9.3.2.	Pristup putem tlačne dijagonale .....	288
9.4.	Više povezanih okvira s ispunom .....	291
9.4.1.	Pregled modela .....	291
9.4.2.	Rezultati numeričkog proračuna .....	291
9.5.	Sažetak i zaključak poglavlja .....	295

## **Poglavlje 10.0.**

<b>OSVRT, ZAKLJUČAK I PRIJEDLOZI .....</b>	<b>296</b>	
10.1.	Osvrt .....	297
10.2.	Zaključak .....	298
10.3.	Prijedlozi .....	300
10.3.1.	Prijedlog metodologije promatranja okvira s ispunom s otvorima .....	300
10.3.2.	Prijedlog konstruktivnih smjernica za izvedbu vertikalnih serklaža .....	300
10.3.3.	Prijedlozi za daljnji rad .....	302
<b>LITERATURA .....</b>	<b>303</b>	

## POPIS SLIKA

### Poglavlje 1.0.

<b>Slika 1.1.</b> Armirano-betonska okvirna konstrukcija bez i sa zidanim ispunima.....	1
<b>Slika 1.2.</b> Armirano-betonski okvir s različitim otvorima zidanog ispuna i potencijalnim opasnostima vezanih uz njih.....	3

### Poglavlje 2.0.

<b>Slika 2.1.</b> Tlocrt i presjek A-A prototipa s odabranim uzorkom.....	12
<b>Slika 2.2.</b> Izmjere i količina armature armirano-betonskih elemenata okvira uzorka na prototipu u cm .....	13
<b>Slika 2.3.</b> Izmjere i količina armature armirano-betonskih elemenata okvira uzorka na prototipu u cm .....	16
<b>Slika 2.4.</b> Izmjere i plan armature poprečnih presjeka elemenata armirano-betonskog okvira uzoraka.....	17
<b>Slika 2.5.</b> Izmjere i plan armature uzorka tip (I/1) u cm .....	19
<b>Slika 2.6.</b> Izmjere i plan armature uzorka tip (I/2) u cm .....	20
<b>Slika 2.7.</b> Izmjere i plan armature uzorka tip (I/3) u cm .....	21
<b>Slika 2.8.</b> Izmjere i plan armature uzorka tip (I/4) u cm .....	22
<b>Slika 2.9.</b> Izmjere i plan armature uzorka tip (II/1) u cm .....	24
<b>Slika 2.10.</b> Izmjere i plan armature uzorka tip (II/2) u cm .....	25
<b>Slika 2.11.</b> Izmjere i plan armature uzorka tip (II/3) u cm .....	26
<b>Slika 2.12.</b> Izmjere i plan armature uzorka tip (II/4) u cm .....	27
<b>Slika 2.13.</b> Izmjere uzorka tip (III/2) u cm .....	28
<b>Slika 2.14.</b> Izmjere i količina armature u poprečnim presjecima nadvoja i vertikalnih serklaža.....	29
<b>Slika 2.15.</b> Zidni element u izvornom obliku (gore) i prilagođen mjerilu uzorka (dolje) s izmjerama u cm.....	37
<b>Slika 2.16.</b> Izmjere i položaj mjernih uređaja na ispitnim uzorcima zidanih prizmi 1 do 3 za ispitivanje na tlak .....	38
<b>Slika 2.17.</b> Zidna prizma uslijed ispitivanja na tlaku vertikalnom smjeru (lijevo) te uzorak nakon sloma (desno).....	39
<b>Slika 2.18.</b> Osnovne izmjere i način opterećivanja uzorka za određivanje početne posmične čvrstoće.....	40
<b>Slika 2.19.</b> Određivanje početne posmične čvrstoće putem Mohr-Coulomb-ovog zakona čvrstoće .....	41
<b>Slika 2.20.</b> Pravičan (lijevo) i nepravilan slom (desno) uzorka .....	42
<b>Slika 2.21.</b> Određivanje početne posmične čvrstoće putem Mohr-Coulomb-ovog zakona čvrstoće za uzorke s u šupljine upuštenim mortom.....	43
<b>Slika 2.22.</b> Redosljed postupaka pri pripremi armirano-betonskih okvira uzoraka .....	44
<b>Slika 2.23.</b> Redosljed postupaka pri pripremi uzoraka grupe I .....	45
<b>Slika 2.24.</b> Redosljed postupaka pri pripremi uzoraka grupe II .....	46
<b>Slika 2.25.</b> Shematski prikaz postavke ispitivanja .....	47
<b>Slika 2.26.</b> Način nanošenja horizontalnog opterećenja .....	48
<b>Slika 2.27.</b> Prikaz postavke opreme na uzorak .....	49
<b>Slika 2.28.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (I/1) .....	50
<b>Slika 2.29.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (I/2) .....	51
<b>Slika 2.30.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (I/3) .....	52
<b>Slika 2.31.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (I/4) .....	53
<b>Slika 2.32.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (II/1) .....	54
<b>Slika 2.33.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (II/2) .....	55

<b>Slika 2.34.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (II/3) .....	56
<b>Slika 2.35.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (II/4) .....	57
<b>Slika 2.36.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (III/1) .....	58
<b>Slika 2.37.</b> Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (III/2) .....	59

### Poglavlje 3.0.

<b>Slika 3.1.</b> Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (I/1) i tip (I/2) .....	63
<b>Slika 3.2.</b> Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (I/1) i b) tip (I/2) .....	64
<b>Slika 3.3.</b> Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (I/3) i tip (I/4) .....	65
<b>Slika 3.4.</b> Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (I/3) i b) tip (I/4) .....	66
<b>Slika 3.5.</b> Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (II/1) i tip (II/2) .....	75
<b>Slika 3.6.</b> Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (II/1) i b) tip (II/2) .....	76
<b>Slika 3.7.</b> Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (II/3) i tip (II/4) .....	77
<b>Slika 3.8.</b> Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (II/3) i b) tip (II/4) .....	78
<b>Slika 3.9.</b> Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (III/1) i tip (III/2) .....	82
<b>Slika 3.10.</b> Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (III/1) i b) tip (III/2) .....	83
<b>Slika 3.11.</b> Fotografije uzoraka grupa I i II nakon sloma zidanog ispuna .....	86
<b>Slika 3.12.</b> Fotografije uzoraka grupe III: a) pri pripremi ispitivanja i b) nakon sloma zidanog ispuna .....	87
<b>Slika 3.13.</b> Primarne krivulje uzoraka grupe I i II .....	89
<b>Slika 3.14.</b> Krivulje opadanja horizontalne krutosti uzoraka grupe I i II .....	90
<b>Slika 3.15.</b> Pojednostavljene primarne krivulje pozitivnih ciklusa uzoraka grupe I i II .....	95
<b>Slika 3.16.</b> Pojednostavljene primarne krivulje negativnih ciklusa uzoraka grupe I i II .....	96
<b>Slika 3.17.</b> Pojednostavljene primarne krivulje pozitivnih (lijevo) i negativnih (desno) ciklusa uzoraka grupe III .....	97

### Poglavlje 4.0.

<b>Slika 4.1.</b> Nosivost uzoraka grupe I, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	114
<b>Slika 4.2.</b> Nosivost uzoraka grupe II, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	118
<b>Slika 4.3.</b> Nosivost uzoraka grupe III, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	120
<b>Slika 4.4.</b> Krutost uzoraka grupe I, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	125
<b>Slika 4.5.</b> Krutost uzoraka grupe II, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	129
<b>Slika 4.6.</b> Krutost uzoraka grupe III, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	131

<b>Slika 4.7.</b> Histerezna energija uzoraka grupe I, $E$ (kNm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	136
<b>Slika 4.8.</b> Histerezna energija uzoraka grupe II, $E$ (kNm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	140
<b>Slika 4.9.</b> Histerezna energija uzoraka grupe III, $E$ (kNm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	142
<b>Slika 4.10.</b> Nosivost uzoraka $F_H/ F_{H,REF}$ pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) za pozitivne cikluse (lijevo) i negativne (desno).....	143
<b>Slika 4.11.</b> Krutost uzoraka $K/K_{REF}$ pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) za pozitivne cikluse (lijevo) i negativne (desno).....	144
<b>Slika 4.12.</b> Krutost uzoraka $E/E_{REF}$ pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) za pozitivne cikluse (lijevo) i negativne (desno).....	145

## Poglavlje 5.0.

<b>Slika 5.1.</b> Načini modeliranja zidanog ispuna .....	148
<b>Slika 5.2.</b> Zamjenski jednoosni odnos naprezanja i deformacija (lijevo) i teorija čvrstoće pri dvoosnom stanju naprezanja (desno) modela materijala SBETA u ATENA-i 2D v4.....	148
<b>Slika 5.3.</b> Odabrana eksponencijalna funkcija širenja pukotine za model materijala SBETA u ATENA-i 2D v4... ..	149
<b>Slika 5.4.</b> Fixed crack (lijevo) i rotated crack model (desno) za model materijala SBETA u ATENA-i 2D v4 .....	149
<b>Slika 5.5.</b> Krivulja omekšavanja za model materijala SBETA u ATENA-i 2D v4.....	150
<b>Slika 5.6.</b> Ploha sloma kontakt elementa u ATENA-i 2D v4 .....	151
<b>Slika 5.7.</b> Plastično tlačno očvršćavanje ili omekšavanje u ATENA-i 2D v4.....	155
<b>Slika 5.8.</b> CCIsoTruss konačni element u ATENA-i 2D v4 .....	155
<b>Slika 5.9.</b> CCIsoGap elementi u ATENA-i 2D v4.....	156
<b>Slika 5.10.</b> CCIsoQuad elementi u ATENA-i 2D v4.....	156
<b>Slika 5.11.</b> Standardna Newton-Raphson metoda .....	157
<b>Slika 5.12.</b> Preinačena Newton-Raphson metoda.....	158
<b>Slika 5.13.</b> Arc-Length metoda.....	158
<b>Slika 5.14.</b> Pukotinsko stanje pred slom rezultata fizikalnih (lijevo) i numeričkih modela (desno): a) tip (III/1) i b) tip (III/2) .....	162
<b>Slika 5.15.</b> Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) tip (III/1) i b) tip (III/2) .....	166
<b>Slika 5.16.</b> Usporedba eksperimentalnih (lijevo) i numeričkih rezultata (desno) ispitnih uzoraka: a) Tip (I/1), b) Tip (I/2), c) Tip (I/3) i d) Tip (I/4).....	172
<b>Slika 5.17.</b> Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) Tip (I/1) i b) Tip (I/2) .....	173
<b>Slika 5.18.</b> Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) Tip (I/3) i b) Tip (I/4) .....	174
<b>Slika 5.19.</b> Usporedba eksperimentalnih (lijevo) i numeričkih rezultata (desno) ispitnih uzoraka: a) Tip (II/1), b) Tip (II/2), c) Tip (II/3) i d) Tip (II/4).....	179
<b>Slika 5.20.</b> Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) Tip (II/1) i b) Tip (II/2) .....	180
<b>Slika 5.21.</b> Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) Tip (II/3) i b) Tip (II/4) .....	181

## Poglavlje 6.0.

<b>Slika 6.1.</b> Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/1) gore i tip (IV/2) dolje .....	194
<b>Slika 6.2.</b> Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/3) gore i tip (IV/4) dolje .....	194
<b>Slika 6.3.</b> Raspodjela glavnih tl. naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/1) gore i tip (IV/2) dolje.....	195
<b>Slika 6.4.</b> Raspodjela glavnih tl.naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/3) gore i tip (IV/4) dolje.....	195
<b>Slika 6.5.</b> Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/5) gore i tip (IV/6) dolje .....	197
<b>Slika 6.6.</b> Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/7) gore i tip (IV/8) dolje .....	197
<b>Slika 6.7.</b> Raspodjela glavnih tl. naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/5) gore i tip (IV/6) dolje.....	198
<b>Slika 6.8.</b> Raspodjela glavnih tl. naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/7) gore i tip (IV/8) dolje.....	198
<b>Slika 6.9.</b> Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/9) gore i tip (IV/10) dolje .....	200
<b>Slika 6.10.</b> Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/9) gore i tip (IV/10) dolje .....	200
<b>Slika 6.11.</b> Raspodjela glavnih tlačnih naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/11) gore i tip (IV/12) dolje .....	201
<b>Slika 6.12.</b> Raspodjela glavnih tlačnih naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/11) gore i tip (IV/12) dolje .....	201
<b>Slika 6.13.</b> Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (V/1), tip (V/2) i tip (V/3) .....	202
<b>Slika 6.14.</b> Raspodjela glavnih tl. naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (V/1), tip (V/2) i tip (V/3).....	203
<b>Slika 6.15.</b> Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (VI/1), tip (VI/2) i tip (VI/3) .....	204
<b>Slika 6.16.</b> Raspodjela glavnih tl.naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (VI/1), tip (VI/2) i tip (VI/3).....	205
<b>Slika 6.17.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/1) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	206
<b>Slika 6.18.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/2) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	207
<b>Slika 6.19.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/3) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	207
<b>Slika 6.20.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/4) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	208
<b>Slika 6.21.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/5) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	208
<b>Slika 6.22.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/6) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	209
<b>Slika 6.23.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/7) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	209
<b>Slika 6.24.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/8) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	210
<b>Slika 6.25.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/9) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	210
<b>Slika 6.26.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/10) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	211
<b>Slika 6.27.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/11) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	211
<b>Slika 6.28.</b> Razine oštećenja modela tip (IV/12) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) .....	212
<b>Slika 6.29.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (IV/1) i b) tip (IV/2) .....	214
<b>Slika 6.30.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (IV/3) i b) tip (IV/4) .....	215
<b>Slika 6.31.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (IV/5) i b) tip (IV/6) .....	216
<b>Slika 6.32.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (IV/7) i b) tip (IV/8) .....	217
<b>Slika 6.33.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (IV/9) i b) tip (IV/10) .....	218
<b>Slika 6.34.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (IV/11) i b) tip (IV/12) .....	219

<b>Slika 6.35.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (V/1) i b) tip (V/2) .....	220
<b>Slika 6.36.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (V/3) i b) tip (V/4) .....	221
<b>Slika 6.37.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (VI/1) i b) tip (VI/2) .....	222
<b>Slika 6.38.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (VI/3) i b) tip (VI/4) .....	223
<b>Slika 6.39.</b> Nosivost numeričkih modela grupe IV, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	225
<b>Slika 6.40.</b> Nosivost numeričkih modela grupe IV, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	226
<b>Slika 6.41.</b> Nosivost numeričkih modela grupe IV, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	227
<b>Slika 6.42.</b> Nosivost numeričkih modela grupe V, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	229
<b>Slika 6.43.</b> Nosivost numeričkih modela grupe VI, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	230
<b>Slika 6.44.</b> Krutost numeričkih modela grupe IV, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	232
<b>Slika 6.45.</b> Krutost numeričkih modela grupe IV, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	233
<b>Slika 6.46.</b> Krutost numeričkih modela grupe IV, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	234
<b>Slika 6.47.</b> Krutost numeričkih modela grupe V, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	236
<b>Slika 6.48.</b> Krutost numeričkih modela grupe VI, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	237
<b>Slika 6.49.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe IV, $E$ (kNmm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	239
<b>Slika 6.50.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe IV, $E$ (kNmm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	240
<b>Slika 6.51.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe IV, $E$ (kNmm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	241
<b>Slika 6.51.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe V, $E$ (kNmm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	243
<b>Slika 6.52.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe VI, $E$ (kNmm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	244

## Poglavlje 7.0.

<b>Slika 7.1.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (VII/1) i b) tip (VII/2) .....	253
<b>Slika 7.2.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (VII/3) i b) tip (VII/4) .....	254



<b>Slika 7.3.</b> Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (VII/5) i b) tip (VII/6) .....	255
<b>Slika 7.4.</b> Nosivost numeričkih modela grupe VII, FH (kN) i omjer nosivosti, FH/FH,REF u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	257
<b>Slika 7.5.</b> Krutost numeričkih modela grupe VII, K (kN/mm) i omjer nosivosti, K/KREF u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) .....	259
<b>Slika 7.6.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe VII, E (kNmm) i omjer energije, E/EREF u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%).....	260

## Poglavlje 8.0.

<b>Slika 8.1.</b> Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidne ispune odnosa stranica $\alpha=H/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim u sredini raspona, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%).....	264
<b>Slika 8.2.</b> Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=H_1/5+L_o/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%) .....	264
<b>Slika 8.3.</b> Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=L_1-(H_1/5+L_o/2)$ , u odnosu na katne pomake IDR (%).....	265
<b>Slika 8.4.</b> Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,59$ u odnosu na katne pomake IDR (%) .....	266
<b>Slika 8.5.</b> Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,93$ u odnosu na katne pomake IDR (%) .....	268
<b>Slika 8.6.</b> Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidne ispune različitih materijala i odnosa stranica u odnosu na katne pomake IDR (%) .....	269
<b>Slika 8.7.</b> Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidne ispune odnosa stranica $\alpha=H/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim u sredini raspona, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%).....	271
<b>Slika 8.8.</b> Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=H_1/5+L_o/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%) .....	271
<b>Slika 8.9.</b> Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=L_1-(H_1/5+L_o/2)$ , u odnosu na katne pomake IDR (%).....	272
<b>Slika 8.8.</b> Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,59$ u odnosu na katne pomake IDR (%) .....	273
<b>Slika 8.11.</b> Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,93$ u odnosu na katne pomake IDR (%) .....	275
<b>Slika 8.12.</b> Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidne ispune različitih materijala i odnosa stranica u odnosu na katne pomake IDR (%) .....	276
<b>Slika 8.13.</b> Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidne ispune odnosa stranica $\alpha=H/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim u sredini raspona, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%).....	278
<b>Slika 8.14.</b> Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=H_1/5+L_o/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%) .....	278
<b>Slika 8.15.</b> Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=L_1-(H_1/5+L_o/2)$ , u odnosu na katne pomake IDR (%).....	279
<b>Slika 8.16.</b> Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,59$ u odnosu na katne pomake IDR (%).....	280
<b>Slika 8.17.</b> Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidne ispune odnosa stranica $H_1/L_1=0,93$ u odnosu na katne pomake IDR (%).....	282

**Slika 8.18.** Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidne ispune različitih materijala i odnosa stranica u odnosu na katne pomake **IDR (%)** .....283

## **Poglavlje 9.0.**

**Slika 9.1.** Model s punim ispunom (lijevo) i sa zamjenskim tlačnim dijagonalama prema (6) (desno) .....284

**Slika 9.2.** Otklonjeni otvor za prozor u ispunu okvira s pripadnim oznakama.....286

**Slika 9.3.** Odnos omjera krutosti okvira s punim ispunom spram praznog okvira za  $IDR=0,10\%$  .....288

**Slika 9.4.** Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (VIII/1) i tip (VIII/2).....291

**Slika 9.5.** Primarne krivulje modela jednog okvira, sa i bez ispuna, u usporedbi s modelom s dva okvira, sa i bez ispuna .....292

**Slika 9.6.** Oštećenost i pripadna glavna tlačna naprezanja modela tip (VIII/2) za  $IDR=1,0\%$  .....293

## **Poglavlje 10.0.**

**Slika 10.1.** Postavljanje mjernih uređaja tijekom pripreme ispitivanja .....296

**Slika 10.2.** Otvor u ispunu s osnovnim izmjerama .....298



## POPIS TABLICA

### Poglavlje 1.0.

Nema tablica.

### Poglavlje 2.0.

<b>Tablica 2.1.</b> Pregled uzoraka koji pripadaju grupi I .....	9
<b>Tablica 2.2.</b> Pregled uzoraka koji pripadaju grupi II .....	10
<b>Tablica 2.3.</b> Pregled uzoraka koji pripadaju grupi III .....	10
<b>Tablica 2.4.</b> Djelovanja na prototipu.....	11
<b>Tablica 2.5.</b> Pregled veličina i smještaja otvora uzoraka grupe I .....	14
<b>Tablica 2.6.</b> Pregled veličina i smještaja otvora uzoraka grupe II .....	14
<b>Tablica 2.7.</b> Količina armature u poprečnim presjecima armirano-betonskog okvira uzoraka .....	15
<b>Tablica 2.8.</b> Količina armature u pop. presjecima armirano-betonskih vertikalnih serklaža i nadvoja uzoraka .....	29
<b>Tablica 2.9.</b> Karakteristična tlačna čvrstoća kocki betona nakon 28 i 365 dana .....	30
<b>Tablica 2.10.</b> Tlačna čvrstoća betona uzorka tip (III/1) u vrijeme ispitivanja .....	31
<b>Tablica 2.11.</b> Tlačna čvrstoća betona vertikalnih serklaža i nadvoja.....	31
<b>Tablica 2.12.</b> Mehanička svojstva uzdužne i poprečne armature uzoraka.....	32
<b>Tablica 2.13.</b> Izmjere uzoraka zidanih elemenata, gdje je $l_u$ duljina, $w_u$ širina i $h_u$ visina .....	33
<b>Tablica 2.14.</b> Rezultati ispitivanja neto obujma i postotnog udjela šupljina zidanih elemenata .....	34
<b>Tablica 2.15.</b> Rezultati ispitivanja neto i bruto obujamske mase zidanih elemenata .....	34
<b>Tablica 2.16.</b> Rezultati eksperimentalnog ispitivanja tlačne čvrstoće zidanih elemenata.....	35
<b>Tablica 2.17.</b> Maseni udjeli pijeska, mp, građevnog vapna, mgv i cementa, mc u odnosu na ukupnu masu veziva na uzorkovanih pri pripremi uzoraka morta (probna mješavina).....	35
<b>Tablica 2.18.</b> Rezultati određivanja konzistencije svježeg morta potresanjem .....	36
<b>Tablica 2.19.</b> Rezultati određivanja gustoće svježeg morta .....	36
<b>Tablica 2.20.</b> Rezultati određivanja udjela pora u svježem mortu .....	36
<b>Tablica 2.21.</b> Rezultati određivanja gustoće suhog očvrslog morta .....	36
<b>Tablica 2.22.</b> Rezultati određivanja čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće suhog očvrslog morta .....	37
<b>Tablica 2.23.</b> Izmjere uzoraka zidanih prizmi, $l_s$ duljina, $t_s$ debljina i $h_s$ visina za ispitivanje na tlak .....	38
<b>Tablica 2.24.</b> Tlačna čvrstoća uzoraka zidanih prizmi utvrđena.....	39
<b>Tablica 2.25.</b> Vrijednosti deformacija pri slomu $\epsilon_u$ i modula elastičnosti E uzoraka zidanih prizmi opterećenih na tlak.....	39
<b>Tablica 2.26.</b> Izmjere uzoraka pripremljenih za ispitivanje početne posmične čvrstoće.....	40
<b>Tablica 2.27.</b> Rezultati ispitivanja početne posmične čvrstoće .....	41
<b>Tablica 2.28.</b> Rezultati ispitivanja početne posmične čvrstoće uzoraka s u šupljine upuštenim mortom .....	42
<b>Tablica 2.29.</b> Sažeti prikaz osnovnih mehaničkih svojstava gradiva dobivenih ispitivanjima .....	43

### Poglavlje 3.0.

<b>Tablica 3.1.</b> Cjelokupni prikaz razina oštećenosti i načina sloma uzoraka.....	85
<b>Tablica 3.2.</b> Ukupna histerezna energija E (kNmm) uzoraka.....	93

<b>Tablica 3.3.</b> Početna krutost $k_{el}$ (kN/mm), sila pri prvoj pukotini $F_{H,CR}$ (kN), granica tečenja $F_{H,Y}$ (kN) i granica loma $F_{H,U}$ (kN) te pripadni katni pomaci .....	94
--	----

## Poglavlje 4.0.

<b>Tablica 4.1.</b> Prikaz katnog pomaka IDR (%) pri razinama oštećenosti zidanih ispuna uzoraka .....	99
<b>Tablica 4.2.</b> Razine i vrsta oštećenosti uzoraka grupe I s pripadnim katnim pomacima .....	101
<b>Tablica 4.3.</b> Razine i vrsta oštećenosti uzoraka grupe II s pripadnim katnim pomacima .....	103
<b>Tablica 4.4.</b> Razvrstavanje načina oštećenja zidanog ispuna uzorka tip (III/2), grupe II pri određenim razinama oštećenja i pripadna oštećenja na ispitnom uzorku tip (III/1) .....	104
<b>Tablica 4.5.</b> Prikaz i usporedba izmjera dijelova na koje se zidni ispun uzoraka Grupe I razložio i načina njihova sloma .....	105
<b>Tablica 4.6.</b> Prikaz i usporedba izmjera dijelova na koje se zidni ispun uzoraka grupe II razložio i načina njihova sloma .....	108
<b>Tablica 4.7.</b> Prikaz i usporedba izmjera dijelova na koje se zidni ispun uzoraka razložio i načina sloma .....	109
<b>Tablica 4.8.</b> Nosivost uzoraka, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	110
<b>Tablica 4.9.</b> Nosivost uzoraka, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	110
<b>Tablica 4.10.</b> Krutost uzoraka, $K$ (kN/mm) i omjer krutosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na krutost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	121
<b>Tablica 4.11.</b> Krutost uzoraka, $K$ (kN/mm) i omjer krutosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na krutost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	121
<b>Tablica 4.12.</b> Histerezna energija uzoraka, $E$ (kNm) i omjer energija, $E/E_{REF}$ u odnosu na histereznu energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	132
<b>Tablica 4.13.</b> Histerezna energija uzoraka, $E$ (kNm) i omjer energija, $E/E_{REF}$ u odnosu na histereznu energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	132

## Poglavlje 5.0.

<b>Tablica 5.1.</b> Bitna i primijenjena svojstva zidnog elementa za model materijala SBETA u ATENA-i 2D v4 .....	150
<b>Tablica 5.2.</b> Bitna i primijenjena svojstva reške morta tj. kontakt elementa u ATENA-i 2D v4 .....	151
<b>Tablica 5.3.</b> Bitna i primijenjena svojstva betona okvira u ATENA-i 2D v4 .....	152
<b>Tablica 5.4.</b> Bitna i primijenjena svojstva betona nadvoja i vertikalnih serklaža u ATENA-i 2D v4 .....	153
<b>Tablica 5.5.</b> Bitna i primijenjena svojstva armature okvira, nadvoja i vertikalnih serklaža u ATENA-i 2D v4 .....	153
<b>Tablica 5.7.</b> Bitna i primijenjena početna svojstva materijala za model u ATENA-i 2D v4 .....	154
<b>Tablica 5.8.</b> Rubni uvjeti za pomake i sile u ATENA-i 2D v4 .....	159
<b>Tablica 5.9.</b> Nosivost $F_H$ (kN) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima tip (III/1) i tip (III/2) .....	163
<b>Tablica 5.10.</b> Krutost $K$ (kN/mm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima tip (III/1) i tip (III/2) .....	164
<b>Tablica 5.11.</b> Ukupna histerezna energija $E$ (kNm), pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima tip (III/1) i tip (III/2) .....	164
<b>Tablica 5.12.</b> Odabrana bitna svojstva modela materijala zidnog elementa .....	165

<b>Tablica 5.13.</b> Prednosti i nedostaci odabira tlačne čvrstoće zidnog elementa kao reprezentativne vrijednosti za čitav element .....	169
<b>Tablica 5.14.</b> Nosivost $F_H$ (kN) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe I.....	175
<b>Tablica 5.15.</b> Krutost $K$ (kN/mm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe I.....	176
<b>Tablica 5.16.</b> Histerezna energija $E$ (kNm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe I.....	177
<b>Tablica 5.17.</b> Nosivost $F_H$ (kN) pri odabranim katnim pomacima IDR (%), dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe II.....	182
<b>Tablica 5.18.</b> Krutost $K$ (kN/mm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe II.....	183
<b>Tablica 5.19.</b> Histerezna energija $E$ (kNm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe II.....	184

## Poglavlje 6.0.

<b>Tablica 6.1.</b> Pregled numeričkih modela grupe IV s ploštinom otvora $A_O < 1,5 \text{ m}^2$ .....	188
<b>Tablica 6.2.</b> Pregled numeričkih modela grupe IV s ploštinom otvora $A_O > 1,5 \text{ m}^2$ .....	189
<b>Tablica 6.3.</b> Pregled numeričkih modela grupe V s pripadnim izmjerama .....	190
<b>Tablica 6.4.</b> Pregled matematičkih modela grupe VI s pripadnim izmjerama.....	191
<b>Tablica 6.5.</b> Bitna i primijenjena početna svojstva materijala za model u ATENA-i 2D v4 .....	192
<b>Tablica 6.6.</b> Nosivost numeričkih modela grupe IV, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	224
<b>Tablica 6.7.</b> Nosivost numeričkih modela grupe IV, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	224
<b>Tablica 6.8.</b> Nosivost matematičkih modela grupe V, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	228
<b>Tablica 6.9.</b> Nosivost matematičkih modela grupe V, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	228
<b>Tablica 6.10.</b> Nosivost matematičkih modela grupe VI, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	228
<b>Tablica 6.11.</b> Nosivost matematičkih modela grupe VI, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	228
<b>Tablica 6.12.</b> Krutost numeričkih modela grupe IV, $K$ (kN/mm) i omjer krutosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na krutost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	231
<b>Tablica 6.13.</b> Krutost numeričkih modela grupe IV, $K$ (kN/mm) i omjer krutosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na krutost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	231
<b>Tablica 6.14.</b> Krutost matematičkih modela grupe V, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	235
<b>Tablica 6.15.</b> Krutost matematičkih modela grupe V, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	235
<b>Tablica 6.16.</b> Krutost matematičkih modela grupe VI, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	235

<b>Tablica 6.17.</b> Krutost matematičkih modela grupe VI, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	235
<b>Tablica 6.18.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe IV, $E$ (kNmm) i omjer energija, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	238
<b>Tablica 6.19.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe IV, $E$ (kNmm) i omjer energija, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani.....	238
<b>Tablica 6.20.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe V, $E$ (kNmm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	242
<b>Tablica 6.21.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe V, $E$ (kNmm) i omjer energija, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani.....	242
<b>Tablica 6.22.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe VI, $E$ (kNmm) i omjer energije, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	242
<b>Tablica 6.23.</b> Histerezna energija numeričkih modela grupe VI, $E$ (kNmm) i omjer energija, $E/E_{REF}$ u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani.....	242

## Poglavlje 7.0.

<b>Tablica 7.1.</b> Pregled numeričkih modela grupe VII s pripadnim svojstvima zidnih elemenata i morta te količine poprečne armature .....	249
<b>Tablica 7.2.</b> Raspucalo stanje pred slom i opis načina sloma matematičkih modela u ATENA-i 2D v4.....	250
<b>Tablica 7.3.</b> Glavna tlačna naprezanja pred slom matematičkih modela u ATENA-i 2D v4 .....	251
<b>Tablica 7.4.</b> Nosivost matematičkih modela grupe VII, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	256
<b>Tablica 7.5.</b> Nosivost matematičkih modela grupe VII, $F_H$ (kN) i omjer nosivosti, $F_H/F_{H,REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	256
<b>Tablica 7.6.</b> Krutost numeričkih modela grupe VII, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani (otvor).....	256
<b>Tablica 7.7.</b> Krutost matematičkih modela grupe VII, $K$ (kN/mm) i omjer nosivosti, $K/K_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	258
<b>Tablica 7.8.</b> Histerezna energija matematičkih modela grupe VII, $E$ (kNmm) i omjer nosivosti, $E/E_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani .....	258
<b>Tablica 7.9.</b> Histerezna energija matematičkih modela grupe VII, $E$ (kNmm) i omjer nosivosti, $E/E_{REF}$ u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani .....	258

## Poglavlje 8.0.

<b>Tablica 8.1.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_I=0,72$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_I/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	262
<b>Tablica 8.2.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_I=0,72$ s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=H_I/5+L_o/2$ , unutar zidnog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) (na strani otvora) .....	263
<b>Tablica 8.3.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_I=0,72$ s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=L_I-(H_I/5+L_o/2)$ , unutar zidnog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) (strana suprotno od otvora) .....	263

<b>Tablica 8.4.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,59$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	265
<b>Tablica 8.5.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,59$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=H/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	265
<b>Tablica 8.6.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,59$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1-(H/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	266
<b>Tablica 8.7.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,93$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	267
<b>Tablica 8.8.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,93$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=H/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	267
<b>Tablica 8.9.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,93$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1-(H/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	267
<b>Tablica 8.10.</b> Pregled faktora utjecaja na nosivost $F_H$ (kN) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,72$ s različitim materijalom zidnog ispuna, u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	268
<b>Tablica 8.11.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost $K$ (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,72$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	269
<b>Tablica 8.12.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost $K$ (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,72$ s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=H/5+L_o/2$ , unutar zidnog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) (na strani otvora) .....	270
<b>Tablica 8.13.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost $K$ (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,72$ s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=L_1-(H/5+L_o/2)$ , unutar zidnog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) (strana suprotno od otvora) .....	270
<b>Tablica 8.14.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost $K$ (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,59$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	272
<b>Tablica 8.15.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost $K$ (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,59$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=H/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	272
<b>Tablica 8.16.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost $K$ (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,59$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1-(H/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	273
<b>Tablica 8.17.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost $K$ (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H/L_1=0,93$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) .....	274

<b>Tablica 8.18.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost <b>K (kN/mm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,93$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=H_1/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	274
<b>Tablica 8.19.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost <b>K (kN/mm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,93$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1-(H_1/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	274
<b>Tablica 8.20.</b> Pregled faktora utjecaja na krutost <b>K (kN/mm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,72$ s različitim materijalom zidnog ispuna, u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	275
<b>Tablica 8.21.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,72$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	276
<b>Tablica 8.22.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,72$ s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=H_1/5+L_o/2$ , unutar zidnog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> (na strani otvora).....	277
<b>Tablica 8.23.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,72$ s otvorom smještenim s otklonom, $O_o=L_1-(H_1/5+L_o/2)$ , unutar zidnog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> (strana suprotno od otvora).....	277
<b>Tablica 8.24.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,59$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	279
<b>Tablica 8.25.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,59$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=H_1/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	279
<b>Tablica 8.26.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,59$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1-(H_1/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	280
<b>Tablica 8.27.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,93$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	281
<b>Tablica 8.28.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,93$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=H_1/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	281
<b>Tablica 8.29.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,93$ s otvorom smještenim u sredini zidnog ispuna, $O_o=L_1-(H_1/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	281
<b>Tablica 8.30.</b> Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju <b>E (kNmm)</b> za odnos izmjera „punog“ zidnog ispuna armirano-betonskog okvira $\alpha=H_1/L_1=0,72$ s različitim materijalom zidnog ispuna, u odnosu na odabrane katne pomake <b>IDR (%)</b> .....	282

## Poglavlje 9.0.

<b>Tablica 9.1.</b> Kategorizacija otvora.....	286
<b>Tablica 9.2.</b> Prikaz faktora otklona otvora, x, kojim se umanjuju nosivost i krutost okvira s punim ispunom .....	288
<b>Tablica 9.3.</b> Prikaz faktora vrste otvora, y, kojim se umanjuju nosivost i krutost okvira s punim ispunom .....	288



<b>Tablica 9.4.</b> Numerički modeli međusobno povezanih okvira .....	290
<b>Tablica 9.5.</b> Nosivost i krutost dvaju okvira u usporedbi s istima jednog okvira na pozitivnoj strani .....	290
<b>Tablica 9.6.</b> Nosivost i krutost dvaju okvira u usporedbi s istima jednog okvira na negativnoj strani .....	290

## **Poglavlje 10.0.**

Nema tablica.

## POPIS SIMBOLA

### VELIKA LATINIČNA SLOVA

$A_D$	ploština tlačne dijagonale
$A_I$	ploština zidanog ispuna
$A_O$	ploština otvora
$A_D$	ploština dijagonale
$D_H$	horizontalni pomak
$D_V$	vertikalni pomak
$D_D$	dijagonalni pomak
$E$	histerezna energija ili razina otpuštene energije
$E_D$	modul elastičnosti tlačne dijagonale
$F_H$	horizontalna sila, nosivost
$F_V$	vertikalna sila
$F_D$	dijagonalna sila, nosivost
$H_D$	širina tlačne dijagonale
$H_I$	visina zidanog ispuna
$H_L$	visina nadvoja
$H_N$	visina parapeta
$H_O$	visina otvora
$H_P$	visina zidnog stupa
$H_S$	visina zidne grede
$K$	Krutost ili sekantni modul elastičnosti
$K_D$	Krutost tlačne dijagonale
$L_D$	duljina tlačne dijagonale
$L_I$	duljina zidanog ispuna
$L_L$	duljina nadvoja
$L_N$	duljina parapeta
$L_O$	duljina zidnog stupa
$L_P$	duljina zidnog stupa
$L_S$	duljina zidne grede
$L_V$	duljina vertikalnog serklaža
$O_O$	otklon otvora
$T_D$	debljina tlačne dijagonale
$T_I$	debljina ispuna



## MALA LATINIČNA SLOVA

- b<sub>g</sub>**    širina poprečnog presjeka armirano-betonske grede  
**b<sub>s</sub>**    širina poprečnog presjeka armirano-betonskog stupa  
**b<sub>t</sub>**    širina poprečnog presjeka armirano-betonske temeljne grede  
**b<sub>v</sub>**    širina poprečnog presjeka armirano-betonskog vertikalnog serklaža  
**d<sub>g</sub>**    visina poprečnog presjeka armirano-betonske grede  
**d<sub>s</sub>**    visina poprečnog presjeka armirano-betonskog stupa  
**d<sub>t</sub>**    visina poprečnog presjeka armirano-betonske temeljne grede  
**d<sub>v</sub>**    visina poprečnog presjeka armirano-betonskog vertikalnog serklaža  
**f<sub>H</sub>**    = $F_H/F_{H,REF}$ , faktor utjecaja za nosivost  
**k<sub>H</sub>**    = $K/K_{REF}$ , faktor utjecaja za krutost  
**e<sub>H</sub>**    = $E/E_{REF}$ , faktor utjecaja za histereznu energiju

## MALA GRČKA SLOVA

- α**    = $H_i/L_i$ , odnos izmjera ispuna  
**β**    = $H_o/L_o$ , odnos izmjera otvora  
**γ**    = $A_o/A_i$ , odnos ploština otvora i ispuna  
**κ**    faktor redukcije krutosti okvira s punim ispunom  
**v**    faktor redukcije krutosti praznoga okvira

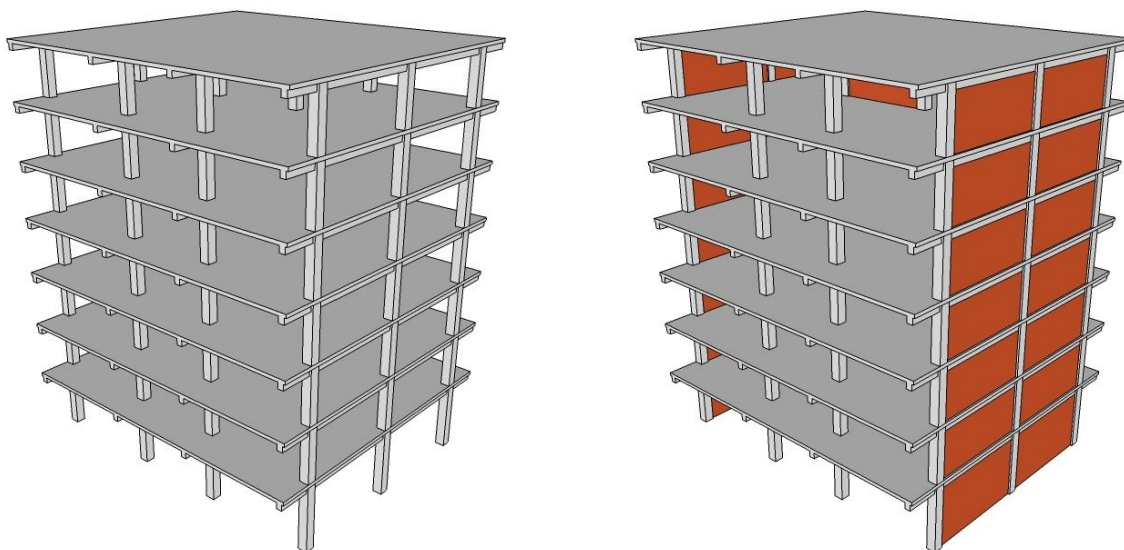
## Poglavlje 1.0.

# UVOD

### 1.1. Obrazloženje motiva

Primjena armirano-betonskih okvira sa nearmiranim zidanim ispunom, s otvorima ili bez njih, izvedenim nakon očvršćivanja armirano-betonskog okvira, tradicionalna je pri izvedbi niskih i srednje visokih objekata i čini većinu građevina u Republici Hrvatskoj. Zidanim ispunom s otvorom ili bez, ostvaruje se arhitektonska namjena objekta te su otvori za prozore i vrata u njemu više pravilo nego iznimka. Zidani ispun, s otvorima ili bez njih, stoga ima ulogu vanjskog ili unutarnjeg pregradnog elementa, i smatran je nenosivim elementom, osim što nosi vlastitu težinu. Izvješća s potresom pogođenih područja (1,2) i mnogo ranije (3,4), potvrdila su znatne razlike u načinu sloma praznih armirano-betonskih okvira te onih sa zidanim ispunom, s tim također postoji međudjelovanje okvira i ispuna te da se doprinos ispuna ne smije zanemariti. Danas je svijest o tome uvelike prisutna, što je vidljivo kroz postojeće normative za projektiranje građevina, ali još uvijek ne postoji dovoljno istraživačkog iskustva.

Utjecaj ispuna na odgovor konstrukcije, s otvorima ili bez, pri djelovanju potresa, najčešće se ne uzima u obzir pri proračunu, što podrazumijeva da bi se ispun trebao odvojiti od okvira. Takva izvedba je rijetka i najčešće se ispun izvodi tik uz okvir ili se čak koristi kao oplata okvira.



**Slika 1.1.** Armirano-betonska okvirna konstrukcija bez i sa zidanim ispunima

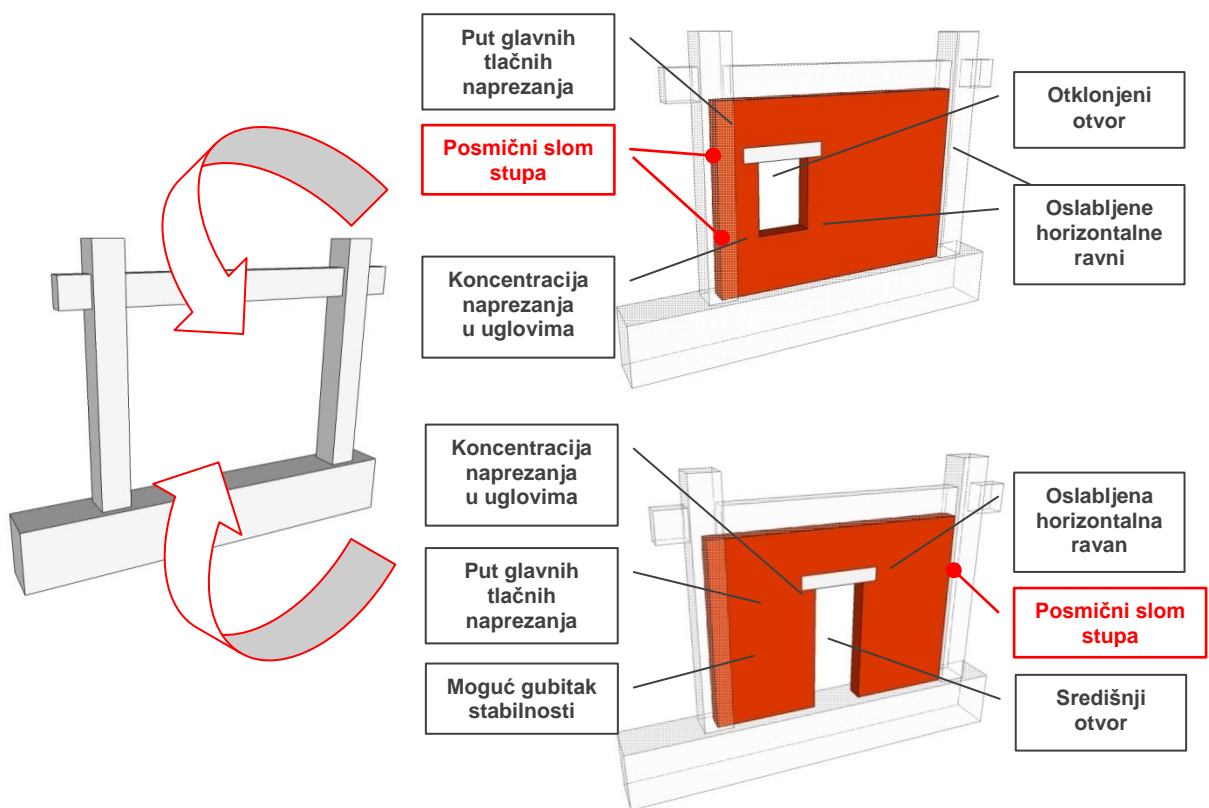
Zbog složenog ponašanja samog ziđa, ostaje još uvelike nepoznato, na koji točno način zidani ispun s otvorima utječe na ponašanje armirano-betonskih okvira. Prikaz armirano-betonske okvirne konstrukcije sa i bez zidanog ispuna prikazan je na slici 1.1.

## 1.2. Opis problema

Dosadašnje spoznaje o utjecaju ispuna su oprečne, stoga smjernice za projektiranje pretežno uzimaju u obzir negativni utjecaj, dok se pozitivni doprinos zanemaruje, kao u (25). Nepovoljni utjecaj ispuna posljedica je nejednolike raspodjele u tlocrtu ili po visini na razini cijelog objekta, dok se na razini okvira očituje u stvaranju koncentriranih sila na okvir i nastanku nepovoljnih i/ili nepredviđenih konstruktivnih sustava. Zanemarivanjem ispuna konstrukcija ima drukčiji odgovor od očekivanog te objekt može doći u neželjeno stanje. Uzimanjem u obzir ispuna realnije se predstavlja stvarno ponašanje građevine, a moguće su i racionalizacije u dimenzioniranju.

Posebni problem predstavljaju otvori u zidanom ispunu, jer u odnosu na puni ispun, daju drukčiji način sloma, obično više načina sloma za jedan ispun. Postojanje otvora oslabljuje horizontalnu ravan morta što zidani ispun čini podložnijim slomu klizanjem po reški morta, nakon čega se ispun razlaže na dijelove. Naime smještaj i izmjere otvora mogu utjecati na poremećaj toka tlačne dijagonale. Smjernice (24, 25) upućuju na izvedbu vertikalnih serklaža oko otvora za omeđeno ziđe, dok za zidani ispun ne, premda je dokazano da je ispun nosivi element. Smjernice (19,20,21,22) naglašavaju problem otvora u zidnom ispunu te preporučuju promatranje zidanog ispuna kao skup pod-dijelova koji se razmatraju zasebno, što ne odgovara stvarnom stanju u potpunosti, jer slom često nije jednoznačan. Svakako je projektantima najjednostavniji pristup uzimanja zidanog ispuna u obzir, putem zamjenske tlačne dijagonale (od ugla do ugla ispuna) te je ovaj pristup potrebno poboljšati. Europske norme (23,24,25) daju preporuke za uzimanje zidanog ispuna s otvorom u obzir putem zamjenske tlačne dijagonale, ali uz nedovoljno objašnjenja.

Za izvedbu vertikalnih serklaža oko otvora dane su isključivo konstruktivne smjernice za omeđeno ziđe, u (25), o tome pri kojoj ploštini otvora ih je potrebno izvesti, no međutim nigdje se ne navodi njihov stvarni utjecaj na ponašanje armirano-betonskog okvira sa zidanim ispunom. Ukoliko se vertikalni serklaž izvede čitavom visinom ispuna, nearmirani zidni ispun, postaje omeđeni zidni ispun. Povijest istraživanja armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom i otvorima vrlo je kratka te ne postoji puno eksperimentalnih podataka, što predstavlja problem, obzirom da su za svako područje također svojstveni određeni građevni materijali.



**Slika 1.2.** Armirano-betonski okvir s različitim otvorima zidanog ispuna i potencijalnim opasnostima vezanih uz njih

### 1.2.1. Pregled dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja

Usporedbu ponašanja okvira s punim ispunom te ispunom s otvorima među prvima su objavili (8), eksperimentima na čeličnim okvirima sa zidanim ispunom od opeke sa i bez otvora, pokazali su da se utjecaj otvora u sredini raspona očituje u naglom padu krutosti nakon postizanja polovine najvećeg opterećenja onog od okvira s punim ispunom, uz neznčajnu razliku u krutosti do te razine opterećenja. U (9), dan je prikaz utjecaja smještaja otvora na horizontalnu krutost u ravni opterećenih čeličnih okvira s homogenim kvadratnim ispunom. Zamijećeno je da otvori smješteni u blizini tlačno opterećenih uglova značajnije utječu na smanjenje krutosti, nego li otvori smješteni u sredini raspona. Prema (10), pri eksperimentima, nije opažena značajna razlika u krutosti okvira s ispunom s otvorima i bez njih. Rezultati istraživanja (11), ukazuju da je negativan utjecaj otvora za vrata izraženiji ukoliko se nalaze bliže sredini raspona. Ipak, u slučaju cikličkog horizontalnog opterećenja, gdje je ekscentrično smješten otvor prihvatljiviji za jedan smjer opterećenja, a neprihvatljivije za drugi, proizlazi da je otvor smješten u sredini ispuna povoljniji. Zamijećena je također promjena u načinu sloma

ispuna kada je prisutan otvor. U slučaju punog ispuna slom se dogodio drobljenjem uglova ili posmičnim slomom, dok se u slučaju ispuna s otvorima prvo dogodilo razdvajanje ispuna na segmente oko i iznad otvora, a zatim njihov posmični slom ili drobljenje uglova.

Posljednja dostupna istraživanja okvira s ispunom s otvorima dana su u (16,17,18). Počevši s cikličkim eksperimentalnim istraživanjem na modelima u mjerilu M 1:3, mijenjanjem smještaja, vrste i veličine otvora te vrste ispune, predložili su numerički model, kojim su obuhvatili više mogućih načina sloma, s pretpostavkom pojave tlačne dijagonale unutar dijelova zidanog ispuna koji omeđuju otvore, ali metoda ovisi od slučaja do slučaja. Veličina i oblik otvora ne utječu znatno na nosivost i krutost armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom prema (16,17,18). Otklon otvora utječe na poboljšanje ponašanja, dok središnji koji se nalazi na putu glavnih tlačnih naprezanja potiče bržu degradaciju materijala ispuna putem ranijeg vlačnog sloma (18). Ovaj zaključak je uvjetovan, jer ovisi o osnovnim izmjerama ispuna. Svrha eksperimentalnih istraživanja pronaći je prikladan i pouzdan numerički model, jednostavan za inženjersku primjenu. Na slici 1.2. prikazan je armirano-betonski okvir s različitim otvorima zidanog ispuna i potencijalnim opasnostima vezanih uz njih.

### **1.2.2. Dostupni numerički modeli**

Danas dostupni numerički modeli, kojima se doprinos zidanog ispuna uzima u obzir, dijele se na jednostavne inženjerske makro modele i složene mikro modele, uz primjenu metode konačnih elemenata. Makro model je tlačni dijagonalni štap kojim se zamjenjuje ispun, i predstavlja intuitivno rješenje koje se zasniva na prisutnosti glavnih tlačnih naprezanja u dijagonalnom pojasu ispuna, dok je preostali dio ispuna gotovo neopterećen, prema istraživanjima (5) i (6,7). Ovi modeli podliježu velikoj nesigurnosti pri procjeni ponašanja, jer nisu u mogućnosti ispravno predstaviti način sloma zidanog ispuna (drobljenje uglova, klizanje po reškama morta), što je vrlo bitno ukoliko postoje otvori u zidanom ispunu, koje karakteriziraju višestruki načini sloma. Također, izrazi pomoću kojih se proračunava širina zamjenske dijagonale često su empirijski i nisu opći, jer su dobiveni putem ograničenih eksperimentalnih studija (vrijede od slučaja do slučaja). Realističniji opis ponašanja okvira s ispunom u osnovi počinje s razvojem mikro modela odnosno metode konačnih elemenata. Razvojem kontaktnih elemenata prema (12), kojima je moguće modelirati odnos zidnih elemenata i morta, i modela ponašanja materijala, omogućen je vjeran opis međuodnosa okvira i ispuna. Nedostatak je u zahtjevu za poznavanjem velikog broja parametara te je stoga ovaj pristup prikladniji za znanstvenike, nego inženjere u praksi. Ovi parametri trebaju biti dobiveni eksperimentalno koje često nije lako provesti, ili putem preporučenih izraza, što opet podliježe nesigurnosti. Dodatni

problem kod nas je i to što su dostupna eksperimentalna istraživanja rezultat građevinske prakse pojedine zemlje ili regije te time i uobičajenim gradivima što otežava njihovu direktnu primjenu u Republici Hrvatskoj. Zbog svoje učinkovitosti i jednostavnosti makro modeli su stoga ipak prikladniji i privlačniji za primjenu u praksi, jer je promatranjem načina sloma ispuna utvrđeno je kako tlačna dijagonala uz primjenu prikladnih mehaničkih svojstava može biti realističan opis problema. Ipak je utvrđeno da prvi takvi modeli ne mogu jasno predstaviti opadanje nosivosti i krutosti pri horizontalnom cikličkom opterećenju te horizontalno klizanje po reškama morta te su stoga predlagani novi modeli, obično na osnovi više tlačnih dijagonala, kao u (13,14).

Do danas, iako je postignut velik napredak u istraživanju okvira s punim ispunom, zbog svoje složenosti, okviri s otvorima u zidanom ispunu predstavljaju problem razvoju pojednostavljenih modela, zbog složenih (višestrukih) načina sloma koji su ovisni o vrsti i smještaju otvora. Također, i za zidane ispune s otvorima, istraživanja su se tijekom vremena usmjeravana na povećanje realističnosti pristupa primjenom zamjenske tlačne dijagonale. Za okvire s ispunom s otvorima prvi nelinearni model za proračun, prikazan u (10), izveden je na osnovi monotonog rastućeg statičkog horizontalnog opterećenja. U (15), prikazan je model kojim se utjecaj otvora uzima kroz smanjenje krutosti tlačne dijagonale s faktorom koji ovisi o postotku ploštine otvora u odnosu na ispun na temelju linearno-elastične analize.

Niti normativi i smjernice niti dosadašnji istraživački radovi, nisu u dovoljnoj mjeri objasnili ponašanje armirano-betonskih okvira s otvorima u zidanom ispunu, kako bi se sa sigurnošću mogao procijeniti odgovor konstrukcije, niti su u dovoljnoj mjeri razvijeni prikladni numerički modeli za inženjersku uporabu niti dane konstruktivne smjernice s posljedicama njihove primjene. To se osobito odnosi na utjecaj vertikalnog serklaža oko otvora, bilo prozora ili vrata, u zidanom ispunu, također i jer se mjerilo u (24) odnosi na otvore određene ploštine, ali se pri tome ne razmatra odnos iste prema ploštini ispuna. Kako zidani ispun nije smatran nosivim elementom, u novom svjetlu, on treba biti smatran nosivim, zajedno sa pratećim pravilima o izvedbi koje nalažu normativi (24,25). Suvremenim projektiranjem seizmički otpornih građevina nastoji se s određenom pouzdanošću procijeniti stupanj oštećenja objekta pri djelovanju potresa, uz uvjete ograničenog oštećenja pri slabim i srednje jakim, te sprječavanje rušenja pri jakim potresima. Težnja je, da se s obzirom na zahtjeve korisnika, objekt izvede i projektira racionalno i ekonomično s mjerljivom pouzdanošću, zbog čega bi ova istraživanja trebala doprinijeti boljem razumijevanju međudjelovanja armirano-betonskih okvira sa zidom s otvorima uz uzimanje u obzir utjecaja otvora u ispunu.



### 1.3. Pregled istraživanja

U okviru disertacije istražiti će se utjecaj različitih izmjera, vrsta i smještaja otvora u zidanom ispunu te doprinos vertikalnih serklaža oko otvora. Istraživati će se ponašanje zidanog ispuna izvedenog blok opekam i mortom, bez i sa armirano-betonskim vertikalnim serklažima. Uslijed stalnog vertikalnog i cikličkog horizontalnog opterećenja, pratiti će se način sloma, raspucavanje, nosivost i katni pomak do sloma zidanog ispuna. Istraživanje će se sastojati iz eksperimentalnog i numeričkog dijela s ciljem pojašnjenja ponašanja i iznalaženja prikladnih metoda proračuna okvira s ispunom. Obzirom da su dostupna eksperimentalna istraživanja armirano-betonskih okvira s ispunom s otvorima vrlo oskudna, u okviru ovog rada na osnovu provedenih eksperimentalnih ispitivanja, baza podataka proširiti će se numeričkim studijama na druge izmjere i smještaje otvora te druge izmjere i vrste materijala zidanog ispuna, kako bi se mogli iznaći parametri mjerodavni za projektiranje. Studija će se također proširiti na složene sustave od dva i tri armirano-betonska okvira sa zidanim ispunom u nizu.

Problemi proizlaze iz razmatranja kompozitnog sustava okvira sa zidom, sa i bez otvora, koje je zbog složenosti međudjelovanja s okvirom te anizotropije gradiva nedovoljno istraženo. Naročito se to odnosi na ispun s otvorima, jer dodatne nepoznanice čine odnos duljina stranica otvora te odnos izmjera otvora u odnosu na izmjere ispuna i omeđenost otvora vertikalnim serklažima.

### 1.4. Ciljevi istraživanja

Cilj istraživanja je definirati utjecaj izmjera, vrste i smještaja otvora na seizmički odgovor armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom, sa ili bez vertikalnih serklaža oko otvora. Istražiti će se, na osnovu eksperimentalnih i numeričkih studija, način sloma te oštećenja zidanog ispuna pri odabranim katnim pomacima. Također, pri odabranim katnim pomacima, utvrditi će se omjer nosivosti, krutosti i histerezne energije armirano-betonskog okvira sa zidanim ispunom s otvorima, u odnosu na iste armirano-betonskog okvira. Ovo je u svrhu pomoći kasnijoj prilagodbi i/ili poboljšanju postojećih modela, koji će omogućiti praktično uzimanje u obzir utjecaja zidanog ispuna. To će omogućiti projektiranje uz uzimanje u obzir okvira sa zidom, s otvorima i veću pouzdanost u procjeni nosivosti postojećih građevina.

Istraživanjem će se omogućiti stvarni uvid u ponašanje konstrukcije armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom uzimajući u obzir otvore u ispunu s ciljem ograničenja oštećenja i sprječavanja gubitka nosivosti.

## 1.5. Znanstvene metode, metodologija i plan istraživanja

Na početku istraživanja, putem dostupne literature, istražiti će se bitni elementi koji utječu na seizmički odgovor okvira s ispunom: izmjere okvira, izmjere i smještaj otvora, mehanička svojstva elemenata okvira i ispuna. U ovom stupnju istraživanja, istražiti će se mogućnost izrade malih modela okvira s ispunom na zamjenjujućim eksperimentalnim modelima (čelični okvir i ispun od gips ploča ili morta) te numeričke analize primjenom računalnog programa za nelinearni proračun ATENA 2D v4.3. (26). To bi trebalo dati predodžbu o ponašanju okvira s ispunom s otvorima te kakvi se mogu očekivati načini sloma te koji će biti prvi pokazatelji otkazivanja. Mehaničke karakteristike materijala u ovom dijelu istraživanja na numeričkim modelima biti će usvojene iz dostupne literature.

Eksperimentalni dio istraživanja provesti će se na armirano-betonskim okvirima sa zidanim ispunom od glinenih blokova i vapneno-cementnog morta opće namjene. Za primijenjene materijale provest će se zasebna ispitivanja na uzorcima radi utvrđivanja mehaničkih svojstava. Izvesti će se deset ispitivanja na uzorcima armirano-betonskih okvira s ispunom s otvorima u mjerilu M 1:2,5. Okviri su istih izmjera, projektirani i izvedeni prema (23) i (25), a oformiti će se grupe prema vrsti i položaju otvora te s izvedbom vertikalnih serklaža ili bez njih. Prvu grupu predstaviti će četiri uzorka sa zidanim ispunom s otvorom za prozor ili vrata sa središnjim ili otklonjenim smještajem bez vertikalnih serklaža oko otvora. Drugu grupu predstaviti će četiri uzorka kao u prethodnoj grupi, ali s vertikalnim serklažima, dok će treću grupu predstaviti dva referentna uzorka; jedan će biti prazan okvir, a drugi okvir s punim ispunom.

Nakon eksperimentalnog dijela istraživanja, provoditi će se podešavanje numeričkih modela prema rezultatima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjima te će se numerička analiza proširiti na otvore drugih izmjera i smještaja te na druge izmjere i vrste materijala ispuna i količine poprečne armature okvira, s ciljem istraživanja utjecaja pojedinih parametara.

Prema rezultatima numeričkih i eksperimentalnih istraživanja modela, dati će se pregled krutosti, nosivosti i histerezne energije zidanog ispuna u ovisnosti o katnom pomaku tj. deformaciji te analiza utjecaja materijalnih i geometrijskih parametara na ponašanje ovih elemenata. Izvedene parametri prikazati će se u odnosu na pripadni prazni armirano-betonski okvir. Također, parametri nosivosti biti će dodatno prikazani u odnosu na iznos uzdužne sile u stupovima.



## 1.6. Očekivani izvorni doprinos istraživanja

Okviri s ispunom, a naročito uz prisustvo otvora, nedostatno su istraženi konstruktivni elementi. U radu će se istražiti utjecaj otvora na seizmički odgovor armirano-betonskih okvira s zidanim ispunom, eksperimentalno i numerički. Definirati će se faktori kojima se u obzir uzima utjecaj odnosa izmjera otvora, smještaja otvora te prisustva vertikalnih serklaža oko otvora u zidanom ispunu, u odnosu na prazan armirano-betonski okvir. Ovo je u svrhu kasnijoj prilagodbi i/ili poboljšanju modela zamjenske tlačne dijagonale, koji će omogućiti praktično uzimanje u obzir utjecaja zidanog ispuna s otvorima. To će omogućiti primjenu složenog elementa okvira sa zidom s otvorima, kao konstruktivnog elementa, što će rezultirati u većoj ekonomičnosti i pouzdanosti u procjeni ponašanja armirano-betonskih okvira s ispunom na djelovanje potresa.

## 1.7. Primjena rezultata istraživanja

Utjecaj otvora u zidanom ispunu armirano-betonskog okvira, uslijed djelovanja potresa, ima veoma važnu ulogu. Svijest o tome danas je svakako prisutna, što je vidljivo kroz postojeće normative za projektiranje građevina, ali još uvijek nema dovoljno istraživačkog iskustva. Također, postojeći predloženi modeli proračuna nedostatno su istraženi i uglavnom kalibrirani na pojedinačnim rezultatima i na materijalima kakovi se ne susreću u Republici Hrvatskoj. Potreba za novim ili poboljšanjem postojećih numeričkih modela je stoga činjenica, jer se događa da su dosadašnji modeli ili neprimjenjivi ili u praktičnoj primjeni daju lošu procjenu ponašanja te ne mogu obuhvatiti složene načine sloma koji mogu nastati. To se stoga osobito odnosi na zidane ispune s otvorima. Danas najprimjenjiviji model je zamjenska tlačna dijagonala.

Istraživanje će rezultirati metodologijom koja će biti prikladna inženjerskoj praksi za proračun i analizu seizmičkog odgovora u svrhu optimalnog projektiranja i procjeni ponašanja armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunima uz uzimanje u obzir otvora u potresnim područjima. Osnova će biti faktori koji predstavljaju odnos ključnih parametara ponašanja praznih armirano-betonskih okvira te sa zidanim ispunom, sa i bez otvora. Putem ovih faktora, na temelju poznavanja pojednostavljene krivulje odnosa horizontalne sile i katnog pomaka armirano-betonskog okvira, moći će se odrediti ista u slučaju kada postoji zidani ispun, s otvorima i bez njih, također i s prisutnošću vertikalnih serklaža. Na temelju tog odnosa, tj. određene pojednostavljene krivulje ponašanja, koja je vezana za jedan kat i jedan okvir, svojstva zamjenske tlačne dijagonale moći će se podesiti putem njene širine te će se ona moći primijeniti na čitave armirano-betonske okvirne konstrukcije sa zidanim ispunima, s otvorima ili bez njih, koji su omeđeni vertikalnim serklažima ili ne.

Istraživanje će rezultirati boljem razumijevanju ponašanja armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom s otvorima, ovisno o njihovom smještaju, vrsti i izmjerama te prisutnošću vertikalnih serklaža oko njih.

## 1.8. Hipoteza

Moguće iznaći faktore koji, primijenjeni na model tlačne dijagonale, omogućuju tom modelu uzimanje u obzir utjecaj otvora i serklaža oko otvora.

Za dane utjecajne faktore vrijediti će:

- Odnositi će se na jedan armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom, tj. pripadni par zamjenskih tlačnih dijagonala.
- Moći će se primijeniti u slučaju više spojenih okvira, tj. različitih statičkih sustava, uzimanjem u obzir utjecaja pojedinih polja.

Model zamjenske tlačne dijagonale, koji zahtijeva provedbu nelinearnog proračuna konstrukcije, ima praktičnu primjenu. Praktična primjena je omogućena putem nelinearnog statičkog proračuna u skladu s (25).

## Poglavlje 2.0.

# PROVEDBA ISPITIVANJA NA ARMIRANO-BETONSKIM OKVIRIMA SA ZIDANIM ISPUNOM

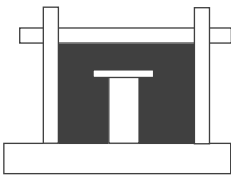
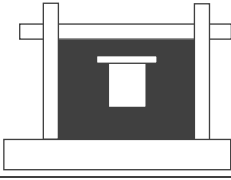

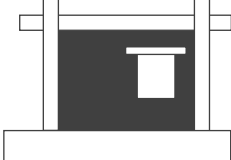
### 2.1. Uvod

U ovome poglavlju prikazan je opis uzoraka te objašnjen plan ispitivanja armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom, uslijed vertikalnog stalnog i horizontalnog cikličkog opterećenja. Objašnjen je odabir otvora i njihov smještaj te su dane izmjere pojedinih uzoraka. Prikazani su rezultat ispitivanja primijenjenih gradiva pri izvedbi uzoraka. Provedba ispitivanja te opis i razmještaj mjernih uređaja opisani su na kraju poglavlja.

### 2.2. Pregled ispitivanih modela

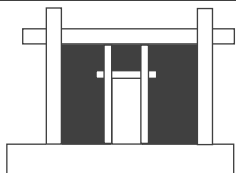
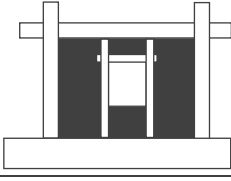
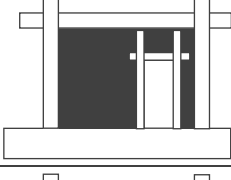
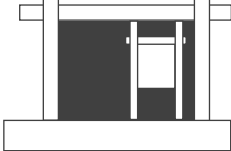
Pripremljeno je ukupno deset uzoraka, armirano-betonskih okvira jednakih izmjera, materijalnih svojstava i plana armature, umanjenih u skladu s mjerilom  $M=1:2,5$ . Uzorci su podijeljeni u grupe I, II i III, gdje se razlikuju vrstom, smještajem i omeđenošću otvora u zidanom ispunu. Uzorci grupe I, uzorci su s otvorima u zidanom ispunu, bez vertikalnih serklaža oko otvora i navedeni su u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Pregled uzoraka koji pripadaju grupi I

Uzorak			Način izvedbe zidanog ispuna			
Grupa	Broj	Oznaka	Izgled	Vrsta otvora	Smještaj otvora	Omeđenost otvora
I	1	Tip (I/1)		Vrata	Središnji	Bez vertikalnih serklaža
	2	Tip (I/2)		Prozor	Središnji	
	3	Tip (I/3)		Vrata	Otklonjen	
	4	Tip (I/4)		Prozor	Otklonjen	

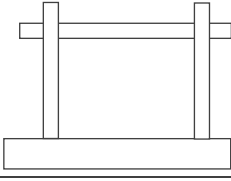
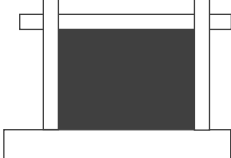
Uzorci grupe II su uzorci s vertikalnim serklažima izvedenim oko otvora, za razliku od istih grupe I, i navedeni su u tablici 2.2.

**Tablica 2.2.** Pregled uzoraka koji pripadaju grupi II

Uzorak			Način izvedbe zidanog ispuna			
Grupa	Broj	Oznaka	Izgled	Vrsta otvora	Smještaj otvora	Omeđenost otvora
I	1	Tip (II/1)		Vrata	Središnji	S vertikalnim serklažima
	2	Tip (II/2)		Prozor	Središnji	
	3	Tip (II/3)		Vrata	Otklonjen	
	4	Tip (II/4)		Prozor	Otklonjen	

Posljednju, ili grupu III uzoraka, čine dva uzorka, od kojih je jedan bez ispuna, dok je drugi s punim ispunom tj. s ispunom bez otvora, i dani su u tablici 2.3. Oni predstavljaju granične slučajeve ovog istraživanja.

**Tablica 2.3.** Pregled uzoraka koji pripadaju grupi III

Uzorak			Način izvedbe zidanog ispuna			
Grupa	Broj	Oznaka	Izgled	Vrsta otvora	Smještaj otvora	Omeđenost otvora
III	1	Tip (III/1)		Nema	Nema	Nema
	2	Tip (III/2)		Nema	Nema	

## 2.3. Opis i izmjere ispitivanih modela

### 2.3.1. Opis prototipa

Kao prototip za dobivanje izmjera uzoraka, odabrana je građevina od sedam katova, izvedenih od armirano-betonskih okvira i ploča nosivih u dva smjera. Zidani ispun smješten je neprekidno po visini objekta, i to u njegovoj sredini te na rubnim rasponima, kao što je prikazano na slici 2.1. Odabrani materijal armirano-betonskih okvira je beton razreda čvrstoće C30/37 u skladu s (23) te uzdužna i poprečna rebrasta armatura razreda B500B, također u skladu s (23). Materijal zidanog ispuna čine zidni elementi, glineni blokovi s vertikalnim šupljinama u skladu s (25) te vapneno-cementni mort razreda čvrstoće M5 u skladu s (24,25).

Tablica 2.4. Djelovanja na prototipu

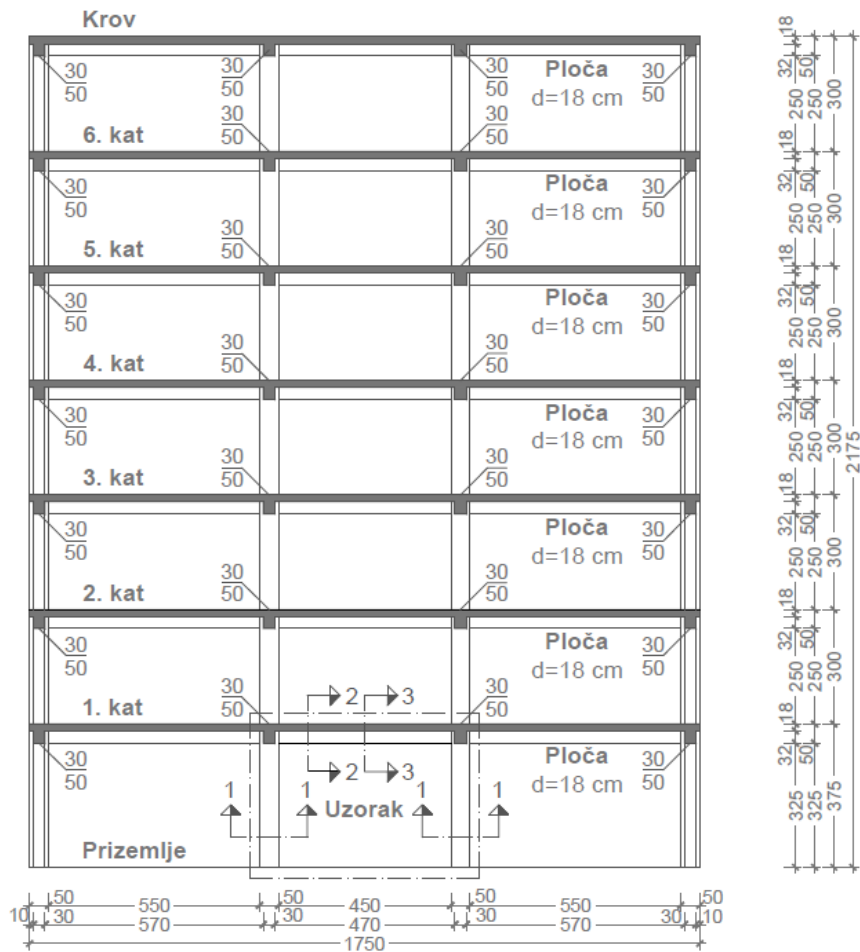
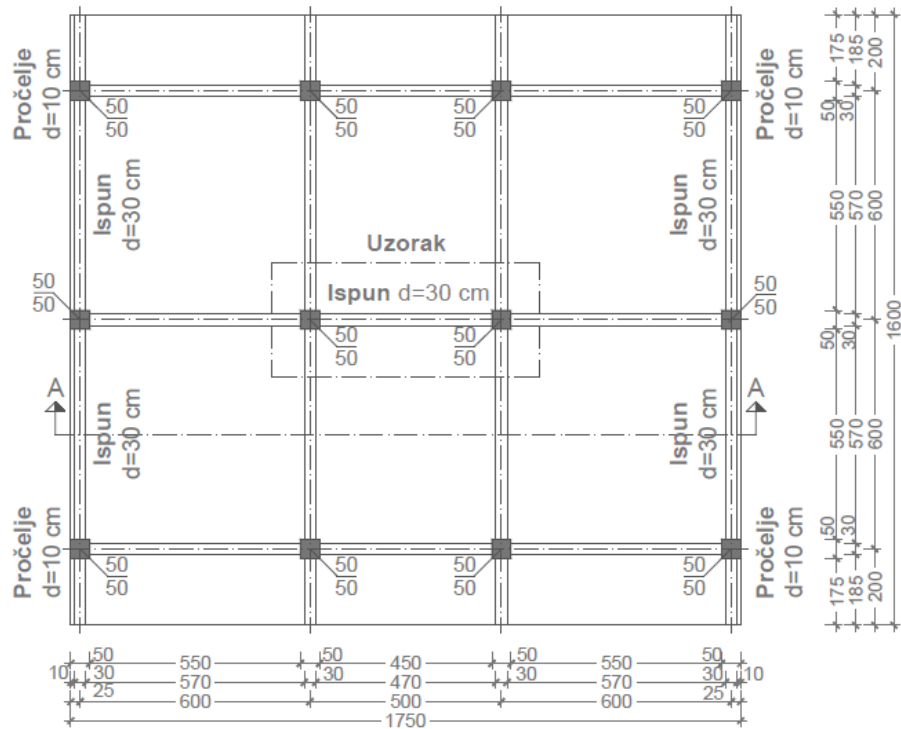
Kat	Stalno opterećenje			Pokretno opterećenje		Projektni intenzitet potresa (razred važnosti II, $\gamma_I=1,0$ )	
	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>(1)</sup>	kN/m <sup>(2)</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m		
Krov	2,0	-	-	1,25	-	Vrsta tla	B
6.	1,75	12,0	1,0	3,0	1,0	$a_g/g$	0,2
5. do 1.	1,75	12,0	1,0	3,0	1,0	q	3,9

<sup>1</sup>zamjensko opterećenje od djelovanja zidanog ispuna

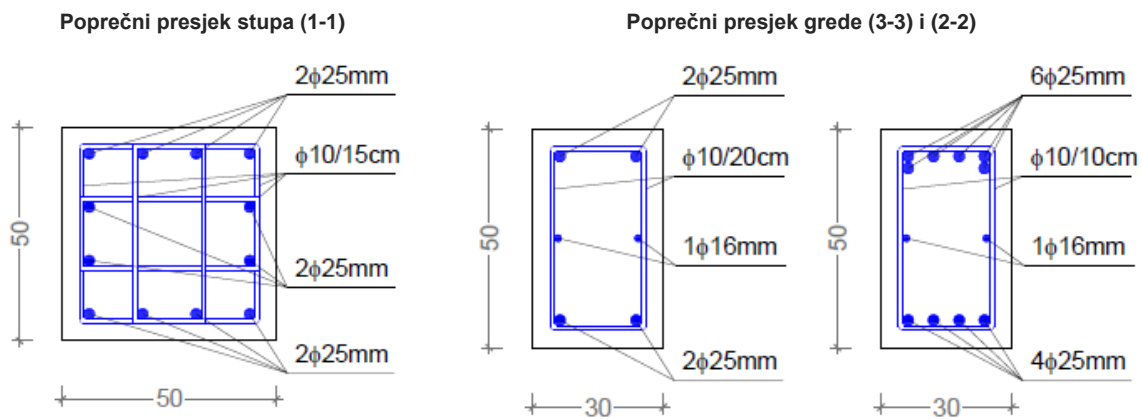
<sup>2</sup>zamjensko opterećenje od vlastite težine pročelja

Djelovanja na konstrukciju navedena su u tablici 2.4. Zidani ispun nije izravno uzet u obzir pri proračunu, već je zamijenjen istoznačnim neprekidnim opterećenjem u iznosu od 12,0 kN/m. Pročelja objekta su na jednak način prevedena u opterećenje od 1,0 kN/m te su smještena na vanjski rub armirano-betonskih ploča. Vlastita težina armirano-betonskih elemenata u obzir je uzeta izravno putem računalnog programa. Dimenzioniranje armirano-betonskih elemenata provedeno je statičkim proračunom te primjenom metode spektra odgovora na 3D modelu primjenom metode konačnih elemenata s računalnim programom TOWER 5. v.24. Odabrane izmjere poprečnih presjeka te količina armature, elemenata armirano-betonskih okvira prikazane su na slici 2.2. Dimenzioniranje armirano-betonskog okvira provedeno je u skladu s (23,25) za srednji razred duktilnosti tj. DCM.

U skladu sa prototipom odabran je središnji armirano-betonski okvir prizemlja, prema slici 2.1., u svrhu izmjera potrebnih za izvedbu uzoraka u mjerilu  $M=1:2,5$ . Odnos duljina stranica zidanog ispuna odabranog uzorka, duljine naspram visine, iznosi  $L_I/H_I=4,5/3,25$  (1,80/1,30) m, u stvarnim (i pripadajućim) umanjenim u  $M=1:2,5$ ) izmjerama. Debljina ispuna iznosi  $T_I=30,0$  (12,0) cm. Izmjere poprečnih presjeka armirano-betonskog okvira su  $b_s \times d_s=50,0 \times 50,0$  (20,0  $\times$  20,0) cm za stupove odnosno  $b_g \times d_g=30,0 \times 50,0$  (12,0  $\times$  20,0) cm za gredu, prema slici 2.2. Sličnost modela i prototipa opisana je dalje u tekstu.



Slika 2.1. Tlocrt i presjek A-A prototipa s odabranim uzorkom



**Slika 2.2.** Izmjere i količina armature armirano-betonskih elemenata okvira uzorka na prototipu u cm

Model je izveden jednakim gradivima i svojstvima gradiva kao i na prototipu tj. u potpunoj je sličnosti s materijalom prototipa, prema (93). Za zidne elemente na modelu usvojeni su pregradni elementi, kako bi se izbjeglo pretjerano izrezivanje. Oni imaju jednak volumen šupljina prema ukupnom volumenu zidnog elementa i spadaju u istu grupu zidnih elemenata kao i elementi na prototipu, prema (24). Mort na modelu jednakog je sastava i debljine i broja reški kao na prototipu. Stoga su, za zidani ispun, svojstva ispitana u skladu s uvjetima izvedbe na modelu.

Djelovanja na model koja potječu od vertikalnog opterećenja, a koja prenose armirano-betonski stupovi okvira, određena su u skladu s očuvanjem jednakog tlačnog naprezanja na modelu i prototipu, tj.  $N_m/A_m=N_p/A_p$ , gdje indeks p predstavlja prototip, m model, N uzdužnu silu u stupu okvira i A ploštinu poprečnog presjeka stupa.

### 2.3.2. Izmjere i smještaj otvora u zidanom ispunu

U skladu sa smjernicama za odabir najprikladnijih otvora stambenih i poslovnih objekata, prikazanih u (27), odabrane su dvije vrste otvora u zidanom ispunu, prozor i vrata, pravokutnog oblika, s pripadnim izmjerama.

Normirane građevinske izmjere odabranih otvora, tj. jednog otvora za vrata u stvarnom (i mjerilu  $M=1:2,5$ )  $L_o \times H_o=875 \times 2125$  ( $350 \times 900$ ) mm te jednog otvora za prozor  $L_o \times H_o=1250 \times 1500$  ( $500 \times 600$ ) mm, višekratnici su 125 mm (modularna gradnja), kako bi se izbjeglo pretjerano rezanje zidanih elemenata pri oblikovanju otvora, u skladu s (24). Pregledi izmjera i smještaja otvora uzoraka grupe I, koji je jednak kao i za grupu II, prikazani su na tablicama 2.5. i 2.6. S druge strane, pri izvedbi otvora, u obzir je uzeta mogućnost da otvor bude izveden u sredini zidanog ispuna ili s otklonom. Otkloni otvora prikazani su pod oznakom  $O_o$  koja predstavlja kraću horizontalnu udaljenost između vertikalne osi simetrije otvora i vertikalnog ruba zidanog ispuna tj. početka armirano-betonskog stupa.

**Tablica 2.5.** Pregled veličina i smještaja otvora uzoraka grupe I

Uzorak			Način izvedbe otvora unutar zidanog ispuna (bez vertikalnih serklaža) u stvarnim izmjerama (i pripadnim umanjnim)				
Grupa	Broj	Oznaka	Ispun $L/H_i=4,5/3,25$ (1,8/1,3) m	Izmjere $L_o/H_o$ (m)	Ploština $A_o$ (m <sup>2</sup> )	Otklon $O_o$ (m)	Parapet $H_N$ (m)
I	1	Tip (I/1)		0,875/2,25 (0,35/0,90)	1,97 (0,315)	2,25 (0,90)	0 (0)
	2	Tip (I/2)		1,25/1,50 (0,50/0,60)	1,875 (0,30)	2,25 (0,90)	1,0 (0,40)
	3	Tip (I/3)		0,875/2,25 (0,35/0,90)	1,97 (0,315)	1,10 (0,44)	0 (0)
	4	Tip (I/4)		1,25/1,50 (0,50/0,60)	1,875 (0,30)	1,275 (0,51)	1,0 (0,40)

**Tablica 2.6.** Pregled veličina i smještaja otvora uzoraka grupe II

Uzorak			Način izvedbe otvora unutar zidanog ispuna (s vertikalnim serklažima) u stvarnim izmjerama (i pripadnim umanjnim)				
Grupa	Broj	Oznaka	Ispun $L/H_i=4,5/3,25$ (1,8/1,3) m	Izmjere $L_o/H_o$ (m)	Ploština $A_o$ (m <sup>2</sup> )	Otklon $O_o$ (m)	Parapet $H_N$ (m)
II	1	Tip (II/1)		0,875/2,25 (0,35/0,90)	1,97 (0,315)	2,25 (0,90)	0 (0)
	2	Tip (II/2)		1,25/1,50 (0,50/0,60)	1,875 (0,30)	2,25 (0,90)	1,0 (0,40)
	3	Tip (II/3)		0,875/2,25 (0,35/0,90)	1,97 (0,315)	1,10 (0,44)	0 (0)
	4	Tip (II/4)		1,25/1,50 (0,50/0,60)	1,875 (0,30)	1,275 (0,51)	1,0 (0,40)



Otvor, u skladu sa (24), ne smije biti smješten odmah uz element koje zidom nastojimo ukrutiti, u ovom slučaju stup armirano-betonskog okvira, već treba biti odmaknut petinu visine zida odnosno zidanog ispuna od njega, tj.  $H_i/5=1,30/5=0,26$  m. Visina parapeta u iznosu od  $H_N=1,0$  (0,40) m, usvojena je za sve uzorke s otvorima za prozor.

Pri razmatranju utjecaja izvedbe vertikalnih serklaža tj. omeđivanja otvora ili ne, također je usvojena smjernica iz (25), koja glasi da je izvedba potrebna ukoliko je ploština otvora  $A_O > 1,5$  m<sup>2</sup>.

Prethodno tome, otvore se pokušalo odabrati putem studije na modelima u mjerilu  $M=1:10$  u odnosu na odabrani okvir prototipa, gdje se čelični okvir nadopunjavao ispunima izvedenim od gipsanih panela ili morta. Ispuni su sadržavali otvore, dane u (27), a svrha je bila utvrditi trajektorije glavnih tlačnih naprezanja. Ispitivanja su pokazala da homogeni ispun ne može na prikladan način predstavljati anizotropni ispun. Drobljenje uglova u slučaju ispuna od morta pokazalo se na gotovo svakom uzorku. Gipsani paneli imali su prepreku u tome što su sadržavali zaštitni sloj, koji ih štiti od vlačnog sloma te stoga nisu bili prikladni.

### 2.3.3. Izmjere uzoraka i plan armature

U nastavku teksta, dan je prvo detaljan opis armirano-betonskog okvira, pripadajućih izmjera i plana armature, koje su usvojene u skladu s prototipom te umanjene u skladu s mjerilom  $M=1:2,5$  te su na dalje u tekstu sve izmjere dane u ovom mjerilu. Promjer poprečne armature je umanjnjen u skladu s mjerilom, ali je razmak očuvan kao na prototipu.

#### a) Izmjere i plan armature armirano-betonskih okvira

Prikaz armirano-betonskog okvira uzoraka, s izmjerama poprečnih presjeka i duljina elemenata te s planom raspodjele uzdužne i poprečne armature dan je na slici 2.3. Putem danih prikaza poprečnih presjeka (A-A), (B-B), (C-C), (D-D) i (E-E) vidljiv je broj i raspored šipki armature unutar istog.

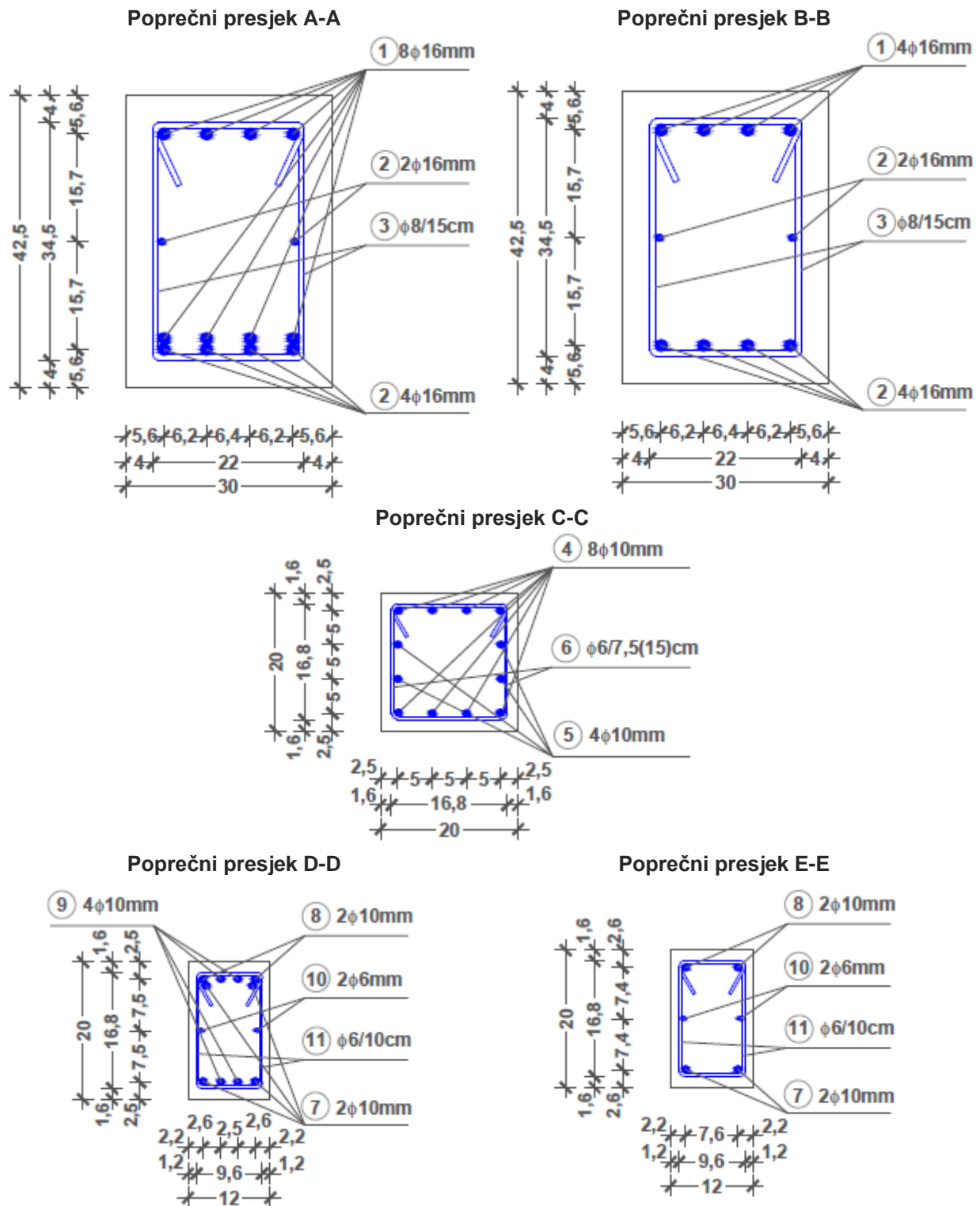
U tablici 2.7. prikupljeni su podaci o količini armature u odabranim poprečnim presjecima na slikama 2.3. i 2.4. te pripadni koeficijent armiranja uzdužnom i poprečnom armaturom istih.

**Tablica 2.7.** Količina armature u poprečnim presjecima armirano-betonskog okvira uzoraka

Poprečni presjek s izmjerama u cm	Uzdužna armatura	Koeficijent armiranja $\rho_l$ (%)	Poprečna armatura	Koeficijent armiranja $\rho_w$ (%)
A-A (30×42,5)	14Ø16 mm	0,16	Ø8 mm / 15,0 cm	0,22
B-B (30×42,5)	12Ø16 mm	0,14	Ø8 mm / 15,0 cm	0,22
C-C (20×20)	12Ø10 mm	2,36	Ø6 mm / 7,50 cm	0,38
D-D (12×20)	10Ø10 mm	3,27	Ø6 mm / 7,50 cm	0,63
E-E (12×20)	4Ø10 mm	1,31	Ø6 mm / 10,0 cm	0,47



Poprečni presjeci (G-G) i (F-F) daju bokocrt i tlocrt armirano-betonskog okvira uzoraka, na kojima su vidljive izrazito velike izmjere tj. robusnost temeljne grede, čija je uloga da osigura upetost stupa uz sidrenje uzdužne armature stupa te odnos širine stupova i grede.



Slika 2.4. Izmjere i plan armature poprečnih presjeka elemenata armirano-betonskog okvira uzoraka

## b) Izmjere zidanih ispuna uzoraka

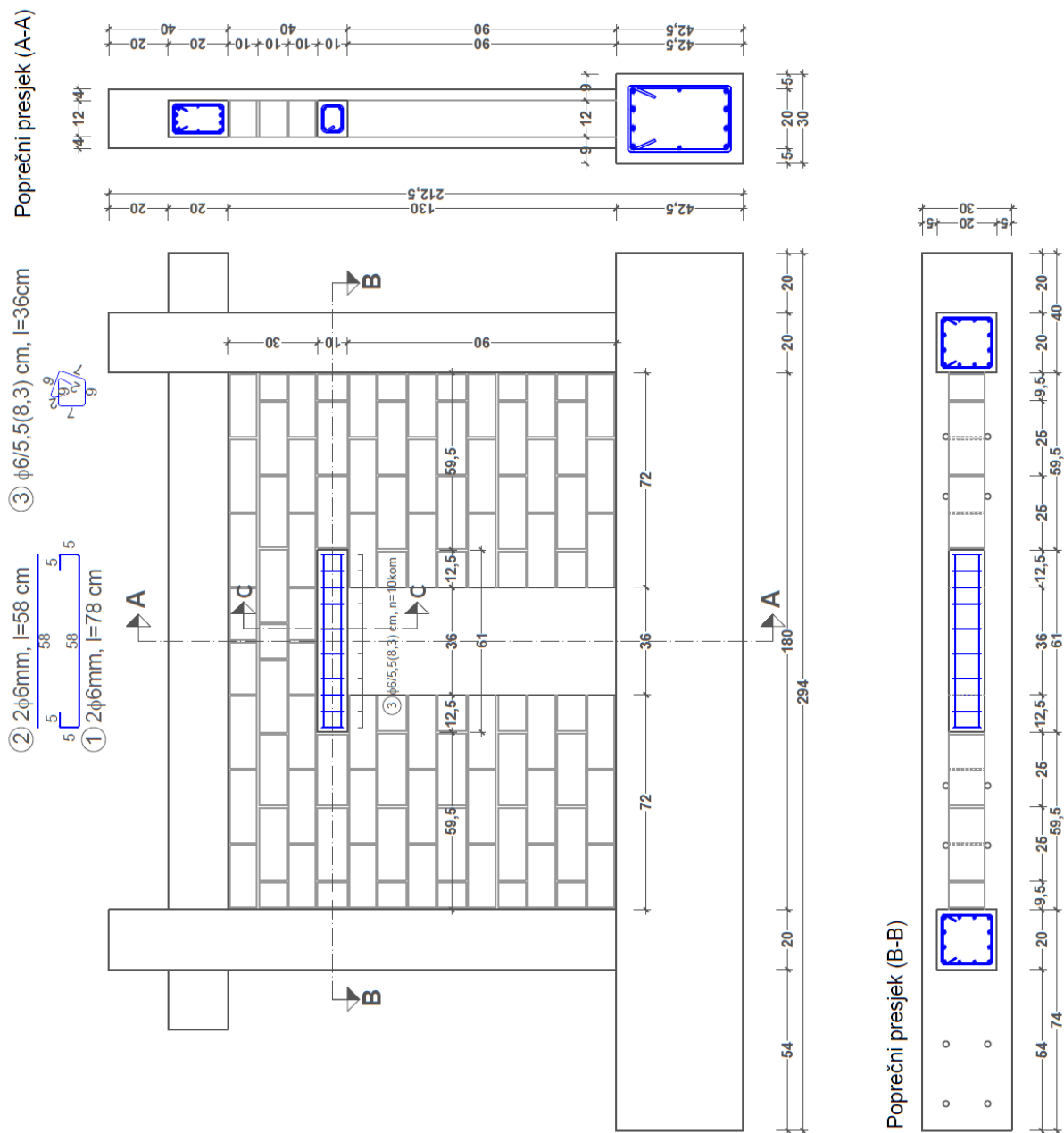
Odnos duljina stranica zidanog ispuna ispitivanih modela, duljine naspram visine, iznosi  $L_i/H_i=1,80/1,30 \text{ m}=1,40$ . Debljina zidanog ispuna svih uzoraka iznosi  $T_i=0,12 \text{ m}$ . Unutar zidanih ispuna za grupe I i II uzoraka prisutan je otvor za prozor ili vrata, koji su smješteni u sredini ispuna ili s otklonom te s prisutnošću vertikalnog serklaža ili ne.

Gruppu I uzoraka čine četiri uzorka, bez izvedbe vertikalnih serklaža oko otvora, u skladu s tablicom 2.1., čiji je detaljan geometrijski opis naveden dolje u tekstu, od kojih su, dva s otvorom smještenim u sredini:

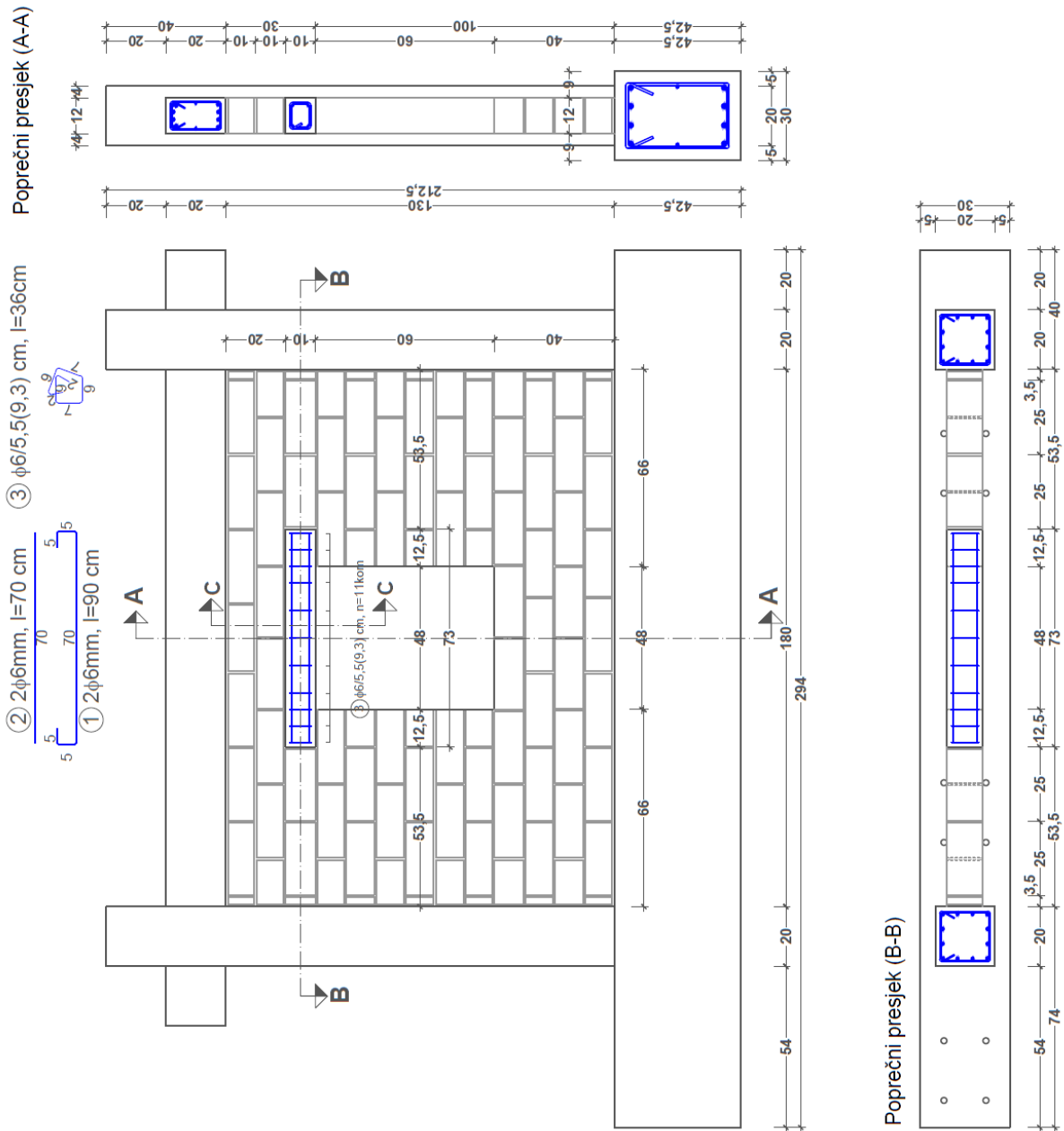
- uzorak tip (I/1), prikazan na slici 2.5., armirano-betonski je okvir sa zidanim ispunom s otvorom za vrata izmjera  $L_o/H_o=0,35/0,90 \text{ m}$  i ploštine  $A_o=0,32 \text{ m}^2$ , bez vertikalnih serklaža. Smješten je s otklonom  $O_o=0,90 \text{ m}$  od osi simetrije otvora do vertikalnog ruba ispuna (u sredini ispuna). Nadvoj iznad otvora je armirano-betonski element duljine  $L_L=0,60 \text{ m}$  (prepust s obe strane je  $0,13 \text{ m}$ ). Visina nadvoja  $H_L=0,10 \text{ m}$ , tj. jednaka je visini zidnog elementa.
- uzorak tip (I/2), prikazan na slici 2.6., ima drugu vrsta otvora u odnosu na uzorak tip (I/1), tj. otvor za prozor, koji ima izmjere  $L_o/H_o=0,50/0,60 \text{ m}$  te ploštinu  $A_o=0,30 \text{ m}^2$ , bez vertikalnih serklaža. Smješten je u sredini ispuna, tj. s otklonom  $O_o=0,90 \text{ m}$  od osi simetrije otvora do vertikalnog ruba ispuna. Nadvoj iznad otvora je armirano-betonski element duljine  $L_L=0,75 \text{ m}$  (prepust s obje strane je  $0,13 \text{ m}$ ). Visina nadvoja  $H_L=0,10 \text{ m}$ , tj. jednaka je visini zidnog elementa. Ispod otvora izveden je parapet visine  $H_N=0,40 \text{ m}$

te dva s otklonjenim otvorom,

- uzorak tip (I/3), prikazan na slici 2.7., armirano-betonski je okvir sa zidanim ispunom s otvorom za vrata smještenim s otklonom od sredine ispuna, bez vertikalnih serklaža. Izmjera otvora i ploština su  $L_o/H_o=0,35/0,90 \text{ m}$  i  $A_o=0,32 \text{ m}^2$ . Smješten je s udaljenošću  $O_o=0,44 \text{ m}$  od osi simetrije otvora do vertikalnog ruba ispuna. Nadvoj iznad otvora je armirano-betonski element duljine  $L_L=0,60 \text{ m}$  (prepust s obje strane je  $0,13 \text{ m}$ ). Visina nadvoja  $H_L=0,10 \text{ m}$ , tj. jednaka je visini zidnog elementa.
- uzorak tip (I/4), prikazan na slici 2.8., za razliku od uzorka tip (I/3), ima otvor za prozor u ispunu s izmjerama  $L_o/H_o=0,50/0,60 \text{ m}$  i ploštinu  $A_o=0,30 \text{ m}^2$ , bez vertikalnih serklaža. Smješten je s otklonom tj. s udaljenošću  $O_o=0,51 \text{ m}$  od osi simetrije otvora do vertikalnog ruba ispuna. Nadvoj iznad otvora je armirano-betonski element duljine  $L_L=0,75 \text{ m}$  (prepust s obje strane je  $0,13 \text{ m}$ ). Visina nadvoja  $H_L=0,10 \text{ m}$ , tj. jednaka je visini zidnog elementa. Ispod otvora izveden je parapet visine  $H_N=0,40 \text{ m}$ .

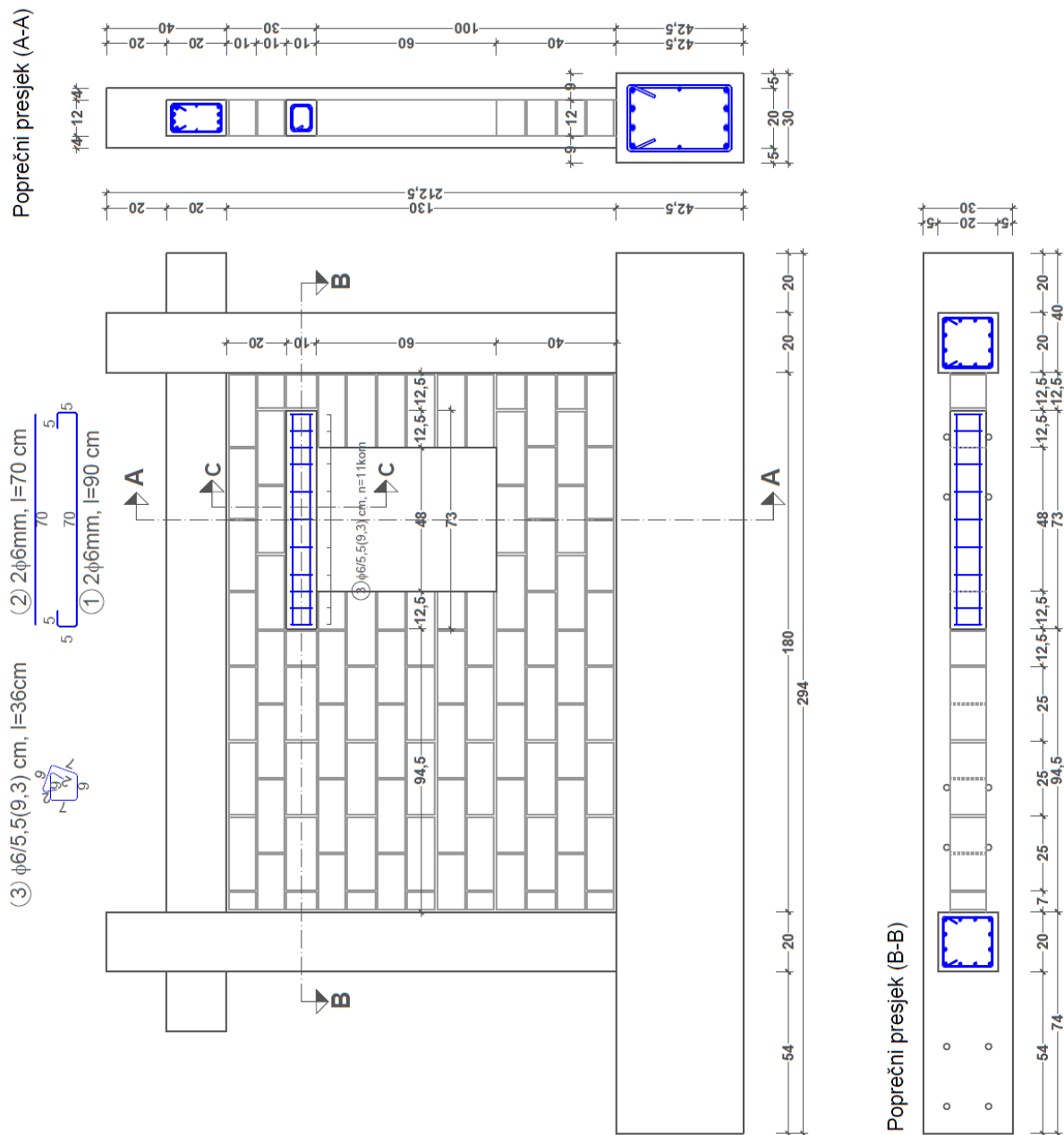


Slika 2.5. Izmjere i plan armature uzorka tip (I/1) u cm



Slika 2.6. Izmjere i plan armature uzorka tip (I/2) u cm





Slika 2.8. Izmjere i plan armature uzorka tip (I/4) u cm



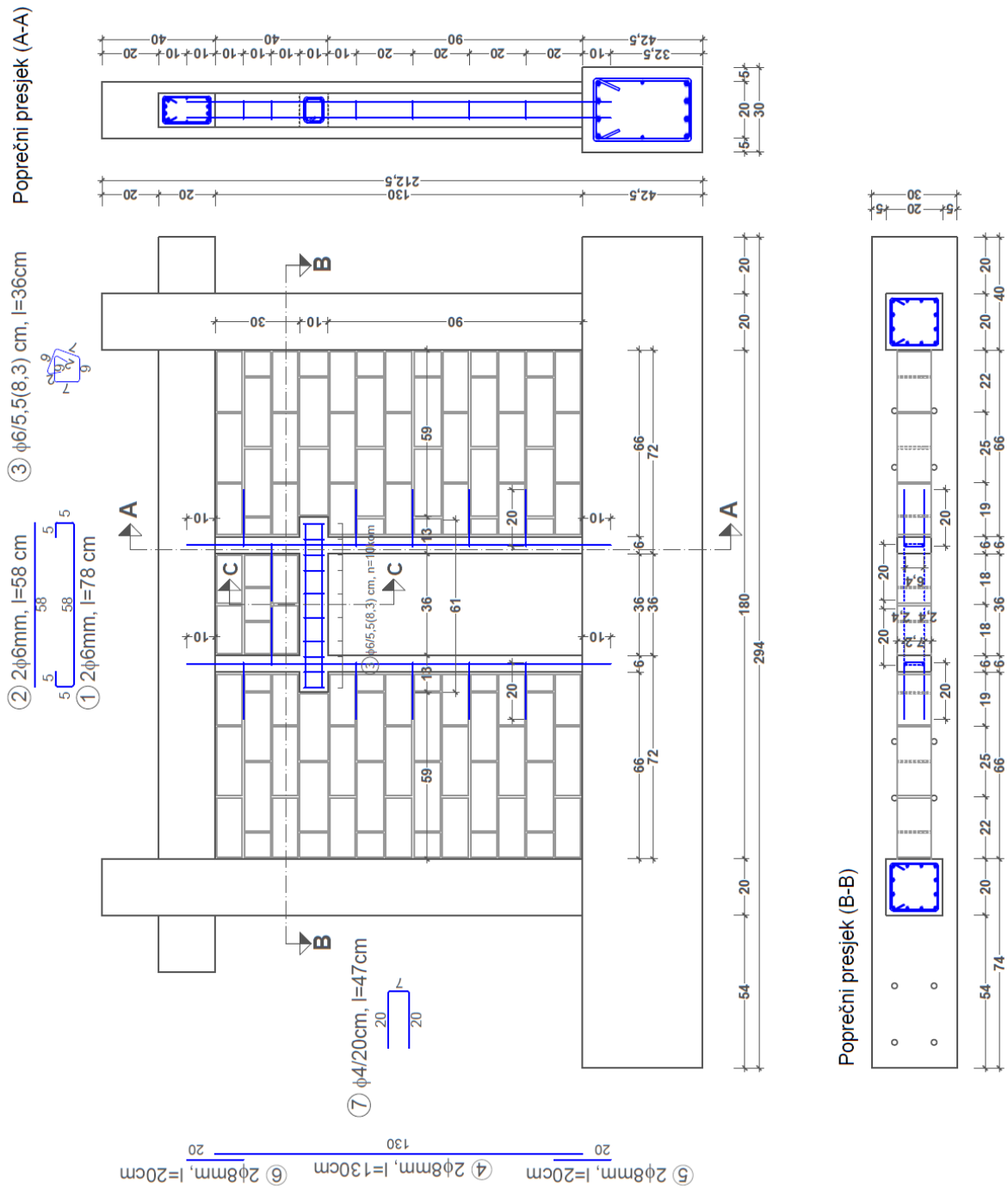
Grupu II uzoraka čine četiri uzorka, u skladu s tablicom 2.2., s prisutnošću vertikalnih serklaža, čiji je detaljan geometrijski opis naveden dolje u tekstu, od kojih su, dva s otvorom smještenim u sredini:

- uzorak tip (II/1), prikazan na slici 2.9., armirano-betonski je okvir sa zidanim ispunom s otvorom za vrata izmjera  $L_O/H_O=0,35/0,90$  m i ploštine  $A_O=0,32$  m<sup>2</sup>, omeđen vertikalnim serklažima, smještenim s otklonom  $O_O=0,90$  m od osi simetrije otvora do vertikalnog ruba ispuna (u sredini ispuna). Nadvoj iznad otvora je armirano-betonski element duljine  $L_L=0,60$  m (prepust s obe strane je 0,13 m). Visina nadvoja  $H_L=0,10$  m, tj. jednaka je visini zidnog elementa.
- uzorak tip (II/2), prikazan na slici 2.10., u odnosu na uzorak tip (II/1), ima otvor za prozor izmjera  $L_O/H_O=0,50/0,60$  m i ploštine  $A_O=0,30$  m<sup>2</sup>. Otvor je omeđen vertikalnim serklažima. Smješten je u sredini ispuna, tj. s otklonom  $O_O=0,90$  m od osi simetrije otvora do vertikalnog ruba ispuna (u sredini ispuna). Nadvoj iznad otvora je armirano-betonski element duljine  $L_L=0,75$  m (prepust s obe strane je 0,13 m). Visina nadvoja  $H_L=0,10$  m, tj. jednaka je visini zidnog elementa. Ispod otvora izveden je parapet visine  $H_N=0,40$  m

te dva s otklonjenim otvorom,

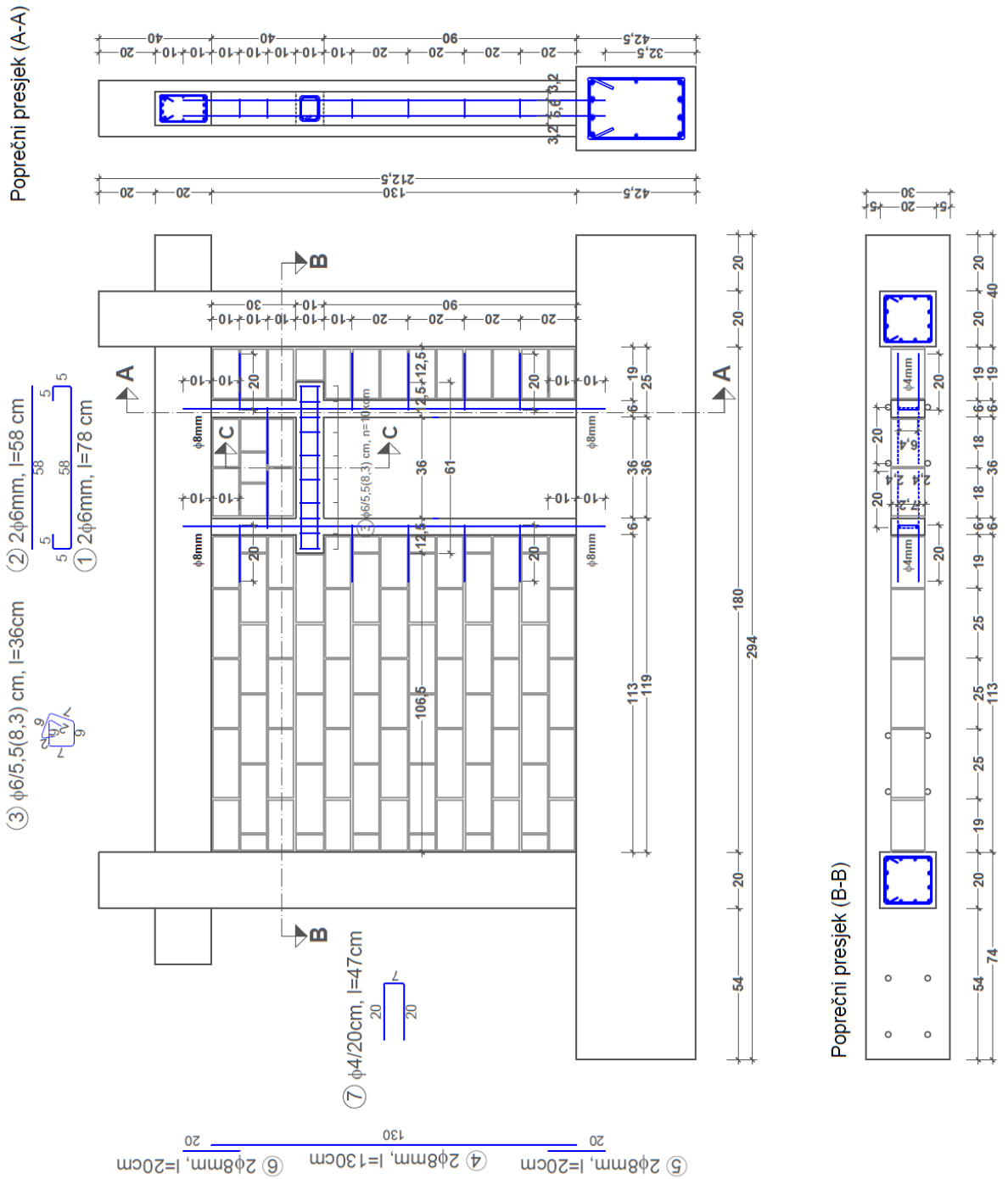
- uzorak tip (II/3), prikazan na slici 2.11., armirano-betonski je okvir sa zidanim ispunom s otvorom za vrata izmjera  $L_O/H_O=0,35/0,90$  m i ploštine  $A_O=0,32$  m<sup>2</sup>, omeđen vertikalnim serklažima, smještenim s otklonom  $O_O=0,44$  m od osi simetrije otvora do vertikalnog ruba ispuna. Nadvoj iznad otvora je armirano-betonski element duljine  $L_L=0,60$  m (prepust s obe strane je 0,13 m). Visina nadvoja  $H_L=0,10$  m, tj. jednaka je visini zidnog elementa.
- uzorak tip (II/4), prikazan na slici 2.12., u odnosu na uzorak tip (II/3) ima otvor za prozor izmjera  $L_O/H_O=0,50/0,60$  m te ploštine  $A_O=0,30$  m<sup>2</sup>. Otvor je omeđen vertikalnim serklažima. Smješten je s otklonom  $O_O=0,51$  m od osi simetrije otvora do vertikalnog ruba ispuna. Nadvoj iznad otvora je armirano-betonski element duljine  $L_L=0,75$  m (prepust s obe strane je 0,13 m). Visina nadvoja  $H_L=0,10$  m, tj. jednaka je visini zidnog elementa. Ispod otvora izveden je parapet visine  $H_N=0,40$  m

Grupu III uzoraka čine dva uzorka, tip (III/1) i tip (III/2), čiji je opis dan u tablici 2.3. Uzorak tip (III/1), prikazan na slici 2.3., prazan je armirano-betonski okvir, dok je uzorak tip (III/2), prikazan na slici 2.13., uzorak s punim zidanim ispunom (bez otvora) od iste vrste zidnih elemenata.



Slika 2.9. Izmjere i plan armature uzorka tip (II/1) u cm

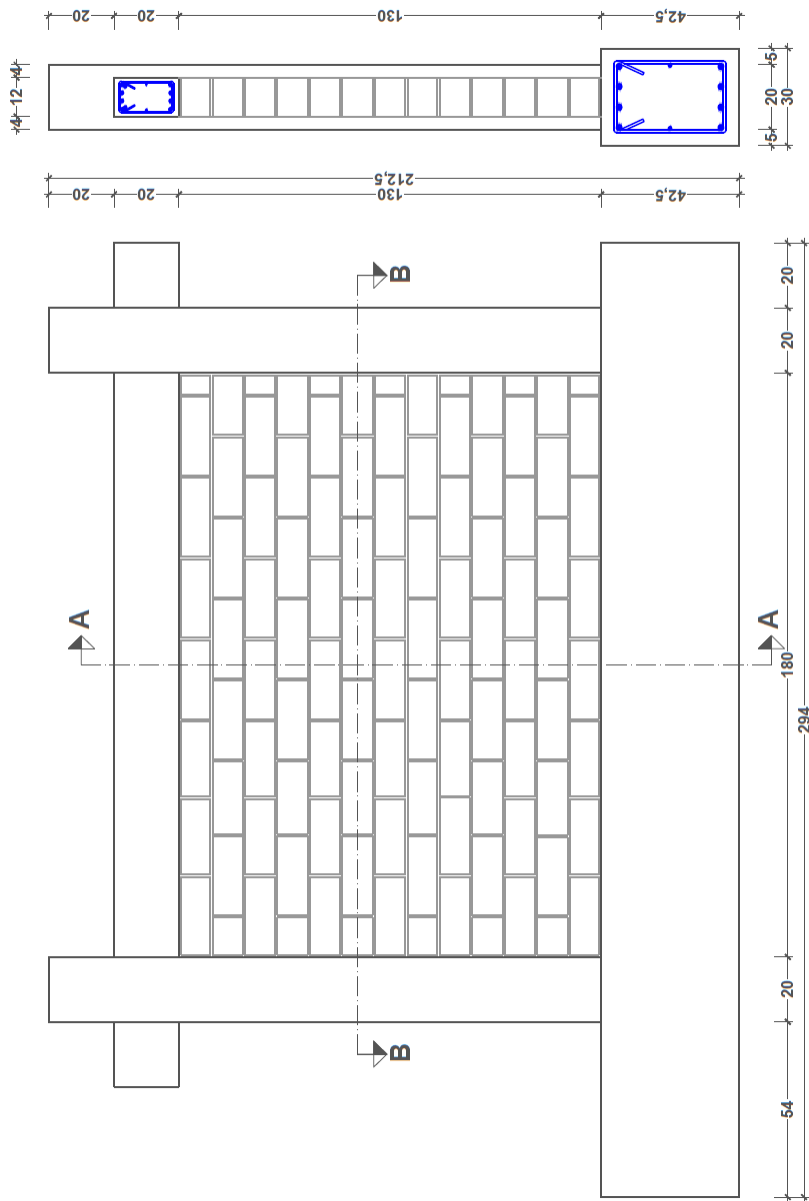




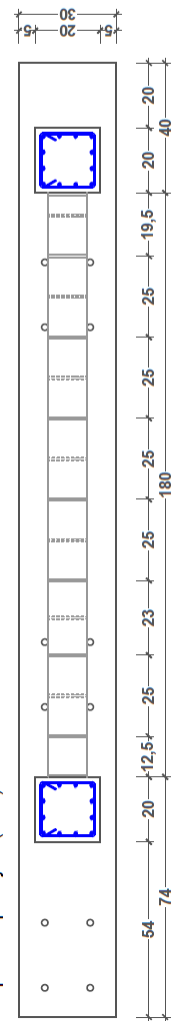
Slika 2.11. Izmjere i plan armature uzorka tip (II/3) u cm



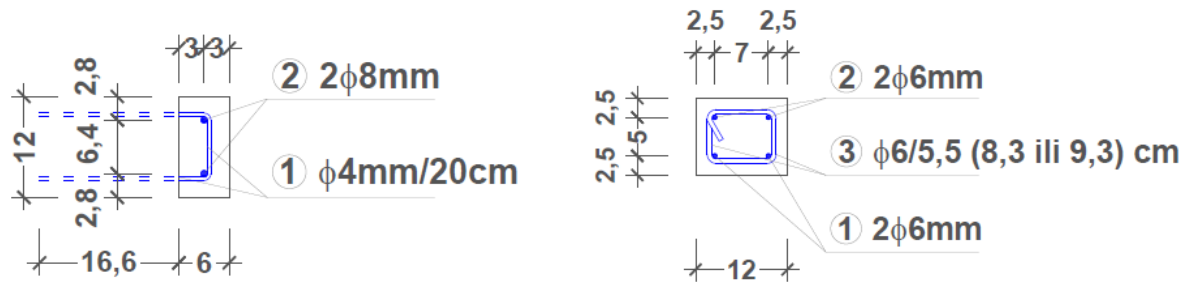
Poprečni presjek (A-A)



Poprečni presjek (B-B)



Slika 2.13. Izmjere uzorka tip (III/2) u cm



**Slika 2.14.** Izmjere i količina armature u poprečnim presjecima nadvoja i vertikalnih serklaža

### c) Izmjere vertikalnih serklaža uzoraka

Vertikalni serklaži izvedeni su kao ojačanje otvora na uzorcima grupe II. Izmjere poprečnih presjeka te duljine ovih armirano-betonskih elemenata jednake su za sve uzorke grupe II. Izmjere poprečnog presjeka su  $b_v \times d_v = 12,0 \times 6,0$  cm. Izmjere poprečnog presjeka odgovaraju smjernicama iz (25). Širina vertikalnih serklaža odgovara stoga širini, dok im visina odgovara visini zidanog ispuna, tj.  $L_v = L_f = 1,3$  m. Promjer i količina uzdužne i poprečne armature vertikalnih serklaža sažeta je su u tablici 2.8.

Armirano-betonski vertikalni serklaži armirani su čeličnom uzdužnom rebrastom armaturom s dvije šipke promjera  $\varnothing 8$  mm, prema slici 2.14. Ove šipke sidrene su u armirano-betonski okvir duljinom 10 cm. Poprečna armatura sastoji se šipki promjera  $\varnothing 4$  mm u obliku vilica, koje su ovijene oko šipki uzdužne armature te sidrene u horizontalne reške zidanog ispuna svakih 20 cm visine, što odgovara visini dva zidna elementa. Plan armature vertikalnih serklaža za uzorke grupe II, za slučajeve otvora za prozor ili vrata prikazan je na slikama 2.9. do 2.12.

**Tablica 2.8.** Količina armature u poprečnim presjecima armirano-betonskih vertikalnih serklaža i nadvoja uzoraka

Poprečni presjek s izmjerama u cm	Uzdužna armatura	Koeficijent armiranja $\rho_l$ (%)	Poprečna armatura	Koeficijent armiranja $\rho_w$ (%)
Nadvoj (12x10)	4 $\varnothing 6$ mm	0,94	$\varnothing 6$ mm/5,5cm(8,3 ili 9,3cm)	1,02 (0,68 ili 0,61)
Vertikalni serklaž (12x6)	2 $\varnothing 8$ mm	0,70	$\varnothing 4$ mm/20,0cm	0,10

### d) Izmjere nadvoja uzoraka

Nadvoj iznad otvora, u oba slučaja (otvor za vrata ili prozor, bez ili s vertikalnim serklažima), armiran je s četiri šipke uzdužne armature  $\varnothing 6$  mm, od toga s dvije u gornjem te dvije u donjem dijelu poprečnog presjeka, prema slici 2.14. Poprečnu armature čine također šipke promjera  $\varnothing 6$  mm, s razmacima 5,5 cm u blizini oslonca i 8,3 (vrata) ili 9,3 (prozor) cm bliže sredini nadvoja. Plan armature nadvoja prikazan je na slikama 2.4. do 2.12.

### 2.3.4. Primijenjena gradiva i materijalna svojstva

Gradiva primijenjena pri izvedbi uzoraka, tj. armirano-betonskih okvira, nadvoja i vertikalnih serklaža te zidanog ispuna, imaju mehanička svojstva utvrđena ispitivanjima u skladu s važećim normama te s usvojenim preporukama iz literature. Primijenjena su gradiva uobičajena u Republici Hrvatskoj. U tekstu su opisane metode ispitivanja pojedinih gradiva te time dobiveni rezultati.

#### a) Beton armirano-betonskih okvira

Beton je primijenjen pri izvedbi okvira, vertikalnih serklaža i nadvoja. Beton primijenjen pri izvedbi armirano-betonskih okvira spravljen je u tvornici betona, s projektiranim razredom čvrstoće betona C30/37. U skladu s (28) normom, provedena su ispitivanja kocki betona izmjera 15×15 cm, uzorkovanih pri izvedbi armirano-betonskih okvira. U tablici 2.9. prikazani su rezultati ispitivanja betonskih kocki betona primijenjenog pri izvedbi armirano-betonskih okvira uzoraka.

Također, utvrđena u skladu s (30), dana je i očekivana karakteristična tlačna čvrstoća betona nakon određenog vremena, tj.  $f_{ck,cube,t}$  s usvojenim  $t=365$  dana, dobivena množenjem tlačne čvrstoće nakon 28 dana s faktorom 1,35. Ovo je urađeno iz razloga što su ispitivanja izvedena s tolikim vremenskim odmakom od vremena izvedbe, tj. nakon najmanje godinu dana.

Tablica 2.9. Karakteristična tlačna čvrstoća kocki betona nakon 28 i 365 dana

Uzorak			Karakteristična tlačna čvrstoća $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Predviđena tlačna čvrstoća nakon $t=365$ dana $f_{ck,cube,365}=1,35 \times f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Grupa	Broj	Oznaka		
I	1	Tip (I/1)	51,5	69,5
	2	Tip (I/2)	35,0	47,3
	3	Tip (I/3)	44,0	59,4
	4	Tip (I/4)	48,5	65,5
II	1	Tip (II/1)	41,5	56,0
	2	Tip (II/2)	41,0	55,4
	3	Tip (II/3)	43,5	58,7
	4	Tip (II/4)	48,5	65,5
III	1	Tip (III/1)	35,0	47,3
	2	Tip (III/2)	31,5	42,5



Putem razorne metode ispitivanja, vađenjem prizmi tj. valjaka promjera 5,0 cm i visine 5,0 cm iz armirano-betonskog okvira uzorka tip (III/1), u skladu s (29) utvrđena je tlačna čvrstoća betona istoznačna karakterističnoj tlačnoj čvrstoći betonskih kocki  $f_{ck,cube}$ . Rezultati ispitivanja dani su u tablici 2.10.

**Tablica 2.10.** Tlačna čvrstoća betona uzorka tip (III/1) u vrijeme ispitivanja

Uzorak betona (n)	Karakteristična tlačna čvrstoća $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	45,3
2	44,0
3	46,2
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>45,2</b>

U skladu s vrijednostima dobivenih naknadnim ispitivanjima tlačne čvrstoće betona, danih u tablici 2.10., beton se može svrstati u razred čvrstoće betona C35/45 u skladu s (23), dakle zabilježen je stvarni porast čvrstoće.

#### b) Beton armirano-betonskih vertikalnih serklaža i nadvoja

Osim za armirano-betonske okvire, beton je primijenjen i za izvedbu nadvoja te vertikalnih serklaža uzoraka. Pri tome je primijenjen beton, spravljen u tvornici betona, projektiranog razreda čvrstoće C25/30 u skladu s (23). Karakteristična tlačna čvrstoća betona vertikalnih serklaža i nadvoja utvrđena je na kockama betona, izmjera 15×15 cm, uzorkovanog pri izvedbi, nakon 28 dana starosti, s zaokruženom vrijednošću na cijeli broj  $f_{ck,cube}=30$  N/mm<sup>2</sup>, u skladu s (29). Rezultati ispitivanja dani su u tablici 2.11.

**Tablica 2.11.** Tlačna čvrstoća betona vertikalnih serklaža i nadvoja

Uzorak betona (n)	Karakteristična tlačna čvrstoća $f_{ck,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	28,1
2	25,6
3	32,3
4	31,3
5	27,8
6	29,6
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>29,1</b>

### c) Uzdužna i poprečna armatura

Armatura armirano-betonskih okvira te vertikalnih serklaža i nadvoja je rebrasta čelična armatura razreda B500B, osim poprečne armature vertikalnih serklaža sidrene u zidani ispun, čija je površina glatka. U armirano-betonski okvir uzoraka ugrađene su šipke uzdužne i poprečne armature s ukupno četiri različita promjera i to  $\varnothing 16$ ,  $\varnothing 10$ ,  $\varnothing 8$  i  $\varnothing 6$  mm, od čega su šipke promjera  $\varnothing 16$  mm prisutne isključivo u temeljnoj gredi te svojstva ovih šipki nisu ispitivana u sklopu ovog istraživanja.

Pri izvedbi vertikalnih serklaža primijenjene su rebraste šipke uzdužne armature promjera  $\varnothing 8$  mm te glatke šipke poprečne armature promjera  $\varnothing 4$  mm. Poprečnu i uzdužnu armaturu nadvoja čine šipke promjera  $\varnothing 6$  mm. Mehanička svojstva, modul elastičnosti, granica tečenja i granica loma, utvrđena su u skladu s (49) te prikazana u tablici 2.12.

**Tablica 2.12.** Mehanička svojstva uzdužne i poprečne armature uzoraka

Promjer armature $\varnothing$ (mm)	Karakteristična granica tečenja $f_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Karakteristična granica loma $f_{uk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Modul elastičnosti $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	Vrsta armature
10	564	651	197430	Rebrasta
8	551	650	192611	Rebrasta
6	545	645	195756	Rebrasta
4	559	648	195145	Glatka

### d) Zidani ispun, zidni elementi i mort

Zidani ispun izveden je glinenim (opečnim) zidanim elementima s vertikalnim šupljinama, prikazanih na slici 2.15., koji se obzirom na geometrijska svojstva (volumen šupljina) i vrstu materijala od kojih su sačinjeni, u skladu s (31), mogu svrstati u Grupi IIb zidnih elemenata. Za povezivanje zidanih elemenata pripremljen je mort opće namjene, propisani mort za ziđe, vapneno – cementni mort, sačinjen u omjeru v:c:p=1:1:5, (v predstavlja građevno vapno, c cement, a p prirodni pijesak), projektirani mort izveden u laboratoriju. Pri tome je pozornost također posvećena ugradbenim svojstvima morta, pošto nije bilo moguće istovremeno zadovoljiti sve potrebe za mortom, već je bilo potrebe za ponovnim miješanjem novih količina.

U skladu s važećim normama provedena su ispitivanja kako bi se utvrdila mehanička svojstva zidanih elemenata, te osim toga u skladu s ostalim preporukama iz normi, njihove izmjere, gustoća, obujam šupljina, u svrhu svrstavanja zidanih elemenata u prethodno navedenu grupu.

## e) Svojstva zidnih elemenata

Podaci o izmjerama zidanih elemenata, određenih u skladu s (32) navedeni su u tablici 2.13.

**Tablica 2.13.** Izmjere uzoraka zidanih elemenata, gdje je  $l_u$  duljina,  $w_u$  širina i  $h_u$  visina

Uzorak (n)	$l_u$ (mm)	$w_u$ (mm)	$h_u$ (mm)	Vanjska stjenka (uzdužna) (mm)	Vanjska stjenka (poprečna) (mm)	Unutarnje rebro (mm)
1	247,2	116,2	191,4	10,4	13,2	8,2
	247,8	116,6	188,8	12,0	13,2	8,8
	247,2	116,8	189,2	12,0	13,2	8,0
	247,8	116,8	190,0	10,4	13,2	8,2
	247,5	116,6	189,9	11,2	13,2	8,3
2	248,4	116,4	193,8	11,0	13,4	8,0
	248,0	118,2	193,2	11,4	13,2	8,0
	247,2	115,8	193,6	12,0	14,4	8,0
	246,4	117,2	193,2	10,0	14,2	8,0
	247,5	116,9	193,5	11,1	13,8	8,0
3	247,2	117,0	194,0	10,6	13,2	8,2
	246,6	116,8	191,0	11,6	13,0	7,8
	248,0	116,3	192,4	12,0	13,2	8,0
	248,4	116,8	193,2	11,2	13,2	8,0
	247,6	116,7	192,7	11,4	13,2	8,0
4	247,8	116,8	193,0	12,0	14,0	8,0
	247,0	117,2	193,0	10,2	13,4	8,0
	247,0	117,5	192,6	10,8	13,2	8,4
	247,6	116,2	191,8	12,4	13,6	8,0
	247,4	116,9	192,6	11,4	13,6	8,1
5	247,2	117,2	191,8	11,6	13,4	8,0
	247,2	116,8	191,8	10,6	12,8	8,4
	248,0	117,2	193,2	10,6	13,0	7,8
	248,0	116,8	193,2	13,0	13,2	8,0
	247,6	117,0	192,5	11,5	13,1	8,1
6	248,2	117,6	191,6	12,6	13,6	8,0
	248,0	117,0	193,2	10,6	13,0	8,0
	248,4	117,2	192,0	11,4	13,0	9,0
	247,6	117,0	194,2	11,2	14,0	8,0
	248,1	117,2	192,8	11,5	13,4	8,3
7	246,6	117,6	187,8	12,0	13,0	7,8
	247,2	116,8	188,6	11,2	13,4	8,0
	248,0	117,0	187,2	11,0	13,0	8,2
	248,2	117,6	189,2	12,0	12,6	8,0
	247,5	117,3	188,2	11,6	13,0	8,0
8	247,0	117,0	190,4	12,0	13,0	8,0
	247,4	117,2	192,8	11,2	13,2	8,0
	248,6	117,4	192,3	11,0	13,0	8,4
	248,0	117,0	191,8	12,0	13,6	8,0
	247,8	117,2	191,8	11,6	13,2	8,1
9	247,8	116,8	191,4	12,0	13,0	8,0
	247,6	117,0	190,4	11,2	13,6	7,8
	248,2	117,2	191,4	11,0	13,2	8,2
	248,2	117,3	189,4	12,0	13,0	8,0
	248,0	117,1	190,7	11,6	13,2	8,0
10	248,2	116,8	195,8	11,6	13,0	8,0
	247,8	117,6	195,8	11,0	13,2	8,0
	248,2	117,3	194,6	10,6	13,2	9,0
	247,8	117,0	195,6	11,2	12,8	8,0
	248,0	117,2	195,5	11,1	13,1	8,3
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>247,7</b>	<b>117,0</b>	<b>192,0</b>	<b>11,4</b>	<b>13,3</b>	<b>8,1</b>

Podaci o neto obujmu i postotku šupljina zidanih elemenata, određenih u skladu s (33) navedeni su u tablici 2.14.

**Tablica 2.14.** Rezultati ispitivanja neto obujma i postotnog udjela šupljina zidanih elemenata

Uzorak (n)	$l_u$ (mm)	$w_u$ (mm)	$h_u$ (mm)	Bruto obujam $V_{g,u}$ ( $10^4 \cdot \text{mm}^3$ )	Masa pod vodom $M_{w,u}$ (g)	Masa na zraku $M_{a,u}$ (g)	Neto obujam $V_{n,u}$ ( $10^4 \cdot \text{mm}^3$ )	Obujam šupljina $V_{v,u}$ ( $10^4 \cdot \text{mm}^3$ )	Postotak šupljina $V_{v,u}/V_{g,u} \cdot 100$ (%)
1	247,5	116,6	189,9	548	2822	5520	270	278	51
2	247,5	116,9	193,5	560	2870	5605	274	286	51
3	247,6	116,7	192,7	557	2878	5575	270	287	52
4	247,4	116,9	192,6	557	2877	5570	269	288	52
5	247,6	117,0	192,5	558	2883	5575	269	288	52
6	248,1	117,2	192,8	560	2912	5620	271	290	52
7	247,5	117,3	188,2	546	2809	5450	264	282	52
8	247,8	117,2	191,8	557	2887	5580	269	287	52
9	248,0	117,1	190,7	553	2855	5535	268	285	52
10	248,0	117,2	195,5	568	2927	5670	274	294	52
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>247,7</b>	<b>117,0</b>	<b>192,0</b>	<b>556</b>	<b>2872</b>	<b>5570</b>	<b>270</b>	<b>287</b>	<b>52</b>
<b>Neto obujam <math>V_{n,u}</math> (<math>10^4 \cdot \text{mm}^3</math>)</b>	<b>270</b>								
<b>Postotak šupljina <math>V_{v,u}/V_{g,u} \cdot 100</math> (%)</b>	<b>52</b>								

Podaci o neto i bruto obujamskoj masi suhih zidanih elemenata, određenih u skladu s (34) navedeni su u tablici 2.15.

**Tablica 2.15.** Rezultati ispitivanja neto i bruto obujamske mase zidanih elemenata

Uzorak (n)	Bruto obujam $V_{g,u}$ ( $10^4 \cdot \text{mm}^3$ )	Neto obujam $V_{n,u}$ ( $10^4 \cdot \text{mm}^3$ )	Masa u suhom stanju $m_{dry,u}$ (g)	Neto obujamska masa u suhom stanju $\rho_{n,u} = 10^6 \cdot m_{dry,u} / V_{n,u}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Bruto obujamska masa u suhom stanju $\rho_{g,u} = 10^6 \cdot m_{dry,u} / V_{g,u}$ ( $\text{kg/m}^3$ )
1	548	270	4937	1830	901
2	560	274	5029	1839	899
3	557	270	4995	1852	897
4	557	269	4995	1855	897
5	558	269	4985	1852	894
6	560	271	5020	1854	896
7	546	264	4895	1853	896
8	557	269	4985	1851	895
9	553	268	4955	1849	895
10	568	274	5065	1847	892
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>556</b>	<b>270</b>	<b>4986</b>	<b>1848</b>	<b>896</b>
<b>Neto obujamska masa u suhom stanju <math>\rho_{n,u}</math> (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	<b>1850</b>				
<b>Bruto obujamska masa u suhom stanju <math>\rho_{g,u}</math> (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	<b>895</b>				

Podaci o tlačnoj čvrstoći u smjeru (smjer z) te okomito na smjer šupljina (smjer y), određenih u skladu s (35) navedeni su u tablici 2.16.

**Tablica 2.16.** Rezultati eksperimentalnog ispitivanja tlačne čvrstoće zidanih elemenata

Uzorak (n)	Ukupna sila $F^u$ (N)	Ploština $A_{g,u}$ (mm <sup>2</sup> )	Tlačna čvrstoća $f_{mc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Srednja tlačna čvrstoća $f_{mc,sr}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Standardno odstupanje s	Koeficijent varijacije V (%)	Normirana tlačna čvrstoća $f_{mc,norm}$ (N/mm <sup>2</sup> )
	<b>Smjer z</b>	<b><math>w_u \times l_u</math></b>					
1	510000	28978	17,6	17,5	2,8	16,1	15,9
2	590000	28978	20,4				
3	444000	28978	15,3				
4	580000	28978	20,0				
5	405000	28978	14,0				
6	600000	28978	20,7				
	<b>Smjer y</b>	<b><math>w_u \times h_u</math></b>					
1	64000	22463	2,8	2,8	0,2	8,3	2,6
2	70000	22463	3,1				
3	62000	22463	2,8				
4	60000	22463	2,7				
5	56000	22463	2,5				
6	48000	22463	2,1				

Eksperimentalnim ispitivanjem tlačne čvrstoće zidanih elemenata u smjeru (smjer z) te okomito na smjer šupljina (smjer y), u skladu s (35), dobivena je vrijednost normirane tlačne čvrstoće  $f_b=15,9$  N/mm<sup>2</sup> odnosno  $f_{bh}=2,6$  N/mm<sup>2</sup>.

#### f) Svojstva morta

Na probnim mješavinama utvrđena su osnovna ugradbena svojstva morta, tj. konzistencija, gustoća svježeg morta te udio pora. Od svojstava očvrsllog morta određena je gustoća suhog morta te čvrstoća pri savijanju i tlačna čvrstoća morta (tablica 2.17).

**Tablica 2.17.** Maseni udjeli pijeska,  $m_p$ , građevnog vapna,  $m_{gv}$  i cementa,  $m_c$  u odnosu na ukupnu masu veziva na uzorkovanih pri pripremi uzoraka morta (probna mješavina)

Uzorak (n)	$m_c$ (kg)	$m_{gv}$ (kg)	$m_p$ (kg)	$m_c+m_{gv}$ (kg)	$m_c+m_{gv}+m_p$ (kg)	$V_v$ (l)
1	0,271	0,146	1,790	0,417	2,207	0,500
2	0,271	0,146	1,790	0,417	2,207	0,500
Udio građevnog vapna u odnosu na ukupnu masu veziva (%)	35					
Udio cementa u odnosu na ukupnu masu veziva (%)	65					

Konzistencija svježeg morta utvrđena je postupkom potresanja u skladu s (36), te su rezultati prikazani u tablici 2.18.

**Tablica 2.18.** Rezultati određivanja konzistencije svježeg morta potresanjem

Uzorak (n)	Rasprostiranje		Srednja vrijednost (mm)	Odstupanje		Odstupanje 1-2 (%)
	N - S (mm)	E - W (mm)		N-S (%)	E-W (%)	
1	160	173	167	4	4	2
2	173	173	173	0	0	2
<b>Srednja vrijednost (mm)</b>	<b>170</b>					

Gustoća svježeg morta određena je u skladu s (37), te su rezultati prikazani u tablici 2.19.

**Tablica 2.19.** Rezultati određivanja gustoće svježeg morta

Konzistencija morta pri uporabi (mm)	Konzistencija morta utvrđena ispitivanjem (mm)	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	Srednja vrijednost ρ <sub>m,n</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
plastični mort (140-200)	170	1122	3128	2006
		1123	3087	1964
<b>Srednja vrijednost gustoće ρ<sub>m,sr</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1985</b>			

Određivanje udjela pora u svježem mortu provedeno je u skladu s (38), te su rezultati prikazani u tablici 2.20.

**Tablica 2.20.** Rezultati određivanja udjela pora u svježem mortu

Uzorak (n)	Izmjeren sadržaj pora (%)
1	4,8
2	4,5
<b>Srednja vrijednost sadržaja pora (%)</b>	<b>4,7</b>

Određivanje gustoće suhog očvrsllog morta provedeno je u skladu s (39), te su rezultati prikazani u tablici 2.21.

**Tablica 2.21.** Rezultati određivanja gustoće suhog očvrsllog morta

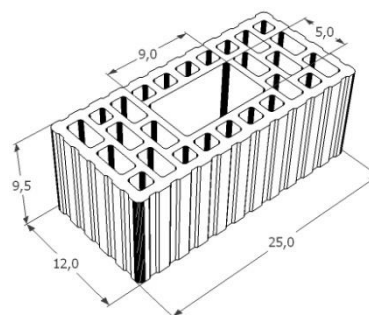
Uzorak (n)	Masa suhog uzorka m <sub>s,dry</sub> (g)	Masa nakon potapanja m <sub>s,sat</sub> (g)	Prividna masa m <sub>s,i</sub> (g)	Obujam uzorka V <sub>s</sub> =(m <sub>s,sat</sub> -m <sub>s,i</sub> )·ρ <sub>w</sub> (cm <sup>3</sup> )	Gustoća očvrsllog uzorka ρ <sub>m</sub> =1000·m <sub>s,dry</sub> /V <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
1	442	494	217	277	1596
2	441	499	221	278	1586
3	446	502	223	279	1599
<b>Srednja vrijednost ρ<sub>m,sr</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1594</b>				

Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće suhog očvrsllog morta provedeno je u skladu s (40), te su rezultati prikazani u tablici 2.22.

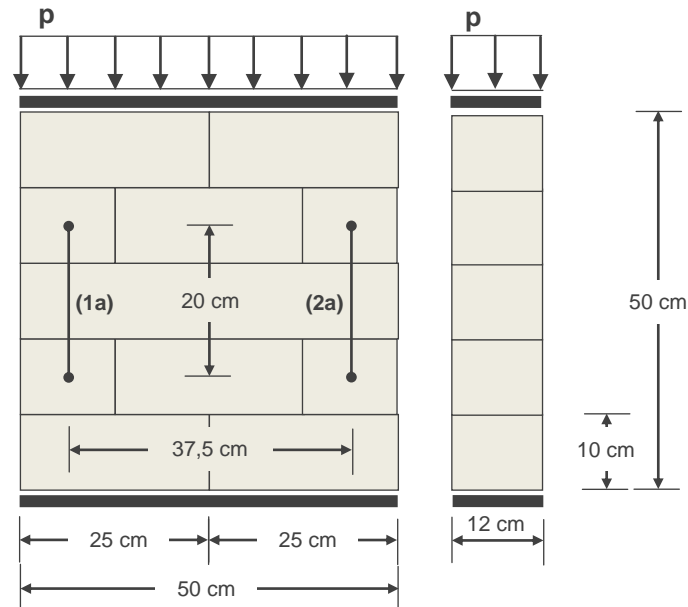
**Tablica 2.22.** Rezultati određivanja čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće suhog očvrsllog morta

Uzorak (n)	Sila sloma pri savijanju $F_{mt}$ (N)	Sila sloma pri tlaku $F_m$ (N)	Vlačna čvrstoća pri savijanju $f_{mt}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Tlačna čvrstoća $f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	540	7600	1,27	5,15
		7600		5,15
2	520	8000	1,22	5,00
		8000		5,00
3	560	8500	1,31	5,31
		8500		5,31
Srednja vrijednost $f_{mt}$ (N/mm <sup>2</sup> )		1,27		
Srednja vrijednost $f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )		5,15		

U skladu s prikazanim svojstvima u tablicama 2.17. do 2.22., a osobito s vrijednošću tlačne čvrstoće od  $f_m=5,15$  N/mm<sup>2</sup>, mort se može svrstati u razred čvrstoće M5, prema (41), te je uz glineni (opečni) zidni element s vertikalnim šupljinama Grupe IIb primijenjen za izvedbu zidanog ispuna.



**Slika 2.15.** Zidni element u izvornom obliku (gore) i prilagođen mjerilu uzorka (dolje) s izmjerama u cm



**Slika 2.16.** Izmjere i položaj mjernih uređaja na ispitnim uzorcima zidanih prizmi 1 do 3 za ispitivanje na tlak

#### g) Svojstva zidanog ispuna u tlaku

U svrhu određivanja mehaničkih svojstava zidanog ispuna u tlaku, pripravljena su tri uzorka zidanih prizmi. Prizme su izvedene od opečnih zidnih elemenata (slika 2.15.) i mortom M5, u šest slojeva s debljinom sloja od 10 mm te su ostavljeni da očvrstu na zraku 28 dana. Slika 2.16. prikazuje shemu uzoraka zidanih prizmi s osnovnim izmjerama, u svrhu ispitivanja na tlak u vertikalnom smjeru, u skladu s (41). Na slici je također dan položaj uređaja za mjerenje pomaka, SM10-SG-KA prema (94), na prednjoj strani 1a i 2a. Nisu prikazani mjerni uređaji na stražnjoj strani, 1b i 2b. Vertikalno opterećenje nanošeno je putem hidrauličkih preša (97), dok je vrijednost sile bilježena putem pretvarača sile (46). Podaci mjerenja prikupljeni su putem uređaja DEWE-BOOK prema (95) i računalnog programa DEWESoft 6.6.7 (95).

**Tablica 2.23.** Izmjere uzoraka zidanih prizmi,  $l_s$  duljina,  $t_s$  debljina i  $h_s$  visina za ispitivanje na tlak

Uzorak (n)	$l_s$ (cm)	$t_s$ (cm)	$h_s$ (cm)
1	50	12	50
2	50	12	50
3	50	12	50

Izmjere uzoraka dane su u tablici 2.23., s vrijednostima zaokruženim na 1,0 cm, gdje su također vidljive izmjere primijenjenog zidanog elementa. Kako bi se što vjernije utvrdila svojstva ispuna pri izvedbi zidanih prizmi primijenjeni su zidni elementi prikazani na slici 2.15.



Prikaz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće zidanih prizmi dan je u tablici 2.24., gdje je kao karakteristična tlačna čvrstoća usvojena  $f_k=f_{k,min}=2,3 \text{ N/mm}^2$  s koeficijentom varijacije od  $V=5,5 \%$ .

**Tablica 2.24.** Tlačna čvrstoća uzoraka zidanih prizmi

Uzorak (n)	Sila pri prvoj pukotini $F_{cr,n}$ (N)	Sila sloma $F_{u,n}$ (N)	Ploština $A_n$ (mm <sup>2</sup> )	Naprezanje pri prvoj pukotini $f_{c,cr,n}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Naprezanje pri slomu $f_{cw,n}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Srednje naprezanje pri slomu $f_{cw,sr}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Koeficijent varijacije V (%)
1	141000	157000	61200	2,3	2,6	2,7	5,5
2	155000	173000	61200	2,5	2,8		
3	153000	173000	61200	2,5	2,8		
<b>Karakteristična tlačna čvrstoća zidanog ispuna <math>f_k</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	2,6	ili	<b>2,3</b>				

**Tablica 2.25.** Vrijednosti deformacija pri slomu  $\epsilon_u$  i modula elastičnosti E uzoraka zidanih prizmi opterećenih na tlak

Uzorak (n)	$\epsilon_{u,n}$ (%)	$E_n$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	0,50	4276
2	0,65	3769
3	0,55	3769
<b>Ukupna normalna deformacija <math>\epsilon_u</math> (‰)</b>	<b>0,57</b>	
<b>Srednja vrijednost modula elastičnosti E (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>3938</b>	

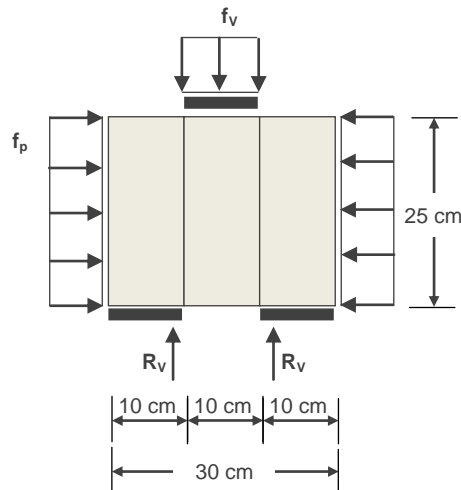
Ispitivanje zidanih prizmi prikazano je na slici 2.17. zajedno sa prikazom uzorka nakon sloma, koje se očitivalo vertikalnim pukotinama te drobljenjem zidanih elemenata.



**Slika 2.17.** Zidna prizma uslijed ispitivanja na tlaku vertikalnom smjeru (lijevo) te uzorak nakon sloma (desno)

## h) Svojstva zidanog ispuna pri posmiku

Primjena opečnih zidnih elemenata s vertikalnim šupljinama također je bila i za izvedbu uzoraka za određivanje početne posmične čvrstoće u skladu s (42). U tablici 2.26. i na slici 2.18. prikazane su osnovne izmjere uzorka zaokružene na vrijednost od 1,0 cm.



**Slika 2.18.** Osnovne izmjere i način opterećivanja uzorka za određivanje početne posmične čvrstoće

U skladu s tablicom 2.26., izvedene su tri serije uzoraka od čega po tri uzorka u svakoj seriji bez upuštanja morta te po jedan s mortom upuštenim u šupljine zidnih elemenata, što čini ukupno 12 uzoraka. Stoga su po četiri ispitna uzorka za svaku skupinu, gdje se jedna skupina odnosi na jednu vrijednost normalnog naprezanja pri opterećivanju na posmik.

**Tablica 2.26.** Izmjere uzoraka pripremljenih za ispitivanje početne posmične čvrstoće

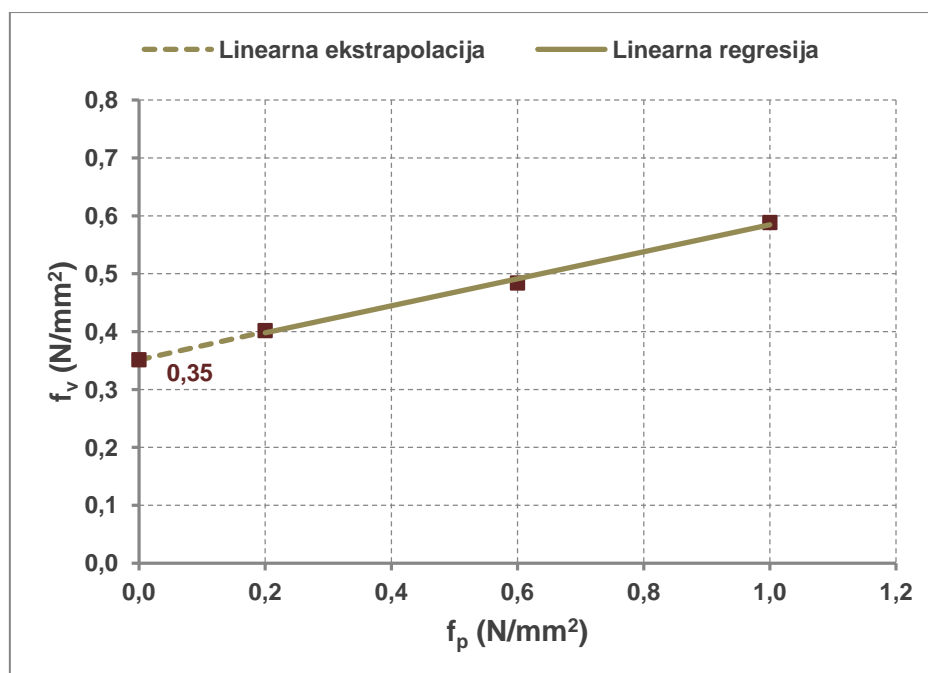
Uzorak (n)	Duljina $l_s$ (mm)	Debljina $t_s$ (mm)	Visina $h_s$ (mm)
1	320	120	250
2	320	120	250
3	320	120	250
4	320	120	250
5	320	120	250
6	320	120	250
7	320	120	250
8	320	120	250
9	320	120	250
10	320	120	250
11	320	120	250
12	320	120	250

Na temelju rezultata ispitivanja, u skladu s (42) proračunati su i prikazani rezultati ispitivanja početne posmične čvrstoće u tablici 2.27.

Tablica 2.27. Rezultati ispitivanja početne posmične čvrstoće

Uzorak (n)	Normalno naprezanje $f_{p,n}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Posmična čvrstoća $f_{v,n}$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	0,20	0,28
2	0,20	0,49
3	0,20	0,43
Srednja vrijednost	0,20	0,40
1	0,60	0,50
2	0,60	0,61
3	0,60	0,34
Srednja vrijednost	0,60	0,48
1	1,00	0,65
2	1,00	0,62
3	1,00	0,50
Srednja vrijednost	1,00	0,59
Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće $f_{v0}$ (N/mm <sup>2</sup> ):	<b>0,35</b>	
Karakteristična početna posmična čvrstoća $f_{vko}$ (N/mm <sup>2</sup> ):	<b>0,28</b>	
Kut unutarnjeg trenja $tg\alpha$ :	<b>0,24</b>	
Karakteristični kut unutarnjeg trenja $tg\alpha_k$ :	<b>0,19</b>	

Iz srednjih vrijednosti posmične čvrstoće prikazanih u tablici 2.27., nacrtan je dijagram, gdje pomoću linearnih regresije i ekstrapolacije iznađena vrijednost početne posmične čvrstoće i kuta unutarnjeg trenja (vidjeti sliku 2.19.).



Slika 2.19. Određivanje početne posmične čvrstoće putem Mohr-Coulomb-ovog zakona čvrstoće

Prikazani rezultati važeći su samo ukoliko se pri izvedbi zidanog mort ne upušta u šupljine zidnog elementa. Kako to nije moguće u stvarnosti, po jednom je uzorku iz svake skupine dopušteno upuštanje morta u šupljine. Upuštanje morta u šupljine zidnog elementa znatno je povećalo posmičnu čvrstoću zidanih prizmi, ali se pri tome zidni element raspucao, što je u skladu s normom (42) nepravilan slom.

Na slici 2.20. prikazani su uzorci pravilnog i nepravilnog sloma u skladu s (42), koji su se dogodili uslijed onemogućavanja ili omogućavanja upuštanja morta u šupljine zidanog elementa.



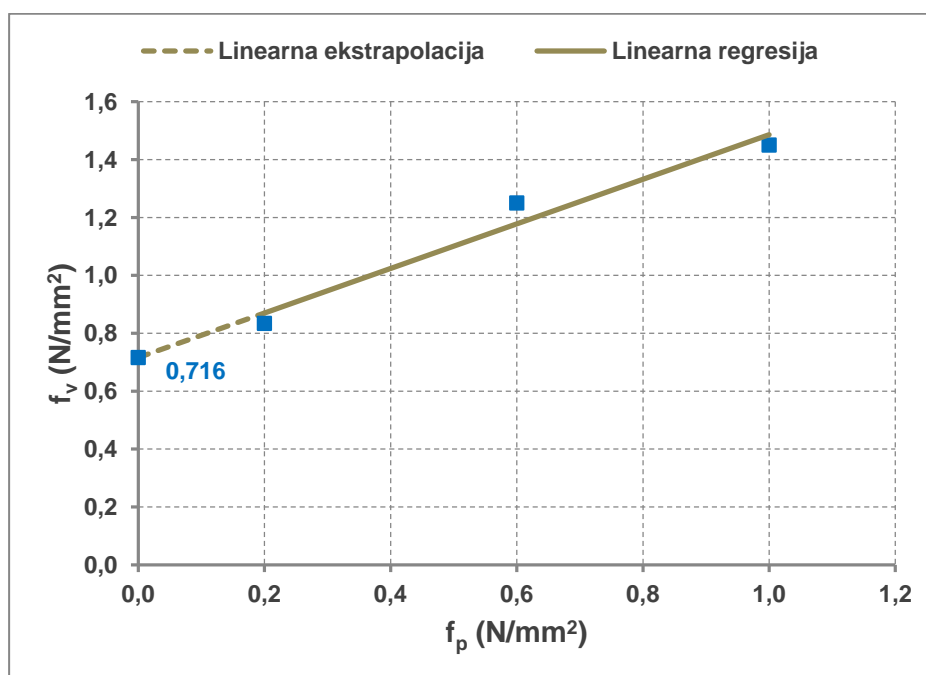
Slika 2.20. Pravilan (lijevo) i nepravilan slom (desno) uzorka

Rezultat ispitivanja ovih uzoraka bio je takav da su uzorci ostvarili karakterističnu posmičnu čvrstoću od  $f_{vk0}=0,72 \text{ N/mm}^2$  što je dvostruko veće od prvotno dane vrijednosti, kada mort nije bio upušten. Pri tome su slom doživjeli svi zidni elementi i mort. Ovdje je prikazan iz razloga što je to stvarno stanje, premda putem norme ovaj slučaj nije obuhvaćen. Pripadni je karakteristični kut unutarnjeg trenja također pokazao porast na  $\text{tg}\alpha_k=0,77$ . Rezultati ispitivanja s nepravilnim slomom uzorka prikazani su u tablici 2.28.

Tablica 2.28. Rezultati ispitivanja početne posmične čvrstoće uzoraka s u šupljine upuštenim mortom

Uzorak (n)	Normalno naprezanje $f_{p,n}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Posmična čvrstoća $f_{v,n}$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	0,20	0,83
2	0,60	1,14
3	1,00	1,45
Karakteristična početna posmična čvrstoća $f_{vk0}$ (N/mm <sup>2</sup> ):		0,72
Karakteristični kut unutarnjeg trenja $\text{tg}\alpha_k$ :		0,77

Vrijednosti dane u tablici 2.28. također su u skladu s preporukama iz (44). Na slici 2.21. dan je prikaz vrijednosti dobivenih ispitivanjima zajedno s linearnim ekstrapolacijom i regresijom u svrhu dobivanja kuta unutarnjeg trenja te početne posmične čvrstoće.



Slika 2.21. Određivanje početne posmične čvrstoće putem Mohr-Coulomb-ovog zakona čvrstoće za uzorke s u šupljine upuštenim mortom

i) Pregled mehaničkih svojstava gradiva

U tablici 2.29. sažeta su mehanička svojstva primijenjenog gradiva, zidanog ispuna, zidnih elemenata, morta, betona armirano-betonskih okvira i nadvoja te uzdužne i poprečne armature dobivena ispitivanjem.

Tablica 2.29. Sažeti prikaz osnovnih mehaničkih svojstava gradiva dobivenih ispitivanjima

Element	Gradivo	Svojstvo	Vrijednost	Jedinice
Zidani ispun	Glineni blok s vertikalnim šupljinama	$f_b$	15,9	N/mm <sup>2</sup>
		$f_{bh}$	2,6	N/mm <sup>2</sup>
	Zide, spoj zidanog elementa i morta	$f_k$	2,7	N/mm <sup>2</sup>
		E	3900	N/mm <sup>2</sup>
		$\epsilon_u$	5,7	mm/m
		$f_{vk0}$	0,7	N/mm <sup>2</sup>
	$tg\alpha_k$	0,8	N/mm <sup>2</sup>	
Armirano-betonski okviri	Beton	$f_c$	45	N/mm <sup>2</sup>
		$f_{yk}$	550	N/mm <sup>2</sup>
	Uzdužna i poprečna armature (prosječna vrijednost)	$f_{uk}$	650	N/mm <sup>2</sup>
	$E_s$	200000	N/mm <sup>2</sup>	
Nadvoji i vertikalni serklaži	Beton	$f_{ck}$	30	N/mm <sup>2</sup>
		$f_{yk}$	550	N/mm <sup>2</sup>
	Uzdužna i poprečna armature (prosječna vrijednost)	$f_{uk}$	650	N/mm <sup>2</sup>
	$E_s$	200000	N/mm <sup>2</sup>	



### 2.3.5. Priprema uzoraka

Pri pripremi uzoraka nužno je bilo pristupiti popravku oštećenih armirano-betonskih okvira, koji su prethodno bili korišteni. Prethodna ispitivanja opisana su u (99). Prema (99), ispitivanje se vršilo do sloma zidanog ispuna, tako da oštećenja na okviru nisu bila značajna. Razina katnog pomaka, koja je dosegnuta pri navedenim ispitivanjima iznosila je za pojedine uzorke najviše  $IDR=1,5\%$ , pri čemu niti na stupovima, niti gredama nije nastao plastični zglob tj. drobljenje betona u kritičnim područjima i tečenje armature.

Prema iskustvima (98), popravak armirano-betonskih okvira nakon ovakvih oštećenja, utječe na gubitak nosivosti u iznosu 15% te na pad krutosti 12%, stoga je popravkom okvira ponovno ostvaren visok stupanj nosivosti.

**Slika 2.22.** Redoslijed postupaka pri pripremi armirano-betonskih okvira uzoraka



Nastala oštećenja pri prethodno provedenim ispitivanjima uključivala su ljuštenje zaštitnog sloja u stopi stupova do dubine zaštitnog sloja i tanke vlačne pukotine uslijed savijanja, na kritičnim područjima stupova i grede. Na slici 2.22 dan je redosljed postupaka pri pripremi armirano-betonskih okvira uzoraka. Na pripremljena mjesta na okviru nanešen je poseban namjenski mort, čija je tlačna čvrstoća bila jednaka čvrstoći okvira te sa čvrstoćom prionjivosti jednakoj vlačnoj čvrstoći okvira. Naziv morta, svojstva i način primjene opisani su u (45).

#### a) Izvedba zidanog ispuna

Pri izvedbi zidanog ispuna primijenjen je mort opće namjene, propisani mort za zidē, vapneno – cementni mort, sačinjen u omjeru v:c:p=1:1:5 (v predstavlja građevno vapno, c cement, a p prirodni pijesak), izveden u laboratoriju te glineni (opečni) zidni elementi s vertikalnim šupljinama Grupe IIb. Debljina reški morta iznosila je  $T_M=0,01$  m, tj. nije bila umanjena u skladu s mjerilom, ali je broj reški odgovarao uzorku u stvarnom mjerilu.

**Slika 2.23.** Redosljed postupaka pri pripremi uzoraka grupe I



Izvedba zidanih ispuna uslijedila je nakon popravka armirano-betonskih okvira, nakon što je utvrđeno da je nanošeni mort za popravak okvira očvrsnuo. Redoslijed postupaka izvedbe za uzorke grupe I opisan je u tablici 2.31., a grupe II u tablici 2.32. Pristup izvedbi zidanog ispuna uzoraka grupe I i II su zbog izvedbe vertikalnih serklaža različiti. Poprečna armatura vertikalnih serklaža, tijekom izvedbe zidanog ispuna polagana je u horizontalne reške morta.

Uzorak tip (III/1) grupe III kao što je navedeno nema zidani ispun, dok je ispun uzorka tip (III/2) puni ispun tj. ispun bez otvora te je stoga neprekidno izveden u istome danu. Svi uzorci su nakon izvedbe ostavljeni u mirovanju 28 dana.

Slika 2.24. Redoslijed postupaka pri pripremi uzoraka grupe II



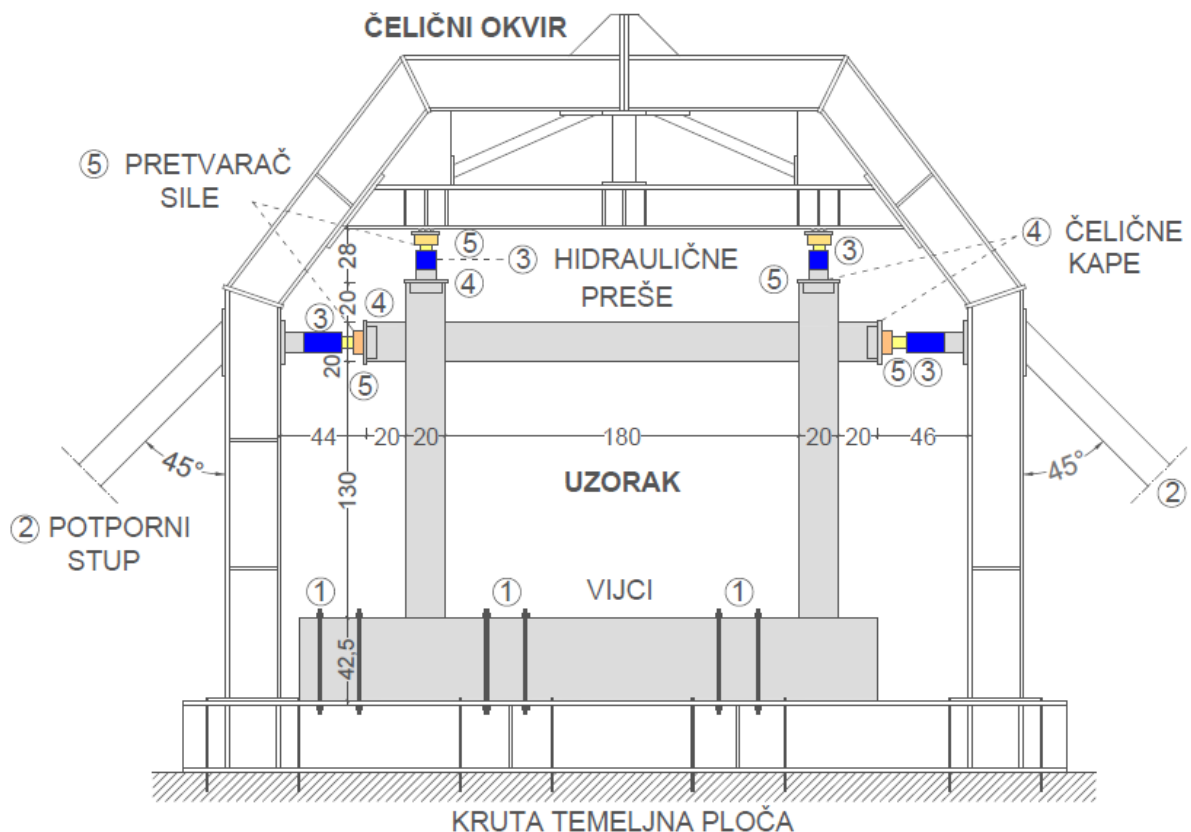


### 2.3.6. Način ispitivanja i raspored mjernih uređaja

Slika 2.22. prikazuje shemu postavke uzorka unutar čeličnog okvira za ispitivanje koji je učvršćen za krutu temeljnu ploču. Čelični okvir je dodatno ojačan kosim čeličnim stupovima s lijeve i desne strane, radi povećanja horizontalne krutosti. Čelične kape bile su podloga za hidraulične preše i pretvarače sile, a bile su smještene na krajevima stupova i greda. Horizontalne hidraulične preše s jedne su strane bile pričvršćene (upete) na stup čeličnog okvira pomoću posebnog nosača, dok je s druge strane bio je smješten pretvarač sile. Vertikalne preše bile su oslonjene na čeličnu kapu, a odupirale su se o čeličnu horizontalnu potpornu gredu iznad uzorka te je na njihovim krajevima bio smješten pretvarač sile, a na njemu čelična ploča s valjcima koji su bili u izravnom dodiru s gredom (pomično-upeti oslonac).

S donje strane uzorka, vezom pomoću vijaka i trenjem između donje potporne grede čeličnog okvira i temeljne grede uzorka, vijcima je spriječeno pomicanje temeljne grede uzorka. Čelična greda s gornje strane uzorka, dodatno je ukrućena u vertikalnom smjeru putem kosnika i čeličnih ploča.

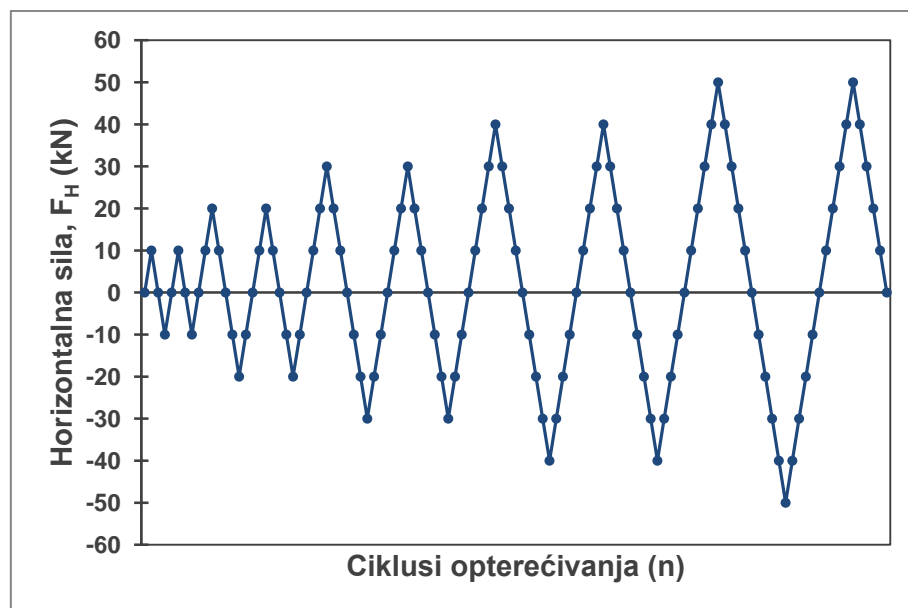
Navedeno vrijedi za sve uzorke armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom ili bez ispuna.



Slika 2.25. Shematski prikaz postavke ispitivanja

Na vrhovima stupova redosljed opreme bio je sljedeći: čelične kape, hidraulične preše, pretvarač sile i čelični držač u kojem su bili smješteni valjci. U vertikalnom smjeru, prema gore, ne i prema dolje, pomaci su bili spriječeni potpornom gredom. Horizontalni pomaci su bili omogućeni, jer su mali čelični valjci postavljeni na kontaktu s gredom unutar posebnog držača. Ovime je izveden horizontalno pomično-upeti oslonac (nije dopuštena rotacija krajnjeg poprečnog presjeka). Na krajevima greda uzorka postavljena je čelična kapa na koju je postavljen pretvarač sile, a na njega hidraulična preša, upeta u čelični okvir na svom drugom kraju pomoću posebnog držača. Ovime je na krajevima greda također spriječena bila rotacija krajnjeg poprečnog presjeka. Temeljna greda je cijelom svojom duljinom bila poduprta čeličnom gredom oslonjenom na krutu čeličnu ploču, kako bi se spriječilo vertikalno pomjerane prema dolje. Horizontalno pomjeranje temeljne grede uzorka spriječeno je mehanički putem čeličnih vijaka i trenja (nepomičan oslonac).

Ispitivanja su provedena primjenom stalnog vertikalnog i horizontalnog cikličkog opterećenja s ponovljenim korakom. Nakon dvostrukog ciklusa razina horizontalnog opterećenja povećavala se za  $\Delta F_H=10,0$  kN, prema slici 2.26. Horizontalno opterećenje je bilo usmjereno na krajeve gornje grede. Vertikalno opterećenje na stupovima održavano je stalnim s vrijednošću  $F_V=365,0$  kN, s odstupanjem  $\pm 10\%$  tijekom ispitivanja. Opterećenje se nanosilo putem hidrauličkih preša (97). Opterećivanje uzoraka ostvareno je kontrolom sile do razine opterećenja pri kojem je uzorak postao fleksibilan nakon čega se pristupilo kontroli pomaka (u jednom smjeru) sve do dostizanja sloma ili gubitka stabilnosti zidanog ispuna. Vrijednost unošenog opterećenja opažana je putem pretvarača sile (46), smještenih na kraju svake hidraulične preše, horizontalne ili vertikalne.



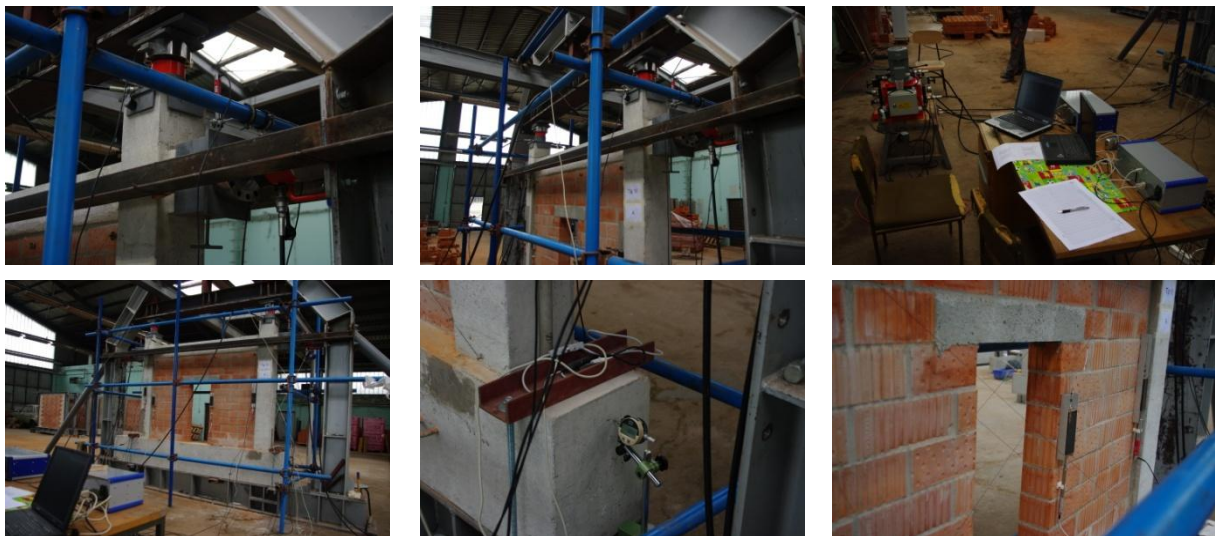
Slika 2.26. Način nanošenja horizontalnog opterećenja

Na slikama 2.28. do 2.31. prikazan su rubni uvjeti te raspored uređaja za mjerenje pomaka, za uzorke grupe I. Jednaki rubni uvjeti i razmještaj uređaja je i za uzorke grupe II, što je prikazano na slikama 2.32. do 2.35. Također, uzorci grupe III imaju jednake rubne uvjete, ali broj mjernih uređaja na zidanom ispunu je manji, nego na uzorcima prethodno navedenih grupa. U skladu sa slikama 2.28. do 2.37., primjenom LVDT-a (Linear Variable Displacement Transducer) (47), mjereni su horizontalni pomaci na lijevom (oznaka 5) i desnom kraju armirano-betonske gornje grede okvira (6), vertikalni pomaci (7 i 8), dijagonalni pomaci armirano-betonskog okvira (9a i 9b) i dijagonalni pomaci (tlačna dijagonala) zidanog ispuna (10a i 10b), gdje slova a i b označavaju prednju i stražnju stranu uzorka. Dijagonalni pomaci mjereni su pomoću napete žice na čijem kraju je postavljen mjerac pomaka. Putem pretvarača sila (5,6,7,8) mjerene su vrijednosti sila.

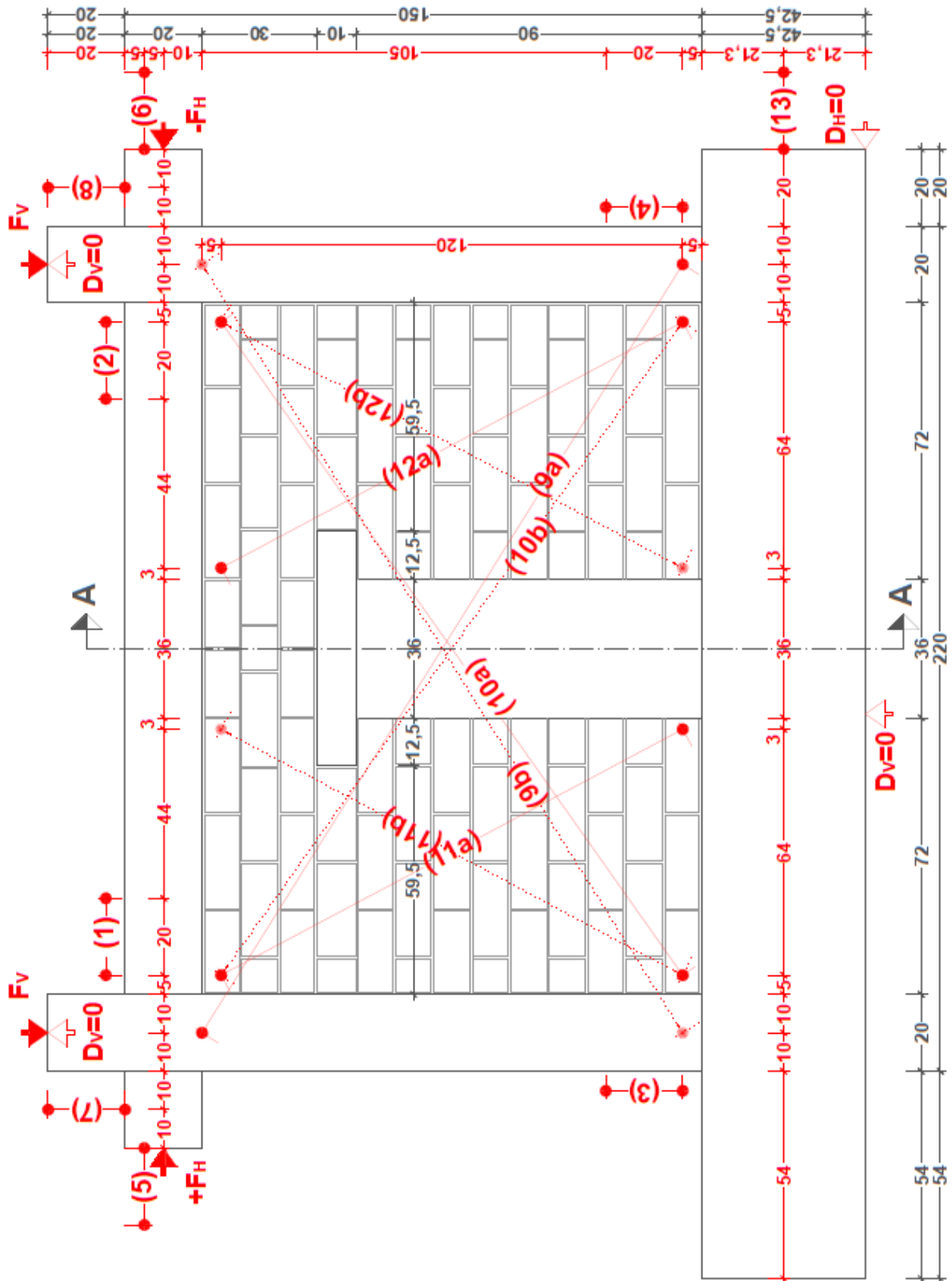
Posebna je pozornost posvećena uzorcima s otvorima u zidanom ispunu. Uzorci s otvorima su pored prethodno navedenih uređaja, bili opskrbljeni dodatnim mjernim uređajima za mjerenje dijagonalnih pomaka zbog mogućnosti pojave zidanog stupa, na dijelovima zidanog ispuna s jedne (11a and 11b) i/ili s druge strane otvora (12a and 12b), u ovisnosti o smještaju otvora, kao što je vidljivo na slikama 2.28. do 2.35. Ukoliko je smještaj otvora bio otklonjen, prethodno navedeni dodatni mjerni uređaji smješteni su samo na veći dio ispuna.

Pri dnu armirano-betonskih stupova uzoraka na vanjskoj strani (3 i 4) te na krajevima gornje grede okvira (između stupova) na gornjoj strani (1 i 2), smješteni su deformetri. Deformetri su korišteni za mjerenje lokalnih deformacija u područjima mogućeg nastanka plastičnih zglobova.

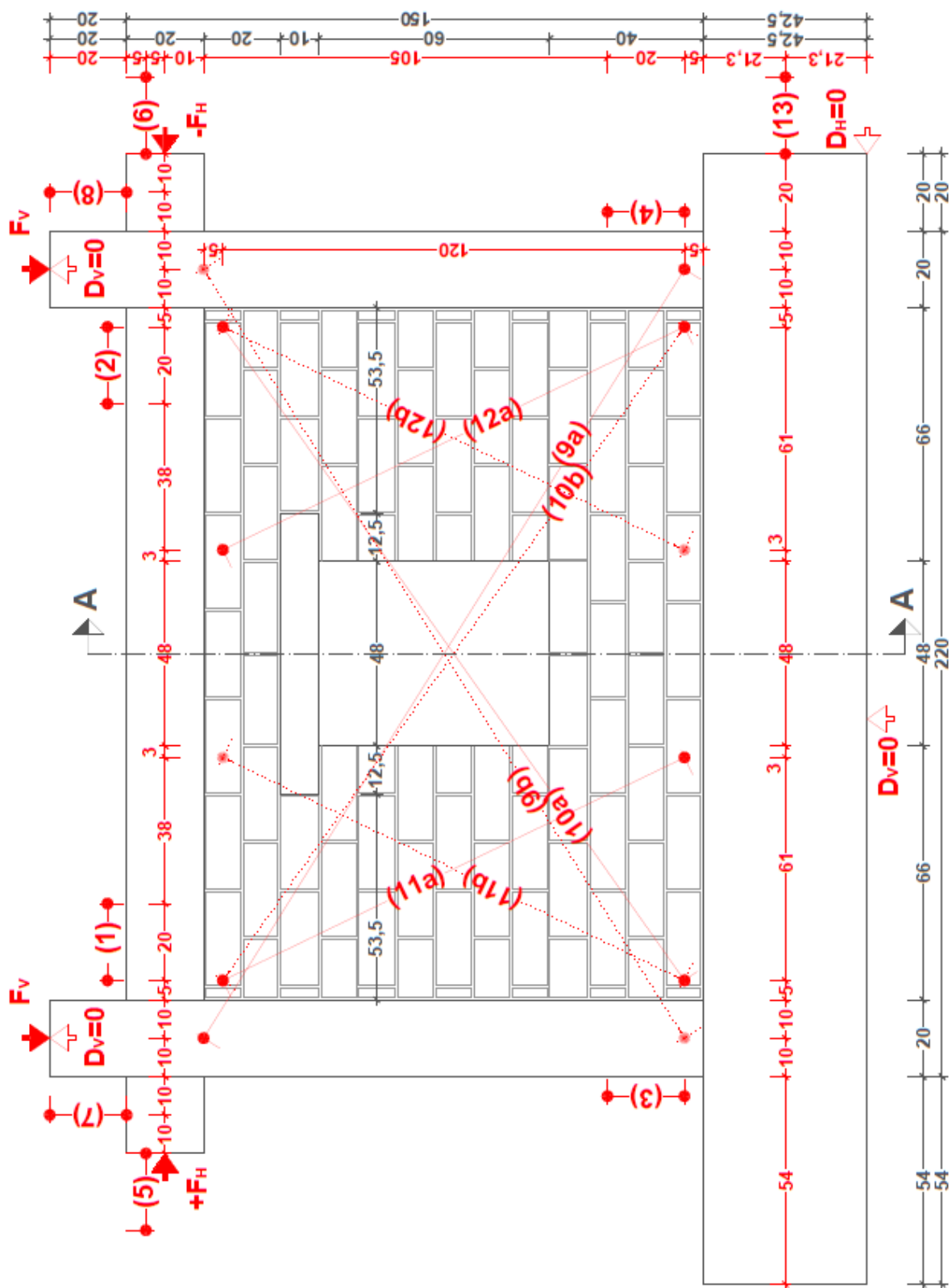
Na krajnjem poprečnom presjeku temeljne grede, horizontalni pomak je opažan putem mikro-ure te su rezultati uzeti u obzir pri analizi.



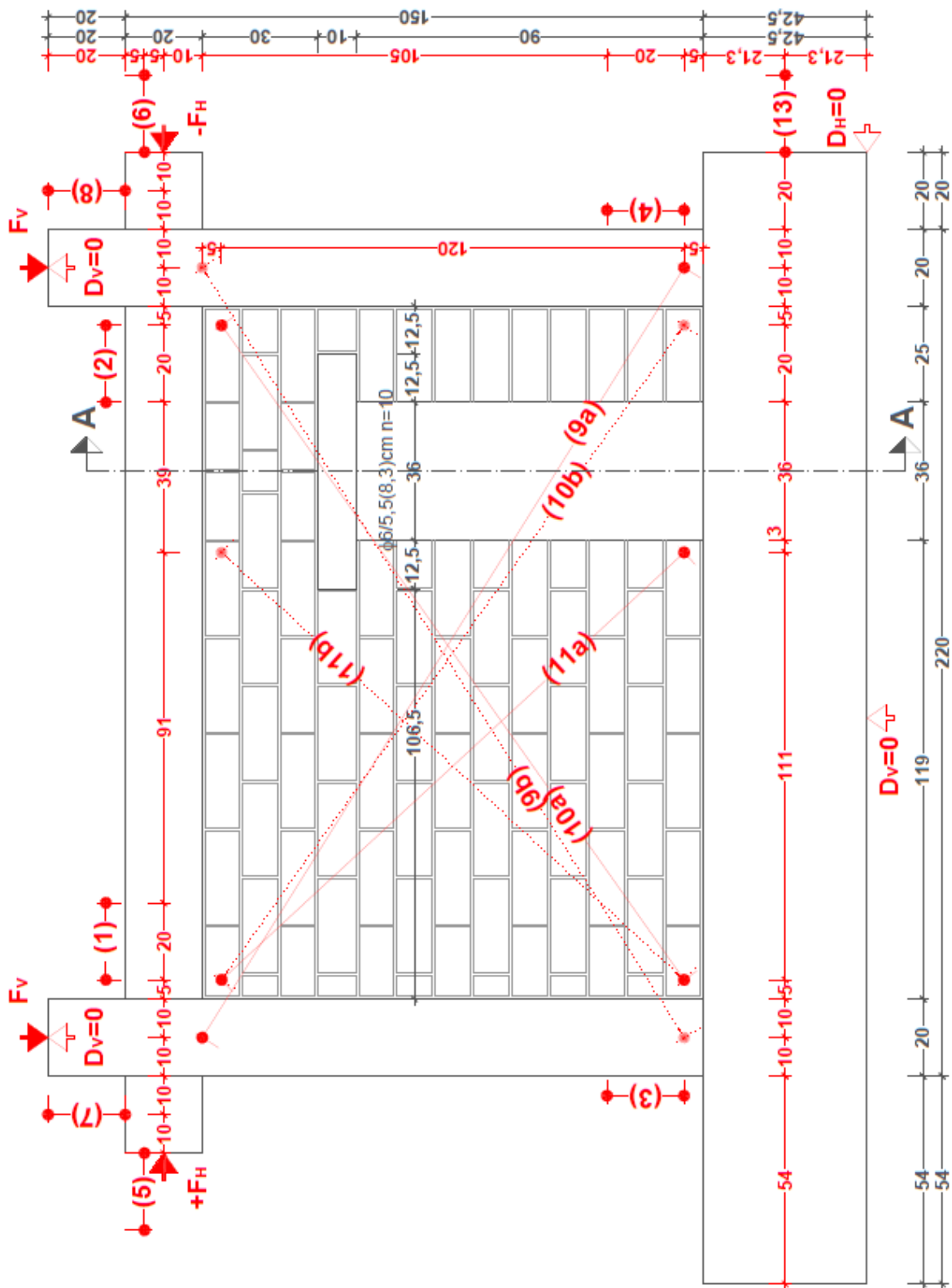
Slika 2.27. Prikaz postavke opreme na uzorak



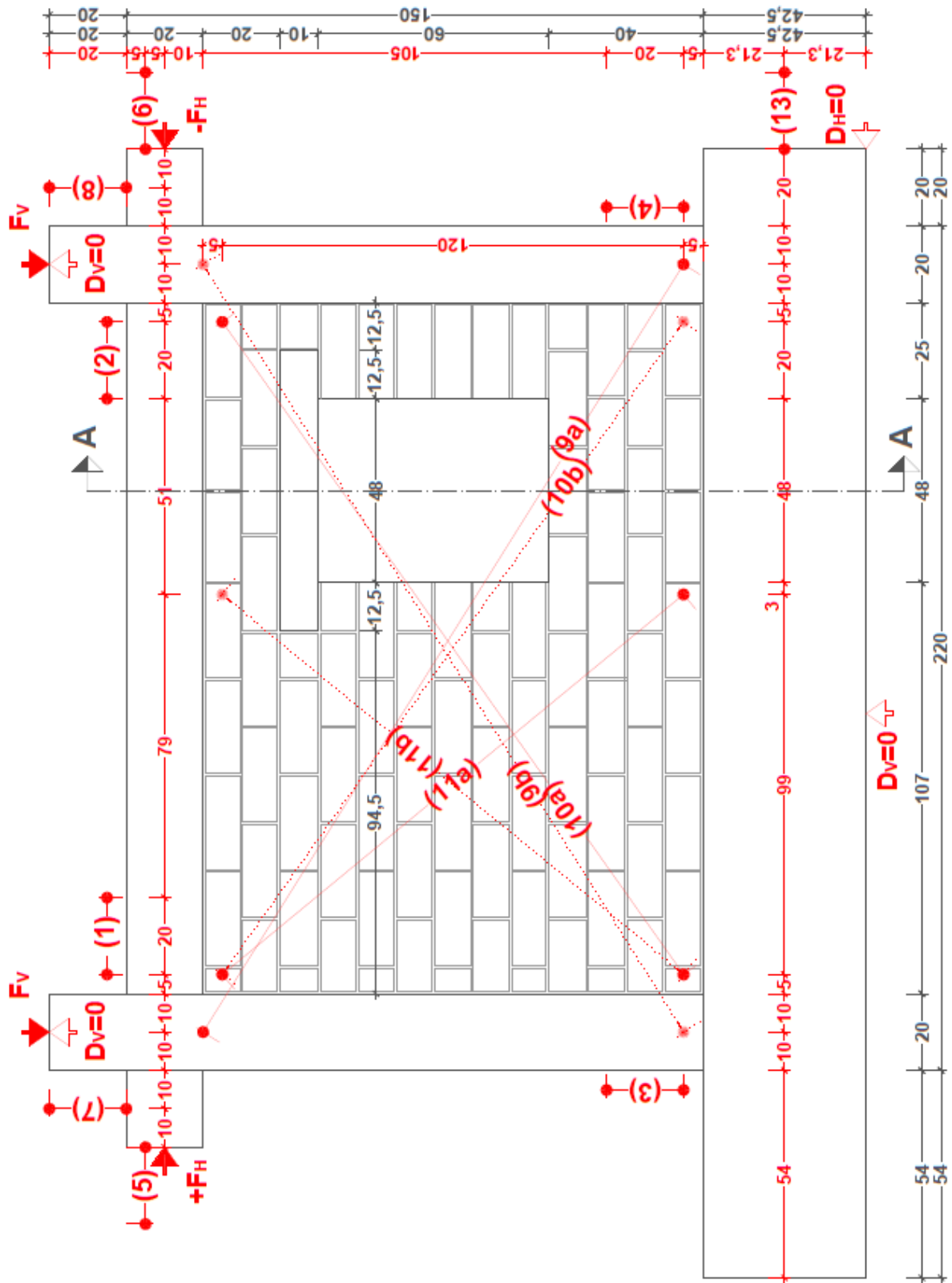
Slika 2.28. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (I/1)



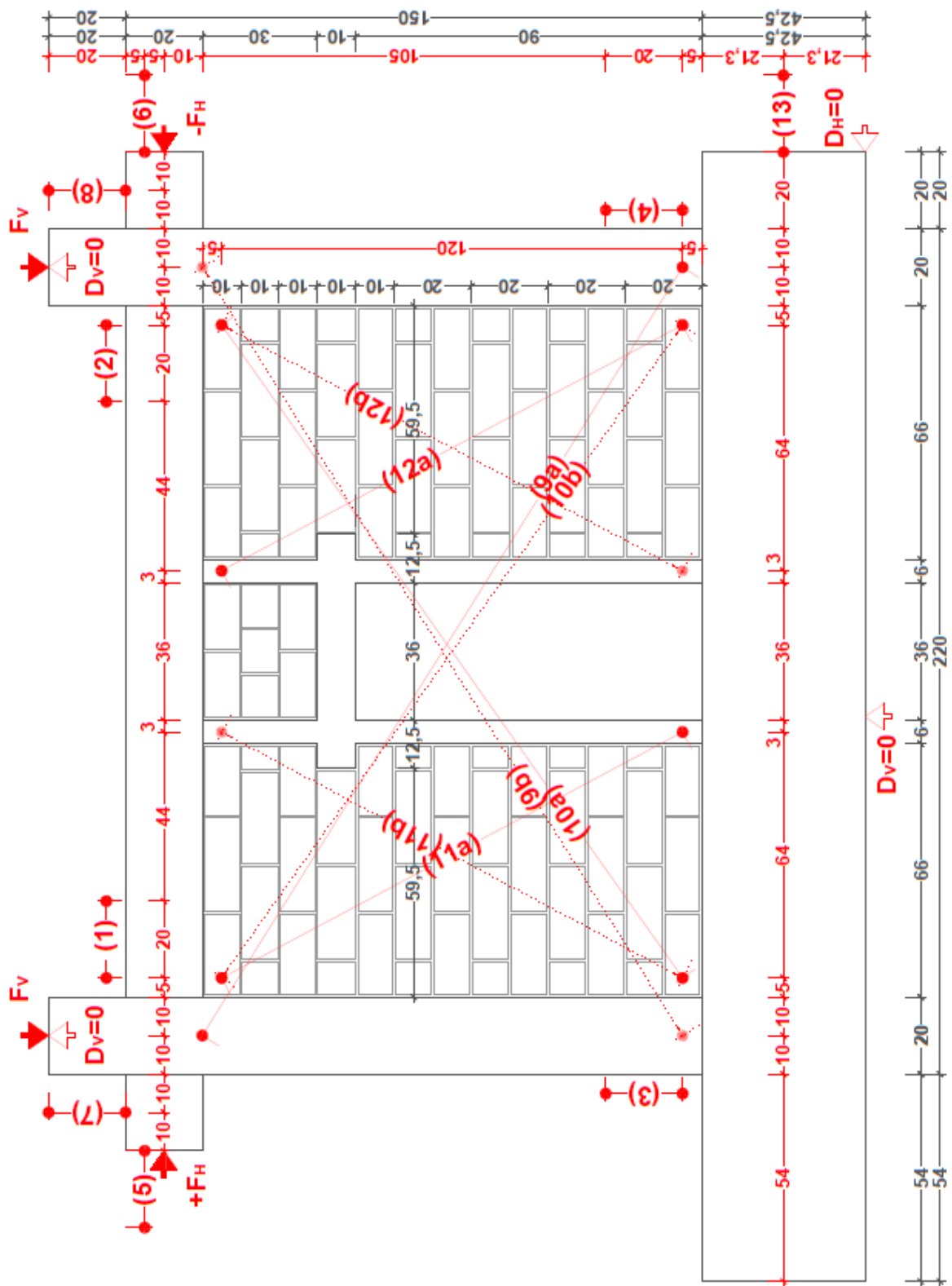
Slika 2.29. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (I/2)



Slika 2.30. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (I/3)

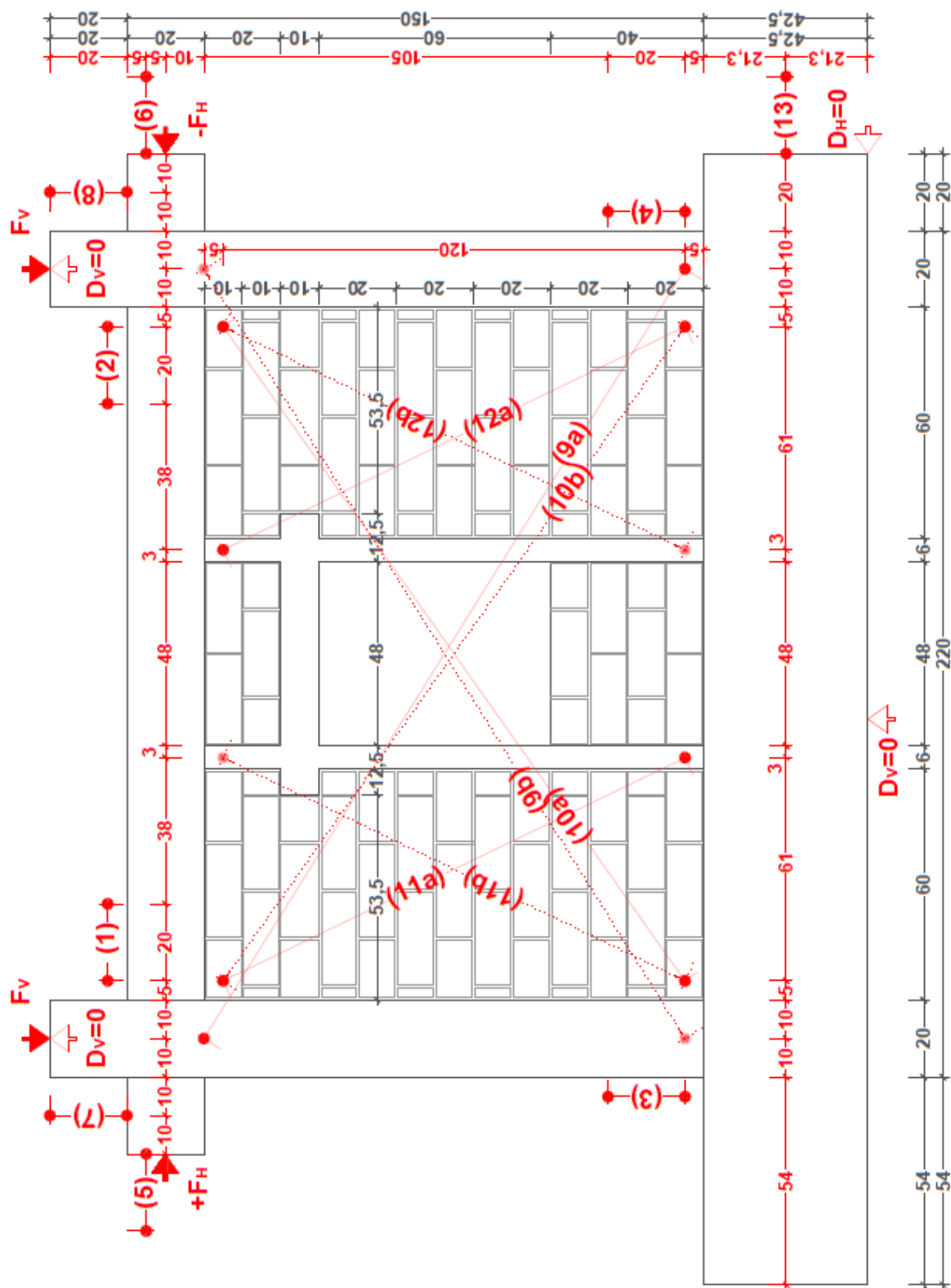


Slika 2.31. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (I/4)

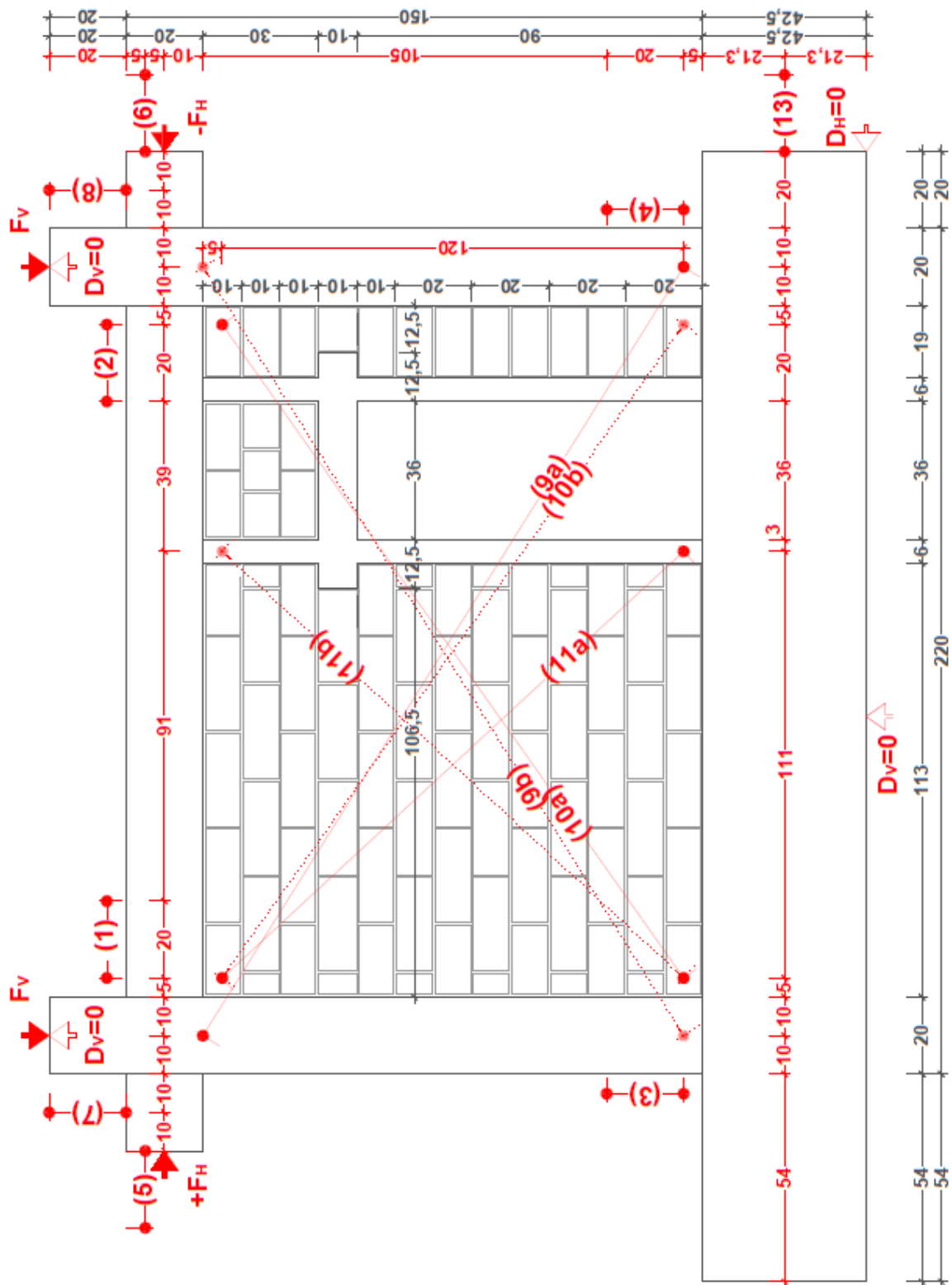


Slika 2.32. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (II/1)

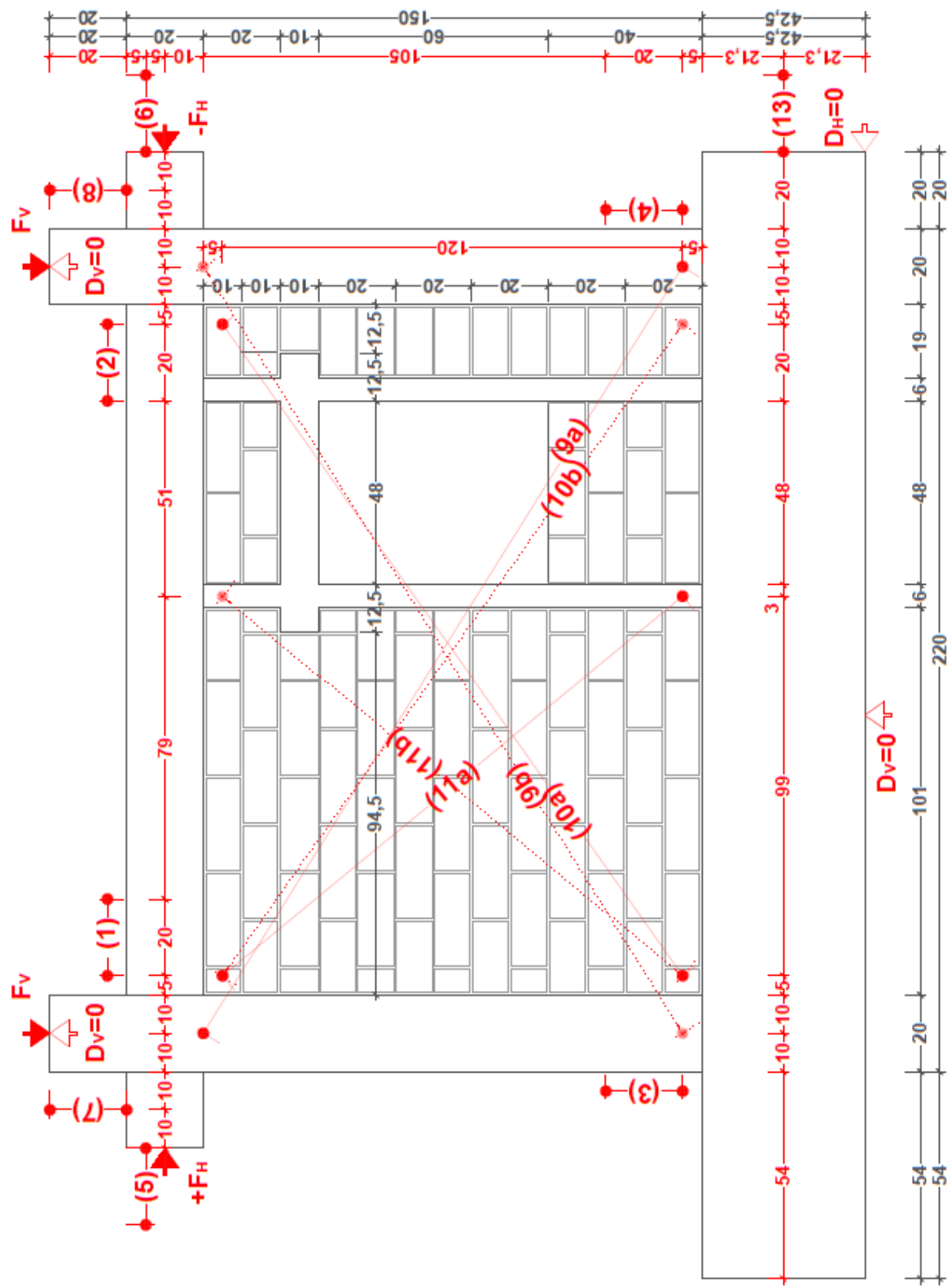




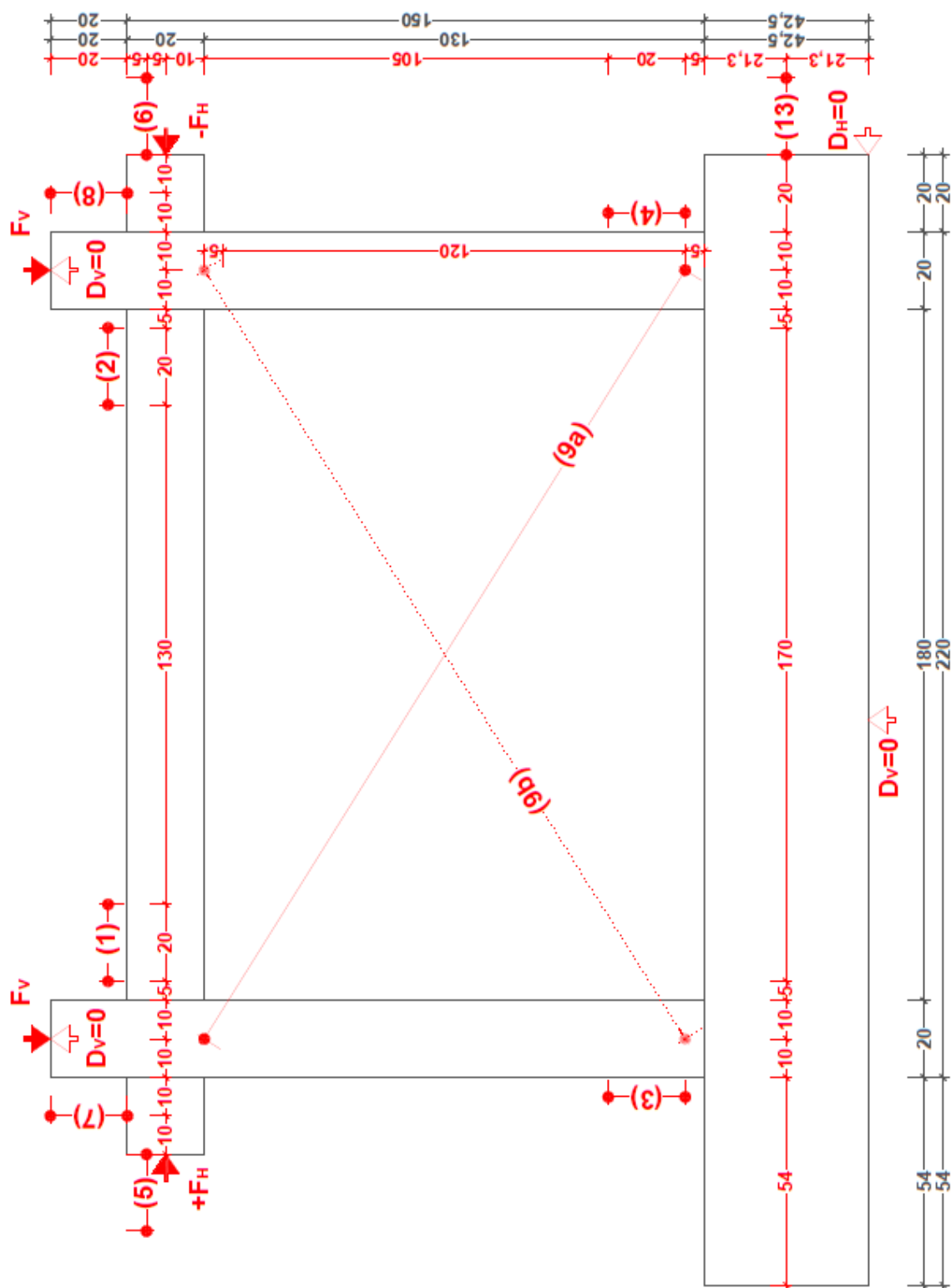
Slika 2.33. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (II/2)



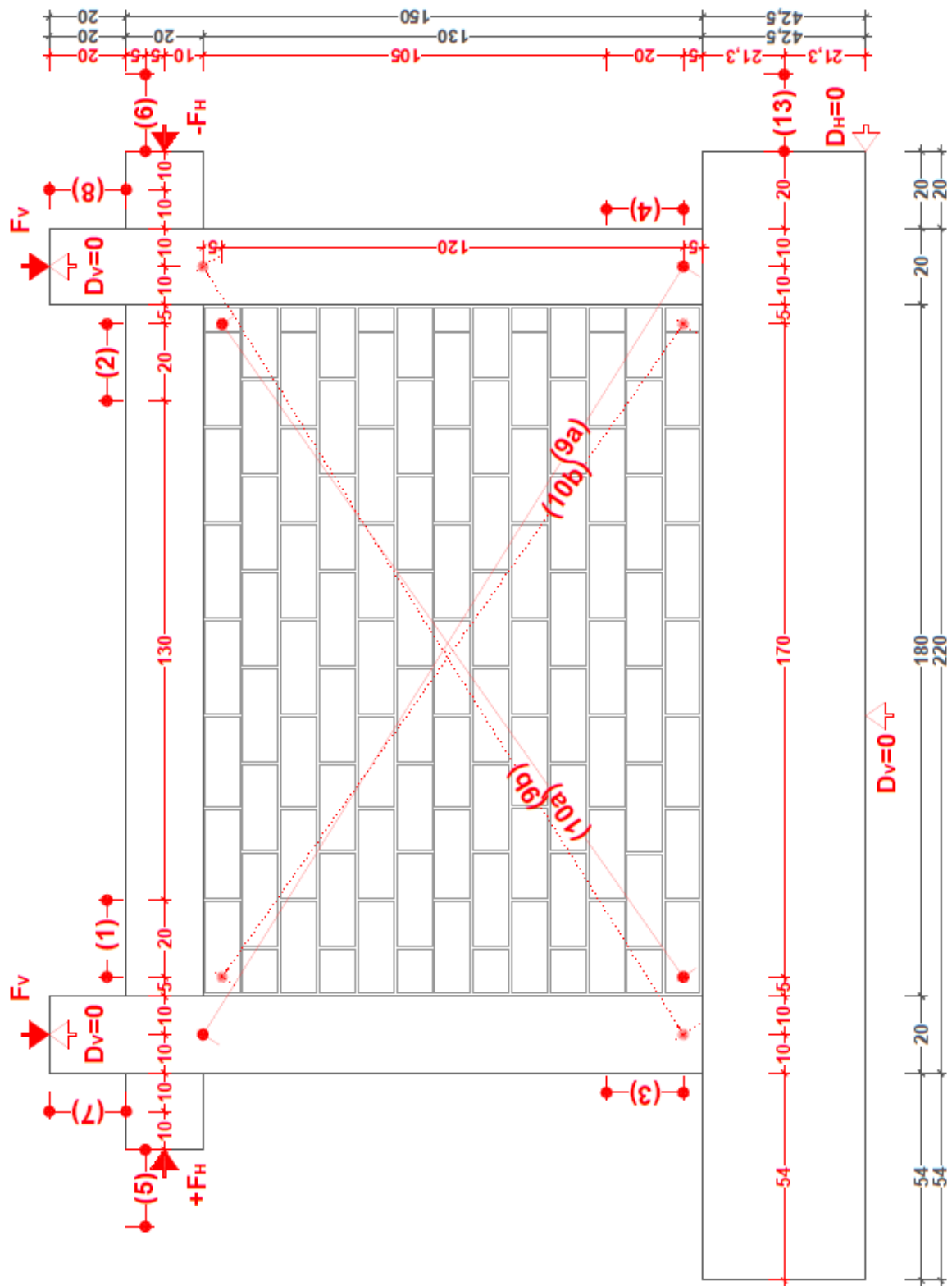
Slika 2.34. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (II/3)



Slika 2.35. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (II/4)



Slika 2.36. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (III/1)



Slika 2.37. Raspored mjernih uređaja i rubni uvjeti za uzorak tip (III/2)

## 2.4. Sažetak i zaključak poglavlja

U ovom poglavlju opisana je priprema i izvedba uzoraka te način ispitivanja. Izmjere armirano-betonskih okvira uzoraka i potrebne količine armature, podatci su dobiveni proračunom prototipa. Primijenjene izmjere otvora, čija ploština u skladu s preporukama zahtijeva izvedbu vertikalnih serklaža, odabrane su kao preporučene vrijednosti za stambene i poslovne objekte. Ispitivanja su provedena na uzorcima u mjerilu M 1:2,5, sa stalnim vertikalnim i horizontalnim cikličkim opterećenjem s ponovljenim korakom do sloma zidanog ispuna.

Pripremljeno je deset uzoraka, čiji je zidani ispun izveden od vapneno-cementnog morta opće namjene i šupljih glinenih blokova. Šuplji glineni blokovi imaju vrlo visoku vertikalnu čvrstoću i nisku horizontalnu čvrstoću te udovoljavaju zahtjevima iz (24). Otvori u zidanom ispunu smješteni su s otklonom ili bez otklona te s vertikalnim serklažima i bez njih. Dva su uzorka (grupa III) granični slučajevi, jer jedan nema izveden ispun, dok drugi ima puni ispun.

Mjerene su sile i pomaci pomoću uređaja DEWE-BOOK te računalnog programa DEWESoft 6.6.7. Posebno su opažani dijagonalni pomaci uzorka te dijelova zidanog ispuna pokraj otvora.

## Poglavlje 3.0.

# REZULTATI PROVEDENIH ISPITIVANJA

### 3.1. Uvod

U ovom poglavlju opisani su rezultati provedenih ispitivanja uzoraka armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom, osobito utjecaj otvora na način sloma. Uspoređeni su načini sloma, tijek oštećivanja uzoraka, razine oštećenosti i histerezne te pripadne primarne krivulje uzoraka. Opisana je pojava dijagonalnih i ne-dijagonalnih vlačnih pukotina u zidanom ispunu koje predstavljaju stvarne tlačne dijagonale. Osobit je naglasak dan utjecaju vertikalnih serklaža oko otvora.

### 3.2. Razine oštećenosti i načini sloma

Pri opisu načina sloma i/ili slijeda više načina sloma zidanog ispuna, primijenjeno je osnovno nazivlje vrsta sloma ziđa: slom savijanjem, pri kojemu se događa vlačni slom horizontalne reške morta i tlačni slom zidnih elemenata i morta u uglovima, zatim slom horizontalnim klizanjem po reškama morta i posmični slom, pri kojemu nastaju dijagonalne vlačne pukotine kroz mort ili kroz zidne elemente i mort. Vrsta i razmjer pukotina zidanog ispuna uzoraka upućuju na način i oblik sloma.

Tijek raspucavanja ispitnih uzoraka opisan je razvrstavanjem na razine oštećenosti: neznatno, osrednje, teško, oštećenje te stanje koje je prethodilo slomu ispuna, s oznakama I, II, III i IV, u skladu s (19). Oštećenosti na armirano-betonskom okviru opisana su zasebno pod oznakom V. Svojstva histereznih i primarnih krivulja opisana su zasebno.

#### 3.2.1. Uzorci grupe I

a) Uzorak tip (I/1): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom s otvorom za vrata smještenim u sredini ispuna bez vertikalnih serklaža

a-1) Opis tijeka oštećivanja s obzirom na razine oštećenosti

Slijed oštećivanja uzorka opisan je prema prethodno navedenim mjerilima na sljedeći način:

- I. Prve pukotine, odvajanje morta na dodiru grede i ispuna te kose pukotine kroz zidne elemente i mort u blizini otvora usmjerene prema gornjim uglovima ispuna, dogodile su se pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,39$  mm (IDR=0,10%) uz pripadnu horizontalnu silu u iznosu 200,0 kN. Nadvoj i ispun međusobno se odvajaju pri horizontalnom pomaku od  $\pm 2,02$  mm (IDR=0,14%). Istodobno visinom ispuna, u području između armirano-betonskih stupova i otvora, nastaje niz kratkih dijagonalnih pukotina.

- II. U horizontalnoj ravni iznad nadvoja, čitavom dužinom ispuna, nastaje slom po reški morta pri horizontalnom pomaku od  $\pm 2,60$  mm (IDR=0,19%) te se uslijed toga ispun razlaže na tri sastavna dijela, od čega po jedan lijevo i desno od otvora čija je visina jednaka visini otvora te preostali dio iznad otvora čija je duljina jednaka duljini ispuna. Opisanom pomaku pripada najveća dosegnuta vrijednost horizontalne sile od 260,0 kN. U nastalim dijelovima ispuna, lijevo i desno od otvora, jasno su vidljive dijagonalne pukotine kroz zidne elemente i mort, od jednog ka drugom uglu. Drobljenje uglova u blizini otvora postaje učestalo.
- III. Znatno proširenje prethodno nastalih dijagonalnih pukotina, u dijelovima ispuna lijevo i desno od otvora, nastaje pri horizontalnom pomaku od  $\pm 4,91$  mm (IDR=0,35%).
- IV. Ispun se odvaja od armirano-betonskih stupova te drobljenje uglova u blizini otvora postaje učestalo što vodi do ljuštenja bočnih strana zidnih elemenata te drobljenja reški morta. Ispun gubi nosivost pri horizontalnom pomaku od  $\pm 7,07$  mm (IDR=0,50%) dijagonalnim slomom te drobljenjem uglova dijelova ispuna lijevo i desno od otvora. Ispun je postao nestabilan u vlastitoj ravnini.
- V. Na armirano-betonskom okviru, uslijed posmika, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 5,90$  mm (IDR=0,42%), niz vlasastih pukotina nastao je u vlačnom području pri dnu i vrhu stupa. Normalna deformacija pri dnu stupa pri tome je iznosila  $\pm 0,95\%$ . Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 7,07$  mm (IDR=0,50%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 1,28\%$ , prethodno nastale pukotine su se produljile visinom poprečnom presjeka. Na gredi nisu uočene pukotine tijekom ispitivanja.

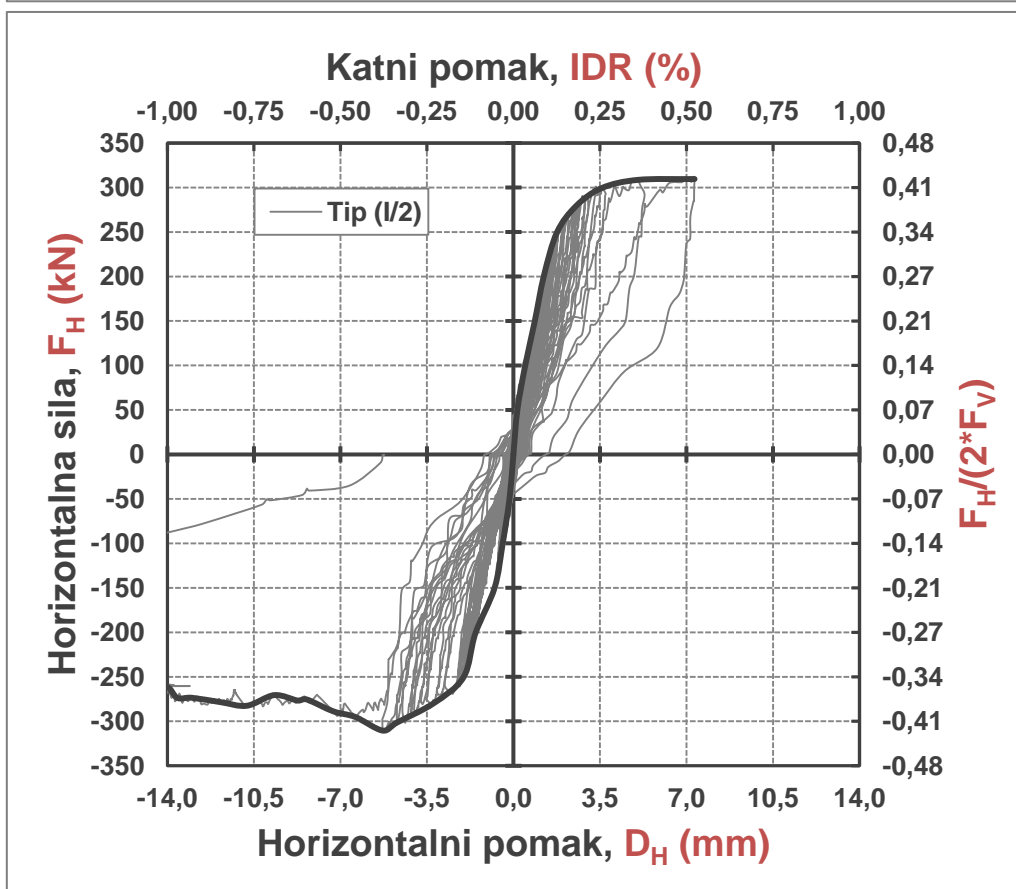
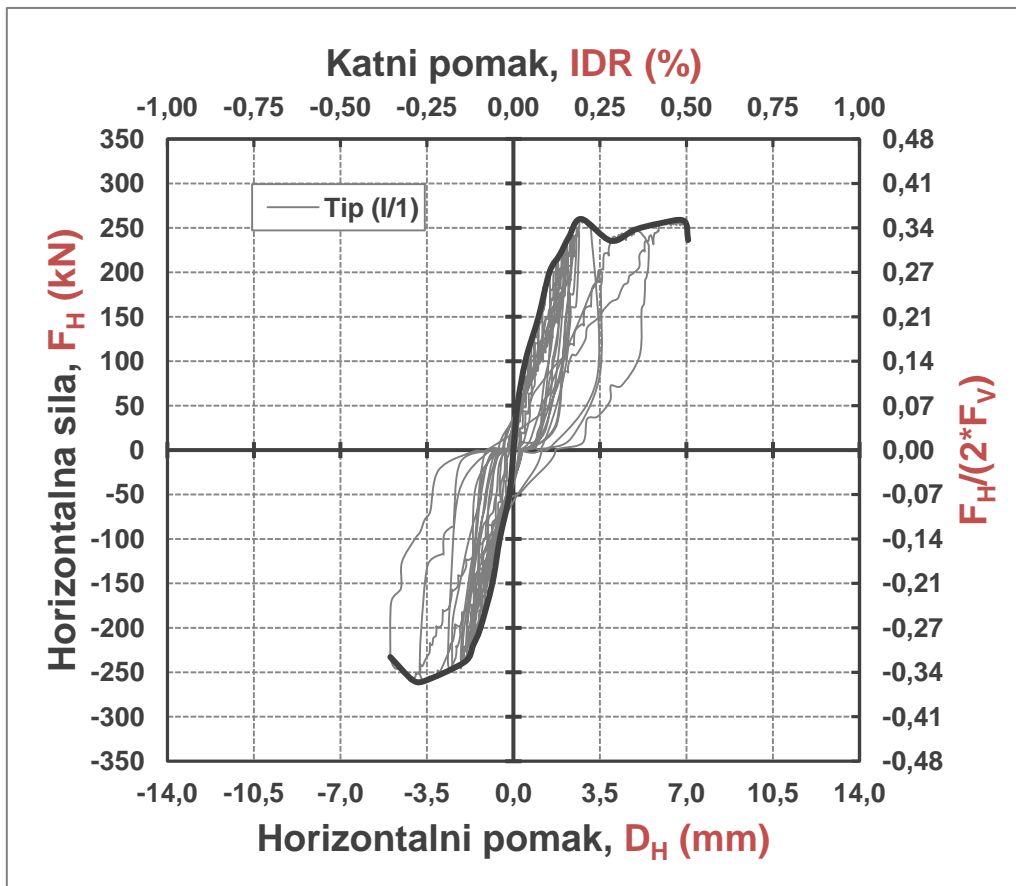
Na slici 3.2. (a) dan je prikaz oštećenosti koje je prethodilo višestrukom slomu zidanog ispuna uzorka tip (I/1) te pripadni geometrijski odnosi unutar ispuna nastali pri tome. Fotografija na slici 3.11. (a) prikazuje oštećenosti uzorka nakon provedbe ispitivanja.

#### a-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

Višestruki način sloma ispuna počinje slomom horizontalne reške morta u ravni iznad nadvoja, čime se ispun razlaže na tri dijela. Njih čine dijelovi lijevo i desno od otvora, jednakih izmjera, koji imaju duljinu jednaku razlici polovine duljine ispuna i polovine duljine otvora,  $L_p=(L_I-L_O)/2=0,725$  m te visinu jednaku visini otvora,  $H_p=H_O=0,90$  m. Treći dio, tj. dio iznad otvora, imao je duljinu jednaku duljini ispuna,  $L_s=L_I=1,80$  m te visinu jednaku razlici visini ispuna i visine otvora,  $H_s=H_I-H_O=0,40$  m.

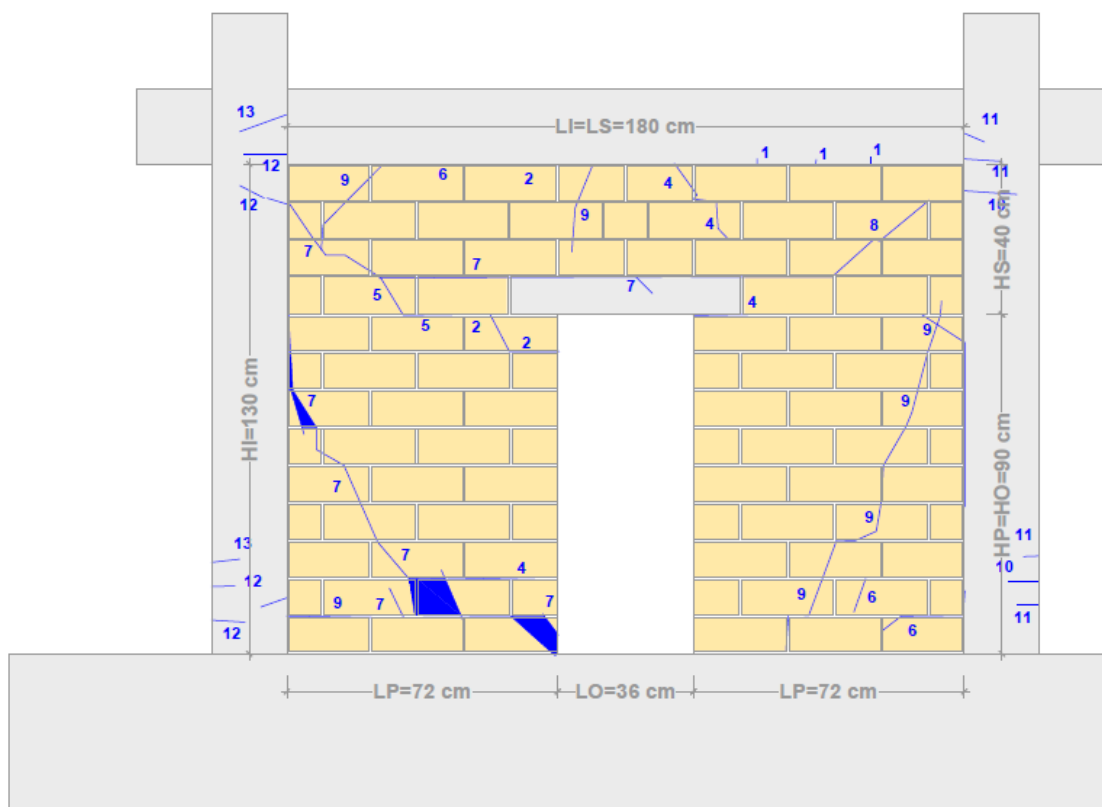
Prevladava slom savijanjem dijela ispuna (zidani stup) pored otvora, odnosa izmjera stranica  $H_p/L_p=0,90/0,72=1,24$ , predstavljen drobljenjem uglova i vlačnim slomom u stopama ovog dijela, ali uz prisutnost dijagonalnih pukotina, što uzrokuje gubitak stabilnosti i slom zidanog ispuna.



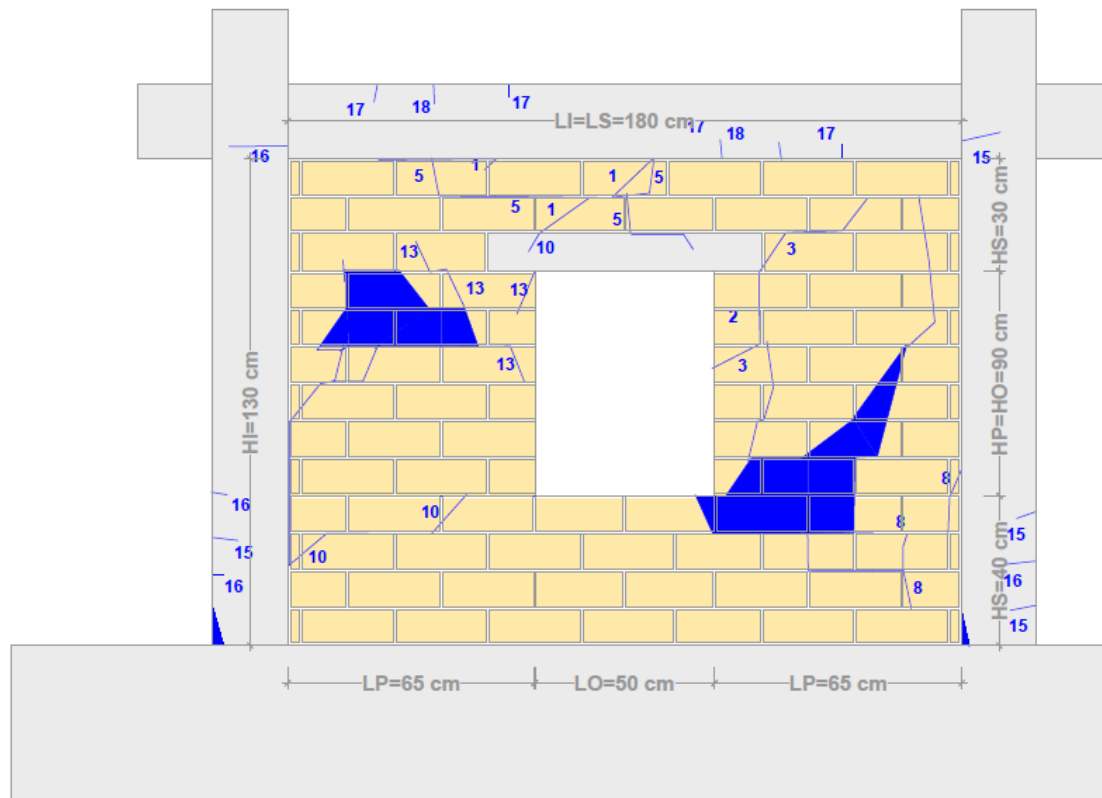


Slika 3.1. Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (I/1) i tip (I/2)

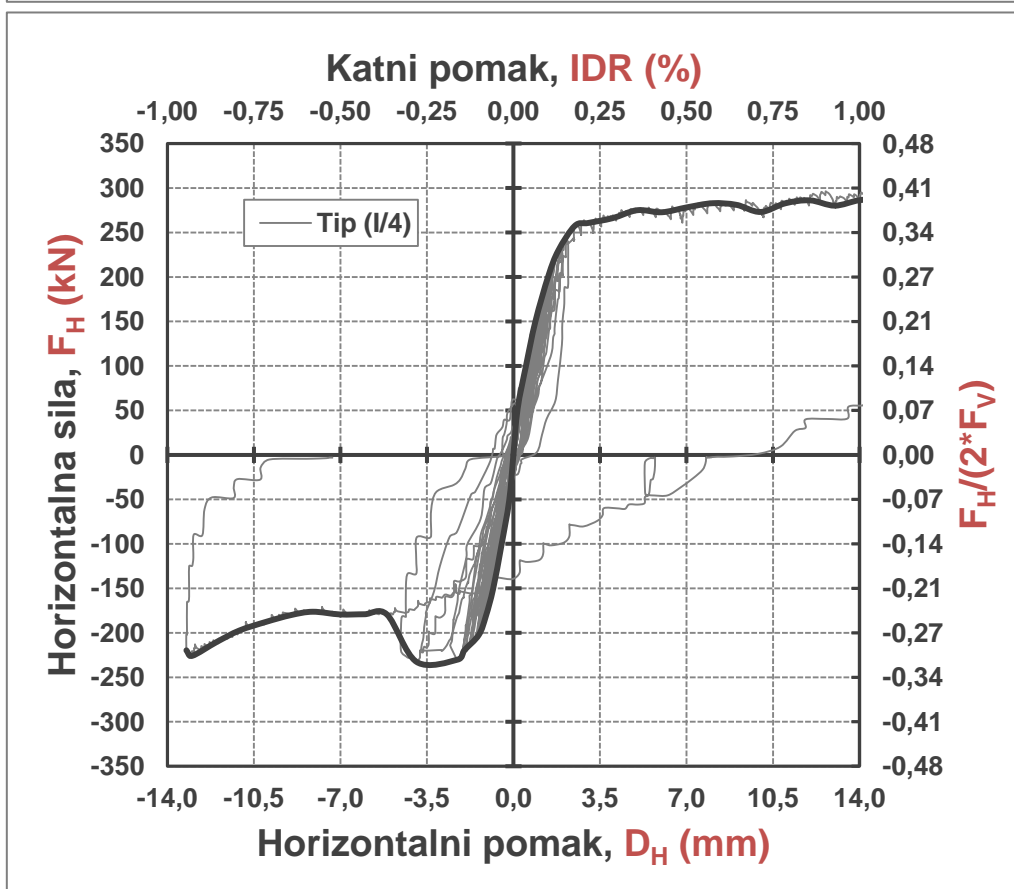
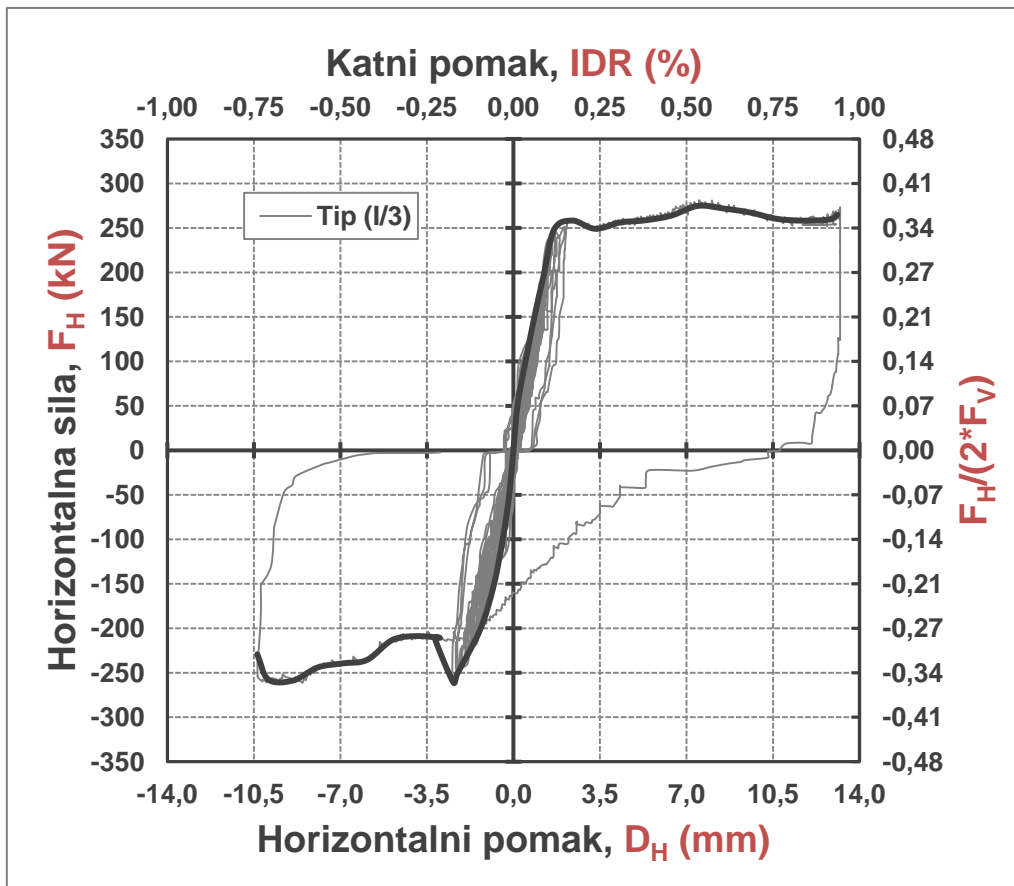
a) UZORAK TIP (I/1)



b) UZORAK TIP (I/2)

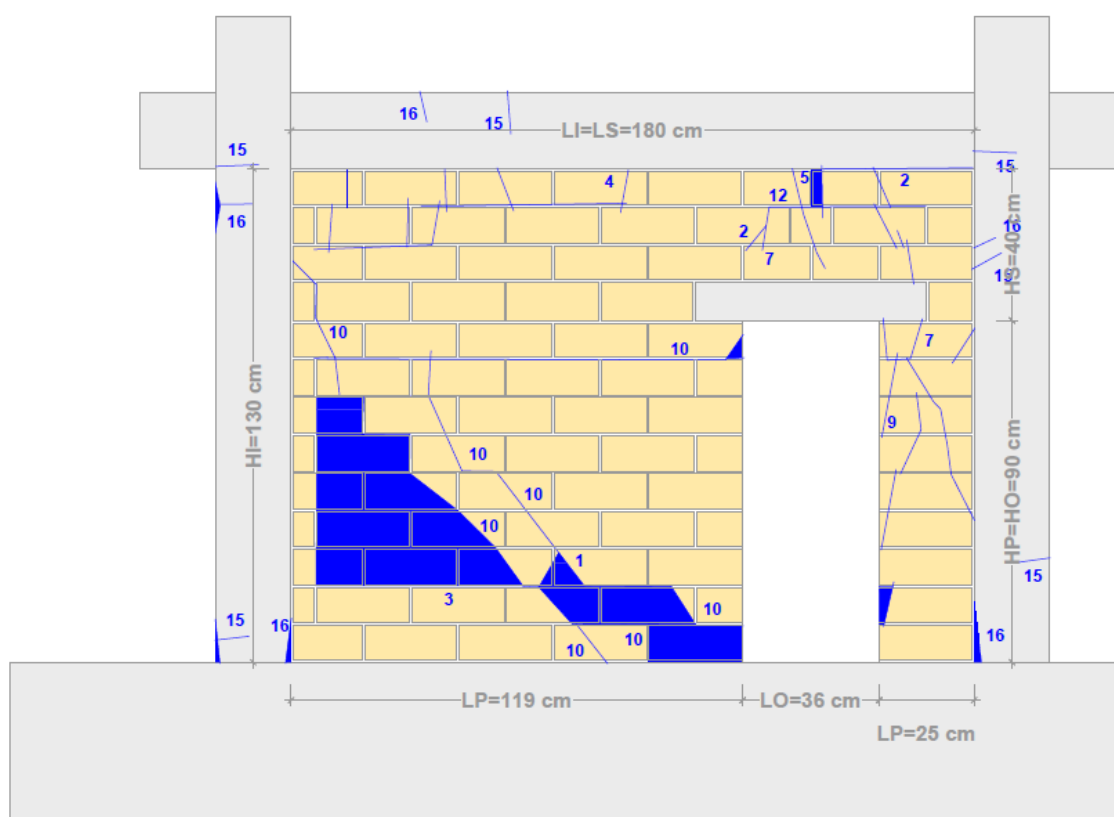


Slika 3.2. Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (I/1) i b) tip (I/2)

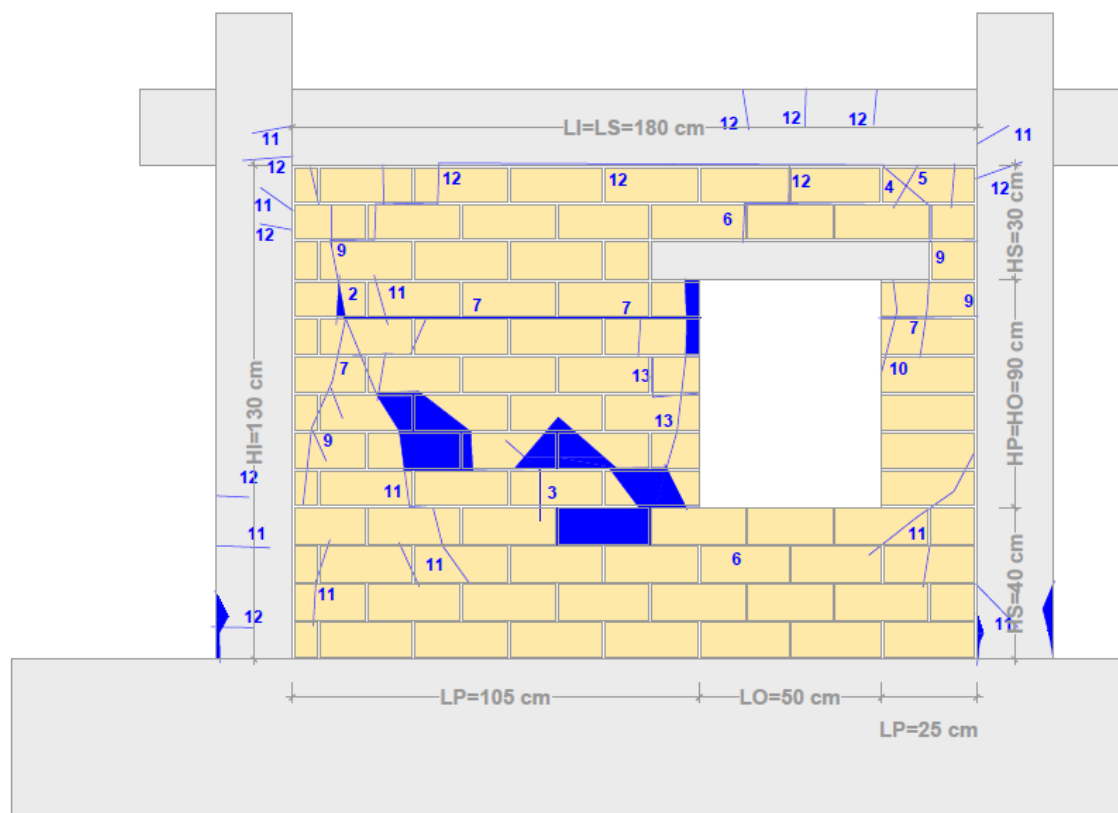


Slika 3.3. Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (I/3) i tip (I/4)

a) UZORAK TIP (I/3)



b) UZORAK TIP (I/4)



Slika 3.4. Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (I/3) i b) tip (I/4)

b) Uzorak tip (I/2): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom s otvorom za prozor smještenim u sredini ispuna bez vertikalnih serklaža

b-1) Opis tijeka oštećivanja s obzirom na razine oštećenosti

Slijed oštećivanja uzorka opisan je prema prethodno navedenim mjerilima na sljedeći način:

- I. Prva pukotina nastaje na dodiru grede i ispuna pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,47$  mm (IDR=0,11%) uz pripadnu horizontalnu silu u iznosu od 180,0 kN. Dijagonalne pukotine nastajale su postepeno kroz zidne elemente i mort između grede armirano-betonskih okvira i nadvoja. U uglovima otvora, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,66$  mm (IDR=0,12%), nastaje horizontalna vlačna pukotina duljine zidnog elementa. Pri tome na suprotnim uglovima nastaju višestruke kose pukotine. U dijelu ispuna koji prati visinu otvora, lijevo i desno od otvora, porastom horizontalnog pomaka na  $\pm 2,07$  mm (IDR=0,16%), nastaju tanke dijagonalne vlačne pukotine. Ispun se u potpunosti odvaja od gornje grede armirano-betonskog okvira te uz vertikalni rub otvora nastaju vertikalne pukotine.
- II. Prirast horizontalnog pomaka na  $\pm 2,49$  mm (IDR=0,18%) uzrokuje novi niz dijagonalnih pukotina, dok se postojeće povećavaju. Iznad nadvoja i ispod otvora horizontalnim slomom reške morta ispun se razlaže na dijelove; dva dijela čini dio ispune lijevo i desno od otvora i visine su otvora, dok su druga dva iznad i ispod otvora, a protežu se čitavom duljinom ispuna. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 3,94$  mm (IDR=0,28%) postignuta je najveća vrijednost horizontalne sile od 310,0 kN. Postojeće pukotine se produljuju i šire, dok se vertikalni rub otvora počinje odvajati. Uglovi ispuna se drobe te je primjetno pomicanje bočnih strana zidnih elemenata.
- III. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 6,05$  mm (IDR=0,49%) dijagonalne vlačne pukotine se znatno produljuju i šire dijelom ispuna lijevo i desno od otvora. Područje u blizini uglova ispuna zahvaćeno je pomicanjem bočnih strana zidnih elemenata, dok u blizini otvora one ispadaju. Odvajanje na dodiru stupa armirano-betonskog okvira i ispuna primjetno u donjoj polovini visine ispuna. Pri tome u gornjem uglu ispuna, drobljenje zidnih elemenata i morta postaje više naglašeno. Kada je horizontalni pomak dosegao razinu  $\pm 12,02$  mm (IDR=0,86%), područje u blizini uglova otvora biva potpuno zdrobljeno, dok u gornjim uglovima nastaje pomicanje bočnih strana zidnih elemenata.
- IV. Oštećenje dijelova ispuna lijevo i desno od otvora uslijed višestrukih dijagonalnih vlačnih pukotina pri kutu od  $65^\circ$  prema horizontali i drobljenja uglova u blizini otvora, dovelo je do gubitka nosivosti ispuna pri horizontalnom pomaku od  $\pm 18,00$  mm (IDR=1,29%).

V. Na armirano-betonskom okviru, uslijed savijanja, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 6,05$  mm (IDR=0,49%), nastaje niz vlasastih u vlačnom području pri dnu i vrhu stupa. Normalna deformacija pri dnu stupa iznosila je pri tome  $\pm 0,88\%$ . Kada je dosegnut horizontalni pomak od  $\pm 8,03$  mm (IDR=0,57%), normalna deformacija pri dnu stupa iznosila je  $\pm 1,25\%$  i vlačne pukotine su se produljile, dok je u tlačnom području nasuprot nastalo ljuštenje zaštitnog sloja. Tanke vlačne pukotine na gredi pojavile su se pri horizontalnom pomaku od  $\pm 10,86$  mm (IDR=0,78%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 0,95\%$ . Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 18,00$  mm (IDR=1,29%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 3,00\%$ , pukotine pri dnu stupa prolaze čitavom visinom poprečnog presjeka te se odvaja zaštitni sloj.

Na slici 3.2. (b) dan je prikaz oštećenosti koje je prethodilo višestrukom slomu zidanog ispuna uzorka tip (I/2) te pripadni geometrijski odnosi unutar ispuna nastali pri tome. Fotografija na slici 3.11. (b) prikazuje oštećenosti uzorka nakon provedbe ispitivanja.

#### b-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

Višestruki način sloma ispuna počinje slomom horizontalne reške morta u dvije ravni; iznad nadvoja i ispod otvora za prozor, čime se zidani ispun razlaže na četiri dijela. Dijelovi lijevo i desno od otvora imali su duljinu jednaku razlici polovine duljine ispuna i polovine duljine otvora  $L_P=(L_I-L_O)/2=0,65$  m te visinu jednaku visini otvora  $H_P=H_O=0,6$  m. Bili su jednakih izmjera. Druga dva dijela, tj. dio iznad te ispod otvora, imali su duljinu ispuna  $L_S=L_I=1,80$  m. Visina gornjeg dijela bila je jednaka razlici visine ispuna i zbroja visine otvora i visine parapeta tj.  $H_S=H_I-H_O-H_N=0,30$  m, dok je visina donjeg dijela bila jednaka visini parapeta tj.  $H_S=H_N=0,40$  m.

Prevladava posmični slom dijela zidanog ispuna pored otvora (zidani stup), odnosa izmjera stranica  $H_P/L_P=0,60/0,65=0,92$ , predstavljen dijagonalnom vlačnim pukotinama, koje su dovele do urušavanja čitavog zidanog ispuna.

c) Uzorak tip (I/3): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom s otvorom za vrata smještenim s otklonom bez vertikalnih serklaža

#### c-1) Opis tijeka oštećivanja s obzirom na razine oštećenosti

Slijed oštećivanja uzorka opisan je prema prethodno navedenim mjerilima na sljedeći način:

- I. Prve pukotine nastaju pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,31$  mm (IDR=0,09%) uz pripadnu horizontalnu silu u iznosu 180,0 kN, pojavom horizontalnog klizanja po reški morta na dodiru grede i ispuna pri gornjem uglu ispuna. Pukotina se nakon toga nastavlja dijagonalno do nadvoja. Nastaju tanke dijagonalne pukotine, pretežno u većem dijelu ispuna između stupa armirano-betonskog okvira i otvora. U blizini uglova

otvora, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,49$  mm (IDR=0,11%) zbog vlaka nastaje odvajanje zidnih elemenata i reške morta, dok istodobno u suprotnim uglovima nastaju višestruke tlačne pukotine.

- II. Kada je horizontalni pomak dosegao vrijednost od  $\pm 1,59$  mm (IDR=0,11%), nastale ukrštene dijagonalne vlačne pukotine produljile su se kroz zidne elemente i mort pod kutem od  $45^\circ$  prema horizontali, u prethodno opisanom većem dijelu ispuna. Pojavom sloma horizontalne reške morta u ravni ispod nadvoja, ispun se razlaže na dio pored otvora te na dio iznad. U blizini gornjih uglova ispuna i donjih uglova otvora primjetno je pomicanje bočnih strana zidnih elemenata. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 2,57$  mm (IDR=0,18%) nastaje drobljenje uglova u gornjim uglovima otvora. Dodatne tanke dijagonalne vlačne pukotine nastaju ispod glavne dijagonalne vlačne pukotine. Horizontalna sila pri danom pomaku doseže vrijednost od 260,0 kN, nakon čega gubi dio vrijednosti, ali nakon toga porastom pomaka opet raste blagim prirastom.
- III. Dijagonalne vlačne pukotine znatno se šire pri horizontalnom pomaku od  $\pm 8,02$  mm (IDR=0,57%). Pri tome, u uglovima otvora i ispuna, bočne strane zidnih elemenata otpadaju, što je najizraženije u donjim uglovima otvora. Pri ovome pomaku dosegnuta je najveća vrijednost horizontalne sile od 276,0 kN. Dosezanje ove vrijednosti sile posljedica je preslagivanja unutar samog ispuna nakon čega ispun ponovno ima mogućnost nositi opterećenje.
- IV. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 13,00$  mm (IDR=0,93%) kraći dio ispuna pored otvora biva značajno zahvaćen pukotinama te teži ispadanju, dok su donji uglovi otvora potpuno zdrobljeni te su zidni elementi slomljeni čitavim obimom. Prisutno je više dijagonalnih vlačnih pukotina, dok se postojeća glavna širi. U trokutu ispod glavne dijagonale, bočne strane zidnih elemenata ispadaju. Ispun gubi nosivost dijagonalnim vlačnim slomom dijela ispuna omeđenog stupom armirano-betonskog okvira otvorom i horizontalnim slomom ravni ispod nadvoja. Također, slom prati drobljenje uglova otvora i ispuna.
- V. Uslijed savijanja, pri dnu i vrhu stupa armirano-betonskog okvira u vlačnom području, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 6,02$  mm (IDR=0,43%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 0,95\%$ , nastaju kratke vlasaste pukotine. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 10,11$  mm (IDR=0,72%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 1,20\%$ , vlačne pukotine protežu se čitavom visinom poprečnog presjeka stupa. Istodobno nastaje drobljenje betona te ljuštenje zaštitnog sloja. Tanke vlačne pukotine na gredu pojavljuju se pri horizontalnom pomaku od  $\pm 10,83$  mm (IDR=0,78%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 0,95\%$ . Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 13,00$  mm (IDR=0,92%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 1,50\%$  odvaja se zaštitni sloj u stopi stupa.

Na slici 3.4. (a) dan je prikaz oštećenosti koje je prethodilo višestrukom slomu zidanog ispuna uzorka tip (I/3) te pripadni geometrijski odnosi unutar ispuna nastali pri tome. Fotografija na slici 3.11. (c) prikazuje oštećenosti uzorka nakon provedbe ispitivanja.

#### c-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

Višestruki način sloma ispuna počinje slomom horizontalne reške morta u ravni ispod nadvoja čime se ispun razlože na tri dijela. Dva su dijela nastala lijevo i desno od otvora, s tim da je doprinos manjeg dijela ispuna bio primjetno neznatan. Veći dio ispuna imao je duljinu jednaku razlici duljine ispuna i zbroja duljine otvora te petine visine ispuna, koja je zapravo duljina navedenog manjeg dijela tj.  $L_P=L_I-L_O-H_I/5=1,19$  m te visinu jednaku visini otvora  $H_P=H_O=0,90$  m. Preostali treći dio, jest dio iznad otvora, koji je duljinu ispuna  $L_S=L_I=1,80$  m, dok mu je visina bila jednaka razlici visine ispuna i visine otvora  $H_S=H_I-H_O=0,40$  m.

Prevladava posmični slom, uslijed dijagonalnih vlačnih pukotina, većeg dijela ispuna pored otvora, odnosa izmjera stranica  $H_P/L_P=0,90/1,20=0,75$ .

#### d) Uzorak tip (I/4): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom s otvorom za prozor smještenim s otklonom bez vertikalnih serklaža

##### d-1) Opis tijeka oštećivanja s obzirom na razine oštećenosti

Slijed oštećivanja uzorka opisan je prema prethodno navedenim mjerilima na sljedeći način:

- I. Prve pukotine nastaju pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,44$  mm (IDR=0,10%) uz pripadnu horizontalnu silu u iznosu 200,0 kN, pojavom horizontalnog klizanja po reški morta na dodiru grede i ispuna pri gornjem uglu ispuna. Pukotina se nakon toga nastavlja dijagonalno do nadvoja. Nastaju tanke dijagonalne pukotine. U blizini uglova otvora, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,66$  mm (IDR=0,12%) zbog vlaka nastaje odvajanje zidnih elemenata i reške morta. U uglovima ispuna nastaju višestruke tlačne pukotine.
- II. U horizontalnim ravnima ispod i iznad otvora, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,96$  mm (0,14%) nastaje slom reške morta. Također, ispun se odvaja od armirano-betonskog stupa na duljini usporedno s visinom otvora. Pri tome također dolazi do drobljenja uglova otvora. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 3,03$  mm (0,22%), dijagonalne vlačne pukotine produljuju se kroz zidne elemente i mort. U srednjem dijelu ispuna i u blizini donjih uglova otvora primjetno je pomicanje bočnih strana zidnih elemenata. Višestruke tanke dijagonalne vlačne pukotine nastale su pri horizontalnom pomaku od  $\pm 4,00$  mm (IDR=0,29%). Tanke vertikalne pukotine nastale su uz vertikalni rub otvora.



- III. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 8,06$  mm (IDR=0,58%) prethodni horizontalni slom reški morta nastupa čitavom duljinom ispuna (dvije ravni). Nastaje drobljenje uglova u blizini uglova otvora. U gornjem uglu ispuna, zbog znatnog dijagonalnog raspucavanja, otpadaju bočne strane zidnih elemenata. To je također izraženo duž glavne dijagonale pukotine koja se povezala s novim znatnim slomom horizontalne reške morta dijela ispuna pored otvora.
- IV. Vertikalni rub otvora odvaja se od ostatka ispuna pri horizontalnom pomaku od  $\pm 18,00$  mm (IDR=1,30%). Prethodni slom horizontalnih reški morta ispod i iznad otvora, drobljenje uglova te dijagonalne vlačne pukotine pod kutem od  $45^\circ$  prema horizontali dovele su do gubitka nosivosti ispuna. Pri ovome pomaku dosegnuta je najveća vrijednost horizontalne sile od 291,0 kN.
- V. Pri dnu i vrhu stupa armirano-betonskog okvira, uslijed savijanja pri horizontalnom pomaku od  $\pm 6,58$  mm (IDR=0,47%), nastaju vlasaste pukotine u vlačnom području. Pripadna normalna deformacija iznosila je  $\pm 0,93\%$ . Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 10,00$  mm (IDR=0,71%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 1,38\%$  vlačne pukotine se produljuju, dok nasuprot dolazi do ljuštenja zaštitnog sloja i drobljenja betona. Vlačne pukotine na gredi nastaju pri horizontalnom pomaku od  $\pm 8,90$  mm (IDR=0,64%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 0,90\%$ . Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 18,00$  mm (IDR=1,29%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 2,03\%$  nastaje više vlačnih pukotina te pri dnu stupa dolazi do odvajanja zaštitnog sloja.

Na slici 3.4. (b) dan je prikaz oštećenosti koje je prethodilo višestrukom slomu zidanog ispuna uzorka tip (I/4) te pripadni geometrijski odnosi unutar ispuna nastali pri tome. Fotografija na slici 3.11. (d) prikazuje oštećenosti uzorka nakon provedbe ispitivanja.

#### d-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

Višestruki način sloma ispuna počinje horizontalnim slomom reške morta u ravni iznad nadvoja te ispod otvora, čime se zidani ispun razlaže na četiri dijela. Dio ispuna pored otvora duljine  $L_p = H_i/5 = 0,26$  m, bio je neznatan u pogledu nosivosti. Dio duljine jednake  $L_p = L_i - L_o - H_i/5 = 1,05$  m bio je od iznimne važnosti, jer je njegovim slomom nastao gubitak nosivosti čitavog ispuna. Visina mu je bila jednaka visini otvora tj.  $H_p = H_o = 0,60$  m. Preostala dva dijela, tj. dio iznad te ispod otvora, imali su duljinu ispuna  $L_s = L_i = 1,80$  m. Visina gornjeg dijela bila je jednaka razlici visine ispuna i zbroja visine otvora i visine parapeta tj.  $H_s = H_i - H_o - H_N = 0,30$  m, dok je visina donjeg dijela bila jednaka visini parapeta tj.  $H_s = H_N = 0,40$  m.

Prevladava posmični slom većeg dijela ispuna pored otvora, odnosa izmjera stranica  $H_p/L_p = 0,60/1,05 = 0,60$ , predstavljen dijagonalnom vlačnim pukotinama, što vodi do urušavanja čitavog zidanog ispuna.

### 3.2.2. Uzorci grupe II

a) Uzorak tip (II/1): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom s otvorom za vrata smještenim u sredini ispuna vertikalnim serklažima

a-1) Opis tijeka oštećivanja s obzirom na razine oštećenosti

Sljed oštećivanja uzorka opisan je prema prethodno navedenim mjerilima na sljedeći način:

- I. Prve oštećenosti pojavila (e) su se na dijelu ispuna između vertikalnih serklaža i armirano-betonskih stupova, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,39$  mm (IDR=0,10%) i horizontalnoj sili od 220,0 kN, u obliku kratkih dijagonalnih pukotina pod kutem od  $65^\circ$  prema horizontali. Početak pukotina bio je u blizini stopa vertikalnih serklaža. Dijagonalna pukotina pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,50$  mm (IDR=0,11%) produljuje se ka sredini, dok u blizini stope vertikalnih serklaža nastaje niz novih tankih pukotina. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,77$  mm (IDR=0,13%), dijagonalne pukotine produljuju se do dodira sa stupom armirano-betonskog okvira.
- II. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 2,26$  mm (IDR=0,16%), broj tankih pukotina u blizini donjeg dijela vertikalnog serklaža se povećava. U donjem uglu ispuna nastaje horizontalna vlačna pukotina duljine zidnog elementa. Na dodiru grede i ispuna ponad otvora dolazi do međusobnog odvajanja. Nastanak novih te produljenje postojećih dijagonalnih pukotina nastaje pri pomaku od  $\pm 5,02$  mm (IDR=0,36%). Pri ovome pomaku dosegnuta je najveća vrijednost horizontalne sile od 311,0 kN. Dijagonalne pukotine protežu se od gornjeg ugla otvora do donjeg ugla ispuna te od gornjeg ugla ispuna ka stopi vertikalnog serklaža. Brojnost kratkih pukotina veća je u blizini uglova otvora, ali one ne zahvaćaju vertikalne serklaže niti nadvoj.
- III. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 8,03$  mm (IDR=0,57%), dijagonalne pukotine znatno se proširuju te su također vidljive nove višestruke dijagonalne pukotine.
- IV. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 15,00$  mm (IDR=1,07%), uslijed dijagonalnog vlačnog sloma te drobljenja uglova i gubitka vlačne čvrstoće, u donjim uglovima nasuprot drobljenih, nastaje gubitak nosivosti dijela ispuna između stupa armirano-betonskog okvira i vertikalnog serklaža. Ovo je praćeno ispadanjem bočnih strana zidnih elemenata.
- V. Na armirano-betonskom okviru, pri dnu i vrhu stupa, uslijed savijanja, horizontalni pomak od  $\pm 7,34$  mm (IDR=0,52%), uzrokovao je vlasaste pukotine u vlačnom području. Pripadna normalna deformacija iznosila je  $\pm 0,95\%$ . Kada je horizontalni pomak dosegao vrijednost od  $\pm 10,86$  mm (IDR=0,71%) te normalna deformacija  $\pm 1,20\%$ , vlačne pukotine su se produljile. Vlačne pukotine na gredi pojavile su se pri horizontalnom pomaku od  $\pm 12,11$  mm (IDR=0,87%) i normalnim deformacijama od

$\pm 0,95\%$ . Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 15,18$  mm (IDR=1,08%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 1,65\%$  u tlačnom području stupova dolazi do odvajanja zaštitnog sloja.

Na slici 3.6. (a) dan je prikaz oštećenosti koje je prethodilo slomu zidanog ispuna uzorka tip (II/1) i pripadni geometrijski odnosi unutar zidanog ispuna. Fotografija uzorka nakon provedbe ispitivanja prikazana je na slici 3.11. (e).

#### a-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

Način sloma ispuna bio je konstruktivno predodređen izvedbom vertikalnih serklaža oko otvora, jer je time zidani ispun podijeljen na tri dijela, od kojih su dva, lijevo i desno od otvora, jednakih izmjera te treći, kojeg čini mala ploština ispuna u području iznad otvora i između vertikalnih serklaža. Dijelovi lijevo i desno od otvora imali su duljinu jednaku razlici polovine duljine ispuna i polovine duljine otvora  $L_P=(L_I-L_O)/2=0,725$  m te visinu jednaku visini ispuna ili vertikalnih serklaža  $H_P=H_I=1,30$  m. Preostali dio, tj. dio iznad otvora, imao je duljinu otvora  $L_S=L_O=0,35$  m te visinu jednakoj razlici visini ispuna i visine otvora  $H_S=H_I-H_O=0,40$  m.

Prevladava slom savijanjem dijelova zidanog ispuna omeđenih vertikalnim serklažom i stupom okvira, odnosa izmjera stranica  $H_P/L_P=1,30/0,72=1,8$ , predstavljen drobljenjem uglova i vlačnim slomom u stopi ovog dijela, ali i višestrukim dijagonalnom pukotinama, koja su obilježje posmičnog sloma, što vodi do urušavanja čitavog zidanog ispuna. Dio zidanog ispuna u ravni iznad otvora, izmjera  $H_S/L_S=0,40/0,36=0,67$ , nije pretrpio teška oštećenosti.

#### b) Uzorak tip (II/2): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom s otvorom za prozor smještenim u sredini ispuna vertikalnim serklažima

##### b-1) Opis tijeka oštećivanja s obzirom na razine oštećenosti

Slijed oštećivanja uzorka opisan je prema prethodno navedenim mjerilima na sljedeći način:

- I. Prvo oštećenje nastaje u blizini donjeg ugla otvora, pored vertikalnog serklaža, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,19$  mm (IDR=0,09%), u obliku kratkih dijagonalnih pukotina (kroz zidne elemente i mort) pod kutem od  $65^\circ$  prema horizontali. Pripada horizontalna sila bila je 170,0 kN. Ova se pukotina pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,77$  mm (IDR=0,13%) proteže ka sredini ispuna, dok se dodatne kratke pukotine pojavljuju u blizini stope vertikalnog serklaža.
- II. Postojeće dijagonalne pukotine potpuno se produljuju pri horizontalnom pomaku od  $\pm 2,30$  mm (IDR=0,16%) te se prenose preko vertikalnog serklaža na parapet. Pukotina na serklažu nije bila vidljiva. Pojavljuju se nove dijagonalne pukotine u blizini

postojeće. Povećava se brojnost tankih pukotina u donjem dijelu u blizini vertikalnog serklaža. Primjetno je pomjeranje bočnih strana zidnih elemenata u blizini donjeg ugla otvora.

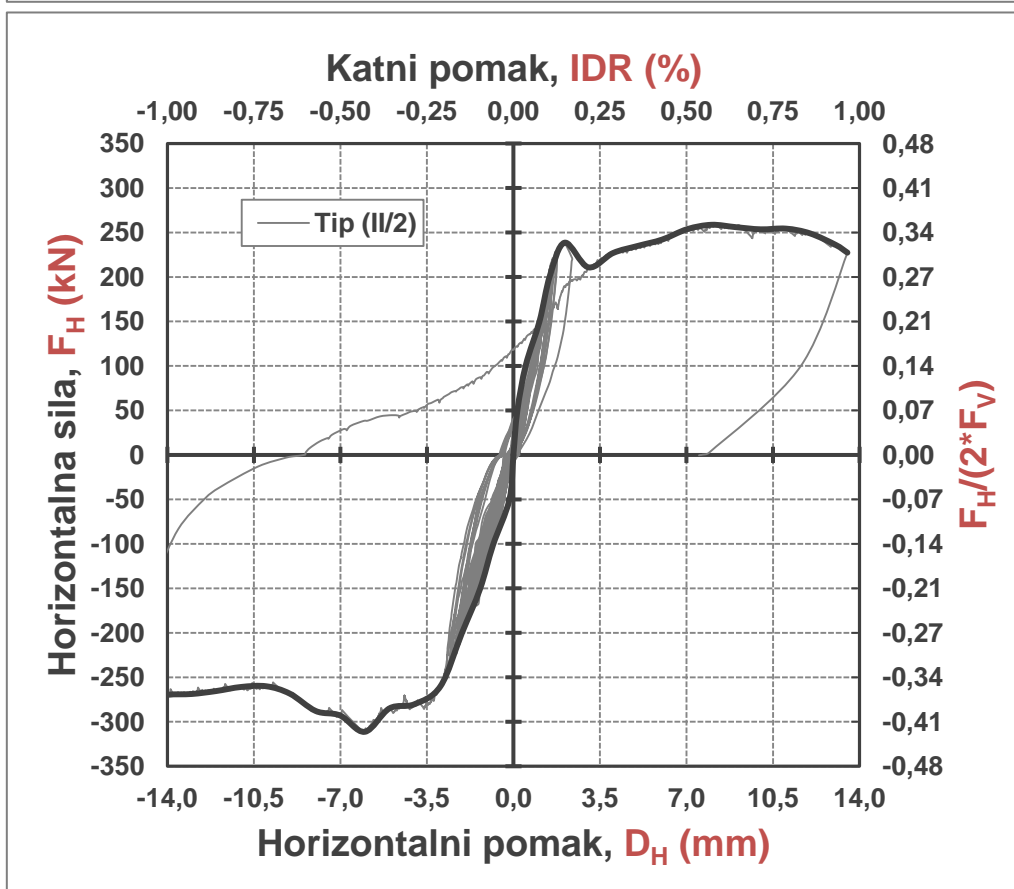
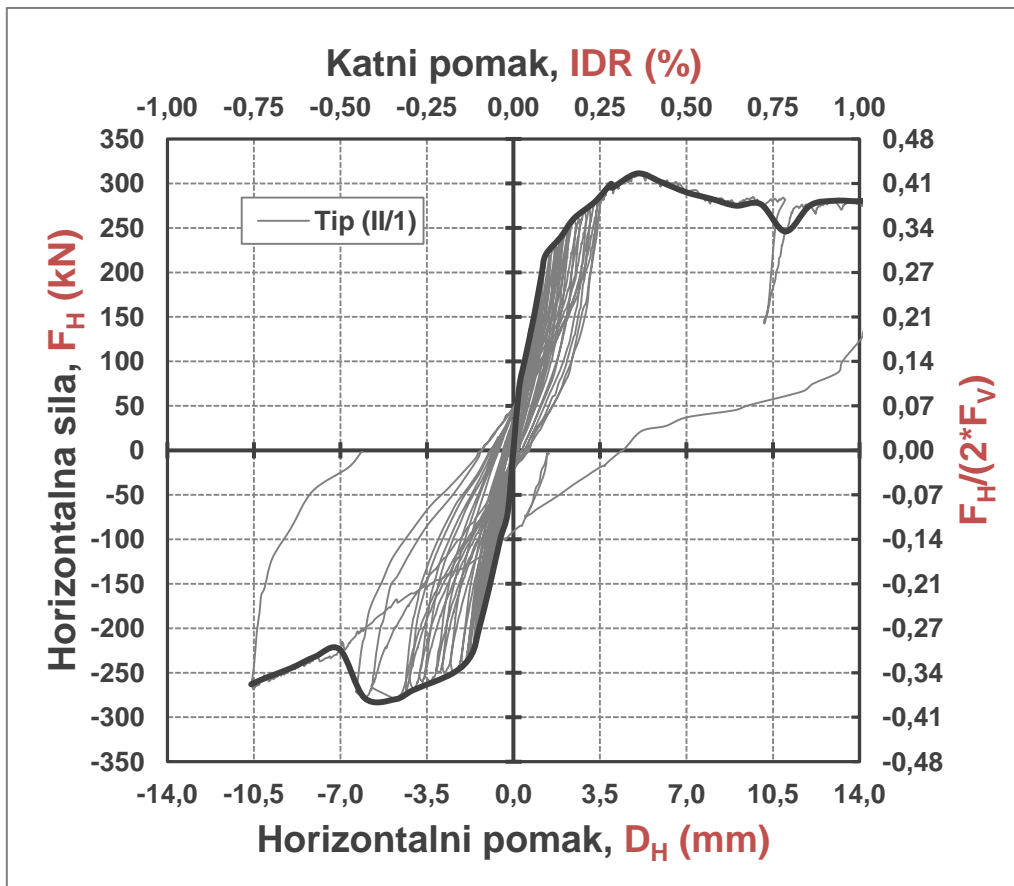
- III. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 6,01$  mm (IDR=0,43%) dosegnuta je najveća vrijednost horizontalne sile od 311,0 kN. Postojeće dijagonalne pukotine se znatno produljuju. Bočne strane zidnih elemenata ispadaju u blizini donjih uglova otvora, dok je primjetno njihovo pomjeranje u gornjem uglu ispuna.
- IV. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 15,00$  mm (IDR=1,07%) dijelovi ispuna lijevo i desno od otvora postaju nestabilni, uslijed višestrukih dijagonalnih pukotina te drobljenja uglova.
- V. Na armirano-betonskom okviru, pri dnu i vrhu stupa, nastaju vlačne pukotine kao posljedica horizontalnog pomaka od  $\pm 5,46$  mm (IDR=0,39%) pri čemu je iznos normalne deformacije bio  $\pm 0,95\%$ . Istodobno se takove pukotine pojavljuju i na gredi. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 15,00$  mm (IDR=1,07%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 2,94\%$  vlačne pukotine se šire kroz poprečni presjek te se zaštitni sloj betona raspada. Na spoju stupa i grede nastaju nove vlačne pukotine.

Na slici 3.6. (b) dan je prikaz oštećenosti koje je prethodilo slomu zidanog ispuna uzorka tip (II/2) i pripadni geometrijski odnosi unutar zidanog ispuna. Fotografija uzorka nakon provedbe ispitivanja dana je na slici 3.11. (f).

## b-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

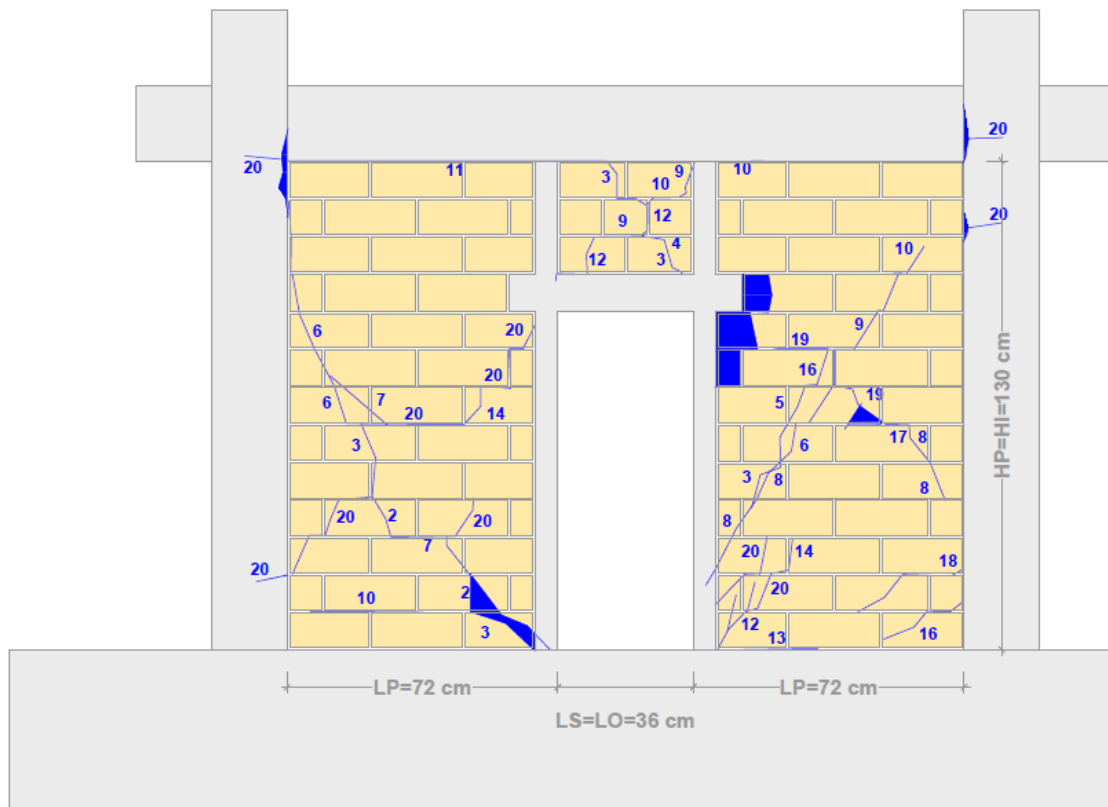
Način sloma ispuna bio je konstruktivno predodređen izvedbom vertikalnih serklaža. Time je ispun bio podijeljen na četiri dijela, od kojih dva jednakih izmjera lijevo i desno od otvora te dvije male površine u području iznad te ispod otvora (između vertikalnih serklaža). Dijelovi lijevo i desno od otvora imali su duljinu jednaku razlici polovine duljine ispuna i polovine duljine otvora  $L_P=(L_I-L_O)/2=0,65$  m te visinu jednaku visini ispuna ili vertikalnih serklaža  $H_P=H_I=1,30$  m. Dio iznad otvora imao je duljine otvora  $L_S=L_O=0,50$  m kao i dio ispod te visinu jednaku razlici visini ispuna i zbroja visine otvora i parapeta  $H_S=H_I-H_O-H_N=0,30$  m. Dio ispod otvora imao je visinu jednaku visini parapeta  $H_S=H_N=0,40$  m.

Vrste pukotina, drobljenje uglova i vlačni slom u stopama, ukazale su na nastali slom savijanjem, dijelova zidanog ispuna omeđenih vertikalnim serklažom i stupom okvira, odnosa izmjera stranica  $H_P/L_P=1,30/0,65=2,0$ , jednako kao i kod prethodnog uzorka. Prisutna su i obilježja posmičnog sloma. Dijelovi ispuna, u ravni iznad i ispod otvora, izmjera  $H_S/L_S=0,30/0,50=0,60$  i  $H_S/L_S=0,40/0,50=0,67$ , nisu pretrpjeli teška oštećenosti.

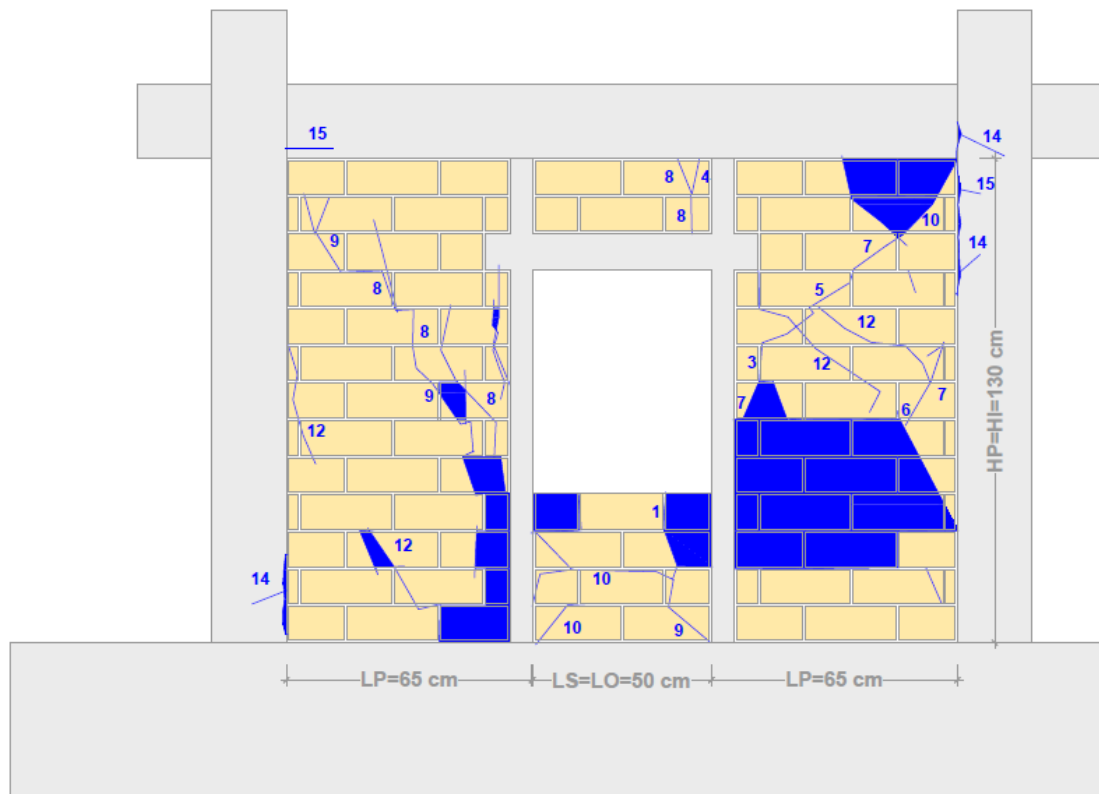


Slika 3.5. Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (II/1) i tip (II/2)

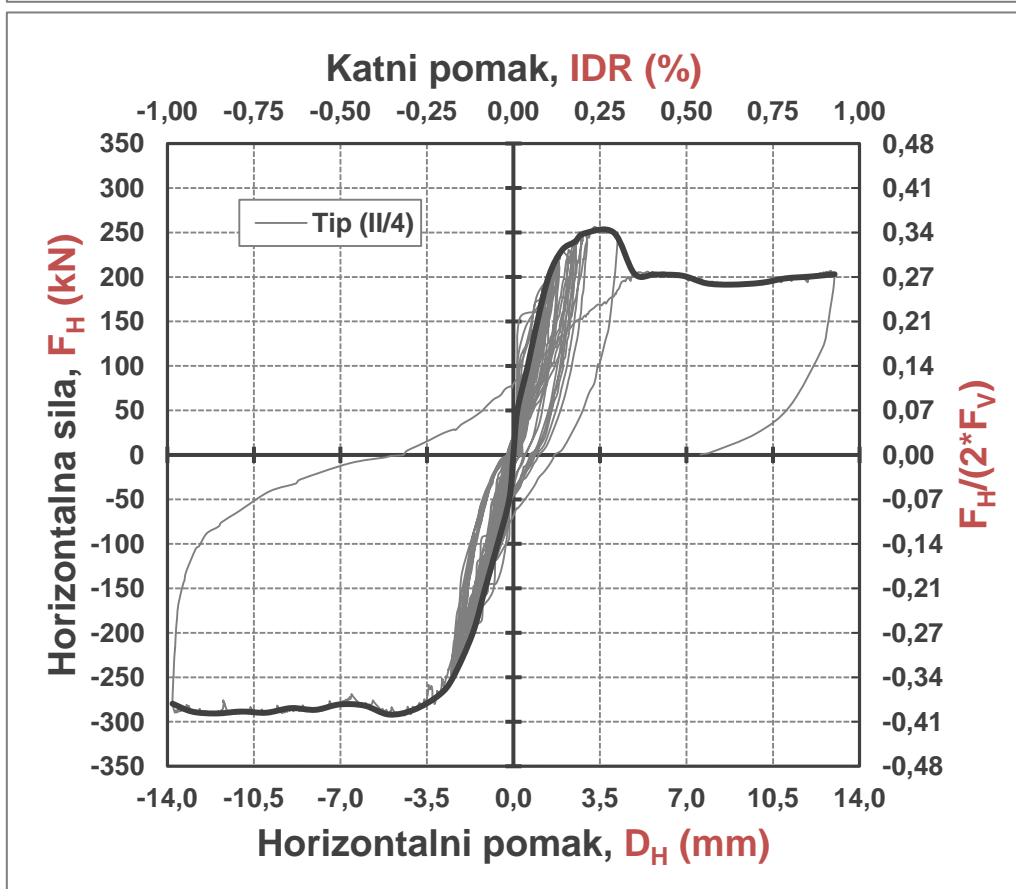
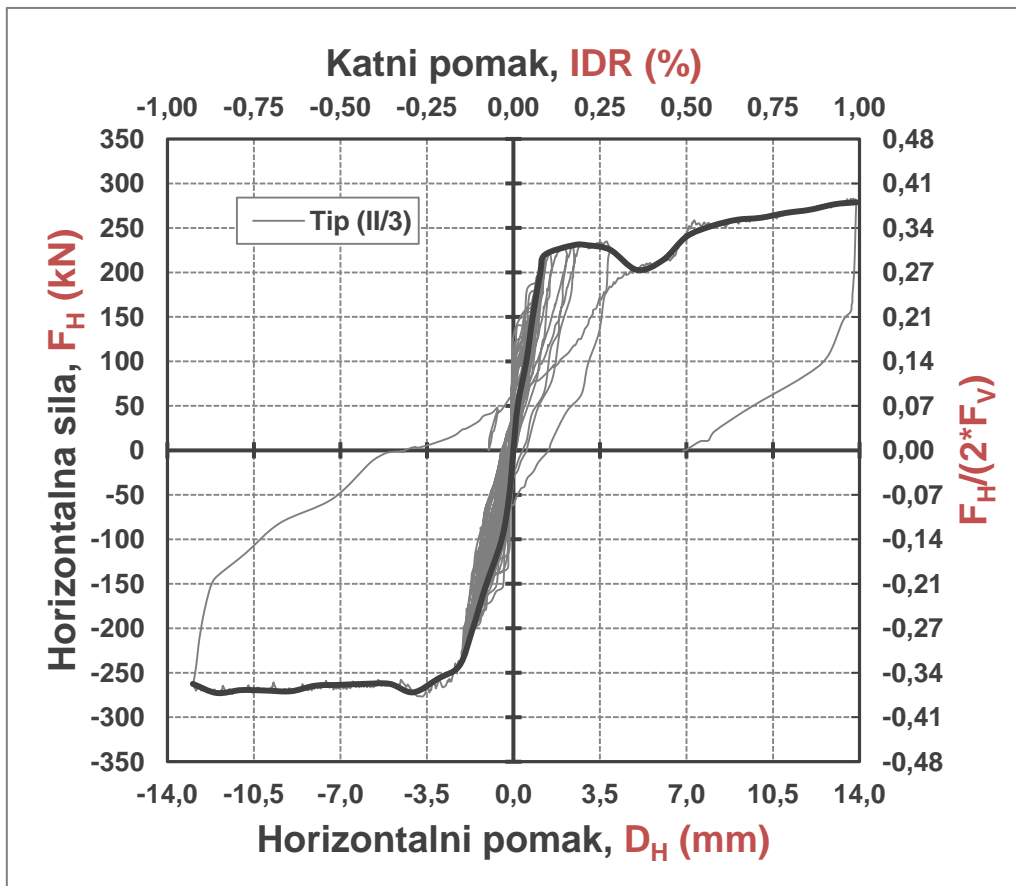
a) UZORAK TIP (II/1)



b) UZORAK TIP (II/2)

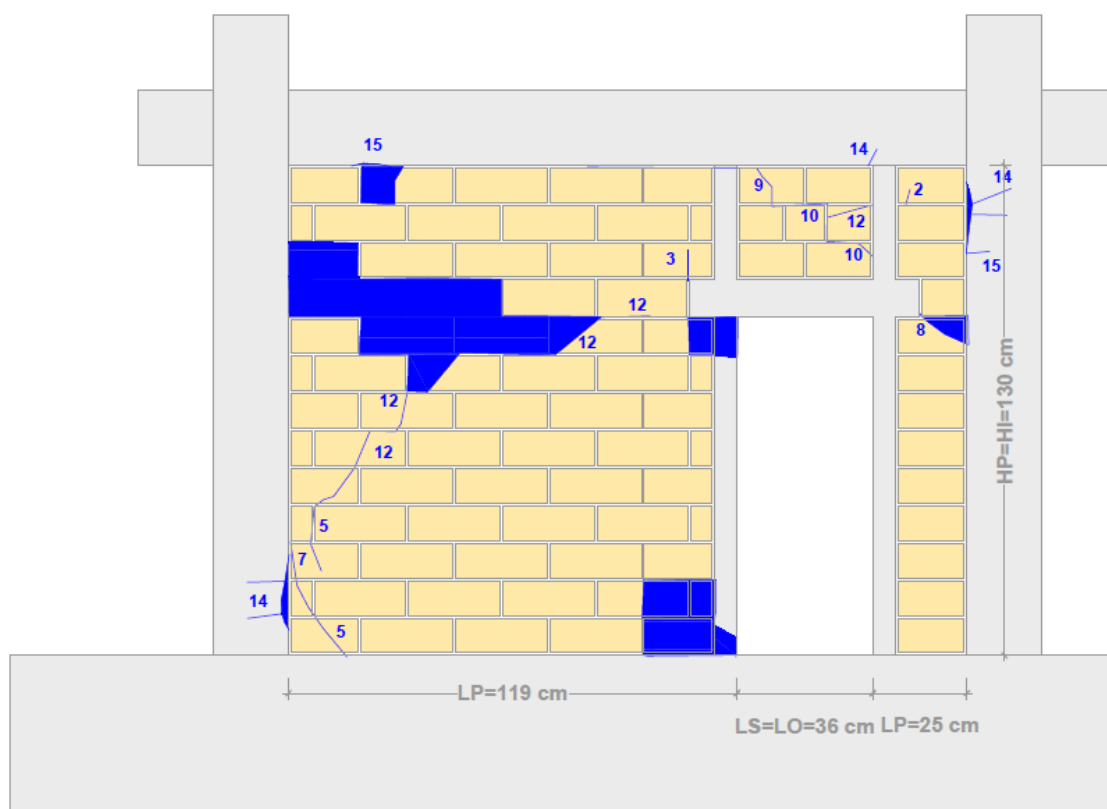


Slika 3.6. Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (II/1) i b) tip (II/2)

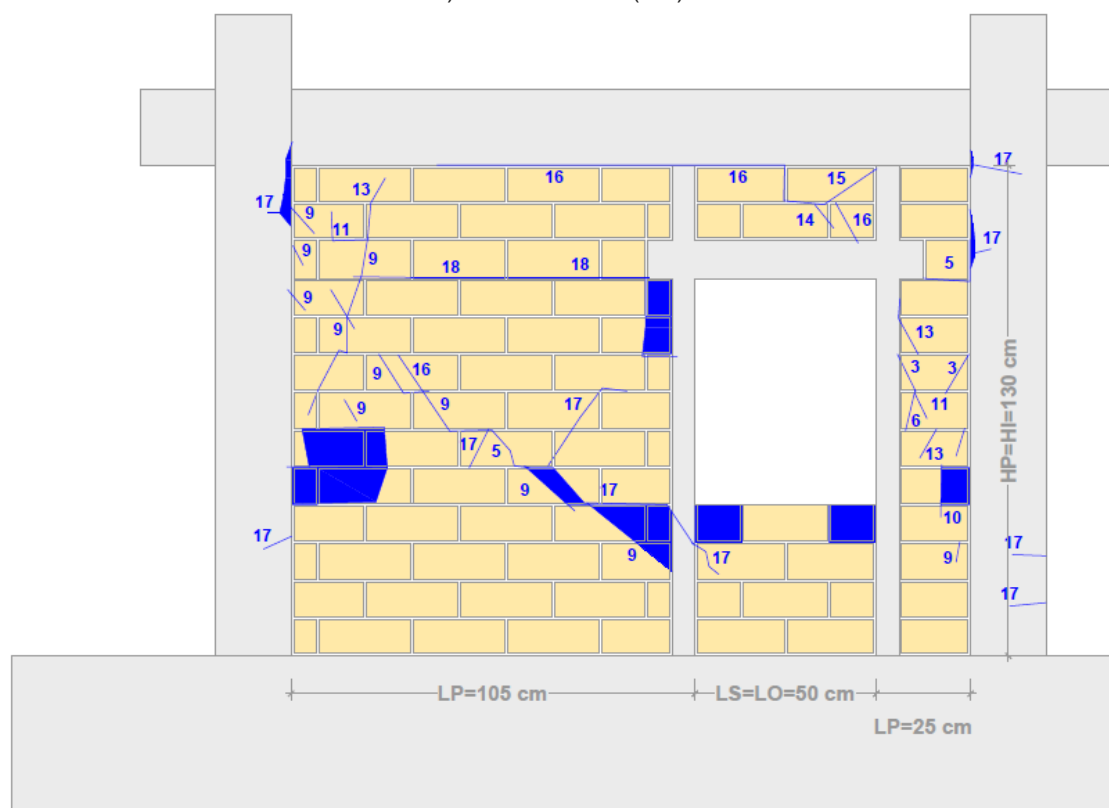


Slika 3.7. Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (II/3) i tip (II/4)

a) UZORAK TIP (II/3)



b) UZORAK TIP (II/4)



Slika 3.8. Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (II/3) i b) tip (II/4)



c) Uzorak tip (II/3): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom s otvorom za prozor smještenim s otklonom s vertikalnim serklažima

c-1) Opis tijeka oštećivanja s obzirom na razine oštećenosti

Slijed oštećivanja uzorka opisan je prema prethodno navedenim mjerilima na sljedeći način:

- I. Prve pukotine pojavljuju se u blizini gornjeg ugla otvora te pored vertikalnog serklaža, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,34$  mm (IDR=0,10%) i horizontalnoj sili od 220,0 kN. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,71$  mm (IDR=0,12%) nastaju tanke ukrštene dijagonalne pukotine u blizini armirano-betonskih stupova pod kutem od  $45^\circ$  prema horizontali. Horizontalni slom reške primjetan je u horizontalnoj ravni ispod nadvoja.
- II. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 2,87$  mm (IDR=0,21%) spajaju se horizontalni slom reške morta i dijagonalne vlačne pukotine. Nastaje nekoliko dodatnih dijagonalnih pukotina. U uglu otvora primjetno je pomjeranje bočnih strana zidnih elemenata.
- III. Porastom horizontalnog pomaka na  $\pm 7,00$  mm (IDR=0,50%) primjetno je pomjeranje bočnih strana zidnih elemenata na spoju horizontalne i dijagonalne pukotine.
- IV. Porastom horizontalne sile na 280,0 kN i horizontalnog pomaka na  $\pm 13,87$  mm (IDR=0,99%), dio ispuna biva odvojen od ostatka horizontalnim slomom i dijagonalnom pukotinom, uslijed čega također dolazi i do sloma vertikalnog serklaža u gornjem uglu otvora te odvajanja ovog dijela od donje grede armirano-betonskog okvira. Ispun postaje nestabilan zbog sloma u gornjem uglu otvora, jer je to omogućilo dijelu ispuna da izađe van ravni.
- V. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 7,23$  mm (IDR=0,52%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 0,90\%$ , na spoju grede i stupa te pri dnu stupa, nastaju vlačne pukotine uslijed savijanja. Istodobno je nastalo nekoliko tankih vlačnih pukotina na gredi. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 13,87$  mm (IDR=0,99%) vlačne pukotine na stupu protežu se cijelom visinom poprečnog presjeka. Nastaju dodatne vlačne pukotine na spoju stupa i grede.

Na slici 3.8. (a) dan je prikaz oštećenosti koje je prethodilo slomu zidanog ispuna uzorka tip (II/3) i pripadni geometrijski odnosi unutar zidanog ispuna. Fotografija uzorka nakon provedbe ispitivanja dana je na slici 3.11. (g).

c-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

Višestruki način sloma ispuna bio je konstruktivno predodređen izvedbom vertikalnih serklaža. Time je ispun bio podijeljen na tri dijela, od kojih dva lijevo i desno od otvora te na posljednji male površine u području iznad otvora (između vertikalnih serklaža). Dio pored otvora veće površine imao je duljine jednaku razlici duljine ispuna i zbroja duljine otvora i drugog dijela  $L_p=L_l-L_o-H_l/5=1,19$  m te visinu jednaku visini ispuna ili vertikalnih serklaža

$H_p=H_l=1,30$  m. Doprinos kraćeg dijela ispuna pored otvora bio primjetno neznatan. Dio iznad otvora imao je duljinu otvora  $L_s=L_o=0,50$  m te visinu jednakoj razlici visini ispuna i zbroja visine otvora  $H_s=H_l-H_o=0,40$  m. Dio ispod otvora imao je visinu jednaku visini parapeta  $H_s=H_n=0,40$  m.

Dijagonalne vlačne pukotine ukazale su na posmični slom većeg dijela zidanog ispuna omeđenih vertikalnim serklažom i stupom okvira, odnosa izmjera stranica  $H_p/L_p=1,30/1,19=1,09$ . Drugi dio ispuna pored otvora,  $H_p/L_p=1,30/0,26=5,0$ , pokazao je neznatan utjecaj na ponašanje uzorka. Usprkos raspucavanju ostao je stabilan, jer je bio prihvaćen vertikalnim serklažom. Dio zidanog ispuna u ravni iznad otvora, izmjera  $H_s/L_s=0,40/0,36=1,11$ , nije pretrpio teška oštećenosti.

d) Uzorak tip (II/4): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom s otvorom za prozor smještenim s otklonom s vertikalnim serklažima

d-1) Opis tijeka oštećivanja s obzirom na razine oštećenosti

Slijed oštećivanja uzorka opisan je prema prethodno navedenim mjerilima na sljedeći način:

- I. Prvo nastaje tanka dijagonalna vlačna pukotina pod kutem od  $45^\circ$  prema horizontali iznad nadvoja, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,14$  mm (IDR=0,08%) i horizontalnoj sili od 150,0 kN. Istodobno nastaje slom reške morta u horizontalnoj ravni ispod nadvoja, duljine nadvoja. U gornjim uglovima otvora i ispuna primjetno je drobljenje morta.
- II. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 2,10$  mm (IDR=0,15%) tanke ukrštene dijagonale pukotine i horizontalni slom nastavljaju se duljiti. Primjetno je pomjeranje bočnih strana zidnih elemenata u donjim uglovima otvora i ispuna. Dijagonalne pukotine protežu se od donjeg ugla ispuna ka gornjem uglu otvora te od stope vertikalnog serklaža do mjesta dodira horizontalnog sloma reške i stupa armirano-betonskog okvira.
- III. Odvajanje gornje grede i ispuna nastaje pri horizontalnom pomaku od  $\pm 3,77$  mm (IDR=0,27%). Porastom pomaka dijagonalne vlačne pukotine postaju dulje i šire se te se također pojavljuju dodatne nove. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 5,03$  mm (IDR=0,36%) najveća vrijednost horizontalne sile od 292,0 kN. Horizontalni slom reške morta postaje jasniji. Očito je drobljenje uglova, osobito u gornjem uglu otvora gdje također zahvaća vertikalni serklaž.
- IV. Dijelovi ispuna počinju izlaziti van ravni pri horizontalnom pomaku od  $\pm 13,79$  mm (IDR=0,99%) te ispun gubi nosivost.
- V. Vlačne pukotine uslijed savijanja pri dnu i vrhu stupa nastaju pri horizontalnom pomaku od  $\pm 5,66$  mm (IDR=0,40%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 0,95\%$ . Istodobno

nastaje nekoliko vlačnih pukotina na gredi. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 13,79$  mm (IDR=0,99%) i normalnoj deformaciji od  $\pm 3,55\%$ , zaštitni sloj armirano-betonskog stupa se ljušti te se vlačne pukotine produljuju.

Na slici 3.8. (b) dan je prikaz oštećenosti koje je prethodilo slomu zidanog ispuna uzorka tip (II/4) i pripadni geometrijski odnosi unutar zidanog ispuna. Fotografija uzorka nakon provedbe ispitivanja dana je na slici 3.11. (h).

#### d-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

Višestruki način sloma ispuna bio je konstruktivno predodređen izvedbom vertikalnih serklaža. Time je ispun bio podijeljen na četiri dijela, od kojih dva pored otvora te dvije male površine u području iznad te ispod otvora (između vertikalnih serklaža). Dio pored otvora veće površine imao je duljinu jednaku razlici duljine ispuna i zbroja duljine otvora i drugog dijela  $L_P=L_I-L_O-H_I/5=1,04$  m te visinu jednaku visini ispuna ili vertikalnih serklaža  $H_P=H_I=1,30$  m. Dio iznad otvora imao je duljinu otvora  $L_S=L_O=0,50$  m kao i dio ispod te visinu jednakoj razlici visini ispuna i zbroja visine otvora i parapeta  $H_S=H_I-H_O-H_N=0,30$  m. Dio ispod otvora imao je visinu jednaku visini parapeta  $H_S=H_N=0,40$  m.

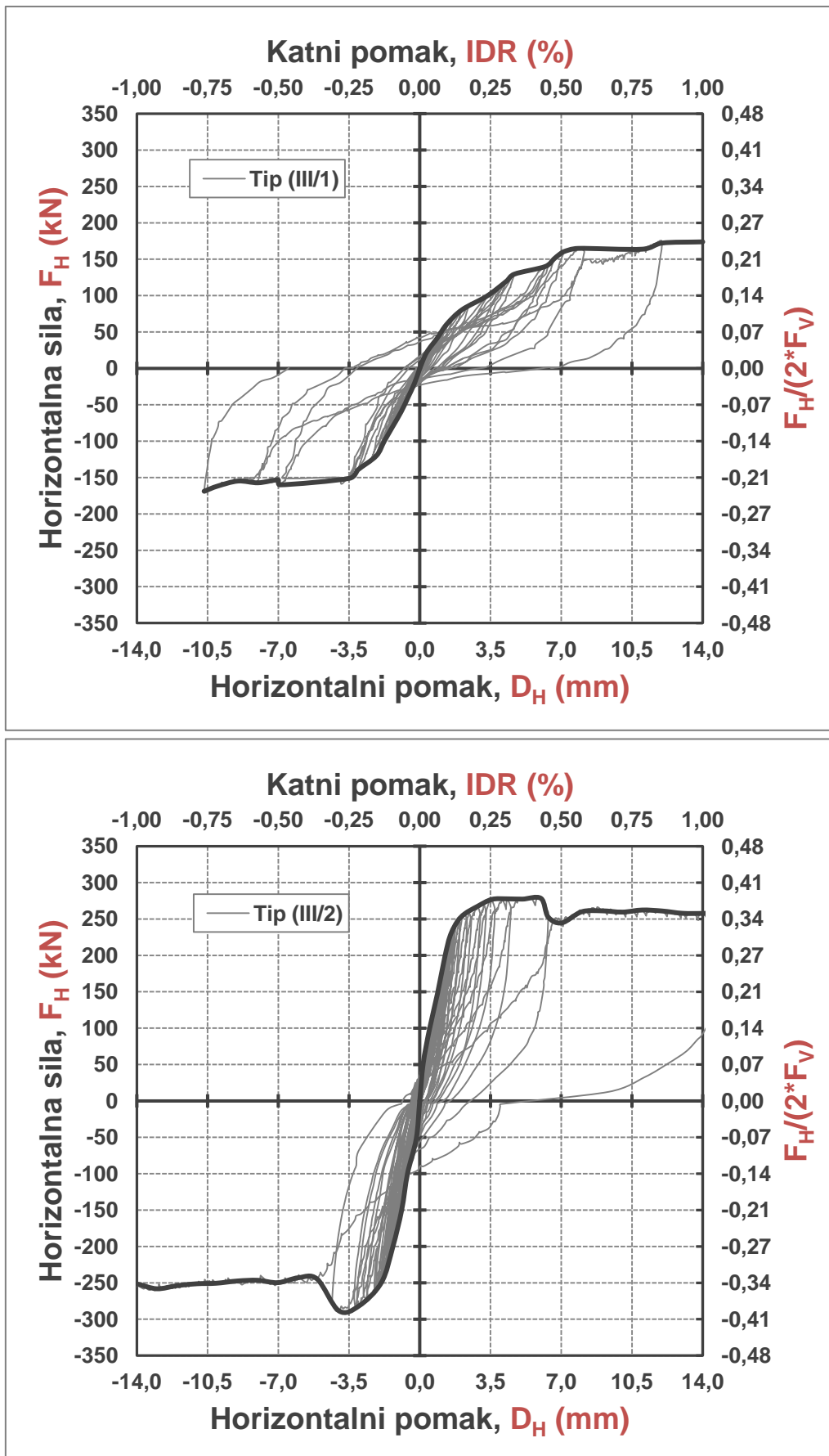
Prevladava posmični slom većeg dijela zidanog ispuna pored otvora, odnosa izmjera  $H_P/L_P=1,30/1,04=1,25$ . Obilježen je pojavom višestrukih dijagonalnih vlačnih pukotina. Drugi dio ispuna pored otvora,  $H_P/L_P=1,30/0,26=5,0$ , pokazao je neznatan utjecaj na ponašanje uzorka, jer je njegovim raspucavanjem zidani ispun i dalje ostao stabilan i pridržan vertikalnim serklažom. Dijelovi ispuna, u ravni iznad i ispod otvora, izmjera  $H_S/L_S=0,30/0,50=0,60$  i  $H_S/L_S=0,40/0,50=0,67$ , nisu pretrpjeli teška oštećenosti.

### 3.2.3. Uzorci grupe III

#### a) Uzorak tip (III/1): armirano-betonski okvir bez zidanog ispuna

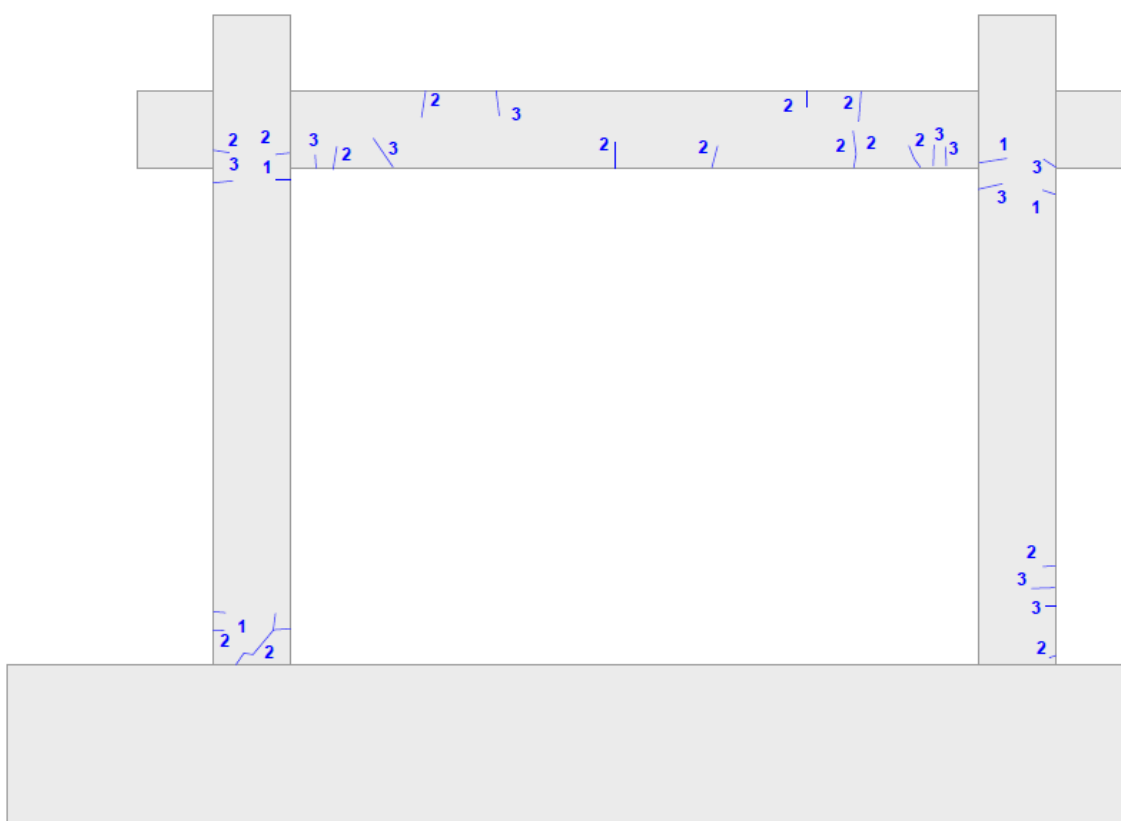
##### a-1) Opis tijeka oštećivanja s s obzirom na razine oštećenosti

Tijek oštećivanja uzorka opisan prema prethodno navedenim mjerilima, počinje nastankom prve vlačne pukotine uslijed savijanja u stopama stupova, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 5,78$  mm (IDR=0,41%) i horizontalnoj sili od 135,0 kN. Normalne deformacije mjerene na mjestu mogućih plastičnih zglobova na stupu i gredi bile su  $\pm 0,95\%$  odnosno  $\pm 0,60\%$ . Nakon toga uslijedila je pojava pukotina na gredi. Ove pukotine rezultat su horizontalnog pomaka od  $\pm 10,64$  mm (IDR=0,76%) i normalne deformacije mjerene na mjestu mogućeg plastičnog zgloba na gredi od  $\pm 0,95\%$ . Pri tome je normalna deformacija pri dnu stupa bila  $\pm 2,30\%$ . Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 12,00$  mm (IDR=0,86%) normalna deformacija u opasnom području stupa je  $\pm 2,70\%$  te se beton u tlačnom području ljušti. Nakon što je dosegnuta razina horizontalne sile od 172,0 kN, armirano-betonski okvir više nije mogao preuzeti daljnji prirast sile, dok je horizontalni pomak rastao.

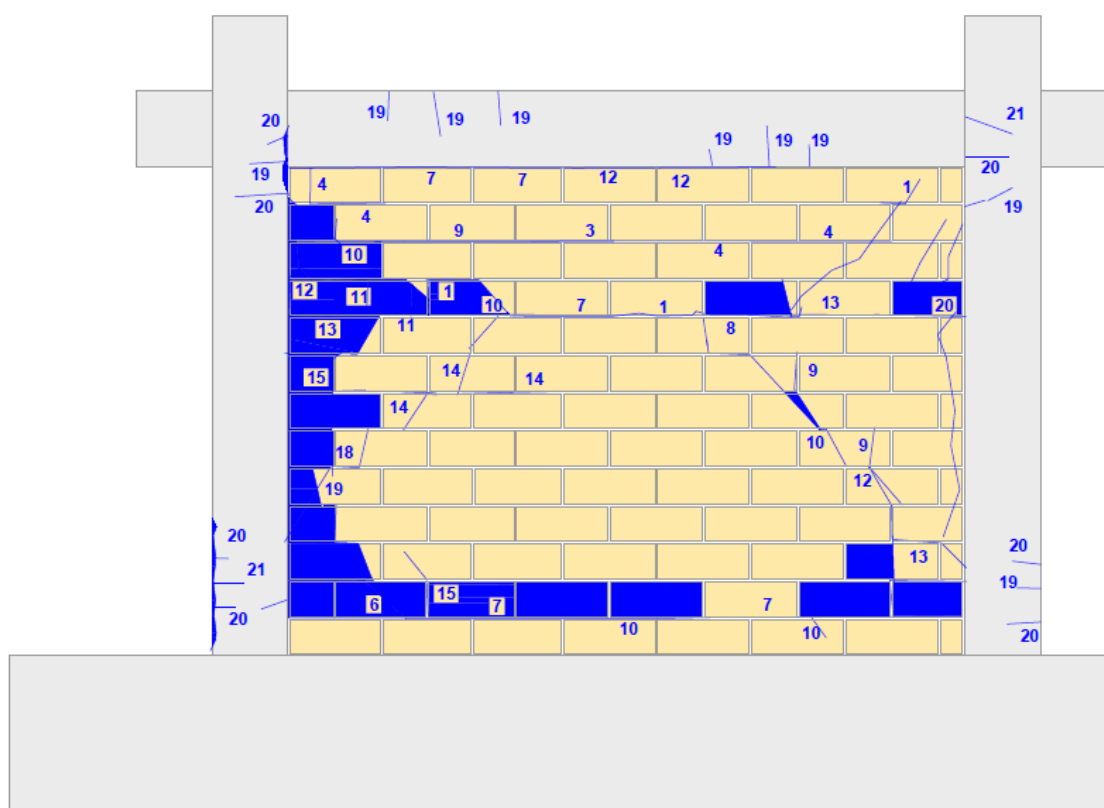


Slika 3.9. Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (III/1) i tip (III/2)

a) UZORAK TIP (III/1)



b) UZORAK TIP (III/2)



Slika 3.10. Prikaz pukotina pred slom i izmjere dijelova na koje se zidani ispun razložio za uzorke: a) tip (III/1) i b) tip (III/2)

Na slici 3.10. (a) dan je prikaz oštećenosti uzorka tip (III/1). Fotografija istog uzorka koje prikazuje stanje nakon provedbe ispitivanja, dana je na slici 3.12. (a).

a-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

Uzorak nije ispitan do sloma, jer nije sadržavao zidani ispun, već do razine ciljanog katnog pomaka  $IDR=1,0\%$ . Prikaz raspodjele i vrsta pukotina ukazuju na savojno ponašanje. Niti kod jednog uzorka sa zidanim ispunom nisu primijećene posmične pukotine na armirano-betonskom okviru.

b) Uzorak tip (III/2): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom bez otvora i vertikalnih serklaža

b-1) Opis tijeka oštećivanja s s obzirom na razine oštećenosti

Slijed oštećivanja uzorka opisan je prema prethodno navedenim mjerilima na sljedeći način:

- I. Prvo nastaje horizontalni slom reške morta u srednjem dijelu ispuna, pri horizontalnom pomaku od  $\pm 0,75$  mm ( $IDR=0,05\%$ ) i horizontalnoj sili od 150,0 kN. U gornjem uglu ispuna nastaju kratke vlasaste pukotine kroz zidne elemente i mort. Druga horizontalna ravan sloma reške morta nastaje pri horizontalnom pomaku od  $\pm 0,82$  mm ( $IDR=0,06\%$ ) u gornjoj trećini visine ispuna. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 1,63$  mm ( $IDR=0,16\%$ ) tanke stepenaste pukotine pod kutem od  $45^\circ$  prema horizontali, nastaju od uglova ispuna prema krajevima horizontalnog sloma u sredini ispuna. Drobljenje morta primjetno je u uglovima ispuna.
- II. Pri horizontalnom pomaku od  $\pm 2,17$  mm ( $IDR=0,16\%$ ) nastaje horizontalni slom u donjoj trećini visine ispuna. Kratke tanke pukotine nastaju na dijelu ispuna uz rub armirano-betonskih stupova, a dijagonalne pukotine se u potpunosti spajaju sa slomljenim horizontalnom ravni.
- III. Postojeće dijagonalne vlačne i horizontalne pukotine se šire pri horizontalnom pomaku od  $\pm 5,84$  mm ( $IDR=0,42\%$ ). Duž visine stupa primjetno drobljenje zidnih elemenata i morta. U donjoj trećini visine ispuna, duž horizontalnog sloma, primjetno je pomjeranje bočnih strana zidnih elemenata.
- IV. Horizontalni slom reški morta u tri ravni, drobljenje ispuna duž armirano-betonskog stupa te nastanak dijagonalnih pukotina od uglova ispuna ka srednjoj ravni, dovelo je do gubitka nosivosti ispuna pri horizontalnom pomaku od  $\pm 15,24$  mm ( $IDR=1,09\%$ ).
- V. Oštećenje grede i stupa armirano-betonskih okvira uslijed savijanja, počinje pri horizontalnom pomaku od  $\pm 6,86$  mm ( $IDR=0,49\%$ ) pojavom vlačnih pukotina, pri čemu je normalna deformacija iznosila  $\pm 0,95\%$ . Odvajanje zaštitnog sloja betona armirano-betonskog stupa javlja se usporedno s učestalim raspucavanjem ispuna uz

rub stupa, što je osobito izraženo pri posljednjim koracima nanošenja opterećenja. Normalna deformacija iznosila je  $\pm 2,00\%$ . Najveća dosegnuta vrijednost horizontalne sile bila je 288,0 kN.

Na slici 3.10. (b) dan je prikaz uzorka u oštećenom stanju koje je prethodilo slomu zidanog ispuna uzorka tip (III/2). Fotografija istog uzorka koje prikazuje stanje nakon provedbe ispitivanja, dana je na slici 3.12. (b).

#### b-2) Opis načina sloma s obzirom na slijed i oblik sloma

Način sloma punog zidanog ispuna uzorka, čije je odnos izmjera visine i duljine  $H/L_1=1,30/1,80=1,38$ , je posmični slom s prevladavajućim horizontalnim klizanjem po reškama morta. Slom je nastupio u tri ravnine. Nastanak značajnog drobljenja uz stup okvira posljedica je vrlo niske vrijednosti tlačne čvrstoće zidnih elemenata u horizontalnom smjeru.

### 3.2.4. Cjelokupni prikaz

U tablici 3.1. sabrane su ključne vrijednosti horizontalnih pomaka i sila pri razmatranim razinama oštećenosti i prevladavajući načini sloma uzoraka.

**Tablica 3.1.** Cjelokupni prikaz razina oštećenosti i načina sloma uzoraka

Uzorak	Razina oštećenosti								Način sloma
	Neznatno		Osrednje		Teško		Pred slom		
	IDR (%)	F <sub>H</sub> (kN)	IDR (%)	F <sub>H</sub> (kN)	IDR (%)	F <sub>H</sub> (kN)	IDR (%)	F <sub>H</sub> (kN)	
I/1	0,10	200,0	0,19	260,0	0,35	248,0	0,50	236,0	Dva zidna stupa i jedna zidna greda nastali su slomom reške morta iznad otvora. Prevladava posmični slom zidnog stupa.
I/2	0,11	180,0	0,18	280,0	0,49	310,0	1,29	250,0	Dva zidna stupa i dvije zidne grede nastali su slomom reške morta iznad i ispod otvora. Prevladava posmični slom zidnog stupa.
I/3	0,09	180,0	0,18	258,0	0,57	272,0	0,93	260,0	Dva zidna stupa i jedna zidna greda nastali su slomom reške morta iznad otvora. Prevladava posmični slom zidnog stupa.
I/4	0,10	200,0	0,22	261,0	0,58	283,0	1,30	292,0	Dva zidna stupa i dvije zidne grede nastali su slomom reške morta iznad i ispod otvora. Prevladava posmični slom zidnog stupa.
II/1	0,10	220,0	0,16	261,0	0,57	283,0	1,07	283,0	Prevladava posmični slom zidnog stupa.
II/2	0,09	170,0	0,16	239,0	0,43	242,0	1,07	275,0	Prevaldava posmični slom zidnog stupa.
II/3	0,10	220,0	0,21	230,0	0,50	240,0	0,99	279,0	Prevaldava posmični slom zidnog stupa.
II/4	0,08	150,0	0,15	230,0	0,36	292,0	0,99	280,0	Prevaldava posmični slom zidnog stupa.
III/1	-	-	-	-	-	-	-	-	Tečenje armirano-betonskog okvira nastupilo je horizontalnoj sili od 172,0 kN.
III/2	0,09	150,0	0,16	257,0	0,42	278,0	1,09	288,0	Nastupio je horizontalni slom po reškama morta. Tečenje armirano-betonskog okvira nastupilo je horizontalnoj sili od 260,0 kN.





Slika 3.11. Fotografije uzoraka grupa I i II nakon sloma zidanog ispuna



a) UZORAK TIP (III/1)



b) UZORAK TIP (III/2)



Slika 3.12. Fotografije uzoraka grupe III: a) pri pripremi ispitivanja i b) nakon sloma zidanog ispuna

### 3.3. Kose vlačne pukotine na zidanom ispunu

Dijagonalne i ne-dijagonalne pukotine nastale su u zidanom ispunu s različitim nagibima i smjerovima ovisno o tipu uzorka. Njihov značaj je u tome što predstavljaju stvarne tlačne dijagonale.

#### 3.3.1. Uzorci grupe I

Na zidanom ispunu uzoraka grupe I, u skladu sa slikom 3.11., nastale su sljedeće kose vlačne pukotine:

- Na zidanom ispunu uzorka tip (I/1) nastaju dijagonalne vlačne pukotine pod kutom od  $65^\circ$  prema horizontali. Nastaju na zidnom stupu nastalom ispod slomljene horizontalne reške morta u razini gornjeg ruba otvora. Također se javljaju od gornjeg ugla ispuna ka gornjem uglu otvora uslijed koncentracije naprezanja. Posljednje nisu bile presudne pri gubitku nosivosti.
- Na zidanom ispunu uzorka tip (I/2), oko otvora, nastaju dvije glavne kose pukotine pod kutom od  $45^\circ$  prema horizontali (za jedan smjer). Prva počinje od stupa okvira na visini slomljene reške morta u ravni gornjeg ruba otvora i završava na temeljnoj gredi uz značajno oštećenje oko donjeg ugla otvora. Druga nastala pukotina počinje iznad otvora i završava kod stupa okvira.

- c) Na zidanom ispunu uzorka tip (I/3), nastala kosa pukotina (na zidnom stupu) počinje od stupa okvira na razini slomljene reške morta u ravnini s gornjim rubom otvora i završava pri dnu otvora, pod kutom od  $45^\circ$  prema horizontali.
- d) Na zidanom ispunu uzorka tip (I/4), nastala kosa pukotina (na zidnom stupu) počinje od stupa okvira na razini slomljene reške morta u ravnini s gornjim rubom otvora i završava pri dnu otvora, pod kutom od  $45^\circ$  prema horizontali, ali s dodatnim slomom reške morta u sredini zidnog stupa.

### 3.3.2. Uzorci grupe II

Na zidanom ispunu uzoraka grupe II, u skladu sa slikom 3.11., nastale su sljedeće kose vlačne pukotine:

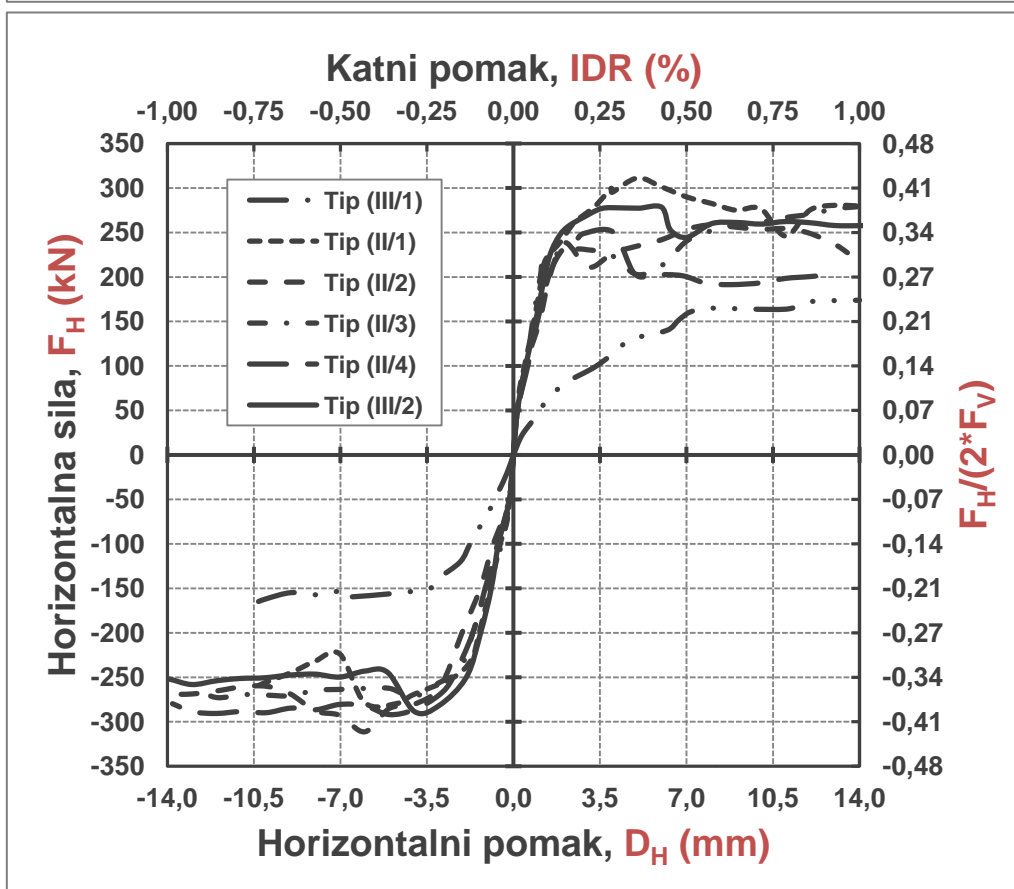
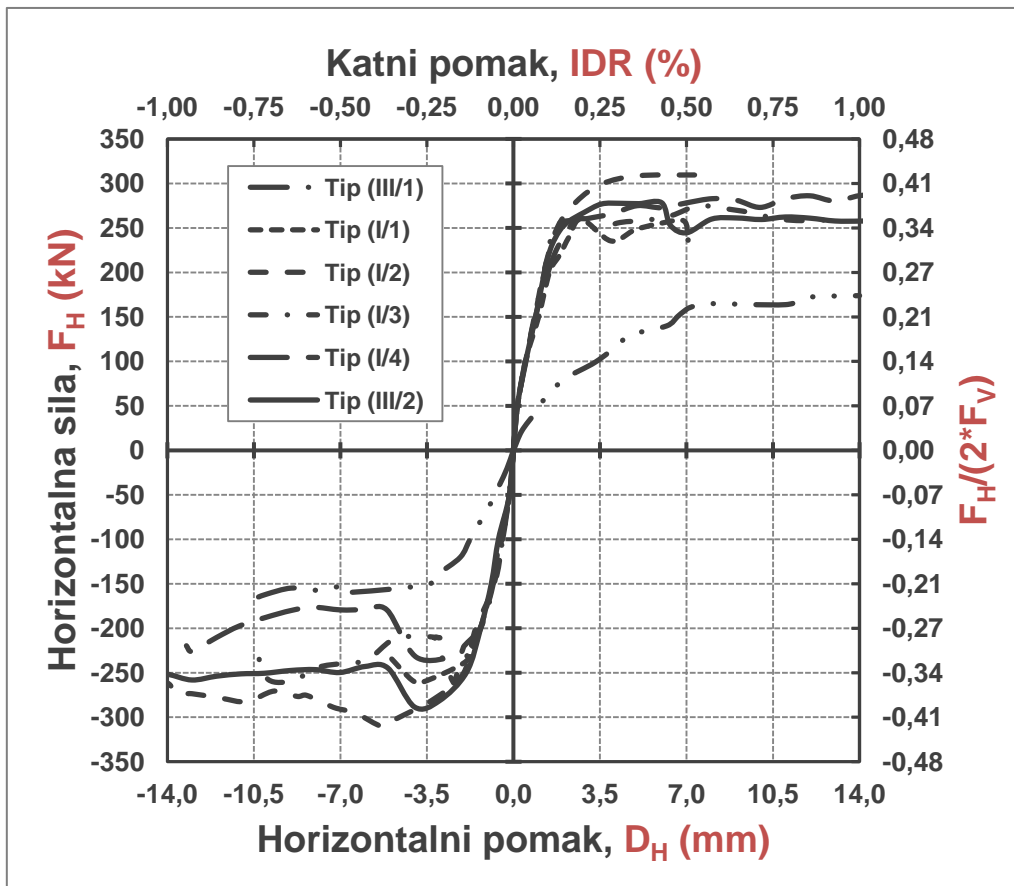
- a) Na zidanom ispunu uzorka tip (II/1) nastaju dijagonalne vlačne pukotine pod kutom od  $65^\circ$  prema horizontali. Nastaju na zidnom stupu predodređenim izvedbom vertikalnih serklaža.
- b) Na zidanom ispunu uzorka tip (II/2), oko otvora, nastaju dvije glavne kose pukotine pod kutom od  $45^\circ$  prema horizontali (za jedan smjer). Prva počinje od ugla ispuna i završava kod donjeg ugla otvora, dok druga počinje od stope serklaža i završava na kontaktu sa stupom okvira.
- c) Na zidanom ispunu uzorka tip (II/3), nastaju pukotine pod kutom od  $45^\circ$  prema horizontali, na zidnom stupu predodređenom izvedbom vertikalnih serklaža.
- d) Na zidanom ispunu uzorka tip (II/4), nastaju pukotine pod kutom od  $45^\circ$  prema horizontali, na zidnom stupu predodređenom izvedbom vertikalnih serklaža.

### 3.3.3. Uzorci grupe III

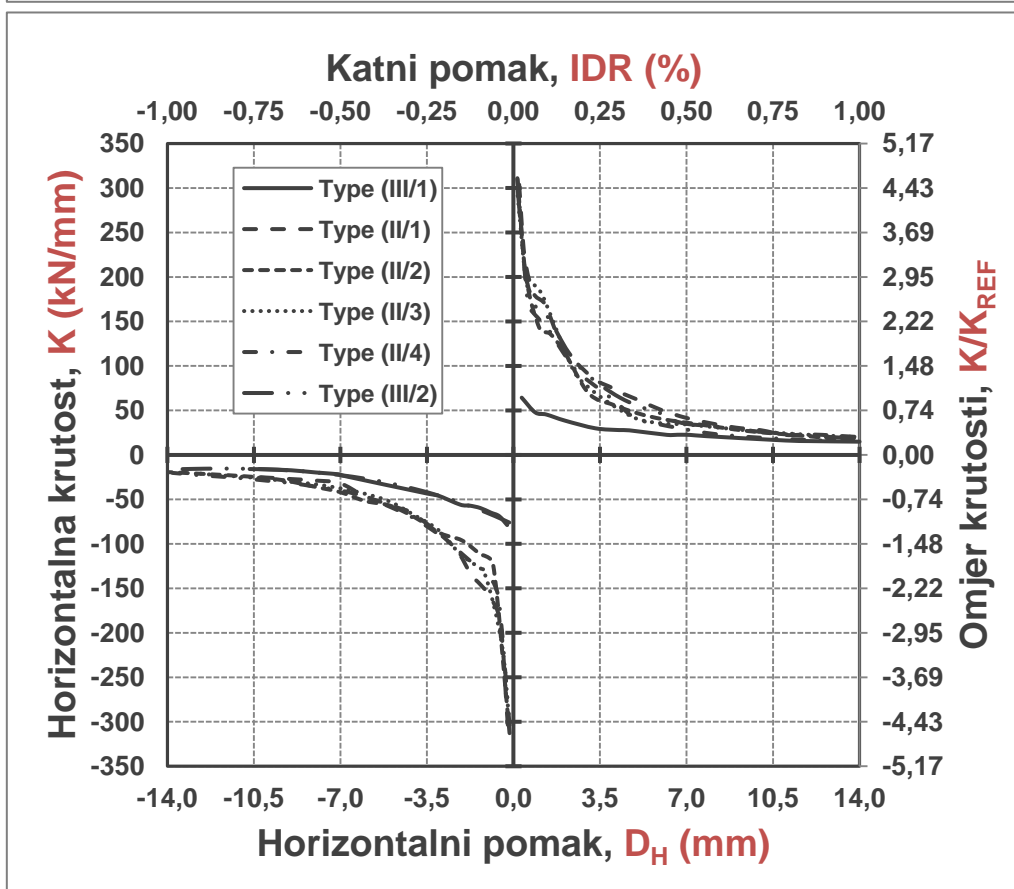
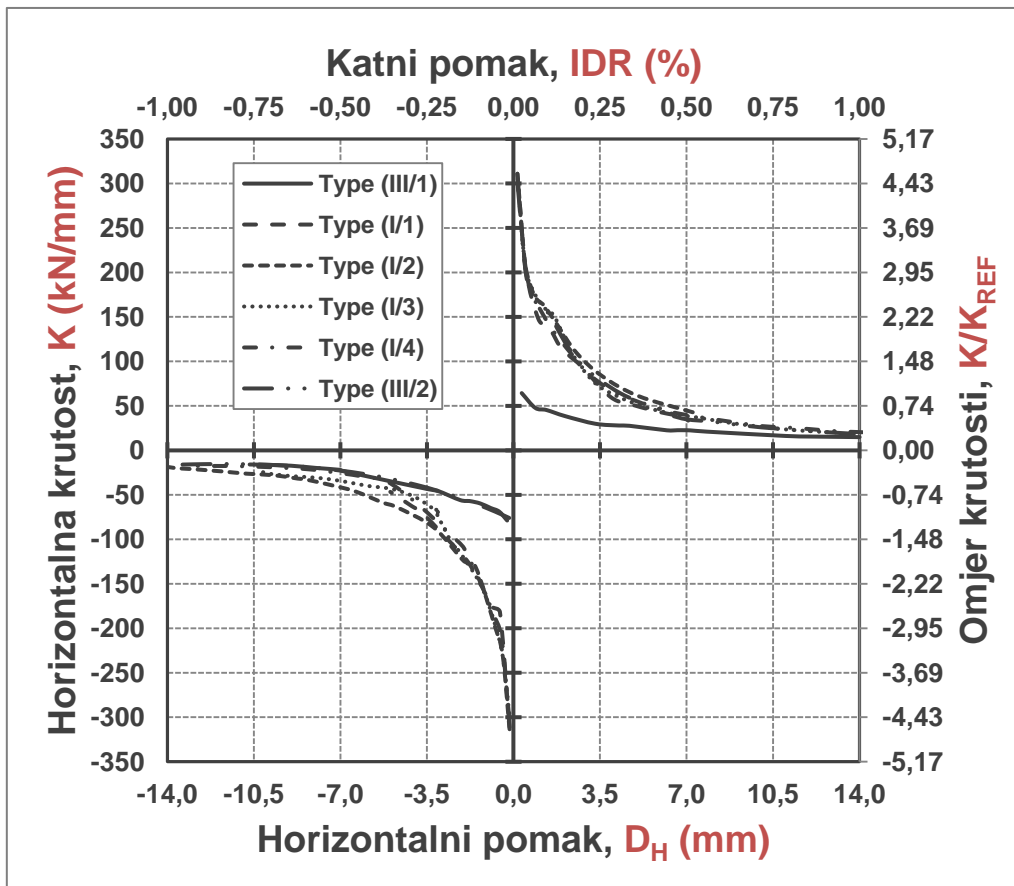
Na zidanom ispunu uzorka tip (III/2) nastaju kose pukotine pod kutom od  $45^\circ$  prema horizontali od uglova ispuna ka slomljenoj srednjoj ravni (slom reške morta).

## 3.4. Svojstva histereznih i primarnih krivulja

Histerezne i pripadne im primarne krivulje dobivene su na osnovu mjerenih horizontalnih sila i pomaka. Primarna krivulja povezuje vršne vrijednosti postignutog opterećenja pojedinih ciklusa. Pomaci su izraženi na apscisama putem izravno izmjerenih vrijednosti pomaka  $D_H$  (mm) tijekom ispitivanja te katnog pomaka dobivenog izrazom  $IDR = D_H / (H_i + d_g / 2) * 100$  (%) gdje je  $H_i$  visina ispuna i  $d_g$  visina poprečnog presjeka grede okvira. Na ordinatama je prikazana izmjerena vrijednost horizontalne sile  $F_H$  (kN) i njena vrijednost normalizirana u odnosu na vrijednost stalnih uzdužnih sila u stupovima  $F_V$  (kN), putem izraza  $F_H / (2 * F_V)$ . Ovime je dan općenit prikaz ponašanja uzoraka.



Slika 3.13. Primarne krivulje uzoraka grupe I i II



Slika 3.14. Krivulje opadanja horizontalne krutosti uzoraka grupe I i II

Prikazana svojstva ovih krivulja su vrijednosti ukupne histerezne energije, nosivost i krutost. Horizontalna krutost proračunata je putem horizontalne sile i pripadnog pomaka izrazom  $K=F_H/D_H$  (kN/mm), dok je ukupna histerezna energija  $E$  (kNmm) dobivena kao zbroj ploština unutar histereznih petlji do krajnjeg katnog pomaka. U nastavku teksta dan je opis svojstava histereznih i primarnih krivulja za pojedine grupe uzoraka te njihov usporedni prikaz.

### 3.4.1. Uzorci grupe I

Histerezne i pripadne primarne krivulje za uzorke grupe I dane su na slikama 3.1. i 3.3. Dalje u tekstu opisani su najznačajnije osobine ovih krivulja te je ujedno dan prikaz dobivenih histereznih energija te krivulja pada krutosti, ovisnog o razini oštećenosti zidanog ispuna uzoraka. Iako različitih zidanih ispuna s obzirom na vrstu i smještaj otvora, pri neznatnoj oštećenosti uzoraka, pri katnom pomaku od približno  $IDR=0,10$  % I, među uzorcima grupe I, s obzirom na histerezna svojstva, nema bitnih odstupanja u nosivosti i krutosti. Primarna krivulja nosivosti je linearna, i pad krutosti, koji je sličan za sve uzorke, iznosi približno 50 % u odnosu na početnu vrijednost. Vrijednosti histerezne energije, prema tablici 3.2., veće su za uzorke s otvorima za prozor.

Najznačajnija osobina primarnih krivulja je točka tečenja. Nije ju moguće izravno procijeniti zbog postupnog prijelaza u nelinearno područje (primarna krivulja je zakrivljena), stoga su usvojene vrijednosti horizontalne sile i pomaka za prvu točku tečenja. Prva točka tečenja nastala je pri vrijednosti katnog pomaka od približno  $IDR=0,20$  % za sve uzorke grupe I, dakle pri nastanku osrednje razine oštećenosti. Dosegnuta razina opterećenja pri tome, za sve uzorke grupe I bila je također vrlo slična, i iznosila je približno  $F_H=265,0$  kN. Pad krutosti je iznosio približno 70% u odnosu na početnu vrijednost za sve uzorke grupe I, u skladu sa slikom 3.14. Do dostizanja prve točke tečenja, uzorci s otvorom za vrata pokazuju veće vrijednosti histerezne energije. To je rezultat preranog oštećenosti u uglovima nastalih zidnih stupova te sklonost ka ispadanju iz ravni. Pri krajnjim katnim pomacima veću histereznu energiju ostvaruju uzorci s otvorom za prozor, smješteni u sredini ili s otklonom. Kod njih je aktivna slomljena horizontalna ploština iznad otvora veća nego kod uzoraka tip (I/1) i tip (I/3), koji imaju otvor za vrata.

Velik broj ciklusa opterećivanja postignut je do dostizanja granice tečenja, ali nakon toga uzorak je opterećivan u jednom smjeru do sloma zidanog ispuna. Najveće opterećenje za sve uzorke iznosilo je prosječno  $F_H=280,0$  kN. Nelinearni odnos sile i pomaka uzrokovan je oštećenošću zidanog ispuna. Prema primarnim krivuljama i tablici 3.1., razina postignutog katnog pomaka približno je  $IDR=1,0$  %, osim za uzorak tip (I/1). Kod uzorka tip (I/1), s otvorom za vrata u sredini, krajnji katni pomak je iznosio  $IDR=0,50$  %. Postignuti pad krutosti

pri krajnjem pomaku je gotovo potpun, tj. krutost armirano-betonskog okvira sa zidanim ispunom postaje jednaka onoj od samog okvira  $K_{REF}$ . Najmanja ploštinu histerezne energije dobivena je za uzorak tip (I/1), jer se zidani ispun urušio znatno ranije nego kod ostalih uzoraka.

Usporedni prikaz primarnih krivulja dan je na slici 3.13, dok je usporedni prikaz opadanja krutosti s obzirom na horizontalni pomak dan na slici 3.14.

### 3.4.2. Uzorci grupe II

Histerezne i pripadne primarne krivulje za uzorke grupe I dane su na slikama 3.5. i 3.7. Dalje u tekstu opisani su najznačajnije osobine ovih krivulja te je ujedno dan prikaz dobivenih histerezni energija te krivulja pada krutosti, ovisnog o razini oštećenosti zidanog ispuna uzoraka grupe II. Za razliku od uzoraka grupe I, ovi uzorci imaju predodređene izmjere zidnog stupa te je putem serklaža onemogućen slom oslabljene horizontalne reške morta iznad ili ispod otvora. Međutim, iako različitih zidanih ispuna s obzirom na vrstu i smještaj otvora te prisutnost vertikalnih serklaža, pri neznatnoj oštećenosti uzoraka, pri katnom pomaku od približno  $IDR=0,10$  %, među uzorcima grupe II, s obzirom na histerezna svojstva, nema bitnih odstupanja u nosivosti i krutosti. Slična su kao i kod grupe I. Primarna krivulja nosivosti je linearna, i pad krutosti, koji je sličan za sve uzorke, iznosi približno 50 % u odnosu na početnu vrijednost. Veće ploštine petlji, prema slikama 3.5. i 3.7. su kod uzoraka s otklonjenim otvorom.

Točku tečenja, kao i kod uzoraka grupe I, nije moguće izravno procijeniti zbog postupnog prijelaza u nelinearno područje (primarna krivulja je zakrivljena). Iz tog razloga su usvojene vrijednosti horizontalne sile i pomaka za prvu točku tečenja. Prva točka tečenja nastala je pri vrijednosti katnog pomaka od približno  $IDR=0,20$  % za sve uzorke grupe II, dakle pri nastanku osrednje razine oštećenosti, prema tablici 3.1. Dosegnuta razina opterećenja pri tome, za sve uzorke grupe II bila je također vrlo slična, i iznosila je približno  $F_H=240,0$  kN. Pad krutosti je iznosio približno 70% u odnosu na početnu vrijednost za sve uzorke grupe II, u skladu sa slikom 3.14. Do dostizanja prve točke tečenja, uzorci s otklonjenim otvorom pokazuju veće vrijednosti histerezne energije, kao rezultat načina oštećenosti.

Velik broj ciklusa opterećivanja postignut je do dostizanja granice tečenja, ali nakon toga uzorak je opterećivan u jednom smjeru do sloma zidanog ispuna. Najveće opterećenje za sve uzorke iznosilo je prosječno  $F_H=280,0$  k, kao i kod grupe I. Nelinearni odnos sile i pomaka uzrokovan je oštećenošću zidanog ispuna. Prema primarnim krivuljama i tablici 3.1., razina postignutog katnog pomaka približno je  $IDR=1,0$  % za sve uzorke. Postignuti pad



krutosti pri krajnjem pomaku je gotovo potpun, tj. krutost armirano-betonskog okvira sa zidanim ispunom postaje jednaka onoj od samog okvira  $K_{REF}$ , ali je urušavanje ispuna van ravni bilo znatno manje nego kod uzoraka grupe I. To potvrđuje odnos između uzoraka tip (I/1) i tip (II/1). Najveću ploštinu histerezne energije dobivena je za uzorak tip (I/1), jer se zidani ispun nije urušio znatno ranije, već je imao veću duktilnost zbog vertikalnih serklaža.

Usporedni prikaz primarnih krivulja dan je na slici 3.13, dok je usporedni prikaz opadanja krutosti s obzirom na horizontalni pomak dan na slici 3.14.

### 3.4.3. Uzorci grupe III

Granični slučajevi ovog istraživanja, uzorci tip (III/1) i tip (III/2), imaju sljedeća svojstva histerezni i primarnih krivulja. Uzorak tip (III/1) nema linearno-elastično područje krivulje, ali do katnog pomaka  $IDR=0,10\%$  postoji nelinearno-elastičan odziv. Do tog katnog pomaka krutost mu je pala za približno 25% u odnosu na početnu vrijednost. Općenito, pad krutosti nije eksponencijalan, kao kod uzoraka sa zidanim ispunom već znatno blaži. Gradijent pada je približno 4 kN/mm po mm horizontalnog pomaka i pretežno je konstantan. Uzorak tip (III/2) ima svojstva slična kao i uzorci grupa I i II.

Prva točka tečenja uzorka sa zidanim ispunom nastaje pri katnom pomaku  $IDR=0,16\%$  i horizontalnoj sili od  $F_H=260,0$  kN. Prazan okvir počinje teći pri sili od 172,0 kN i katnom pomaku od 1,0 %. Uzorak tip (III/2) do nastanka osrednjeg oštećenosti tj. prve točke tečenja pokazuje linearno-elastičan odziv, nakon čega se mijenja u nelinearno-plastični.

Ostvareni katni pomak za uzorak tip (III/2) iznosio je  $IDR=1,09\%$  te nosivost pri tome 290,0 KN. Pad krutosti jednak je kao za uzorke grupe I i II. Vrijednosti ukupne histerezne energije veće su za najmanje 20% od istih ostalih uzoraka. Za uzorak tip (III/1) ukupna histerezna energija tri puta je manja u odnosu na uzorak sa punim zidanim ispunom i općenito je manja od svih uzoraka sa zidanim ispunom.

Tablica 3.2. Ukupna histerezna energija E (kNmm) uzoraka

Uzorak	I/1	I/2	I/3	I/4	II/1	II/2	II/3	II/4	III/1	III/2
E (kNmm)	6714	8445	8281	10527	10574	8626	8492	9304	4994	12809

### 3.5. Pojednostavljene primarne krivulje

Kako bi se pojednostavili rezultati, stvarne primarne krivulje uzoraka podvrgnutih stalnom vertikalnom i cikličkom horizontalnom opterećenju, predstavljene su putem bi-linearnih pojednostavljenih primarnih krivulja. Iako pojednostavljene krivulje ne mogu dati detaljan prikaz kao i proračun putem mikro-modela, one mogu dati konzervativnu procjenu s nekoliko osnovnih značajki.

Bi-linearna krivulja dobivena je izjednačavanjem ploštine iznad i ispod stvarne (histerezne) primarne krivulje, za pozitivne i negativne cikluse. Ključni parametri pri tome bili su najveće horizontalno opterećenje  $F_{H,MAX}$  (kN), horizontalno opterećenje pri prvoj pukotini  $F_{H,CR}=0,7F_{H,MAX}$ , i katni pomak pri urušavanju ispuna  $IDR_U$  (koji ovisi o uzorku), prema (100). Rezultati su dani u tablicama 3.3. i 3.4. te na slikama 3.15. do 3.17.

### 3.5.1. Početna krutost

Početna ili elastična krutost predstavljena je nagibom prvog dijela bi-linearne krivulje koji polazi od ishodišta perma granici tečenja te se računa putem izraza  $k_{el}=F_{H,Y}/D_{H,Y}$ , gdje je  $D_{H,Y}$  horizontalni pomak na granici tečenja izražen u mm. U tablici 3.2. dani su podaci o početnim krutostima za pozitivne i negativne cikluse.

### 3.5.2. Granica tečenja i pripadni katni pomak

Vrijednosti horizontalnih sila na granici tečenja i sloma  $F_{H,Y}$  i  $F_{H,U}$  u kN (koji su jednaki) za pozitivne i negativne cikluse te pripadni katni pomaci  $IDR_Y$  i  $IDR_U$  u %, dani su u tablici 3.3.

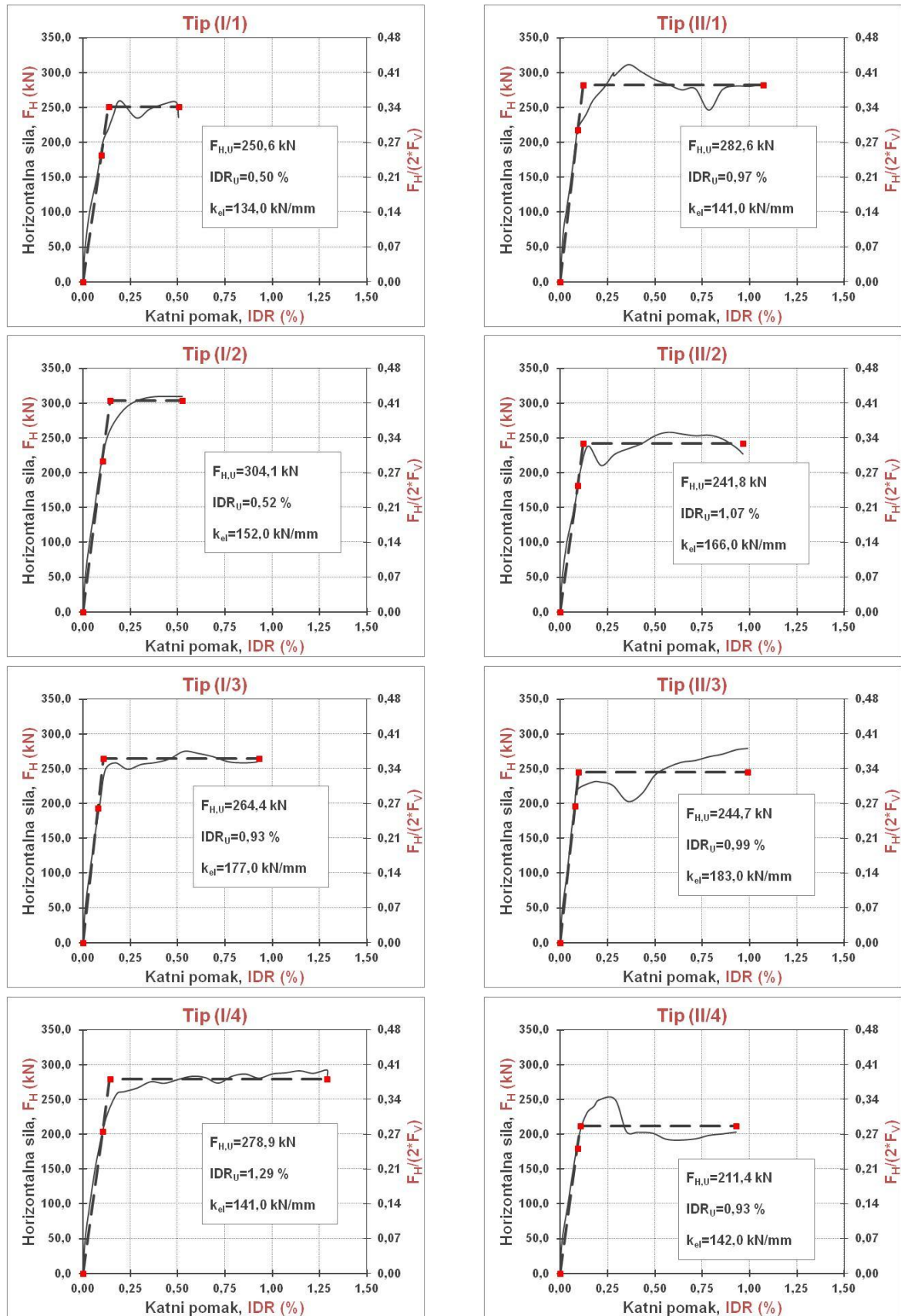
### 3.5.3. Granica sloma i krajnji katni pomak

Vrijednosti horizontalnih sila na granici sloma primjenom ove metode jednaka je onoj na granici tečenja. Smatra se da uzorak više ne može podnijeti porast sile, već samo porast pomaka nakon dostizanja granice tečenja (nema očvršćivanja). Krajnji katni pomak usvojen je prema ispitivanjima.

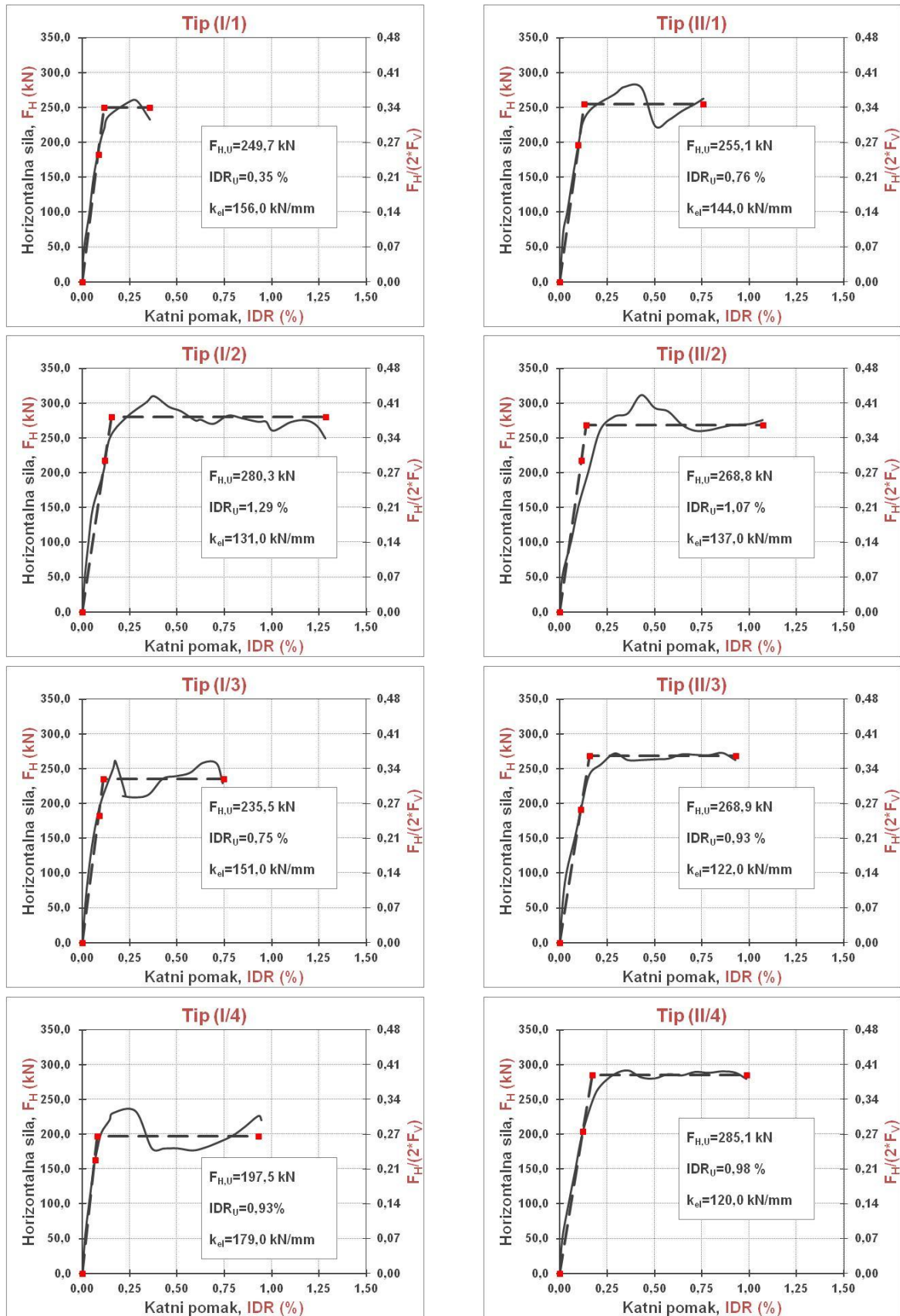
**Tablica 3.3.** Početna krutost  $k_{el}$  (kN/mm), sila pri prvoj pukotini  $F_{H,CR}$  (kN), granica tečenja  $F_{H,Y}$  (kN) i granica loma  $F_{H,U}$  (kN) te pripadni katni pomaci

Uzorak	Pozitivni ciklusi							Negativni ciklusi						
	$k_{el}$	$F_{H,CR}$	$IDR_{CR}$	$F_{H,Y}$	$IDR_Y$	$F_{H,U}$	$IDR_U$	$k_{el}$	$F_{H,CR}$	$IDR_{CR}$	$F_{H,Y}$	$IDR_Y$	$F_{H,U}$	$IDR_U$
I/1	130	182	0,10	251	0,13	251	0,50	163	182	0,08	250	0,11	250	0,35
I/2	155	217	0,10	304	0,14	304	0,52	129	217	0,12	280	0,15	280	1,29
I/3	173	193	0,08	264	0,11	264	0,93	145	183	0,09	236	0,11	236	0,75
I/4	146	204	0,10	279	0,14	279	1,29	166	163	0,07	198	0,08	198	0,93
II/1	173	218	0,09	283	0,12	283	1,07	140	196	0,10	255	0,13	255	0,76
II/2	144	181	0,09	242	0,12	242	0,97	142	218	0,11	269	0,14	269	1,07
II/3	175	196	0,08	245	0,10	245	0,99	124	191	0,11	269	0,16	269	0,93
II/4	142	179	0,09	211	0,11	211	0,93	122	204	0,12	285	0,17	285	0,98
III/1	28	121	0,31	163	0,41	163	1,00	56	117	0,15	157	0,20	157	0,76
III/2	155	195	0,09	263	0,12	263	1,09	144	202	0,10	256	0,12	256	1,13

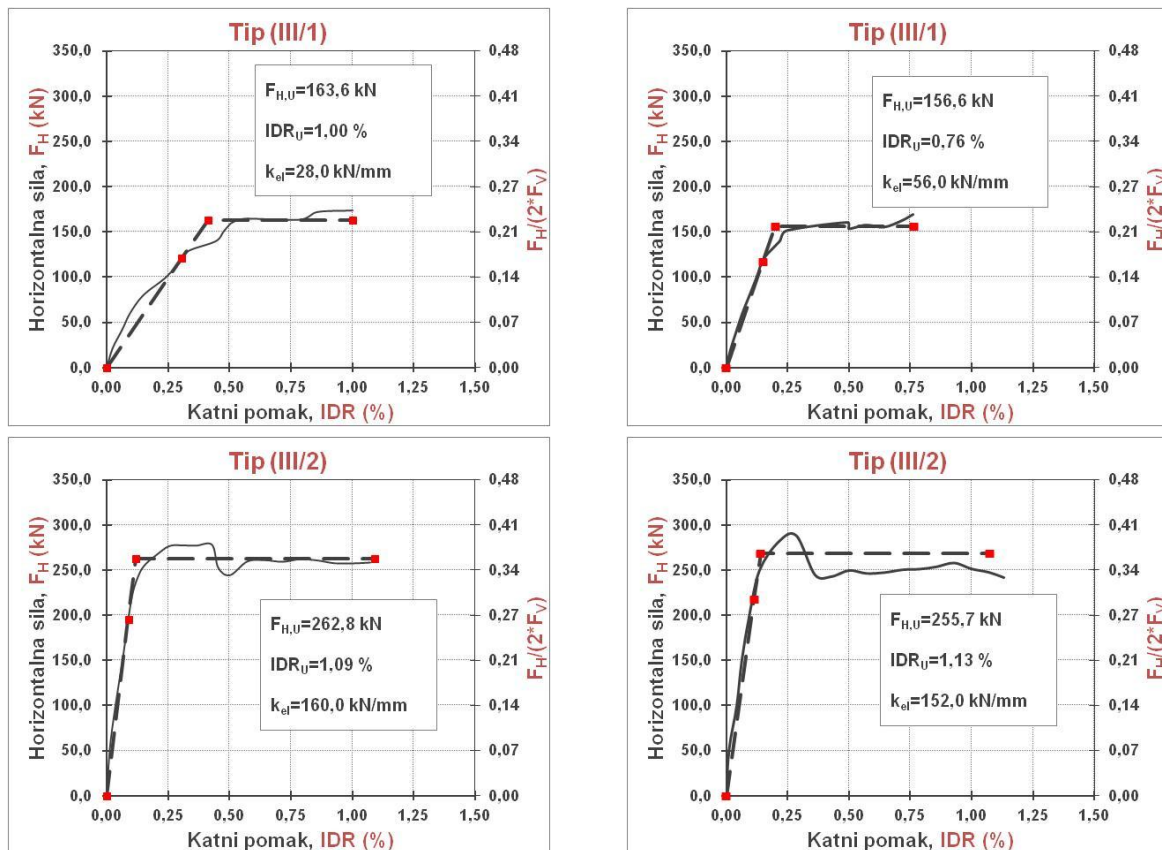




Slika 3.15. Pojednostavljene primarne krivulje pozitivnih ciklusa uzoraka grupe I i II



Slika 3.16. Pojednostavljene primarne krivulje negativnih ciklusa uzoraka grupe I i II



Slika 3.17. Pojednostavljene primarne krivulje pozitivnih (lijevo) i negativnih (desno) ciklusa uzoraka grupe III

Za razliku od stvarnih (histereznih) primarnih krivulja, putem pojednostavljenih (bilinearnih) moguće je jasno izraziti granicu tečenja. Nakon dostizanja krajnjeg katnog pomaka, najkonzervativnija procjena ponašanja bila bi strmi pad ka preostaloj nosivosti praznog okvira. Pored prikazanog modela pojednostavljivanja, postoje još modeli koji mogu predstaviti krutost nakon dosizanja granice tečenja kao u (19).

### 3.6. Sažetak i zaključak poglavlja

Detaljno su opisani rezultati provedenih ispitivanja, osobito utjecaja otvora na način sloma zidanog ispuna te nosivost armirano-betonskih okvira. Dana je usporedba načina sloma zidanih ispuna kao slom savijanjem, posmikom ili slomom horizontalne reške morta. Opažen je i opisan višestruki način sloma u slučaju izvedbe otvora bez vertikalnih serklaža. Opisana je pojava dijagonalnih i ne-dijagonalnih vlačnih pukotina u zidanom ispunu koje predstavljaju stvarne tlačne dijagonale, a za koje se pokazalo da su pod utjecajem otvora. Izrađeni su izmjereni histerezni dijagrami ovisnosti između horizontalne sile i katnog pomaka te je na osnovi njih urađena i primarna krivulja ovisnosti sile i pomaka. Svi uzorci sa zidanim ispunom imali su slične katne pomake pri doseg promatranih razina oštećenosti. Svi uzorci sa zidanim ispunom pokazali su značajne promjene u odnosu na krutost i nosivost praznog

armirano-betonskog okvira tj. povećanje istih. Također, utvrđeno je da među uzorcima sa zidanim ispunom ne postoji znatna razlika u nosivosti i krutosti.

Osobit je naglasak dan utjecaju vertikalnih serklaža oko otvora. Zaključno, vertikalni serklaži oko otvora učinili su način sloma predvidljivijim time što su umanjili utjecaj otvora i povećali stabilnost ispuna u ravni, što omogućava pouzdaniju procjenu načina sloma. Vertikalni serklaži i otvori utjecali su na smjer i broj kosih pukotina zidanom ispunu. Spriječili su mogućnost oslabljene horizontalne reške morta u ravni otvora. Također je naglašeno da dosadašnje spoznaje o zamjenskim dijagonalama nisu sasvim prikladne naročito za razmatranje okvira s ispunom s otvorima.

## Poglavlje 4.0.

# DISKUSIJA REZULTATA ISPITIVANJA

### 4.1. Uvod

U ovom poglavlju su međusobno uspoređeni rezultati ispitivanja. Uspoređen je način sloma, oštećenost zidanog ispuna i ponašanja uzoraka. Promatrani katni pomaci odabrani su u skladu s razinama oštećenosti zidanog ispuna. Utjecaj zidanog ispuna okvira u odnosu na prazan armirano-betonski okvir, dan je putem omjera nosivosti, krutosti i histerezne energije za pripadne katne pomake, odabrane u skladu s razinama oštećenosti. Svrha je u pogledu ovih parametara prikazati razlike između uzoraka tj. izraziti utjecaj vrste otvora, smještaja otvora te izvedbe vertikalnih serklaža oko otvora.

### 4.2. Razine oštećenosti i način sloma

#### 4.2.1. Pregled razina oštećenosti

U tablici 4.1. dan je prikaz vrijednosti katnih pomaka pri neznatnom, osrednjem i teškom oštećenju te oštećenju pred slom pojedinih uzoraka. Vrste oštećenja tj. pukotina povezane su s načinom sloma uzoraka te su od uzorka do uzorka međusobno različiti. Razine oštećenja zidanog ispuna pojedinih uzoraka dostignute su pri vrlo bliskim vrijednostima katnih pomaka. Iz tog razloga usvojene su vrijednosti katnog pomaka: IDR=0,10 % za neznatno, IDR=0,20 % za osrednje, IDR=0,50 % za teško i IDR=1,00 % za oštećenje pred slom.

**Tablica 4.1.** Prikaz katnog pomaka IDR (%) pri razinama oštećenosti zidanih ispuna uzoraka

Uzorak		Oštećenje zidanog ispuna			
		Neznatno IDR (%)	Osrednje IDR (%)	Teško IDR (%)	Pred slom IDR (%)
Grupa I	Tip (I/1)	0,10	0,19	0,50	0,50
	Tip (I/2)	0,11	0,18	0,49	1,29
	Tip (I/3)	0,09	0,18	0,57	0,93
	Tip (I/4)	0,10	0,22	0,58	1,30
Grupa II	Tip (II/1)	0,10	0,16	0,57	1,07
	Tip (II/2)	0,09	0,16	0,43	1,07
	Tip (II/3)	0,10	0,21	0,50	0,99
	Tip (II/4)	0,08	0,15	0,36	0,99
Grupa III	Tip (III/1)	-	-	-	-
	Tip (III/2)	0,09	0,16	0,42	1,09



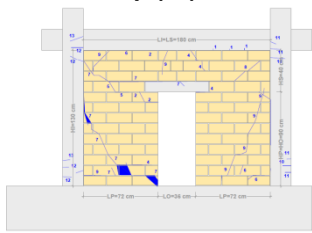
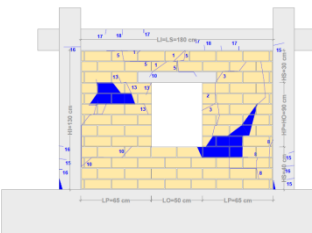
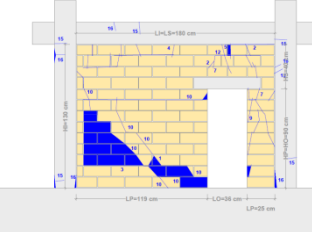
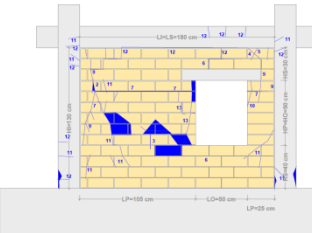
#### 4.2.2. Uzorci grupe I

U skladu s prethodno opisanim razvrstavanjem na razine oštećenosti, dan je kratki opis pripadnih vrsta nastalih oštećenja za uzorke grupe I tj. za uzorke bez vertikalnih serklaža oko otvora. Svojestven im je višestruki način sloma, a opis oštećenja je slijedeći:

- a) **Neznatno oštećenje** zidanog ispuna, pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, uzoraka grupe I, obilježavaju slične vrste oštećenja kao npr. odvajanje grede i stupa okvira od ispuna, vlasaste kose vlačne pukotine te kratke tanke pukotine u uglovima otvora. Odvajanje stupa okvira od ispuna prisutno je kod uzoraka s otklonjenim otvorom, dok je odvajanje grede okvira od ispuna svojstveno ispitnim uzorcima s otvorom u sredini.
- b) **Osrednje oštećenje** zidanog ispuna, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, za sve uzorke grupe I, počinje nastankom klizanja po reški morta u ravni iznad otvora ili nadvoja otvora te u slučaju uzoraka s otvorima za prozor i u ravni ispod otvora. Broj ravnina sloma ovisi stoga o vrsti otvora. Ove ravnine su podložne slomu uslijed oslabljene horizontalne ploštine. Pri tome se zidani ispun razlaže na dijelove unutar sebe. Postojeće kose pukotine na zidnim stupovima se šire te im se povećava brojnost. Pojava tlačnih pukotina u uglovima otvora postaje učestalija, što dovodi i do pomicanja lica zidnih elemenata.
- c) **Teška oštećenja** zidanog ispuna, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, sastoje se od znatnog proširenja postojećih pukotina, nastajanja novih te raspadanja zidnih elemenata u uglovima, već prema načinu sloma koji zidani ispun slijedi. Izdvojenim vrijednostima katnih pomaka za određene razine oštećenja, iznimka je uzorak Tip (I/1), koji je zbog ranog urušavanja zidanog ispuna pri teškom oštećenju, nosivost tj. stabilnost u vlastitoj ravni izgubio pri katnom pomaku od  $IDR=0,50\%$ . Kod uzoraka s vratima drobljenje u uglovima otvora znatno je utjecalo na stabilnost ispuna.
- d) **Oštećenje pred slom** zidanog ispuna pri katnom pomaku  $IDR=1,00\%$ , očituje se početkom gubitka stabilnosti ispuna u vlastitoj ravni. Zidni ispun uzoraka s otvorom za prozor, bez otklona tip (I/2) i s otklonom tip (I/4), dostigli su veće vrijednosti katnog pomaka pri slomu:  $IDR=1,29$  % odnosno  $IDR=1,30$  %, dok su nasuprot njih uzorci s otvorom za vrata, tip (I/1) i tip (I/3), dostigli krajnje pomake  $IDR=0,50\%$  i  $IDR=0,93\%$ . Uz to što su dostigli veće vrijednosti krajnjih katnih pomaka, uzorci s otvorima za prozor pokazali su i veću stabilnost u vlastitoj ravni. Uspjeli su pretrpjeti veća oštećenja do konačnog sloma.

U tablici 4.2., opisan je način oštećenja za pripadnu razinu oštećenosti i katni pomak uzoraka grupe I. Dani opis u skladu je s prethodnim poglavljem, iz čijeg su sadržaja izvučeni ključni podaci o oštećenju tj. pukotinama.

Tablica 4.2. Razine i vrsta oštećenosti uzoraka grupe I s pripadnim katnim pomacima

Uzorak u raspucalo stanju	Oštećenje zidanog ispuna			
	Neznatno IDR=0,10 (%)	Osrednje IDR=0,20 (%)	Teško IDR=0,50 (%)	Pred slom IDR=1,0 (%)
<p><b>Tip (I/1)</b></p> 	<p>Odvajanje morta na dodiru grede i ispuna te kose pukotine kroz zidne elemente i mort u blizini otvora</p>	<p>U horizontalnoj ravni iznad nadvoja nastaje slom po reški morta te se ispun razlaže. Dijagonalne pukotine u zidnom stupu se produljuju i šire. Drobljenje uglova u blizini otvora postaje učestalo.</p>	<p>Znatno proširenje prethodno nastalih dijagonalnih pukotina. Ispun se odvaja od stupova te drobljenje uglova u blizini otvora postaje učestalo što vodi do ljuštenja bočnih strana zidnih elemenata te drobljenja reški morta.</p>	<p>Ispun je postao nestabilan u vlastitoj ravnini slomom dijelova kraj otvora i širenjem dijagonalnih pukotina.</p>
<p><b>Tip (I/2)</b></p> 	<p>Pukotine na dodiru grede i ispuna te kroz zidne elemente i mort između grede i nadvoja.</p>	<p>Iznad nadvoja i ispod otvora horizontalnim slomom reške morta ispun se razlaže na dijelove. Dijagonalne pukotine u zidnom stupu se produljuju i šire.</p>	<p>Dijagonalne vlačne pukotine se znatno produljuju i šire. Pomicanje bočnih strana zidnih elemenata. Odvajanje na dodiru stupa ab okvira i ispuna. Područje u blizini uglova otvora biva potpuno zdrobljeno.</p>	<p>Gubitak stabilnosti dijelova ispuna lijevo i desno od otvora uslijed višestrukih dijagonalnih vlačnih pukotina i drobljenja uglova u blizini otvora.</p>
<p><b>Tip (I/3)</b></p> 	<p>Tanke dijagonalne pukotine, pretežno u većem dijelu ispuna između stupa okvira i otvora. Višestruke tlačne pukotine u uglovima otvora.</p>	<p>Slom reške morta u ravni ispod nadvoja razlaže ispun na dijelove. Ukrštene dijagonalne vlačne pukotine produljile su se kroz zidne elemente i mort. U blizini gornjih uglova ispuna i donjih uglova otvora primjetno je pomjerane bočnih strana zidnih elemenata.</p>	<p>Dijagonalne vlačne pukotine znatno se šire. U uglovima otvora i ispuna, bočne strane zidnih elemenata otpadaju.</p>	<p>Ispun gubi nosivost dijagonalnim vlačnim slomom dijela ispuna omeđenog stupom okvira otvorom i horizontalnim slomom ravni ispod nadvoja.</p>
<p><b>Tip (I/4)</b></p> 	<p>Tanke dijagonalne pukotine, pretežno u većem dijelu ispuna između stupa okvira i otvora. Višestruke tlačne pukotine u uglovima otvora.</p>	<p>Slom reške morta u ravni ispod i iznad nadvoja razlaže ispun na dijelove. Ispun se odvaja od stupa na duljini usporedno s visinom otvora. Višestruke tanke dijagonalne vlačne pukotine.</p>	<p>Drobljenje uglova u blizini otvora. Otpadaju bočne strane zidnih elemenata. Dijagonalne pukotine na zidnom stupu se znatno šire. Pojava sloma reški morta u sredini zidnog stupa.</p>	<p>Drobljenje uglova te dijagonalne vlačne pukotine na dijelu ispuna pored otvora dovele su do gubitka nosivosti ispuna.</p>

### 4.2.3. Uzorci grupe II

Uzorci grupe II su za razliku od onih grupe I, s prisutnošću vertikalnih serklaža oko otvora. Način sloma, koji je u svim slučajevima bio posmik, vezan im je isključivo za konstruktivno predodređene zidne stupove. Nastale kose pukotine su dijagonalne u slučaju otvora za vrata, ali u slučaju otvora za prozor nisu. U skladu s prethodno opisanim razvrstavanjem na razine oštećenosti, dan je osvrt na svojstva istih za uzorke grupe II:

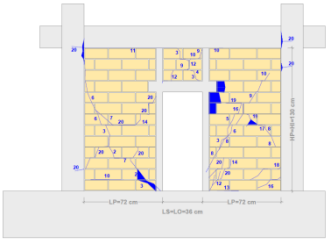
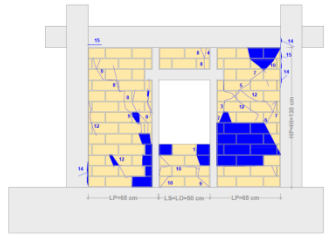
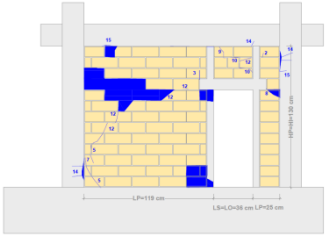
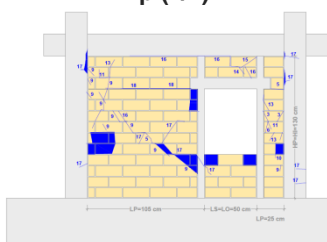
- a) **Neznatno oštećenje** zidanog ispuna, pri katnom pomaku  $IDR=0,10\%$ , uzoraka grupe II, tip (II/1) i tip (II/2), s otvorom u sredini, obilježava pojava tankih pukotina u uglovima dijela ispuna između vertikalnih serklaža i otvora, dok je za uzorke tip (II/3) i tip (II/4), s otklonjenim otvorom, prva nastala pojava vlasastih kosih pukotina.
- b) **Osrednje oštećenje** zidanog ispuna, pri katnom pomaku  $IDR=0,20\%$ , obilježeno je produljenjem postojećih kosih pukotina i nastankom novih te pomijeranjem bočnih strana tj. lica zidnih elemenata u uglovima dijelova ispuna. Za uzorke, tip (II/1) i tip (II/2), izraženije je drobljenje u uglovima ispuna u dodiru s vertikalnim serklažom, dok je uzorke, tip (II/3) i tip (II/4), izraženija pojava i širenje kosih pukotina.
- c) **Teška oštećenja** zidanog ispuna, pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$ , očituje se znatnim proširenjem i produljenje postojećih kosih pukotina te nastankom novih. Uglovi u stopi vertikalnih serklaža se drobe. Bočne stranice zidnih elemenata u uglovima ispadaju ili se pojava širi. Uglovi oko otvora također postaju zahvaćeni pomicanjem lica zidnih elemenata.
- d) **Oštećenje pred slom** zidanog ispuna pri katnom pomaku  $IDR=1,00\%$ , očituje se slomom dijela ispuna omeđenog vertikalnim serklažima. Vrijednosti krajnjih katnih pomaka za sve uzorke grupe II su gotovo jednake, što ukazuje na to kako vertikalni serklaž ujednačava odgovor uzorka. Utjecaj smještaja i vrste otvora ovdje nije od značaja, zbog prisutnosti vertikalnih serklaža, osim što smještaj otvora određuje položaj vertikalnih serklaža.

U usporedbi s uzorcima grupe I, zidani ispun uzoraka grupe II, iako su im vrijednosti krajnjih pomaka bliske, zbog sidrenja vertikalnih serklaža u ispun, tj. zbog omeđenosti otvora, čime i ispun, stvoreni omeđeni ispun pokazao je veću stabilnost ka ispadanju iz vlastite ravni. Oštećenja uzoraka grupe II vežu se isključivo za predodređeni zidni stup, dok su kod uzoraka grupe I raširena po čitavom ispunu. U obje grupe drobljenje uglova otvora izraženije je u slučaju otvora za prozor, i to donjih rubova. Donji uglovi otvora za prozor također su jedan od početaka nastalih kosih ne-dijagonalnih pukotina.

U tablici 4.3., opisan je način oštećenja za pripadnu razinu oštećenja i katni pomak, za uzorke grupe II. Dani opis u skladu je s prethodnim poglavljem, iz čijeg su sadržaja izvučeni ključni podatci o oštećenju tj. pukotinama.



Tablica 4.3. Razine i vrsta oštećenosti uzoraka grupe II s pripadnim katnim pomacima

Uzorak u raspucanom stanju	Oštećenje zidanog ispuna			
	Neznatno IDR=0,10 (%)	Osrednje IDR=0,20 (%)	Teško IDR=0,50 (%)	Pred slom IDR=1,0 (%)
<p><b>Tip (II/1)</b></p> 	<p>Nastaju tlačne pukotine u uglovima vertikalnih serklaža i tanke dijagonalne pukotine.</p>	<p>U donjem uglu ispuna nastaje horizontalna vlačna pukotina duljine zidanog elementa. Na dodiru grede i ispuna ponad otvora dolazi do međusobnog odvajanja. Brojnost kratkih pukotina veća je u blizini uglova otvora.</p>	<p>Dijagonalne pukotine se znatno proširuju te su također vidljive nove višestruke dijagonalne pukotine te se uglovi drobe.</p>	<p>Uslijed drobljenja uglova i dijagonalnog vlačnog sloma, nastaje gubitak nosivosti dijela ispuna između stupa ab okvira i vertikalnog serklaža.</p>
<p><b>Tip (II/2)</b></p> 	<p>Nastaju tlačne pukotine u uglovima vertikalnih serklaža i tanke ne-dijagonalne pukotine.</p>	<p>Postojeće ne-dijagonalne pukotine potpuno se produljuju te se prenose preko vertikalnog serklaža na parapet. Primjetno je pomicanje bočnih strana zidnih elemenata u blizini donjeg ugla otvora.</p>	<p>Postojeće ne-dijagonalne pukotine se znatno produljuju. Bočne strane zidnih elemenata ispadaju u blizini donjih uglova otvora, dok je primjetno njihovo pomicanje u gornjem uglu ispuna.</p>	<p>Dijelovi ispuna lijevo i desno od otvora postaju nestabilni, uslijed višestrukih ne-dijagonalnih pukotina te drobljenja uglova.</p>
<p><b>Tip (II/3)</b></p> 	<p>Nastaju tlačne pukotine u uglovima vertikalnih serklaža i tanke dijagonalne pukotine.</p>	<p>Nastaje nekoliko dodatnih dijagonalnih pukotina. U uglu otvora primjetno je pomicanje bočnih strana zidnih elemenata.</p>	<p>Postojeće dijagonalne pukotine se znatno produljuju. Primjetno je pomicanje bočnih strana zidnih elemenata na spoju horizontalne i dijagonalne pukotine.</p>	<p>Ispun postaje nestabilan zbog dijagonalnog sloma.</p>
<p><b>Tip (II/4)</b></p> 	<p>Tlačne pukotine u uglovima serklaža i tanke dijagonalne pukotine. Kratki horizontalni slom reške primjetan je u horizontalnoj ravni ispod nadvoja. U gornjim uglovima otvora i ispuna primjetno je drobljenje morta.</p>	<p>Tanke ukrštene dijagonalne pukotine i horizontalni slom nastavljaju se duljiti. Primjetno je pomicanje bočnih strana zidnih elemenata u donjim uglovima otvora i ispuna.</p>	<p>Nastaje odvajanje gornje grede i ispuna. Dijagonalne vlačne pukotine postaju duže i šire se te se također pojavljuju dodatne nove.</p>	<p>Očito je drobljenje uglova, osobito u gornjem uglu otvora gdje također zahvaća vertikalni serklaž. Ispun postaje nestabilan zbog dijagonalnog sloma zidnog stupa.</p>


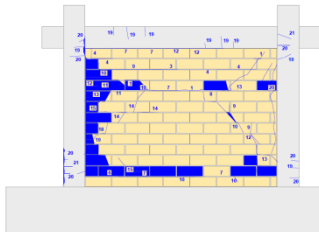
#### 4.2.4. Uzorci grupe III

U usporedbi s ispitnim uzorcima grupe I i II, uzorak grupe III sa zidnim ispunom, ima vrijednosti pomaka koji pripadaju određenim razinama oštećenja vrlo slične, ali je slijed oštećivanja različit, a također i način sloma. U tablici 4.4., opisan je način oštećenja za pripadnu razinu oštećenja i katni pomak uzorka grupe III, tip (III/2). Dani opis u skladu je s prethodnim poglavljem, iz čijeg su sadržaja izvučeni ključni podaci o oštećenju tj. pukotinama.

Ovdje nisu dane razine oštećenja armirano-betonskog okvira bez ispuna tj. uzorka tip (III/1), jer se pripadni opis oštećenja ne poklapa sa navedenim katnim pomacima. Uzorak tip (III/1) nije više mogao preuzeti prirast horizontalne sile pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %. U skladu s tim, u tablici 4.4., dan je opis pripadnog oštećenja na praznom armirano-betonskom okviru tj. ispitnom uzorku tip (III/1) pri navedenom katnom pomaku, koji odgovara svim ispitnim uzorcima obzirom da nije došlo do pojave posmičnih pukotina.

Sva oštećenja uzoraka grupe I, II i III vezani su isključivo za zidani ispun, dok armirano-betonski okvir nije pretrpio značajna oštećenja.

**Tablica 4.4.** Razvrstavanje načina oštećenja zidanog ispuna uzorka tip (III/2), grupe II pri određenim razinama oštećenja i pripadna oštećenja na ispitnom uzorku tip (III/1)

Uzorak u raspucanom stanju	Oštećenje zidanog ispuna			
	Neznatno $IDR=0,10$ (%)	Osrednje $IDR=0,20$ (%)	Teško $IDR=0,50$ (%)	Pred slom $IDR=1,0$ (%)
<p><b>Tip (III/1)</b></p> 	-	-	Tanke vlačne pukotine uslijed savijanja u stopama stupova.	Tanke vlačne pukotine na gredi. Nastaje drobljenje betona te ljuštenje zaštitnog sloja.
<p><b>Tip (III/2)</b></p> 	Horizontalni slom reške morta u srednjem dijelu ispuna. Drobljenje morta primjetno je u uglovima ispuna. Vlasaste dijagonalne pukotine od uglova ispuna ka srednjoj ravni.	Nastaje horizontalni slom u donjoj trećini visine ispuna. Kratke tanke pukotine nastaju na dijelu ispuna uz rub ab stupova, a dijagonalne pukotine se u potpunosti spajaju sa slomljenim horizontalnom ravni.	Duž visine stupa primjetno drobljenje zidnih elemenata i morta. U donjoj trećini visine ispuna, duž horizontalnog sloma, primjetno je pomicanje bočnih strana zidnih elemenata.	Horizontalni slom reški morta u tri ravni, drobljenje ispuna duž ab stupa te nastanak dijagonalnih pukotina od uglova ispuna ka srednjoj ravni.

### 4.3. Način i oblik sloma uzoraka

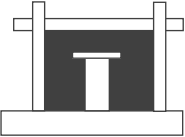
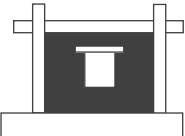

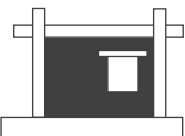
Dijelovi unutar zidanog ispuna, izmjera visine i duljine, koje su obilježene s  $H_P$  i  $L_P$  ili  $H_S$  i  $L_S$ , gdje izmjere s indeksom P označavaju dio ispuna, smješten pored otvora koji nosi u vertikalnom smjeru (engl. Pier), a S dio iznad otvora koji prvenstveno nosi u horizontalnom smjeru (engl. Spandrel), nastali su ili razlaganjem ispuna ili su predodređeni prisustvom vertikalnih serklaža. Prvo se odnosi na grupu uzoraka I, a drugo na grupu uzoraka II. Za pripadne dijelove ispuna usvojeni su nazivi zidni stup i zidna greda, koji su prethodno već korišteni. Prevladavajući slom ispuna određen je načinom raspucavanja.

#### 4.3.1. Uzorci grupe I

Nastankom horizontalnog klizanja tj. sloma reške morta u ravni iznad i ispod otvora koji nije omeđen vertikalnim serklažima, uslijed oslabljene horizontalne posmične ploštine, ispun se razlaže na dijelove različitih izmjera visine i duljine. Ove izmjere u ovisnosti su o vrsti i smještaju otvora.

U tablici 4.5. dani su odnosi izmjera dijelova na koje se zidni ispun odnosa izmjera  $H_I/L_I=1,30/1,80=0,72$  razložio te prevladavajući način sloma svakog uzorka.

**Tablica 4.5.** Prikaz i usporedba izmjera dijelova na koje se zidni ispun uzoraka Grupe I razložio i načina njihova sloma

Uzorak i izmjere zidanog ispuna $H_I/L_I=1,30/1,80=0,72$	Izmjere i odnos izmjera dijelova na koje se ispun razložio				Opis načina sloma
	Dio 1	Dio 2	Dio 3	Dio 4	
<b>Tip (I/1)</b> 	$H_P=H_O=0,90$ m $L_P=(L_I-L_O)/2=0,725$ m $(H_P/L_P=1,23)$	$H_P=H_O=0,90$ m $L_P=(L_I-L_O)/2=0,725$ m $(H_P/L_P=1,23)$	$H_S=H_I-H_O=0,40$ m $L_S=L_I=1,80$ m $(H_S/L_S=0,22)$	-	Dio 1 i 2 ispuna nastali su klizanjem reške morta ispod nadvoja. Prevladao je posmični slom.
<b>Tip (I/2)</b> 	$H_P=H_O=0,6$ m $L_P=(L_I-L_O)/2=0,65$ m $(H_P/L_P=0,92)$	$H_P=H_O=0,6$ m $L_P=(L_I-L_O)/2=0,65$ m $(H_P/L_P=0,92)$	$H_S=H_I-H_O-H_N=0,30$ m $L_S=L_I=1,80$ m $(H_S/L_S=0,17)$	$H_S=H_N=0,40$ m $L_S=L_I=1,80$ m $(H_S/L_S=0,22)$	Dio 1 i 2 ispuna nastali su klizanjem reške morta ispod i iznad otvora. Prevladao je posmični slom.
<b>Tip (I/3)</b> 	$H_P=H_O=0,90$ m $L_P=L_I-L_O-H_I/5=1,19$ m $(H_P/L_P=0,75)$	$H_P=H_O=0,90$ m $L_P=H_I/5=0,26$ m $(H_P/L_P=3,46)$	$H_S=H_I-H_O=0,40$ m $L_S=L_I=1,80$ m $(H_S/L_S=0,22)$	-	Dio 1 i 2 ispuna nastali su klizanjem reške morta ispod nadvoja. Prevladao je posmični slom.
<b>Tip (I/4)</b> 	$H_P=H_O=0,60$ m $L_P=L_I-L_O-H_O/5=1,04$ m $(H_P/L_P=0,58)$	$H_P=H_O=0,60$ m $L_P=H_I/5=0,26$ m $(H_P/L_P=2,31)$	$H_S=H_I-H_O-H_N=0,30$ m $L_S=L_I=1,80$ m $(H_S/L_S=0,17)$	$H_S=H_N=0,40$ m $L_S=L_I=1,80$ m $(H_S/L_S=0,22)$	Dio 1 i 2 ispuna nastali su klizanjem reške morta ispod nadvoja. Prevladao je posmični slom po mortu.

U skladu s tablicom 4.5. dan je pojedinačni opis načina i oblika sloma, uzoraka grupe I:

a) uzorak tip (I/1)

Odnosi izmjera visine i duljine dijelova ispuna lijevo i desno od otvora, kod kojih je visina veća od duljine, tj.  $H_P/L_P=0,90/0,725=1,23$ , upućivali su ka prevlasti normalnih naprezanja u odnosu na posmična. Premda je nastao tlačni slom uglova ispuna i vlačni slom reške morta u suprotnim uglovima zidnog stupa, što su znakovi savijanja, također su se pojavile izražene dijagonalne vlačne pukotine, kao znak posmičnog sloma. To je doprinijelo ranom urušavanju ispuna te upućuje na to da, iako omjer izmjera uvjetuje prevladavajuću ulogu normalnih naprezanja ovog dijela ispuna, da je materijal podložniji vlačnom slomu u smjeru dijagonalne, tj. slomu uslijed posmičnih naprezanja ili glavnih tlačnih tj. vlačnih naprezanja. Dio zidanog ispuna u ravni iznad otvora, izmjera  $H_S/L_S=0,40/1,80=0,22$  nije pretrpio teška oštećenja.

b) uzorak tip (I/2)

Odnosi izmjera visine i duljine dijelova ispuna lijevo i desno od otvora, pri čemu je visina bila približno jednaka duljini,  $H_P/L_P=0,60/0,65=0,92$ , upućivali su prevlast posmičnih u odnosu na normalna naprezanja. Nastale pukotine ukazuju na dijagonalni posmični slom zidnog stupa, što potvrđuje pojava dijagonalnih vlačnih pukotina, premda je bilo prisutno drobljenje uglova u blizini otvora, zbog koncentracije naprezanja. Dijelovi ispuna s odnosima izmjera  $H_S/L_S=0,30/1,80=0,17$  i  $H_S/L_S=0,40/1,80=0,22$ , iznad i ispod otvora, nisu pretrpjeli teška oštećenja. Urušavanje zidanog ispuna nastupilo je posmičnim slomom zidnog stupa.

c) uzorak tip (I/3)

Odnosi izmjera visine i duljine dijela ispuna pored otvora, kojem je visina manja od duljine,  $H_P/L_P=0,90/1,19=0,75$ , s prevlasti posmičnih naprezanja, upućivali su na pojavu nastalog sloma po reškama morta i posmičnog sloma, što potvrđuje i prikaz pukotina. Drugi dio ispuna pored otvora,  $H_P/L_P=0,90/0,26=3,46$ , pokazao je neznatan utjecaj na ponašanje uzorka tj. njegovo rano i teško oštećenje nije pokazalo utjecaj na prirast sile. Dio ispuna iznad ravni otvora, s odnosom izmjera  $H_S/L_S=0,40/1,80=0,22$ , nije pretrpio teška oštećenja.

d) uzorak tip (I/4)

Odnosi izmjera visine i duljine dijela ispuna pored otvora, kojem je visina manja od duljine,  $H_P/L_P=0,60/1,04=0,58$ , upućivali su prevlast posmičnih naprezanja. Nastale pukotine upućuju na pojavu nastalog sloma po reškama morta i posmičnog sloma. Drugi dio ispuna pored otvora,  $H_P/L_P=0,60/0,26=2,31$ , pokazao je neznatan utjecaj na ponašanje uzorka. Dijelovi ispuna s odnosima izmjera  $H_S/L_S=0,30/1,80=0,17$  i  $H_S/L_S=0,40/1,80=0,22$ , nisu pretrpjeli teška oštećenja.

Iako je način sloma zidanog ispuna uzoraka takav da se on razlaže na različite dijelove ovisno o otvoru, vrijednosti katnih pomaka pri dostizanju pojedinih razina oštećenja su bliske. Osnovne vrste oštećenja su različito zastupljene. Razlog tome je različit odnos izmjera dijelova zidanog ispuna, uvjetovan smještajem i vrstom otvora, što upućuje na prevladavajuću ulogu posmičnih ili normalnih naprezanja, pri čemu do izražaja dolazi čvrstoća materijala tj. zida, za dani slučaj. Iz tog razloga su za pojedine slučajeve, gdje bi se način otkazivanja trebao biti u potpunosti posmikom, radi o prevladavajućem slučaju sloma posmikom, jer su prisutna i obilježja drugih načina sloma.

Utjecaj izmjera otvora uzoraka na način sloma je u tome što se horizontalna posmična ploština umanjuje prisustvom otvora, čemu zidani ispun teži ka slomu po toj plohi. Duljina otvora za prozor i vrata  $L_o$ , je vrlo slična za oba otvora, stoga je i horizontalni slom nastupio pri približno jednakom katnom pomaku. Visina otvora,  $H_o$ , utjecala je na ravni sloma po horizontalnoj reški morta te time i na oblikovanje dijelova zidanog ispuna. Međutim nakon što se horizontalni posmični slom ispuna dogodio, u ravni iznad i ispod otvora, čime je ispun razložen na dijelove unutar sebe, način njegova sloma postao je uvjetovan izmjerama visine i duljine istih. Iako se slom ne može pripisati u potpunosti samo jednom načinu sloma, tj. postoji međudjelovanje više načina sloma, obzirom na omjer ovih izmjera, uočava se prevladavajući slom.

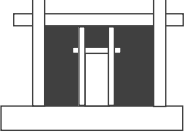
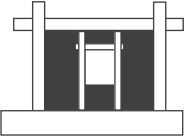
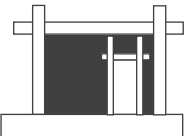
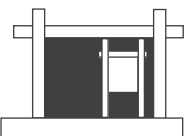
#### 4.3.2. Uzorci grupe II

U usporedbi s uzorcima grupe I, izvedbom vertikalnih serklaža dijelovi zidanog ispuna su postali omeđeni kao i sam otvor, jer je vertikalni serklaž izveden čitavom visinom ispuna te sidren vertikalno u gredu okvira te horizontalno u sam ispun. Horizontalni slom po reškama morta je spriječen ukoliko je serklaž dovoljno čvrst te su time dijelovi ispuna unaprijed određeni. Ovime je utjecaj otvora na način sloma znatno umanjen, također i utjecaja smještaj otvora, osim što smještaj otvora određuje i mjesto vertikalnih serklaža.

U tablici 4.6. dani su odnosi izmjera dijelova zidanog ispuna, odnosa izmjera  $H_i/L_i=1,30/1,80=0,72$ , predodređenih izvedbom vertikalnih serklaža. U tablici je također u posljednjem stupcu dan i opis sloma te na koji dio ispuna se on prvenstveno odnosio. Kako su vertikalni serklaži izvedeni čitavom visinom ispuna, unaprijed određeni dijelovi zidanog ispuna su logično, lijevo i desno od otvora. Dio ispuna iznad te ispod otvora (parapet), omeđen vertikalnim serklažima je sa svojim izmjerama naveden, ali je izvedbom vertikalnih serklaža ovim načinom postao nevažan, iako su tijekom raspucavanja opažena oštećenja, ali neznatna.

Opširniji opis podataka danih u tablici 4.6. dan je dalje u tekstu.

**Tablica 4.6.** Prikaz i usporedba izmjera dijelova na koje se zidni ispun uzoraka grupe II razložio i načina njihova sloma

Uzorak i izmjere zidanog ispuna $H_i/L_i=1,30/1,80=0,72$	Izmjere i omjer izmjera dijelova na koje se ispun razložio				Opis načina sloma
	Dio 1	Dio 2	Dio 3	Dio 4	
 <p>Tip (II/1)</p>	$H_p=H_i=1,30$ m $L_p=(L_i-L_o)/2=0,725$ m $(H_p/L_p=1,80)$	$H_p=H_i=1,30$ m $L_p=(L_i-L_o)/2=0,725$ m $(H_p/L_p=1,80)$	$H_s=H_i-H_o=0,40$ m $L_s=L_o=0,35$ m $(H_s/L_s=1,11)$	-	Prevladao je posmični slom na dijelu 1 i 2.
 <p>Tip (II/2)</p>	$H_p=H_i=1,30$ m $L_p=(L_i-L_o)/2=0,65$ m $(H_p/L_p=2,0)$	$H_p=H_i=1,30$ m $L_p=(L_i-L_o)/2=0,65$ m $(H_p/L_p=2,0)$	$H_s=H_i-H_o=0,30$ m $L_s=L_o=0,50$ m $(H_s/L_s=0,60)$	$H_s=H_N=0,40$ m $L_s=L_o=0,50$ m $(H_s/L_s=0,67)$	Prevladao je slom savijanjem na dijelu 1 i 2.
 <p>Tip (II/3)</p>	$H_p=H_i=1,30$ m $L_p=L_i-L_o-H_i/5=1,19$ m $(H_p/L_p=1,09)$	$H_p=H_o=1,30$ m $L_p=H_i/5=0,26$ m $(H_p/L_p=5,0)$	$H_s=H_i-H_o=0,40$ m $L_s=L_o=0,35$ m $(H_s/L_s=1,11)$	-	Prevladao je posmični slom na dijelu 1.
 <p>Tip (II/4)</p>	$H_p=H_i=1,30$ m $L_p=L_i-L_o-H_i/5=1,04$ m $(H_p/L_p=1,25)$	$H_p=H_o=1,30$ m $L_p=H_i/5=0,26$ m $(H_p/L_p=5,0)$	$H_s=H_i-H_o=0,30$ m $L_s=L_o=0,50$ m $(H_s/L_s=0,60)$	$H_s=H_N=0,40$ m $L_s=L_o=0,50$ m $(H_s/L_s=0,67)$	Prevladao je posmični slom na dijelu 1.

U skladu s tablicom 4.6., dan je opis načina i oblika sloma, pojedinih uzoraka grupe II:

a) uzorak tip (II/1)

Odnosi izmjera dijelova ispuna lijevo i desno od otvora, predodređeni izvedbom vertikalnih serklaža,  $H_p/L_p=1,30/0,725=1,80$ , ukazali su prevlast normalnih naprezanja u odnosu na posmična, a nastale pukotine tj. drobljenje uglova i značajne dijagonalne pukotine na prevladavajući posmični slom, iako su bila prisutna obilježja sloma savijanjem, što govori o važnosti materijalnih svojstava zidanog ispuna. Dio ispuna, u ravni iznad otvora, izmjera  $H_s/L_s=0,40/0,36=1,11$ , nije pretrpio teška oštećenja niti je utjecao na odgovor armirano-betonskog okvira.

b) uzorak tip (II/2)

Odnosi izmjera dijelova ispuna lijevo i desno od otvora, omogućeni izvedbom vertikalnih serklaža,  $H_p/L_p=1,30/0,65=2,0$ , ukazali su prevlast normalnih naprezanja u odnosu na posmična, a nastale pukotine tj. drobljenje uglova i značajne **ne-dijagonalne** pukotine na prevladavajući posmični slom, iako su bila prisutna obilježja sloma savijanjem. Dijelovi ispuna, u ravni iznad i ispod otvora, izmjera  $H_s/L_s=0,30/0,50=0,60$  i  $H_s/L_s=0,40/0,50=0,67$ , nisu pretrpjeli teška oštećenja.

### c) uzorak tip (II/3)

Odnosi izmjera dijelova ispuna lijevo i desno od otvora, omogućeni izvedbom vertikalnih serklaža,  $H_P/L_P=1,30/1,19=1,09$ , ukazali su podjednak odnos normalnih i posmičnih naprezanja, a nastale pukotine na posmični slom. Drugi dio ispuna pored otvora,  $H_P/L_P=1,30/0,26=5,0$ , pokazao je neznatan utjecaj na ponašanje uzorka. Dio ispuna, u ravni iznad otvora, izmjera  $H_S/L_S=0,40/0,36=1,11$ , nije pretrpio teška oštećenja.

### d) uzorak tip (II/4)

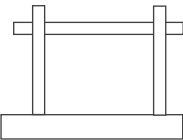
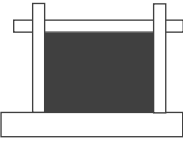
Odnosi izmjera dijelova ispuna lijevo i desno od otvora, omogućeni izvedbom vertikalnih serklaža,  $H_P/L_P=1,30/1,04=1,25$ , ukazali su podjednak odnos normalnih i posmičnih naprezanja, a nastale pukotine na posmični slom. Drugi dio ispuna pored otvora,  $H_P/L_P=1,30/0,26=5,0$ , pokazao je neznatan utjecaj na ponašanje uzorka. Dijelovi ispuna, u ravni iznad i ispod otvora, izmjera  $H_S/L_S=0,30/0,50=0,60$  i  $H_S/L_S=0,40/0,50=0,67$ , nisu pretrpjeli teška oštećenja.

U usporedbi načina sloma uzoraka grupe I i II, različiti su dijelovi ispuna unutar njega, tj. jedni su nastali horizontalnim slomom, drugi predodređeni izvedbom vertikalnih serklaža. Omjeri izmjera ovih dijelova su stoga različiti te time i različita raspodjela naprezanja unutar njih, ali usprkos tome čvrstoća zida, obzirom na vrstu oštećenja, gubila se dijagonalnim vlakom te drobljenjem uglova pri sličnim vrijednostima pomaka i nosivosti. Izvedbom vertikalnih serklaža, način sloma zidanog ispuna je postao predvidljiviji, jer su dijelovi ispuna predodređeni.

### 4.3.3. Uzorci grupe III

U tablici 4.7. dani su uzorci tip (III/1) i tip (III/2) s opisom načina sloma i horizontalne sile pri popuštanju uzorka.

**Tablica 4.7.** Prikaz i usporedba izmjera dijelova na koje se zidni ispun uzoraka razložio i načina sloma

Uzorak i izmjere zidanog ispuna $H/L_1=1,30/1,80=0,72$	Izmjere i omjer izmjera dijelova na koje se ispun razložio				Opis načina sloma
	Dio 1	Dio 2	Dio 3	Dio 4	
<b>Tip (III/1)</b> 	-	-	-	-	Tečenje okvira počelo je pri horizontalnoj sili od 170,0 kN.
<b>Tip (III/2)</b> 	$H_1=1,30$ m $L_1=1,80$ m ( $H/L_1=0,72$ )	-	-	-	Tečenje okvira počelo je pri horizontalnoj sili od 260,0 kN. Prevladao je horizontalni slom po reškama morta.



## 4.4. Nosivost uzoraka u horizontalnom smjeru

### 4.4.1. Uvod

Horizontalna nosivost  $F_H$  (kN), vrijednost je horizontalne sile postignute pri prvom koraku opterećivanja pri pripadnom katnom pomaku tijekom cikličkog opterećivanja uzorka, uz prisustvo vertikalnog opterećenja. Horizontalna nosivost također je prikazana putem omjera,  $F_H/F_{H,REF}$ , gdje  $F_{H,REF}$  predstavlja horizontalnu nosivost praznog armirano-betonskog okvira pri istom katnom pomaku. Horizontalna nosivost uzoraka grupa I, II i III, u usporedbi s nosivošću praznog okvira za odabrane katne pomake te obzirom na pozitivnu i negativnu stranu primarne krivulje, prikazana je u tablicama 4.8. i 4.9.

**Tablica 4.8.** Nosivost uzoraka,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Uzorak	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (I/1)	200	(3,30)	260	(2,62)	236	(1,47)	-	-
Tip (I/2)	201	(3,31)	280	(2,82)	310	(1,93)	-	-
Tip (I/3)	199	(3,28)	249	(2,51)	275	(1,71)	265	(1,52)
Tip (I/4)	201	(3,31)	261	(2,63)	278	(1,73)	286	(1,65)
Tip (II/1)	220	(3,62)	261	(2,63)	290	(1,81)	280	(1,61)
Tip (II/2)	201	(3,31)	211	(2,13)	254	(1,58)	227	(1,31)
Tip (II/3)	220	(3,62)	230	(2,32)	240	(1,49)	279	(1,60)
Tip (II/4)	202	(3,32)	249	(2,51)	201	(1,25)	203	(1,17)
Tip (III/1)	61	(1,00)	99	(1,00)	161	(1,00)	174	(1,00)
Tip (III/2)	227	(3,73)	267	(2,69)	245	(1,52)	258	(1,48)

**Tablica 4.9.** Nosivost uzoraka,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Uzorak	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (I/1)	-201	-(2,50)	-260	-(1,87)	-233	-(1,52)	-	-
Tip (I/2)	-201	-(2,51)	-280	-(2,01)	-289	-(1,89)	-261	-(1,54)
Tip (I/3)	-201	-(2,51)	-211	-(1,51)	-239	-(1,56)	-229	-(1,36)
Tip (I/4)	-202	-(2,52)	-230	-(1,65)	-179	-(1,17)	-220	-(1,30)
Tip (II/1)	-200	-(2,49)	-250	-(1,80)	-224	-(1,46)	-263	-(1,56)
Tip (II/2)	-151	-(1,88)	-260	-(1,87)	-293	-(1,91)	-270	-(1,60)
Tip (II/3)	-201	-(2,50)	-257	-(1,84)	-264	-(1,72)	-263	-(1,56)
Tip (II/4)	-175	-(2,18)	-270	-(1,94)	-281	-(1,83)	-280	-(1,66)
Tip (III/1)	-80	-(1,00)	-139	-(1,00)	-153	-(1,00)	-169	-(1,00)
Tip (III/2)	-200	-(2,49)	-282	-(2,02)	-250	-(1,63)	-252	-(1,49)



#### 4.4.2. Uzorci grupe I

Prema podacima danim u tablicama 4.8. i 4.9. te na slici 4.1., uzorci pokazuju sljedeća svojstva nosivosti:

##### a) uzorak tip (I/1)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, nosivost uzorka 3,30 puta na pozitivnoj strani te 2,50 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 260,0 kN na obe strane, ali je nosivost u usporedbi s nosivošću praznog okvira 2,62 odnosno 1,87 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$  zidni ispun gubi nosivost. Prethodno tome horizontalna sila dostigla je vrijednost 236,0 odnosno 233,0 kN, što je 1,47 odnosno 1,52 puta veće od nosivosti praznog okvira. Pad u nosivosti posljedica je horizontalnog sloma u ravni iznad nadvoja i dodatnog raspucavanja u uglovima i u smjeru dijagonala dijelova ispuna. U odnosu na uzorak s punim ispunom puni ispun razlika u nosivosti je neznatno manja, osim u krajnjem postignutom katnom pomaku.

Nosivost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,25 puta na pozitivnoj odnosno 1,34 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 2,25 puta na pozitivnoj odnosno 1,65 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,25 puta na pozitivnoj strani te 1,64 puta na negativnoj strani. Zidni ispun s otvorom za vrata u sredini stoga povećava nosivost armirano-betonskog okvira tokom opterećivanja do katnog pomaka  $IDR=1,0$  %.

Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=0,20\%$ .

##### b) uzorak tip (I/2)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, nosivost uzorka 3,31 puta na pozitivnoj strani te 2,51 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 280,0 kN na obje strane, ali je nosivost u usporedbi s nosivošću praznog okvira 2,82 odnosno 2,01 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nosivost uzorka 1,93 puta na pozitivnoj strani te 1,89 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. Nastaje prirast sile na 310,0 kN odnosno 289,0 kN. Utjecaj otvora za prozor u odnosu na prethodni uzorak je u tome što ispun i dalje podržava prirast sile, bez obzira što su nastale horizontalne pukotine u ravni ispod i iznad otvora. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na negativnoj strani nosivost je 2,54 puta veća od pripadne praznog okvira. Horizontalna sila pala je na 260,0 kN.

Nosivost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,17 puta na pozitivnoj odnosno 1,25 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,46 puta na pozitivnoj odnosno 1,06 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,23 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 1,62 puta na negativnoj strani.

Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=0,50\%$ .

c) uzorak tip (I/3)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, nosivost uzorka 3,28 puta na pozitivnoj strani te 2,51 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 249,0 kN odnosno 211,0 kN, a nosivost u usporedbi s nosivošću praznog okvira je 2,82 odnosno 1,51 puta veća. Nakon horizontalnog sloma u ravni iznad otvora nosivost preuzima veći dio zida, pored otvora, na posmik. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nosivost uzorka 1,71 puta na pozitivnoj strani te 1,56 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. Nastaje prirast sile na 275,0 kN odnosno 239,0 kN. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani nosivost je 1,52 puta, a na negativnoj strani 1,36 puta veća od pripadne praznog okvira. Horizontalna sila pala je na 265,0 kN odnosno 229,0 kN.

Nosivost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,31 puta na pozitivnoj odnosno 1,66 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,46 puta na pozitivnoj odnosno 0,97 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,13 puta na pozitivnoj odnosno 1,14 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,16 puta na pozitivnoj strani te 1,85 puta na negativnoj strani.

Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=0,50\%$ .

d) uzorak tip (I/4)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, nosivost uzorka 3,31 puta na pozitivnoj strani te 2,52 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 261,0 kN odnosno 230,0 kN, a nosivost u usporedbi s nosivošću praznog okvira je 2,63 odnosno 1,65 puta veća. Nastaje horizontalni slom po reški morta iznad i ispod otvora. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nosivost uzorka 1,73 puta na pozitivnoj strani te 1,17 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. Nastaje prirast sile na 278,0 kN odnosno pad na 179,0 kN. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani nosivost je 1,65 puta, a na negativnoj strani 1,30 puta veća od pripadne praznog okvira. Horizontalna sila pala je na 286,0 kN odnosno porasla na 229,0 kN.

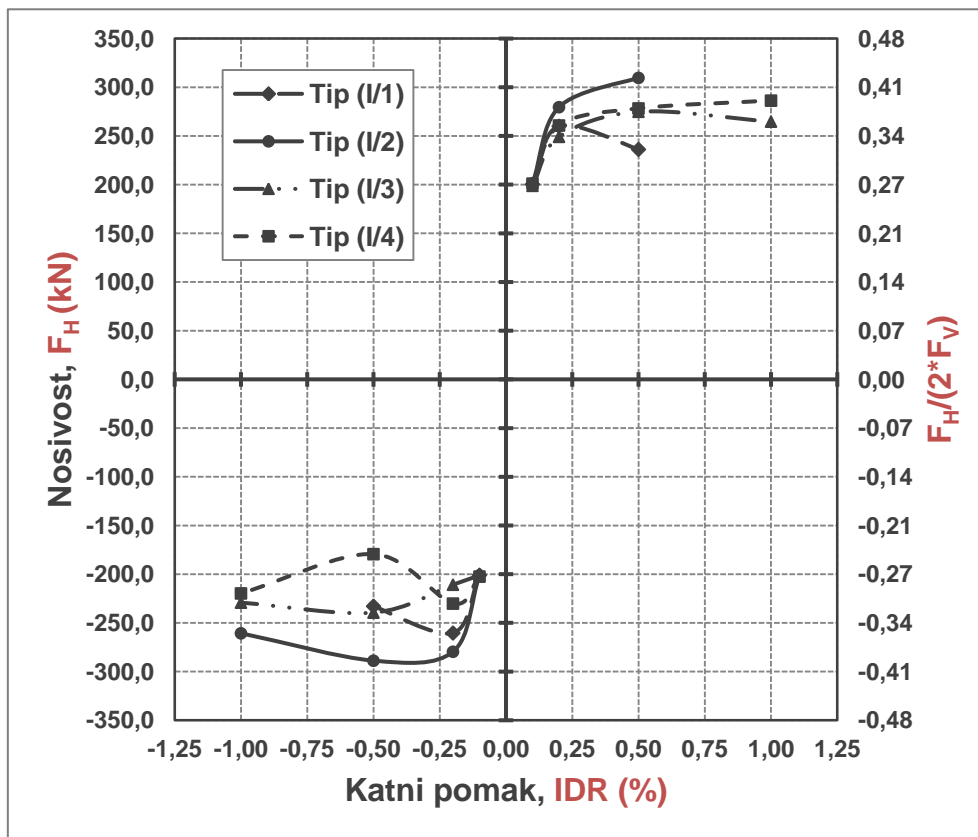
Nosivost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,25 puta na pozitivnoj odnosno 1,52 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,52 puta na pozitivnoj odnosno 1,41 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,05 puta na pozitivnoj odnosno 0,90 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,01 puta na pozitivnoj strani te 1,94 puta na negativnoj strani.

Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=1,0\%$ .

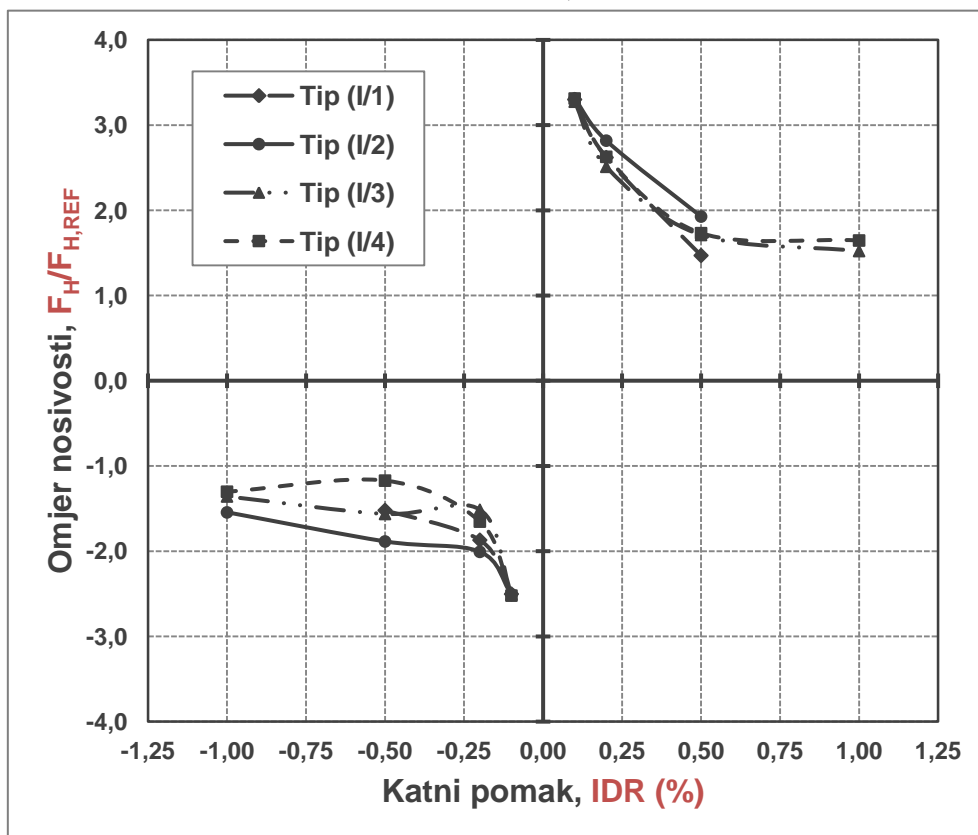
Nosivost u horizontalnom smjeru između uzoraka grupe I je gotovo jednaka spram nosivosti praznog okvira za sve odabrane katne pomake. Utjecaj otvora se nije pokazao značajnim. Snižavanje vrijednosti omjera nosivosti uzoraka sa zidanim ispunom prema nosivosti praznog okvira, od neznatnog oštećenja do oštećenja pred slom, približno je dvostruko. Nosivost uzoraka sa zidanim ispunom opada povećanjem katnog pomaka, dok se kod praznog okvira ona povećava. Uzorci sa zidanim ispunom najveću nosivost dosežu već pri nižim vrijednostima katnih pomaka nego što je to u slučaju praznog okvira. Neznatne varijacije između uzoraka grupe I prisutne su nakon dostizanja granice tečenja, ali one nestaju dostizanjem krajnjeg pomaka. Pri katnim pomacima nakon dostizanja granice tečenja nosivosti su približno jednake.

Na slici 4.1. dane su krivulje odnosa nosivosti i omjera nosivosti u odnosu na prazan okvir te pripadnog katnog pomaka za uzorke grupe I.

a) Krivulje odnosa  $F_H$  (kN) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $F_H/F_{H,REF}$  i IDR (%)



Slika 4.1. Nosivost uzoraka grupe I,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

#### 4.4.3. Uzorci grupe II

Prema podacima danim u tablicama 4.8. i 4.9. te na slici 4.2., uzorci grupe II pokazuju sljedeća svojstva nosivosti:

##### a) uzorak tip (II/1)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, nosivost uzorka 3,62 puta na pozitivnoj strani te 2,49 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 261,0 kN odnosno 250,0 kN, a nosivost u usporedbi s nosivošću praznog okvira je 2,63 odnosno 1,80 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nosivost uzorka 1,81 puta na pozitivnoj strani te 1,46 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. Nastaje prirast sile na 290,0 kN odnosno pad na 224,0 kN. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani nosivost je 1,61 puta, a na negativnoj strani 1,56 puta veća od pripadne praznog okvira. Horizontalna sila pala je na 280,0 kN odnosno porasla na 263,0 kN.

Nosivost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,38 puta na pozitivnoj odnosno 1,37 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,45 puta na pozitivnoj odnosno 1,23 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,14 puta na pozitivnoj odnosno 0,94 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,25 puta na pozitivnoj strani te 1,60 puta na negativnoj strani.

Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=0,50$ %.

##### b) uzorak tip (II/2)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, nosivost uzorka 3,31 puta na pozitivnoj strani te 1,88 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 211,0 kN odnosno 260,0 kN, a nosivost u usporedbi s nosivošću praznog okvira je 2,13 odnosno 1,87 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nosivost uzorka 1,58 puta na pozitivnoj strani te 1,91 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. Nastaje prirast sile na 254,0 kN odnosno pad na 227,0 kN. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani nosivost je 1,58 puta, a na negativnoj strani 1,91 puta veća od pripadne praznog okvira. Horizontalna sila pala je na 227,0 kN odnosno porasla na 270,0 kN.

Nosivost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,55 puta na pozitivnoj odnosno 1,01 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,35 puta na pozitivnoj odnosno 0,98 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,21 puta na pozitivnoj odnosno 1,19 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,53 puta na pozitivnoj strani te 1,18 puta na negativnoj strani.

Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=0,50\%$ . Zbog utjecaja načina sloma, na pozitivnoj strani je ostvarena nosivost manja za 10% nego kod uzorka tip (I/2).

#### c) uzorak tip (II/3)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, nosivost uzorka 3,62 puta na pozitivnoj strani te 2,32 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 230,0 kN odnosno 257,0 kN, a nosivost u usporedbi s nosivošću praznog okvira je 2,32 odnosno 1,84 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nosivost uzorka 1,49 puta na pozitivnoj strani te 1,72 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. Nastaje prirast sile na 240,0 kN odnosno 264,0 kN. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani nosivost je 1,60 puta, a na negativnoj strani 1,56 puta veća od pripadne praznog okvira. Horizontalna sila porasla je na 279,0 kN odnosno pala na 263,0 kN.

Nosivost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,56 puta na pozitivnoj odnosno 1,35 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,56 puta na pozitivnoj odnosno 1,07 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 0,93 puta na pozitivnoj odnosno 1,10 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,26 puta na pozitivnoj strani te 1,61 puta na negativnoj strani.

Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=0,50$  %. U usporedbi s uzorkom tip (I/3) razlika u nosivosti na pozitivnoj strani je neznatna, dok je na negativnoj 10 %, zbog utjecaja vertikalnog serklaža.



d) uzorak tip (II/4)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, nosivost uzorka 3,32 puta na pozitivnoj strani te 2,18 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 249,0 kN odnosno 270,0 kN, a nosivost u usporedbi s nosivošću praznog okvira je 2,51 odnosno 1,94 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nosivost uzorka 1,25 puta na pozitivnoj strani te 1,83 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. Nastaje pad sile na 201,0 kN odnosno porast 280,0 kN. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani nosivost je 1,17 puta, a na negativnoj strani 1,66 puta veća od pripadne praznog okvira. Horizontalna sila pala je na 203,0 kN odnosno porasla na 280,0 kN.

Nosivost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,32 puta na pozitivnoj odnosno 1,12 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 2,0 puta na pozitivnoj odnosno 1,06 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,07 puta na pozitivnoj odnosno 1,10 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,84 puta na pozitivnoj strani te 1,31 puta na negativnoj strani.

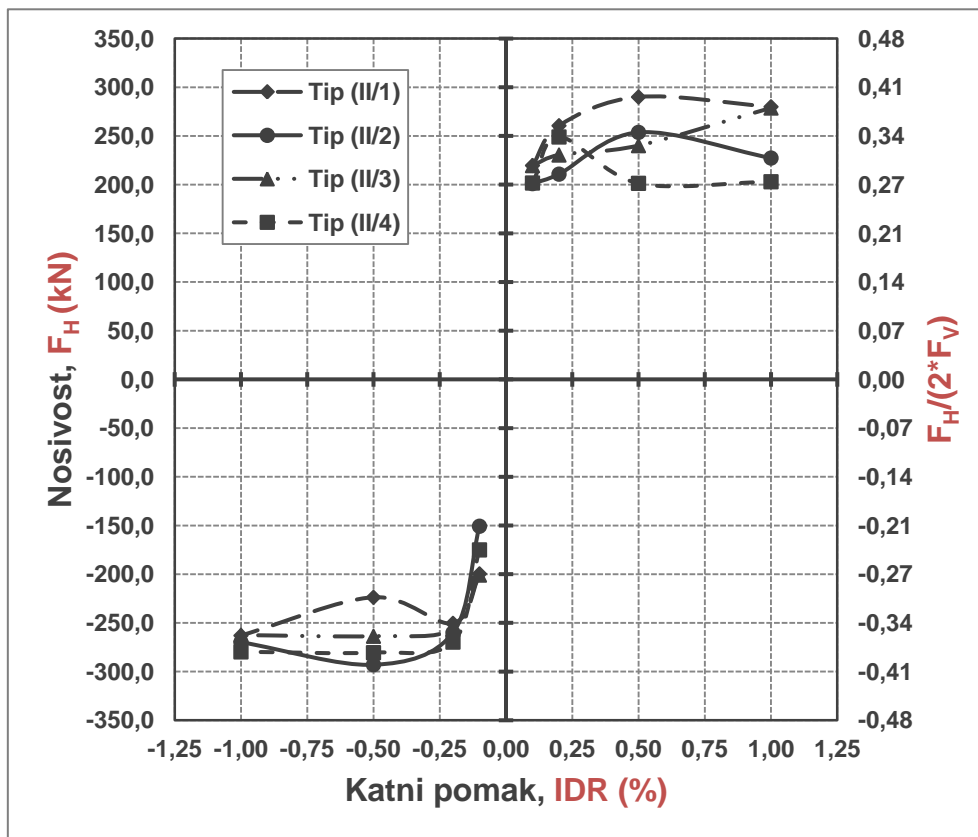
Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=1,0$  %.

Nosivost u horizontalnom smjeru između uzoraka grupe II, u odnosu spram nosivosti praznog okvira, gotovo je jednaka za sve katne pomake, jednako kao i kod grupe I, premda s više ujednačenijim vrijednostima. Omjer nosivosti, od neznatnog oštećenja ka oštećenju pred slom, u odnosu na prazan okvir, iznosi također približno dvostruko za ove uzorke. Nosivost se porastom katnog pomaka održava uglavnom stalnom i stabilnom, usprkos porastu oštećenja, dok se kod praznog okvira još povećavala. Uzorci okvira s ispunom najveću nosivost dosežu već pri nižim vrijednostima katnih pomaka nego što je to u slučaju praznog okvira. Utjecaj vertikalnog serklaža kod uzoraka s otklonjenim otvorima u zidanom ispunu, pri opterećenju sa strane otvora, očitovao se u povećanju nosivosti u odnosu na uzorke bez serklaža.

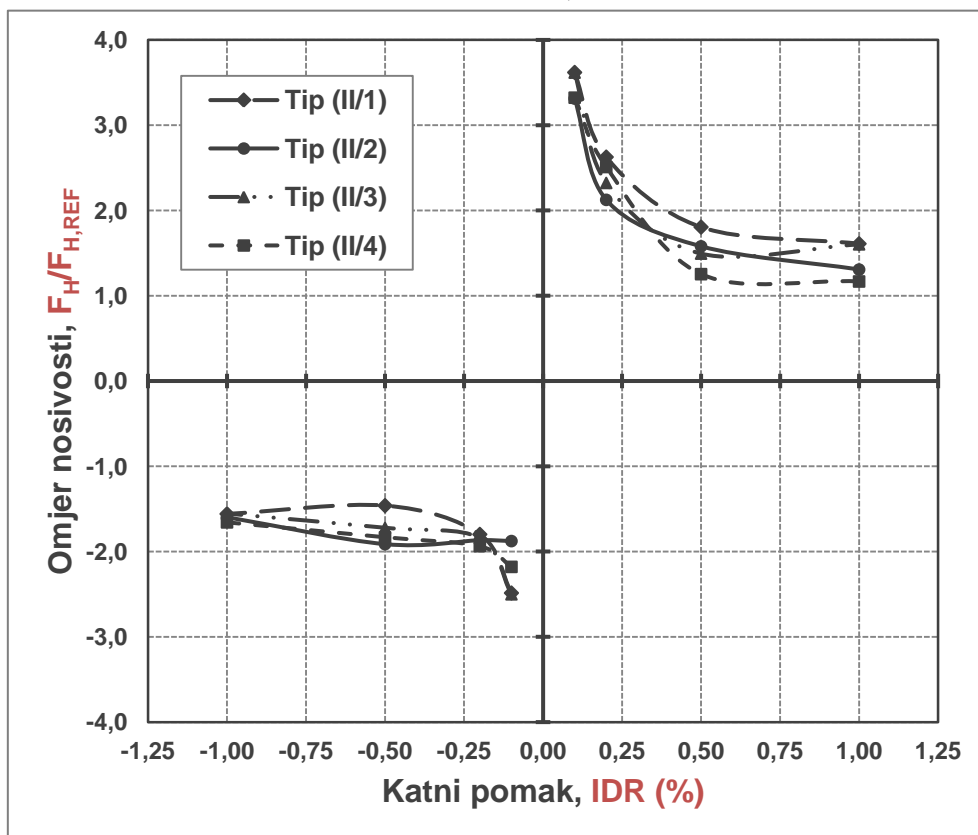
Na slici 4.2. dane su krivulje odnosa nosivosti i omjera nosivosti u odnosu na prazan okvir te pripadnog katnog pomaka za uzorke grupe II.



a) Krivulje odnosa  $F_H$  (kN) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $F_H/F_{H,REF}$  i IDR (%)



Slika 4.2. Nosivost uzoraka grupe II,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

#### 4.4.4. Uzorci grupe III

Prema podacima danim u tablicama 4.8. i 4.9. te na slici 4.3., uzorci pokazuju sljedeća svojstva nosivosti:

##### a) Uzorak tip (III/1)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, iznos horizontalne sile je 61,0 kN na pozitivnoj i 80,0 kN na negativnoj strani. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 99,0 kN odnosno 139,0 kN. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nastaje prirast sile na 161,0 kN odnosno 153,0 kN. Za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani nosivost je 174,0 kN, a na negativnoj strani 160,0 kN. Horizontalna sila porasla je na 279,0 kN odnosno na 263,0 kN.

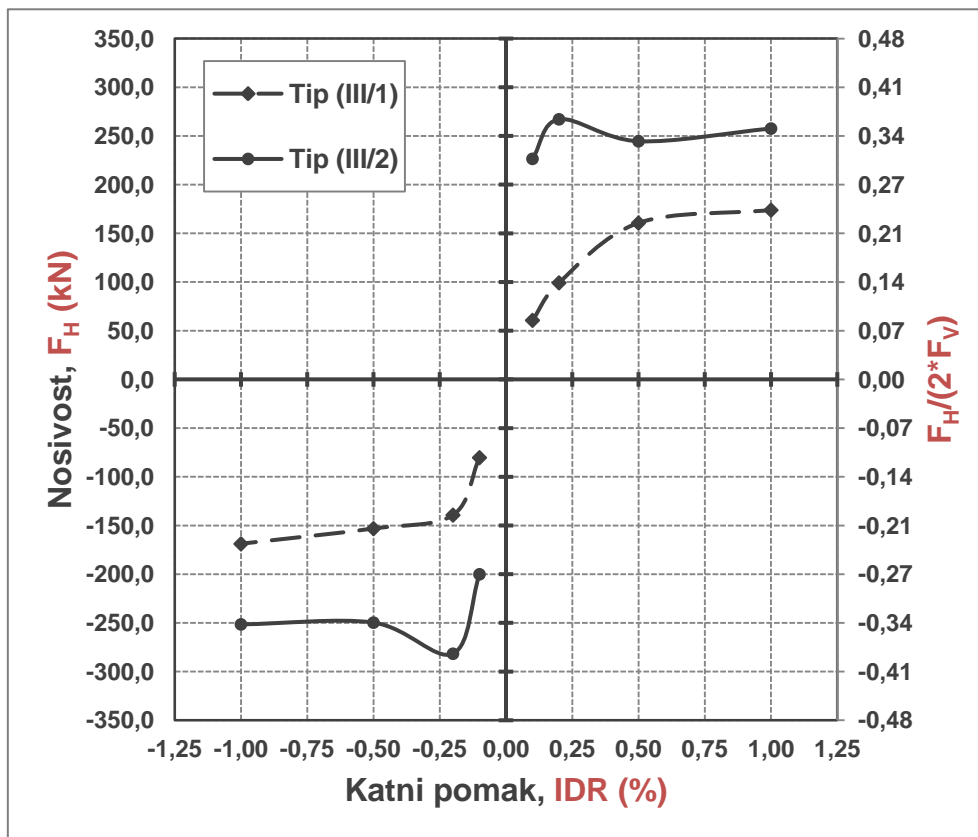
Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=1,0$  %.

##### b) Uzorak tip (III/2)

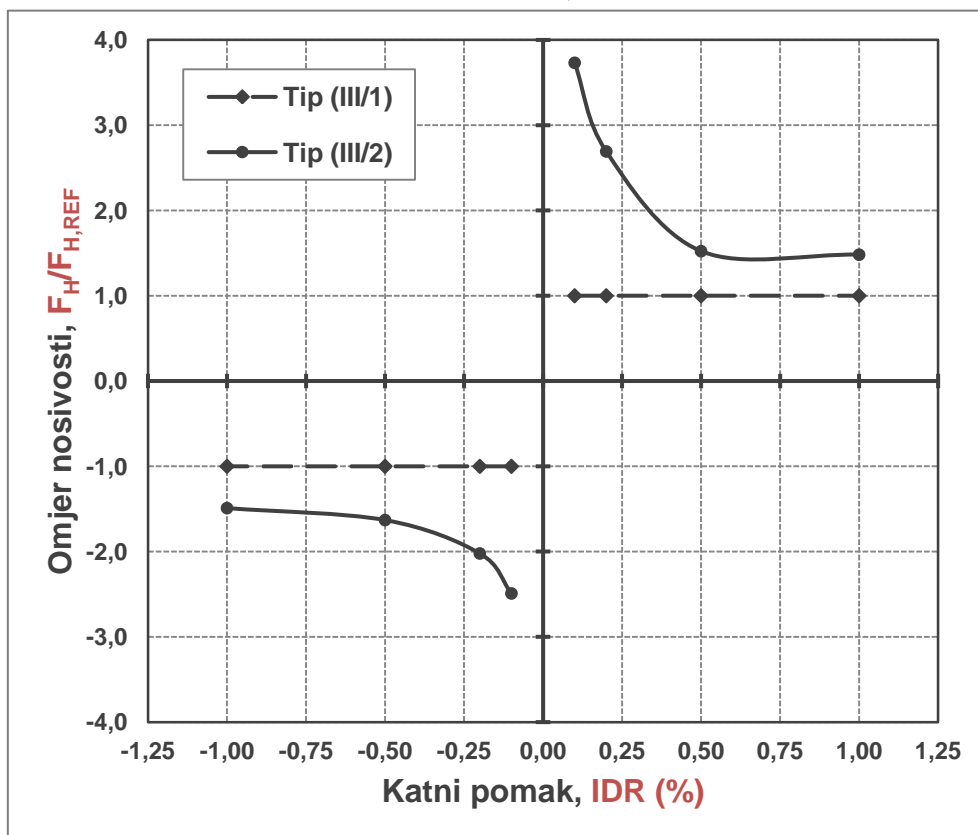
Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, nosivost uzorka 3,73 puta na pozitivnoj strani te 2,49 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi prirast horizontalne sile na 267,0 kN odnosno 282,0 kN, a nosivost u usporedbi s nosivošću praznog okvira je 2,69 odnosno 2,02 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nosivost uzorka 1,52 puta na pozitivnoj strani te 1,63 puta na negativnoj strani veća od nosivosti praznog okvira. Nastaje pad sile na 245,0 kN odnosno 250,0 kN. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani nosivost je 1,48 puta, a na negativnoj strani 1,49 puta veća od pripadne praznog okvira. Horizontalna sila porasla je na 258,0 kN odnosno pala na 252,0 kN.

Nosivost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,39 puta na pozitivnoj odnosno 1,23 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,77 puta na pozitivnoj odnosno 1,24 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,02 puta na pozitivnoj odnosno 1,03 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,52 puta na pozitivnoj strani te 1,67 puta na negativnoj strani. Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.8. i 4.9., je najveća za katni pomak  $IDR=1,0$  %. Na slici 4.3. dane su krivulje odnosa nosivosti i omjera nosivosti u odnosu na prazan okvir te pripadnog katnog pomaka za uzorke grupe III tj. granične slučajeve.

a) Krivulje odnosa  $F_H$  (kN) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $F_H/F_{H,REF}$  i IDR (%)



Slika 4.3. Nosivost uzoraka grupe III,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

## 4.5. Krutost uzoraka u horizontalnom smjeru

### 4.5.1. Uvod

Krutost  $K$  (kN/mm) je vrijednost dobivena dijeljenjem horizontalne sile postignute pri prvom ciklusu opterećivanja (dva ciklusa opterećivanja po koraku) uzorka za pripadnu razinu sile, s pripadnim horizontalnim pomakom. Predstavlja **sekantni modul elastičnosti**. Krutost je također prikazana putem omjera,  $K/K_{REF}$ , gdje  $K_{REF}$  predstavlja krutost praznog armirano-betonskog okvira pri istom katnom pomaku, čime je utvrđena mjera povećanja krutosti uzoraka grupe I, II i III u odnosu na prazan okvir. Krutost uzoraka grupa I, II i III, u usporedbi s krutošću praznog okvira za odabrane katne pomake te obzirom na pozitivnu i negativnu stranu primarne krivulje, prikazana je u tablicama 4.10. i 4.11.

**Tablica 4.10.** Krutost uzoraka,  $K$  (kN/mm) i omjer krutosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na krutost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Uzorak	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (I/1)	137	(3,02)	95	(2,82)	33	(1,49)	-	-
Tip (I/2)	163	(3,58)	103	(3,08)	42	(1,88)	-	-
Tip (I/3)	160	(3,53)	93	(2,79)	37	(1,64)	20	(1,63)
Tip (I/4)	142	(3,13)	93	(2,79)	40	(1,76)	19	(1,55)
Tip (II/1)	168	(3,70)	97	(2,91)	41	(1,84)	20	(1,61)
Tip (II/2)	136	(3,00)	81	(2,40)	36	(1,61)	17	(1,35)
Tip (II/3)	174	(3,82)	83	(2,48)	34	(1,53)	20	(1,62)
Tip (II/4)	140	(3,08)	88	(2,64)	29	(1,31)	16	(1,26)
Tip (III/1)	45	(1,00)	34	(1,00)	22	(1,00)	12	(1,00)
Tip (III/2)	151	(3,32)	94	(2,80)	35	(1,55)	18	(1,48)

**Tablica 4.11.** Krutost uzoraka,  $K$  (kN/mm) i omjer krutosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na krutost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Uzorak	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (I/1)	-150	-(2,51)	-96	-(1,99)	-47	-(2,14)	-	-
Tip (I/2)	-131	-(2,19)	-100	-(2,06)	-40	-(1,81)	-18	-(1,17)
Tip (I/3)	-150	-(2,52)	-87	-(1,80)	-35	-(1,59)	-22	-(1,40)
Tip (I/4)	-145	-(2,43)	-88	-(1,82)	-26	-(1,17)	-17	-(1,05)
Tip (II/1)	-145	-(2,43)	-95	-(1,95)	-32	-(1,46)	-25	-(1,57)
Tip (II/2)	-112	-(1,87)	-90	-(1,85)	-42	-(1,91)	-19	-(1,22)
Tip (II/3)	-122	-(2,04)	-92	-(1,89)	-38	-(1,72)	-20	-(1,28)
Tip (II/4)	-122	-(2,04)	-94	-(1,95)	-40	-(1,83)	-20	-(1,28)
Tip (III/1)	-60	-(1,00)	-48	-(1,00)	-22	-(1,00)	-16	-(1,00)
Tip (III/2)	-151	-(2,53)	-94	-(1,93)	-36	-(1,63)	-17	-(1,04)

#### 4.5.2. Uzorci grupe I

Prema podacima danim u tablicama 4.10. i 4.11. te na slici 4.4., uzorci pokazuju sljedeća svojstva krutosti:

##### a) uzorak tip (I/1)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10\%$ , krutost uzorka 3,02 puta na pozitivnoj strani te 2,51 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20\%$ , nosi pad krutosti na 95,0 kN/mm na obje strane, ali je krutost u usporedbi s krutošću praznog okvira 2,82 odnosno 1,99 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$  zidni ispun gubi nosivost. Prethodno tome krutost je dostigla vrijednost 33,0 kN/mm odnosno 47,0 kN/mm, što je 1,49 odnosno 2,14 puta veće od krutosti praznog okvira. U odnosu na uzorak s punim ispunom puni ispun razlika u krutosti je neznatno manja, osim u krajnjem postignutom katnom pomaku.

Krutost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,07 puta na pozitivnoj odnosno 1,26 puta na negativnoj strani. Od razine osrednjeg oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,89 puta na pozitivnoj odnosno 0,93 puta na negativnoj strani. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,02 puta na pozitivnoj strani te 1,17 puta na negativnoj strani.

Vrijednost krutosti, u skladu s tablicama 4.10. i 4.11., je najveća za katni pomak  $IDR=0,10\%$ .

##### b) uzorak tip (I/2)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10\%$ , krutost uzorka 3,58 puta na pozitivnoj strani te 2,19 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20\%$  nosi pad krutosti na 103,0 kN/mm na obje strane, ali je krutost u usporedbi s krutošću praznog okvira 3,08 odnosno 2,06 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$ , krutost uzorka 1,88 puta na pozitivnoj strani te 1,81 puta na negativnoj strani veća je od krutosti praznog okvira. Nastaje pad krutosti na 42,0 kN/mm odnosno 40,0 kN/mm. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0\%$ , na negativnoj strani, krutost je 18,0 kN/mm.

Krutost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,16 puta na pozitivnoj odnosno 1,01 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila

se 1,63 puta na pozitivnoj odnosno 1,13 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,54 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 1,87 puta na negativnoj strani.

Vrijednost krutosti, u skladu s tablicama 4.10. i 4.11., je najveća za katni pomak  $IDR=0,10$ %.

c) uzorak tip (I/3)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, krutost uzorka 3,53 puta na pozitivnoj strani te 2,52 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi pad krutosti na 93,0 kN/mm odnosno 87,0 kN/mm, a krutost u usporedbi s krutošću praznog okvira je 2,79 odnosno 1,80 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, krutost uzorka 1,64 puta na pozitivnoj strani te 1,59 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. Nastaje pad krutosti na 37,0 kN/mm odnosno 35,0 kN/mm. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani krutost je 1,63 puta, a na negativnoj strani 1,62 puta veća od pripadne praznog okvira. Krutost je pala na 20,0 kN/mm odnosno 22,0 kN/mm.

Krutost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,27 puta na pozitivnoj odnosno 1,40 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,70 puta na pozitivnoj odnosno 1,13 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,01 puta na pozitivnoj odnosno 1,13 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,17 puta na pozitivnoj strani te 1,80 puta na negativnoj strani.

Vrijednost krutosti, u skladu s tablicama 4.10. i 4.11., je najveća za katni pomak  $IDR=0,10$ %.

d) uzorak tip (I/4)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, krutost uzorka 3,13 puta na pozitivnoj strani te 2,43 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi pad krutosti na 93,0 kN/mm odnosno 88,0 kN/mm, a krutost u usporedbi s krutošću praznog okvira je 2,79 odnosno 1,82 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, krutost uzorka 1,76 puta na pozitivnoj strani te 1,17 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. Nastaje pad krutosti na 40,0 kN/mm odnosno pad na 26,0

kN/mm. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani krutost je 1,55 puta, a na negativnoj strani 1,05 puta veća od pripadne praznog okvira. Krutost je pala na 19,0 kN/mm odnosno 17,0 kN/mm.

Krutost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,12 puta na pozitivnoj odnosno 1,33 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,58 puta na pozitivnoj odnosno 1,55 puta na negativnoj strani. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,13 puta na pozitivnoj odnosno 1,11 puta na negativnoj strani. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,01 puta na pozitivnoj strani te 2,33 puta na negativnoj strani.

Vrijednost horizontalne sile, u skladu s tablicama 4.10. i 4.11., je najveća za katni pomak  $IDR=1,0\%$ .

Krutost između uzoraka grupe I prati gotovo jednak odnos spram krutosti praznog okvira za sve katne pomake. Opadanje krutosti, od neznatnog oštećenja ka oštećenju pred slom, iznosi približno 2 puta za ove uzorke. Krutost opada povećanjem katnog pomaka, dok kod praznog okvira još raste. Uzorci okvira s ispunom najveću krutost dosežu već pri nižim vrijednostima katnih pomaka nego što je to u slučaju praznog okvira. Pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, tj. pri oštećenju pred slom, krutost uzoraka grupe I najbliža je krutosti praznog okvira.

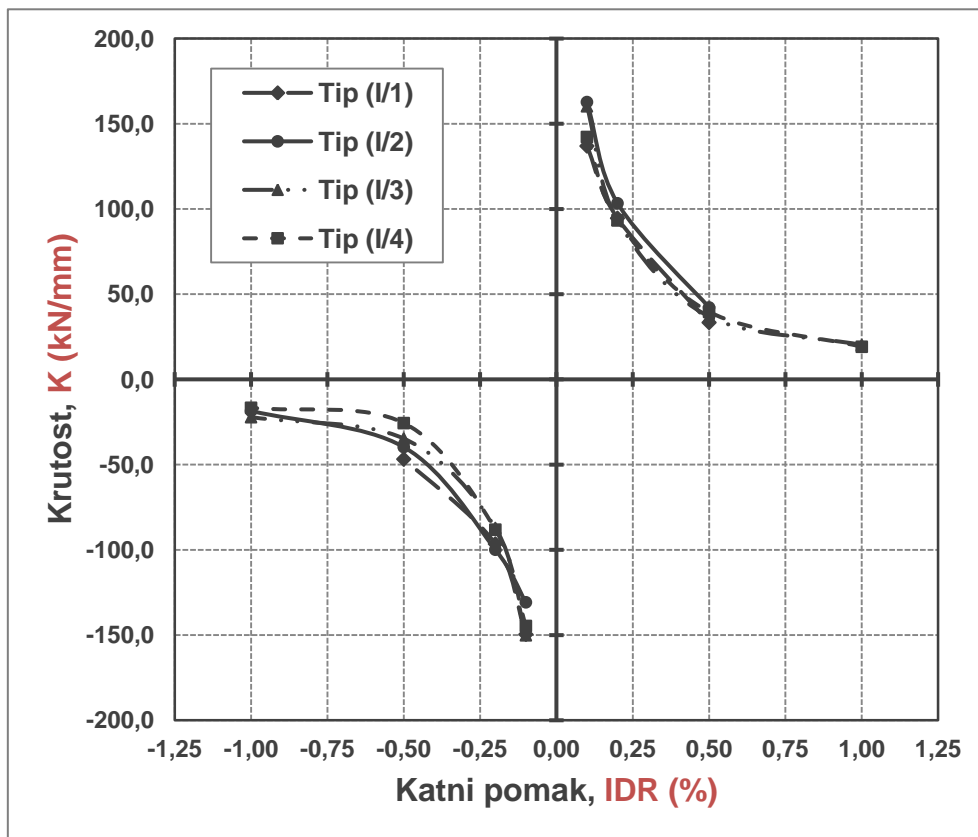
Vrijednosti krutosti na negativnoj strani uglavnom su niže nego pripadne na pozitivnoj, što govori o povećanju oštećenja. Opadanje krutosti izraženije je između razina oštećenja pri katnim pomacima  $IDR=0,10$  % i  $IDR=0,50$  %, dok je manje izraženo između teškog oštećenja pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  % i oštećenju pred slom s katnim pomakom  $IDR=1,0$  %. Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, krutost je približno 3,5 puta veća od iste praznog okvira, dok je pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, približno 1,5 puta.

Način sloma nije znatno utjecao na opadanje krutosti, jer je višestruki način sloma uzrokovao oštećenja tj. vrste pukotina, triju načina sloma na svim ispitnim uzorcima sa zidnim ispunom, s iznimkom uzorka tip (I/1). Uzorci s otvorima za prozor, s otklonom i bez, održavaju višu krutost u odnosu na uzorke s otvorom za vrata, ali između uzoraka nema bitnih razlika u opadanju krutosti. Krutost uzoraka sa zidanim ispunom, pri katnom pomaku od  $IDR=1,0$  % postaje jednaka krutosti praznog okvira.

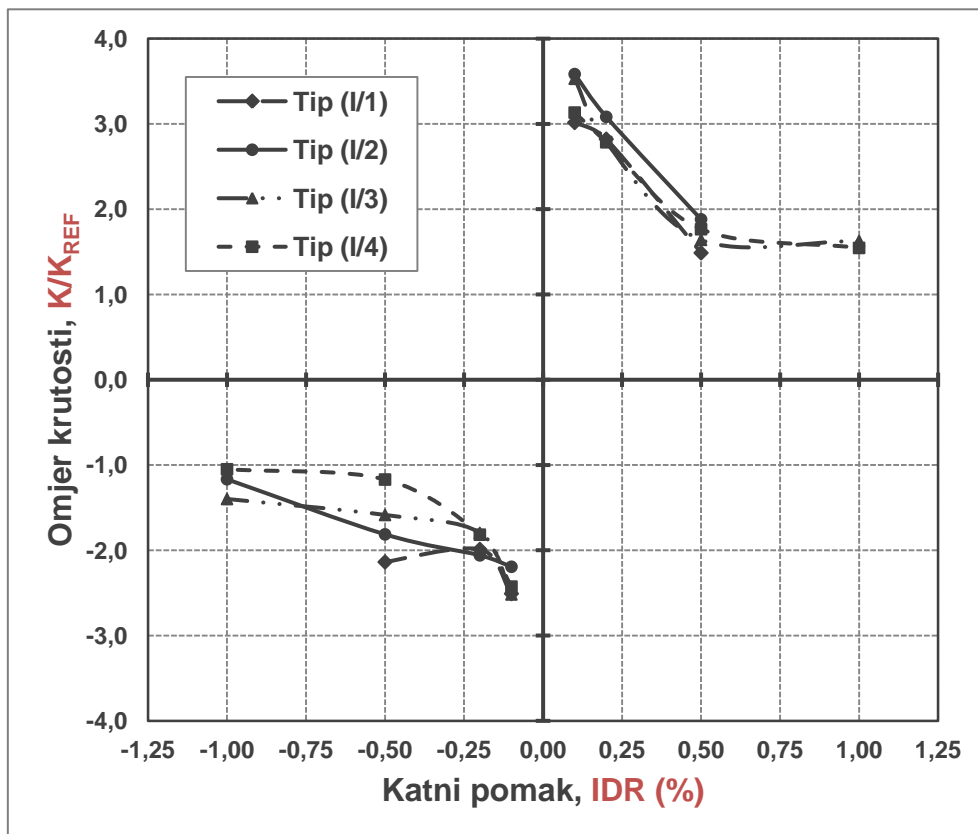
Na slici 4.4. dan je dijagram odnosa omjera krutosti u odnosu na prazan okvir te pripadnog katnog pomaka, uzoraka grupe I.



a) Krivulje odnosa  $K$ (kN/mm) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $K/K_{REF}$  i IDR (%)



Slika 4.4. Krutost uzoraka grupe I,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

### 4.5.3. Uzorci grupe II

Prema podacima ili prikazanim u tablicama 4.10. i 4.11. te na slici 4.5., uzorci pokazuju sljedeća svojstva krutosti:

#### a) uzorak tip (II/1)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10\%$ , krutost uzorka 3,70 puta na pozitivnoj strani te 2,43 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20\%$  nosi pad krutosti na 97,0 kN/mm odnosno 95,0 kN/mm, a krutost u usporedbi s krutošću praznog okvira je 2,91 odnosno 1,95 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$ , krutost uzorka 1,84 puta na pozitivnoj strani te 1,46 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. Nastaje pad krutosti na 41,0 kN/mm odnosno pad na 32,0 kN/mm. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0\%$ , na pozitivnoj strani krutost je 1,61 puta, a na negativnoj strani 1,57 puta veća od pripadne praznog okvira. Krutost pala je na 20,0 kN/mm odnosno pala na 25,0 kN/mm.

Krutost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,27 puta na pozitivnoj odnosno 1,24 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,58 puta na pozitivnoj odnosno 1,34 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,14 puta na pozitivnoj odnosno 0,93 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,30 puta na pozitivnoj strani te 1,55 puta na negativnoj strani.

#### b) uzorak tip (II/2)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10\%$ , krutost uzorka 3,00 puta na pozitivnoj strani te 2,40 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20\%$  nosi pad horizontalne krutosti na 81,0 kN/mm odnosno 90,0 kN/mm, a krutost u usporedbi s krutošću praznog okvira je 2,40 odnosno 1,85 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$ , krutost uzorka 1,61 puta na pozitivnoj strani te 1,91 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. Nastaje pad krutosti na 36,0 kN/mm odnosno pad na 42,0 kN/mm. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0\%$ , na pozitivnoj strani krutost je 1,35 puta, a na negativnoj strani 1,22 puta veća od pripadne praznog okvira. Krutost pala je na 19,0 kN/mm odnosno pala na 17,0 kN/mm.

Krutost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,25 puta na pozitivnoj odnosno 1,01 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,49 puta na pozitivnoj odnosno 0,96 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,19 puta na pozitivnoj odnosno 1,21 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,22 puta na pozitivnoj strani te 1,57 puta na negativnoj strani.

c) uzorak tip (II/3)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, krutost uzorka 3,82 puta na pozitivnoj strani te 2,04 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi pad horizontalne krutosti na 83,0 kN/mm odnosno 92,0 kN/mm, a krutost u usporedbi s krutošću praznog okvira je 2,48 odnosno 1,89 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, krutost uzorka 1,53 puta na pozitivnoj strani te 1,72 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. Nastaje pad krutosti na 34,0 kN/mm odnosno 38,0 kN/mm. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani krutost je 1,62 puta, a na negativnoj strani 1,28 puta veća od pripadne praznog okvira. Krutost je pala na 20,0 kN/mm na obje strane.

Krutost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,54 puta na pozitivnoj odnosno 1,08 puta na negativnoj strani. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,62 puta na pozitivnoj odnosno 1,09 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se 0,94 puta na pozitivnoj odnosno 1,34 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,36 puta na pozitivnoj strani te 1,34 puta na negativnoj strani.

d) uzorak tip (II/4)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, krutost uzorka 3,08 puta na pozitivnoj strani te 2,04 puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi pad horizontalne krutosti na 88,0 kN/mm odnosno 94,0 kN/mm, a krutost u usporedbi s krutošću praznog okvira je 2,64 odnosno 1,95 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, krutost uzorka 1,31 puta na pozitivnoj strani te 1,83 puta na negativnoj

strani veća od krutosti praznog okvira. Nastaje pad krutosti na 16,0 kN/mm odnosno porast 20,0 kN/mm. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0\%$ , na pozitivnoj strani krutost je 1,26 puta, a na negativnoj strani 1,28 puta veća od pripadne praznog okvira. Krutost je pala na 16,0 kN/mm odnosno 17,0 kN/mm na negativnoj strani.

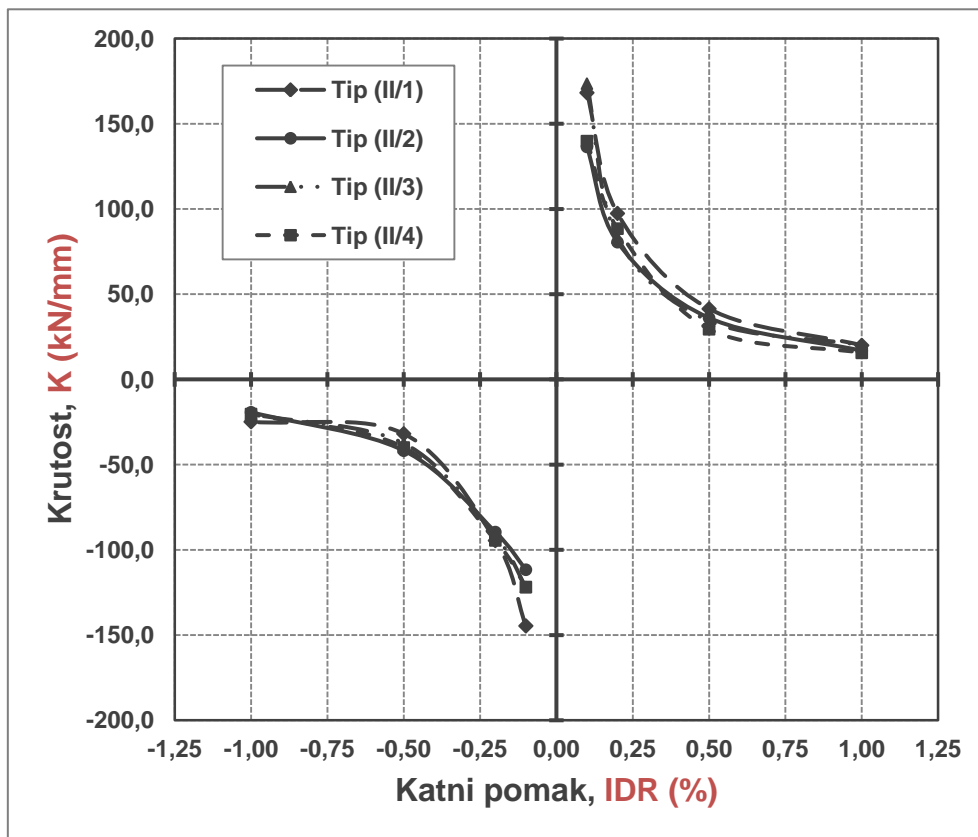
Krutost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,32 puta na pozitivnoj odnosno 1,12 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila se 2,0 puta na pozitivnoj odnosno 1,06 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0\%$ , u odnosu na prazan okvir, spustila se 1,07 puta na pozitivnoj odnosno 1,10 puta na negativnoj strani primarne krivulje. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi 2,84 puta na pozitivnoj strani te 1,31 puta na negativnoj strani.

Krutost između uzoraka grupe II prati gotovo jednak odnos spram krutosti praznog okvira za sve katne pomake, kao kod grupe I, premda više ujednačeniji pri odabranim katnim pomacima. Razlog tome je prisutnost vertikalnih serklaža, sidrenih u zidani ispun, koji bolje održavaju postojanost ispuna. Opadanje krutosti, od neznatnog oštećenja ka oštećenju pred slom, iznosi također približno dva puta za ove uzorke. Krutost između katnih pomaka  $IDR=0,10\%$  i  $IDR=0,20\%$  opada uslijed nastanka pukotina u uglovima ili tankih dijagonalnih pukotina, ovisno o ispitnom uzorku, za razliku od isitnih uzoraka grupe I, gdje je početni pad krutosti uzrokovan horizontalnim slomom reške morta. Uzorci okvira sa zidanim ispunom dosežu najveću krutost već pri nižim vrijednostima katnih pomaka nego što je to u slučaju praznog okvira. Veću krutost u odnosu na prazan okvir, pri osrednjem i teškom oštećenju, zadržavaju uzorci s otvorom za prozor, s otklonom i bez.

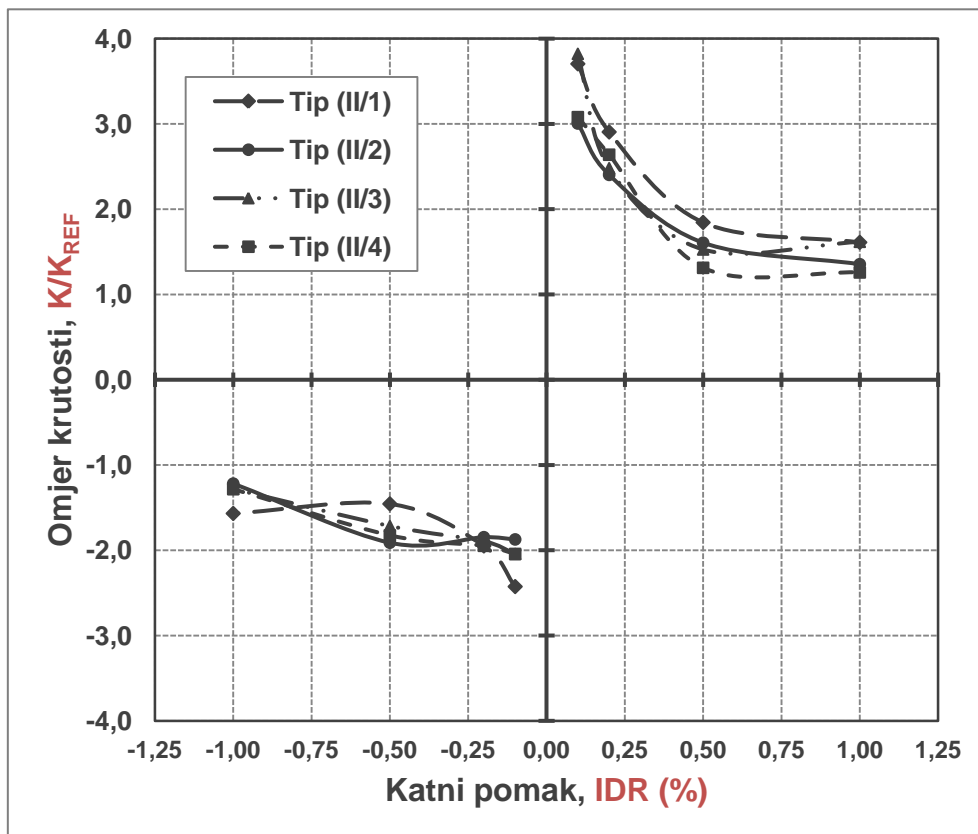
Najmanja razlika u odnosu krutosti uzoraka grupe II i praznog okvira je pri katnom pomaku  $IDR=1,00\%$ , tj. oštećenju pred slom zidanog ispuna, kada ispun uslijed uznapredovanog pukotinskog stanja sve manje biva u stanju prenijeti opterećenje. Obzirom da je način sloma uzoraka grupe II prevladavajući posmik, pad krutosti uzrokovan je pretežno pojavom kosih dijagonalnih i ne-dijagonalnih pukotina zidnog stupa (nosivih elemenata zidanog ispuna), ali također i drobljenjem uglova u blizini otvora. U slučaju otklonjenog otvora u zidanom ispunu, krutost je bila manja s njegove strane tj. na negativnoj strani.

Na slici 4.5. prikazan dijagram odnosa omjera krutosti u odnosu na prazan okvir te pripadnog katnog pomaka, uzoraka grupe II.

a) Krivulje odnosa  $K(\text{kN/mm})$  i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $K/K_{REF}$  i IDR (%)



Slika 4.5. Krutost uzoraka grupe II,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

#### 4.5.4. Uzorci grupe III

Prema podacima danim u tablicama 4.10. i 4.11. te na slici 4.6., uzorci pokazuju sljedeća svojstva krutosti:

a) uzorak tip (III/1)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, iznos horizontalne krutosti je  $45,0$  kN/mm na pozitivnoj i  $60,0$  kN/mm na negativnoj strani. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi pad horizontalne krutosti na  $34,0$  kN/mm odnosno  $48,0$  kN/mm. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, nastaje pad krutosti na  $35,0$  kN/mm odnosno  $22,0$  kN/mm. Za katni pomak  $IDR=1,00$  %, na pozitivnoj strani krutost je  $16,0$  kN/mm, a na negativnoj strani  $17,0$  kN/mm.

Vrijednost horizontalne krutosti, u skladu s tablicama 4.10. i 4.11., je najveća za katni pomak  $IDR=0,10$  %.

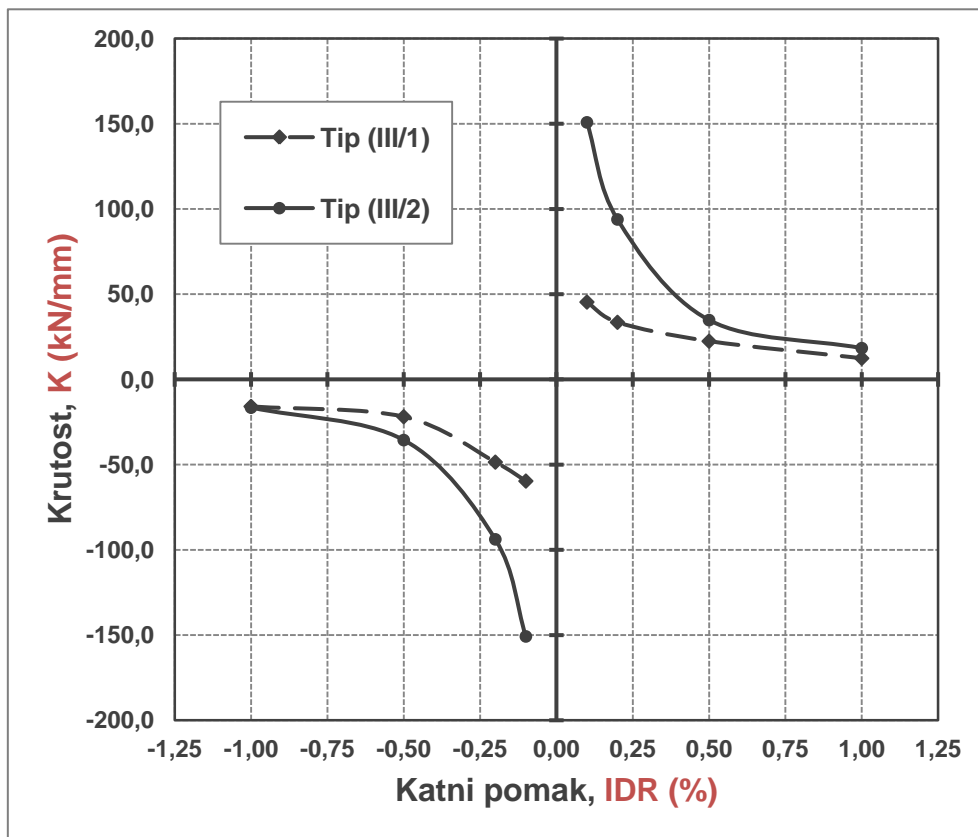
b) uzorak tip (III/2)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, krutost uzorka  $3,32$  puta na pozitivnoj strani te  $2,53$  puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  % nosi pad horizontalne krutosti na  $94,0$  kN/mm odnosno  $94,0$  kN/mm, a krutost u usporedbi s krutošću praznog okvira je  $2,80$  odnosno  $2,93$  puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, krutost uzorka  $1,55$  puta na pozitivnoj strani te  $1,63$  puta na negativnoj strani veća od krutosti praznog okvira. Nastaje pad krutosti na  $35,0$  kN/mm odnosno  $36,0$  kN/mm. Pri oštećenju pred slom, za katni pomak  $IDR=1,0$  %, na pozitivnoj strani krutost je  $1,48$  puta, a na negativnoj strani  $1,04$  puta veća od pripadne praznog okvira. Krutost je pala na  $18,0$  kN/mm odnosno na  $17,0$  kN/mm, na negativnoj strani.

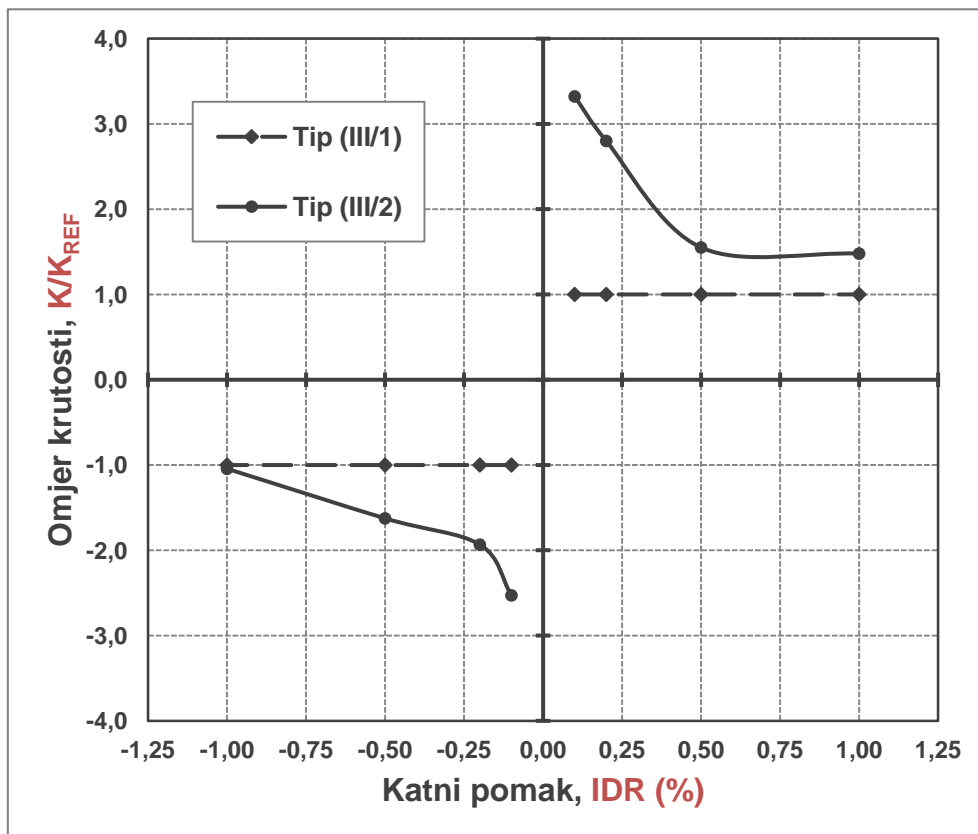
Krutost uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se  $1,18$  puta na pozitivnoj odnosno  $1,31$  puta na negativnoj strani primarne krivulje. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se  $1,80$  puta na pozitivnoj odnosno  $1,18$  puta na negativnoj strani. Od razine teškog oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  %, u odnosu na prazan okvir, spustila se  $1,05$  puta na pozitivnoj odnosno  $1,56$  puta na negativnoj strani. Ukupan pad od neznatnog do oštećenja pred slom iznosi  $2,24$  puta na pozitivnoj strani te  $2,43$  puta na negativnoj strani.

Vrijednost horizontalne krutosti, u skladu s tablicama 4.10. i 4.11., je najveća za katni pomak  $IDR=1,0$  %.

a) Krivulje odnosa  $K$  (kN/mm) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $K/K_{REF}$  i IDR (%)



Slika 4.6. Krutost uzoraka grupe III,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)



## 4.6. Histerezna energija uzoraka

### 4.6.1. Uvod

Histerezna energija,  $E_i$  (kNmm), dana je kao zbroj ploština unutar histereznih petlji svakog ciklusa,  $i$ , uslijed cikličkog horizontalnog opterećivanja uzoraka, uz prisutno stalno vertikalno opterećenje, do promatranog katnog pomaka. Histerezna energija je također prikazana putem omjera,  $E/E_{REF}$ , gdje  $E_{REF}$  predstavlja histereznu energiju praznog armirano-betonskog okvira pri istom katnom pomaku, čime je utvrđena mjera povećanja histerezne energije uzoraka grupe I, II i III u odnosu na prazan okvir. Histerezna energija uzoraka grupa I, II i III u usporedbi s histereznom energijom praznog okvira za odabrane katne pomake te obzirom na pozitivnu i negativnu stranu, prikazana je u tablicama 4.12. i 4.13.

Tablica 4.12. Histerezna energija uzoraka,  $E$  (kNmm) i omjer energija,  $E/E_{REF}$  u odnosu na histereznu energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Uzorak	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	E (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	E (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	E (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	E (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (I/1)	352	(5,37)	3668	(10,81)	6714	(3,59)	-	-
Tip (I/2)	1522	(23,20)	3420	(10,08)	7469	(3,99)	-	-
Tip (I/3)	890	(13,57)	2982	(8,79)	4007	(2,14)	5668	(1,33)
Tip (I/4)	1555	(23,69)	3859	(11,37)	4994	(2,67)	6969	(1,63)
Tip (II/1)	1099	(16,75)	3583	(10,56)	7096	(3,79)	9061	(2,12)
Tip (II/2)	439	(6,69)	6020	(17,74)	6990	(3,74)	8626	(2,02)
Tip (II/3)	2000	(30,47)	2897	(8,54)	6666	(3,56)	8492	(1,99)
Tip (II/4)	669	(10,20)	3173	(9,35)	8123	(4,34)	9303	(2,18)
Tip (III/1)	66	(1,00)	339	(1,00)	1870	(1,00)	4269	(1,00)
Tip (III/2)	1347	(20,53)	3602	(10,62)	7712	(4,12)	9498	(2,22)

Tablica 4.13. Histerezna energija uzoraka,  $E$  (kNmm) i omjer energija,  $E/E_{REF}$  u odnosu na histereznu energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Uzorak	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	E (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	E (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	E (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	E (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (I/1)	486	(2,96)	4410	(3,97)	5706	(1,77)	-	-
Tip (I/2)	924	(5,63)	3072	(2,77)	8335	(2,59)	8447	(1,69)
Tip (I/3)	760	(4,63)	6711	(6,04)	7654	(2,37)	8281	(1,66)
Tip (I/4)	1611	(9,81)	2772	(2,50)	9332	(2,89)	10527	(2,11)
Tip (II/1)	771	(4,70)	2404	(2,16)	10005	(3,10)	10574	(2,12)
Tip (II/2)	574	(3,49)	2095	(1,89)	3290	(1,02)	5218	(1,05)
Tip (II/3)	875	(5,33)	3445	(3,10)	4557	(1,41)	6172	(1,24)
Tip (II/4)	452	(2,75)	4146	(3,73)	5319	(1,65)	7280	(1,46)
Tip (III/1)	164	(1,00)	1111	(1,00)	3224	(1,00)	4994	(1,00)
Tip (III/2)	1413	(8,61)	4407	(3,97)	11043	(3,42)	12809	(2,57)

#### 4.6.2. Uzorci grupe I

Prema podacima danim u tablicama 4.12. i 4.13. te na slici 4.7., uzorci pokazuju sljedeća svojstva histerezne energije:

a) uzorak tip (I/1)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, raspršena histerezna energija uzorka je 5,37 puta na pozitivnoj strani te 2,96 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  %, kada nastaje slom po reški u ravni iznad otvora, vrijednost histerezne energije raste na 3668,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 4410,0 kNmm, a u usporedbi s istom praznog okvira je 10,81 odnosno 3,97 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$  zidni ispun gubi nosivost. Prethodno tome histerezna energija je dostigla vrijednost 6714,0 kNmm odnosno 5706,0 kNmm, što je 3,59 odnosno 1,77 puta veće od iste praznog okvira.

Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, raste 10,42 puta na pozitivnoj odnosno 9,07 na negativnoj strani, kao posljedica horizontalnog sloma po reški morta iznad otvora, te proširenja i produljenja dijagonalnih pukotina praćeno drobljenjem uglova otvora. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja tj. oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 1,83 puta na pozitivnoj odnosno 1,29 puta na negativnoj strani. Blaži prirast, u odnosu na prethodno promatrane razine oštećenja, posljedica je sve većeg proširenja pukotina, tj. gubitka dodira između slomljenih dijelova ziđa.

b) uzorak tip (I/2)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, histerezna energija uzorka je 23,20 puta na pozitivnoj strani te 5,63 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira. U odnosu na prethodnu razinu oštećenja,  $IDR=0,20$  %, kada nastaje slom po reški u ravni iznad otvora, nosi prirast histerezne energije na 3420,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 3072,0 kNmm, a u usporedbi s istom praznog okvira je 10,08 odnosno 2,77 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, histerezna energija je dostigla vrijednost 7469,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 8335,0 kNmm na negativnoj strani, što je 3,99 odnosno 2,59 puta veće od iste praznog okvira. Pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  % je 1,69 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira i njena vrijednost je 8447,0 kNmm.

Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, raste 2,24 puta na pozitivnoj odnosno 3,32 puta na negativnoj strani. Prisutan je slom po horizontalnoj reški morta te pojava drobljenja ispuna u uglovima otvora te također dijagonalne vlačne pukotine. Od razine osrednjeg oštećenja do

razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 2,18 puta na pozitivnoj odnosno 2,71 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50$  % do  $IDR=1,0$  % do prirast raspršene enregije je 1,01 puta, jer su se postojeće pukotine znatno proširile, tj. na slomljenoj horizontalnoj reški morta, ispod i iznad otvora povećao se razmak između razdvojenih dijelova ispuna te pojava raspucavanja koja je oslabila dodir između razdvojenih ploha ispuna.

c) uzorak tip (I/3)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, histerezna energija uzorka je 13,57 puta na pozitivnoj strani te 4,63 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  %, histerezne energije raste na 2982,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 6711,0 kNmm na negativnoj strani, a u usporedbi s istom praznog okvira je 8,79 odnosno 6,04 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, histerezna energija je dostigla vrijednost 4007,0 kNmm odnosno 7654,0 kNmm, što je 2,14 odnosno 2,37 puta veće od iste praznog okvira. U odnosu na uzorak s punim ispunom, ukupna količina raspršene histerezne energije, pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  % je 1,33 puta na pozitivnoj odnosno 1,66 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira i njena vrijednost je 5668,0 kNmm odnosno 8281,0.

Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, raste 3,35 puta na pozitivnoj odnosno 8,89 puta na negativnoj strani tj. na dijelu krivulje dobivenim kada horizontalna sila djeluje na strani gdje je smješten otklonjeni otvor. Od razine osrednjeg oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 1,34 puta na pozitivnoj odnosno 1,14 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50$  % do  $IDR=1,0$  % do prirast raspršene energije je 1,41 puta na pozitivnoj te 1,08 puta na negativnoj strani, jer je strana ispuna s otklonjenim otvorom prethodno doživjela raspucavanje u potpunosti, a na većem dijelu ispuna, povezanim s posmičnim slomom, te na slomljenoj horizontalnoj reški trenje još djeluje.

d) uzorak tip (I/4)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, histerezna energija uzorka je 23,69 puta na pozitivnoj strani te 9,81 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak,  $IDR=0,20$  %, histerezne energije raste na 3859,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 2772,0 kNmm na negativnoj strani, a u usporedbi s istom praznog okvira je 11,37 odnosno 2,50 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, histerezna energija je dostigla vrijednost 4994,0 kNmm odnosno 9332,0 kNmm, što je 2,67 odnosno 2,89 puta veće od iste praznog okvira. U odnosu na uzorak s punim ispunom, ukupna količina raspršene histerezne

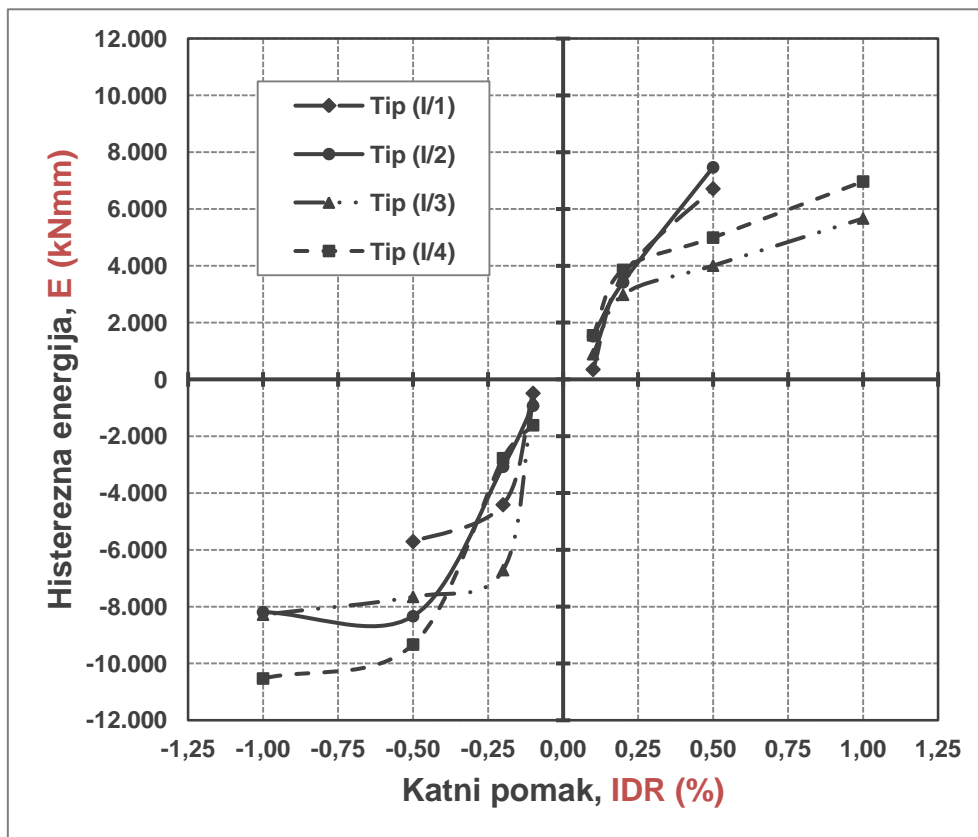
energije, pri katnom pomaku  $IDR=1,0\%$  je 1,63 puta na pozitivnoj odnosno 2,11 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira i njena vrijednost je 6969,0 kNmm odnosno 10527,0.

Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20\%$ , raste 2,48 puta na pozitivnoj odnosno 1,72 puta na negativnoj strani tj. na dijelu krivulje dobivenim kada horizontalna sila djeluje na strani gdje je smješten otklonjeni otvor. Od razine osrednjeg oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50\%$ , raste 1,29 puta na pozitivnoj odnosno 3,36 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50\%$  do  $IDR=1,0\%$  do prirast raspršene energije je 1,39 puta na pozitivnoj te 1,12 puta na negativnoj strani, jer je strana ispun s otklonjenim otvorom prethodno doživjela raspucavanje u potpunosti, a na većem dijelu ispun, povezanim s posmičnim slomom, te na slomljenoj horizontalnoj reški trenje još djeluje.

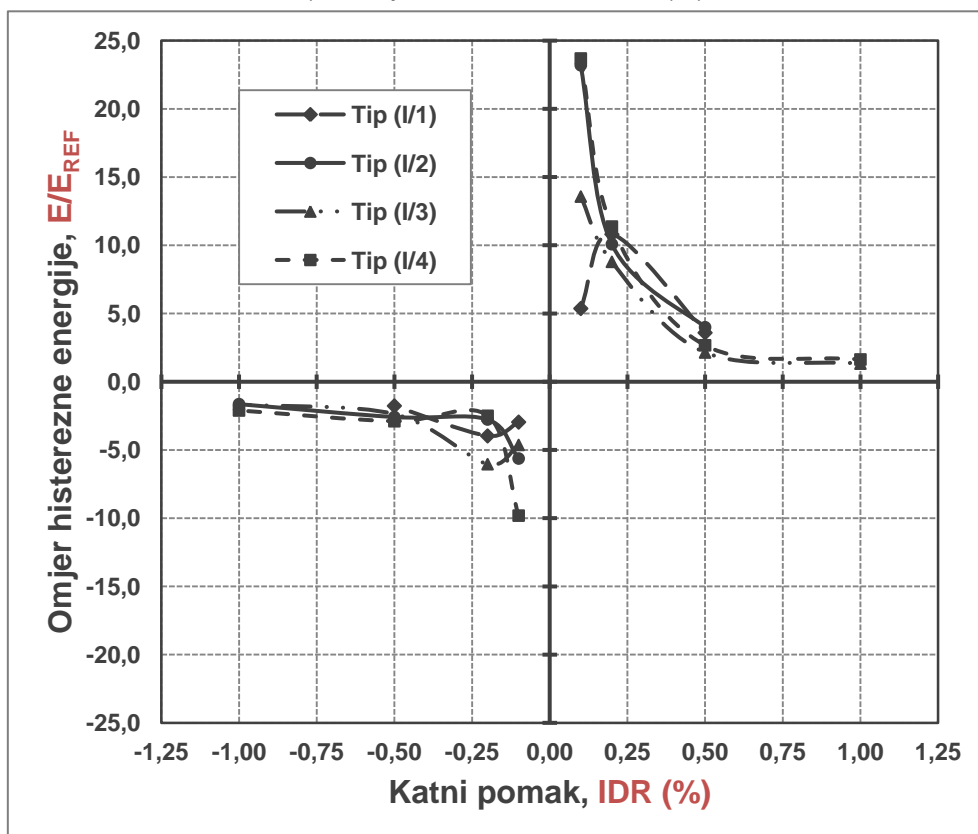
Histerezna energija uzoraka grupe I, znatno je veća od iste praznog okvira. Ovaj odnos umanjuje se rastom katnog pomaka, premda histerezna energija uzoraka grupe I nastavlja rasti te na poslijetku ostvaruje gotovo dvostruko veću vrijednost Rast histerezne energije je drastičan između katnih pomaka  $IDR=0,10\%$  i  $IDR=0,20\%$ , te nastavlja blaži monotoni rast nakon toga, do krajnjeg katnog pomaka, na pozitivnoj strani. Na negativnoj strani, nakon naglog dostizanja razine histerezne energije pri katnom pomaku  $IDR=0,20\%$ , ona ostaje uglavnom konstantna, jer se prethodno nastale pukotine uglavnom samo šire. Međutim, način ispitivanja je bio takav da nakon dostizanja granice tečenja nije bilo više cikličkog opterećivanja stoga proračunata histerezna energija predstavlja ploštinu jednog velikog ciklusa. Histerezna energija povećale se s brojnošću pukotina i vrstom sloma. Putem horizontalnog sloma u ravni ispod i iznad otvora te dijagonalnim vlačnim pukotinama i drobljenjem uglova. Najveću količinu histerezne energije pokazao je uzorak tip (I/4). U njemu prevladavaju dva horizontalna sloma po reškama morta, tj. ispod i iznad otvora te posmični slom dijela ispun pored otvora uz prisutnost novih horizontalnih lomova po reški morta unutar ovog dijela. U odnosu na vrstu otvora, prozor ili vrata, veću histereznu energiju posjeduju uzorci s otvorom za prozor, otklonjen ili ne, jer se horizontalni slom dogodio u dvije ravni, iznad i ispod otvora te putem ove dvije ploštine ispun raspršuje više energije. U odnosu na smještaj otvora, veći prirast histerezne energije do razine osrednjeg oštećenja dobiven je na negativnoj strani (djelovanje horizontalne sile je na strani na kojoj je otvor), kao posljedica raspucavanja kraćeg dijela ispun pored otvora. Ovaj prirast do razine oštećenja pred slom ispun slabi, jer je svoj doprinos histereznoj energije već dao.

Na slici 4.7. dan je dijagram odnosa omjera histerezne energije u odnosu na prazan okvir te pripadnog katnog pomaka, uzoraka grupe I.

a) Krivulje odnosa  $E$  (kNm) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $E/E_{REF}$  i IDR (%)



Slika 4.7. Histerezna energija uzoraka grupe I,  $E$  (kNm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

### 4.6.3. Uzorci grupe II

Prema podacima danim u tablicama 4.12. i 4.13. te na slici 4.8., uzorci pokazuju sljedeća svojstva histerezne energije:

#### a) uzorak tip (II/1)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, raspršena histerezna energija uzorka je 16,75 puta na pozitivnoj strani te 4,70 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak, pri  $IDR=0,20$  %, vrijednost histerezne energije raste na 3583,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 2404,0 kNmm, a u usporedbi s istom praznog okvira je 10,56 odnosno 2,16 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, histerezna energija je dostigla vrijednost 7096,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 10005,0 kNmm na negativnoj strani, što je 3,79 odnosno 3,10 puta veće od iste praznog okvira. Pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  % je 2,12 puta na pozitivnoj i negativnoj strani veća od iste praznog okvira i njena vrijednost je 9061,0 kNmm odnosno 10574,0 kNmm.

Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, raste 3,26 puta na pozitivnoj odnosno 3,11 na negativnoj strani, putem drobljenja uglova i dijagonalnog vlačnog sloma. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja tj. oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 1,98 puta na pozitivnoj odnosno 4,16 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50$  % do  $IDR=1,0$  % prirast raspršene energije je 1,27 puta na pozitivnoj odnosno 1,05 na negativnoj strani.

#### b) uzorak tip (II/2)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, raspršena histerezna energija uzorka je 6,69 puta na pozitivnoj strani te 3,49 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak, pri  $IDR=0,20$  %, vrijednost histerezne energije raste na 6020,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 2095,0 kNmm, a u usporedbi s istom praznog okvira je 17,74 odnosno 1,89 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, histerezna energija je dostigla vrijednost 6020,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 2059,0 kNmm na negativnoj strani, što je 2,59 odnosno 1,02 puta veće od iste praznog okvira. Pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  % je 2,02 puta na pozitivnoj i 1,05 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira i njena vrijednost je 8626,0 kNmm odnosno 5218,0 kNmm.

Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, raste 13,71 puta na pozitivnoj odnosno 3,64 na negativnoj strani, putem drobljenja uglova i dijagonalnog vlačnog sloma kao posljedica djelovanja samo iz jednog smjera. Od



razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja tj. oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 1,16 puta na pozitivnoj odnosno 1,57 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50$  % do  $IDR=1,0$  % prirast raspršene energije je 1,27 puta na pozitivnoj odnosno 1,05 na negativnoj strani.

c) uzorak tip (II/3)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, raspršena histerezna energija uzorka je 30,47 puta na pozitivnoj strani te 5,33 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak, pri  $IDR=0,20$  %, vrijednost histerezne energije raste na 2897,0 kNm na pozitivnoj odnosno 3445,0 kNm, a u usporedbi s istom praznog okvira je 8,54 odnosno 3,10 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, histerezna energija je dostigla vrijednost 6666,0 kNm na pozitivnoj odnosno 4557,0 kNm na negativnoj strani, što je 3,56 odnosno 1,41 puta veće od iste praznog okvira. Pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  % je 1,99 puta na pozitivnoj i 1,24 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira i njena vrijednost je 8492,0 kNm odnosno 6172,0 kNm.

Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, raste 1,45 puta na pozitivnoj odnosno 3,93 na negativnoj strani, putem drobljenja uglova i dijagonalnog vlačnog sloma. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja tj. oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 2,30 puta na pozitivnoj odnosno 1,32 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50$  % do  $IDR=1,0$  % prirast raspršene energije je 1,27 puta na pozitivnoj odnosno 1,35 na negativnoj strani.

d) uzorak tip (II/4)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, raspršena histerezna energija uzorka je 10,20 puta na pozitivnoj strani te 2,75 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak, pri  $IDR=0,20$  %, vrijednost histerezne energije raste na 3173,0 kNm na pozitivnoj odnosno 4146,0 kNm, a u usporedbi s istom praznog okvira je 9,35 odnosno 3,73 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, histerezna energija je dostigla vrijednost 8123,0 kNm na pozitivnoj odnosno 5319,0 kNm na negativnoj strani, što je 4,34 odnosno 1,65 puta veće od iste praznog okvira. Pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  % je 2,18 puta na pozitivnoj i 1,46 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira i njena vrijednost je 9303,0 kNm odnosno 7280,0 kNm.

Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, raste 4,74 puta na pozitivnoj odnosno 9,17 na negativnoj strani, putem drobljenja



uglova i dijagonalnog vlačnog sloma. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja tj. oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 2,56 puta na pozitivnoj odnosno 1,28 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50$  % do  $IDR=1,0$  % prirast raspršene energije je 1,14 puta na pozitivnoj odnosno 1,36 na negativnoj strani.

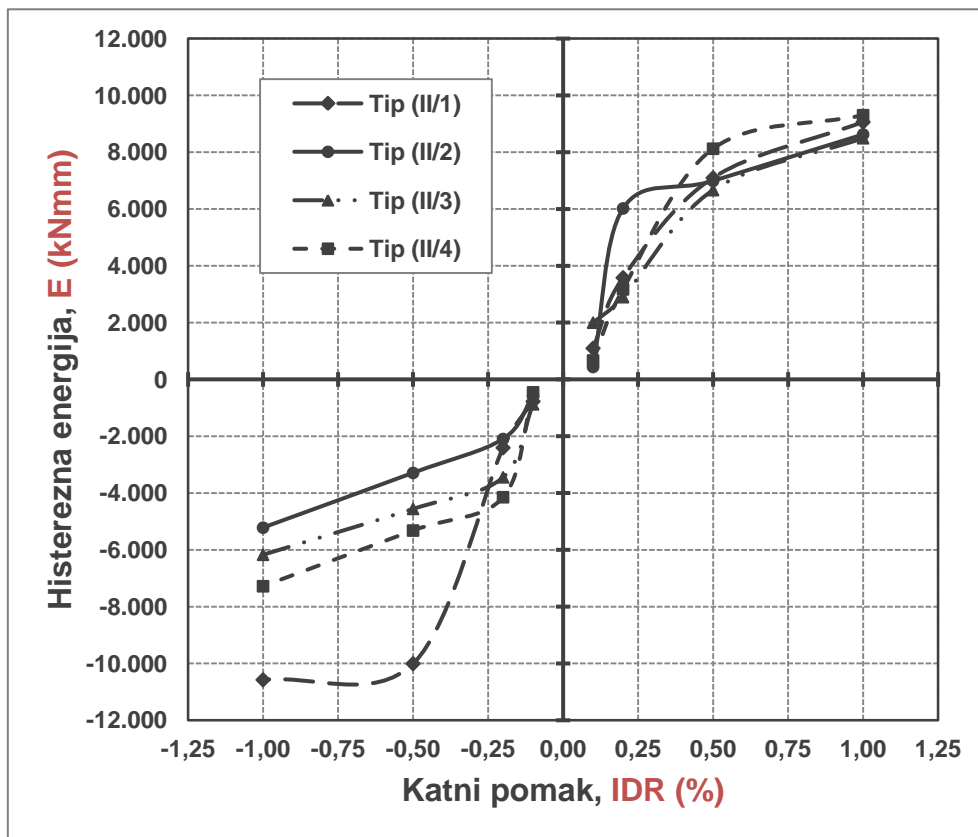
Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  %, raste 2,48 puta na pozitivnoj odnosno 1,72 puta na negativnoj strani tj. na dijelu krivulje dobivenim kada horizontalna sila djeluje na strani gdje je smješten otklonjeni otvor. Od razine osrednjeg oštećenja do razine oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 1,29 puta na pozitivnoj odnosno 3,36 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50$  % do  $IDR=1,0$  % do prirast raspršene energije je 1,39 puta na pozitivnoj te 1,12 puta na negativnoj strani, jer je strana ispunjena s otklonjenim otvorom prethodno doživjela raspucavanje u potpunosti, a na većem dijelu ispunjena, povezanim s posmičnim slomom, te na slomljenoj horizontalnoj reški trenje još djeluje.

Histerezna energija uzoraka grupe II, znatno je veća od iste praznog okvira. Ovaj odnos umanjuje se rastom katnog pomaka, premda histerezna energija uzoraka grupe II nastavlja rasti. Rast histerezne energije je drastičan između katnih pomaka  $IDR=0,10$  % i  $IDR=0,50$  %, te nastavlja blaži monotoni rast nakon toga, do krajnjeg katnog pomaka, na pozitivnoj strani, osim za uzorak tip (II/2). Na negativnoj strani, nagli rast je između katnih pomaka  $IDR=0,10$  % i  $IDR=0,20$  %, nakon čega slijedi blaži monotoni rast, osim za uzorak Tip (II/1). Histerezna energija nastaje putem dijagonalnog vlačnog sloma i drobljenjem uglova. Najveću količinu histerezne energije pokazao je uzorak tip (II/1). U njemu su izražene glavne dijagonalne vlačne pukotine te drobljenje uglova. Suprotno njemu, uzorak tip (II/2), imao je najmanju histereznu energiju, jer prevladava drobljenje uglova u odnosu na ostale načine oštećenja.

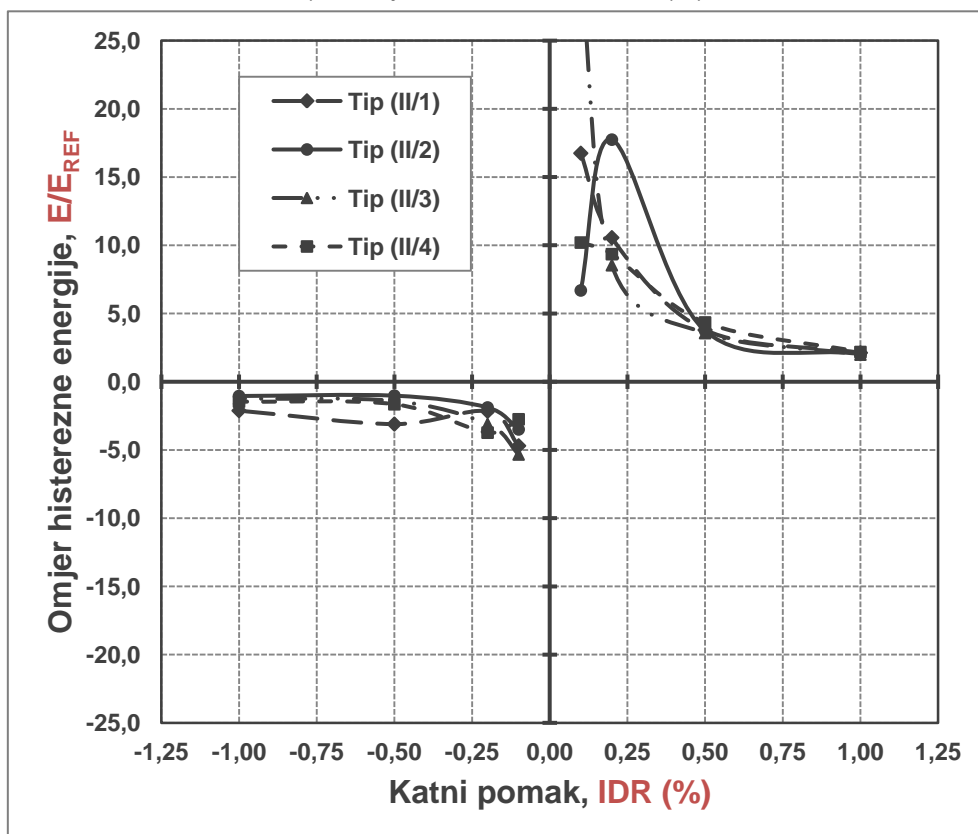
U odnosu na vrstu otvora, prozor ili vrata, veću histereznu energiju posjeduju uzorci s otvorom za vrata, otklonjen ili ne, pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %. Pri katnom pomaku  $IDR=0,20$  % veća je histerezna energija uzoraka s prozorom te kasnije postaje približno jednaka kod svih uzoraka. U odnosu na smještaj otvora, manji prirast histerezne energije dobiven je na negativnoj strani, jer se nastale pukotine djelovanjem sile iz drugog smjera, samo šire. Histerezne energije uzoraka vrlo su sličnih vrijednosti, jer su nastali slomovi obilježeni jednakim vrstama oštećenja, a horizontalni slom po reški morta nije bio primarni niti na jednom ispitnom uzorku.

Na slici 4.8. dan je dijagram odnosa omjera histerezne energije u odnosu na prazan okvir te pripadnog katnog pomaka, uzoraka grupe II.

a) Krivulje odnosa  $E$  (kNm) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $E/E_{REF}$  i IDR (%)



Slika 4.8. Histerezna energija uzoraka grupe II,  $E$  (kNm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

#### 4.6.4. Uzorci grupe III

Prema podacima danim u tablicama 4.12. i 4.13. te na slici 4.9., uzorci pokazuju sljedeća svojstva histerezne energije:

a) uzorak tip (III/1)

Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, raspršena histerezna energija uzorka je 66,0 kNmm na pozitivnoj strani te 164,0 kNmm na negativnoj strani. U odnosu na prethodni katni pomak, pri  $IDR=0,20$  %, vrijednost histerezne energije raste na 339,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 1111,0 kNmm. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, histerezna energija je dostigla vrijednost 1870,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 3224,0 kNmm na negativnoj strani. Pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  % njena vrijednost je 4269,0 kNmm odnosno 4994,0 kNmm.

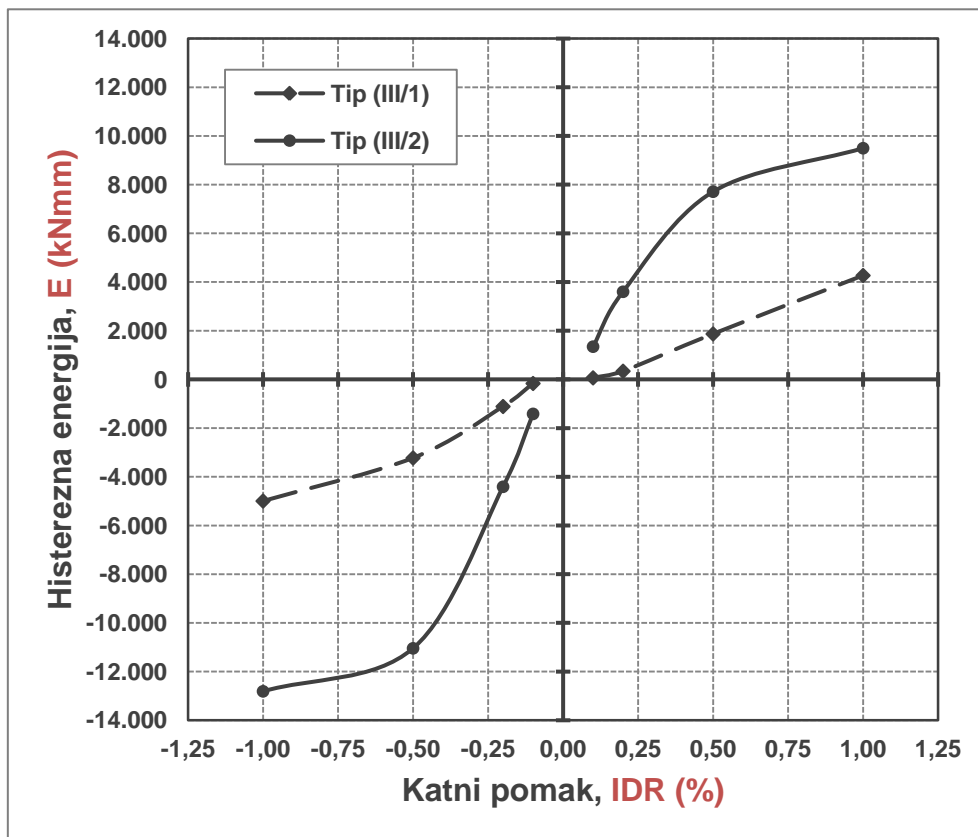
Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, raste 5,13 puta na pozitivnoj odnosno 6,77 na negativnoj strani, putem drobljenja uglova i dijagonalnog vlačnog sloma. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja tj. oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 5,51 puta na pozitivnoj odnosno 2,90 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50$  % do  $IDR=1,0$  % prirast raspršene energije je 2,28 puta na pozitivnoj odnosno 1,54 na negativnoj strani.

b) uzorak tip (III/2)

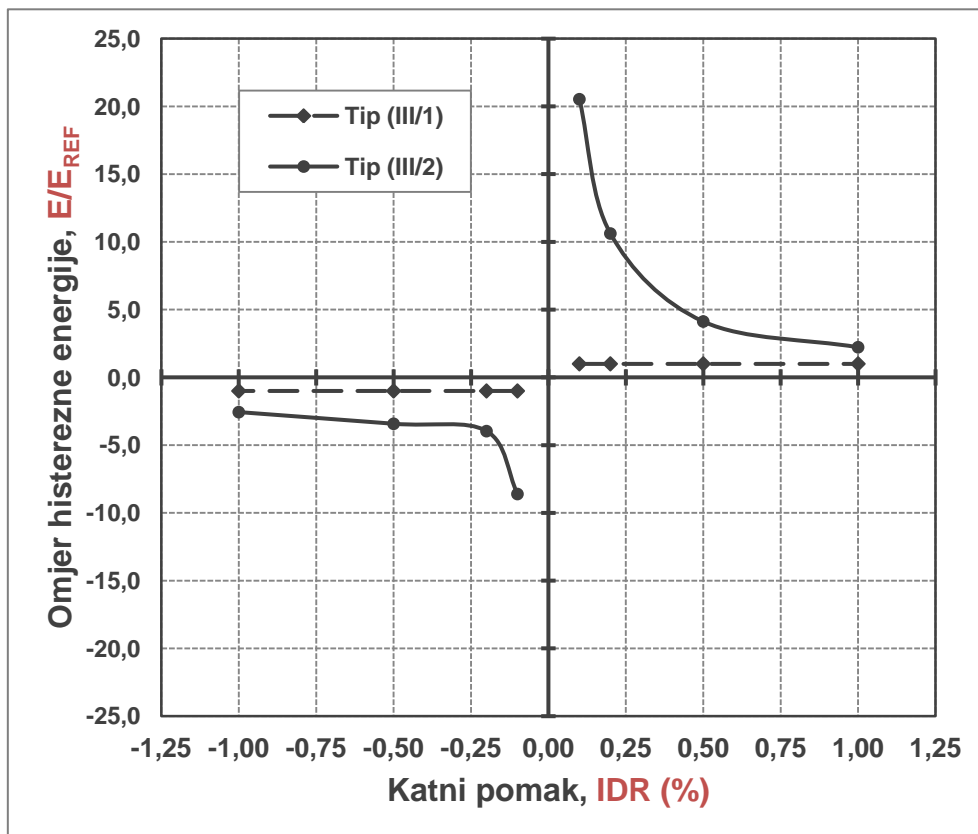
Pri katnom pomaku  $IDR=0,10$  %, raspršena histerezna energija uzorka je 20,53 puta na pozitivnoj strani te 8,61 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira. U odnosu na prethodni katni pomak, pri  $IDR=0,20$  %, vrijednost histerezne energije raste na 3602,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 4407,0 kNmm, a u usporedbi s istom praznog okvira je 10,62 odnosno 3,97 puta veća. Pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, histerezna energija je dostigla vrijednost 7712,0 kNmm na pozitivnoj odnosno 11043,0 kNmm na negativnoj strani, što je 4,12 odnosno 3,42 puta veće od iste praznog okvira. Pri katnom pomaku  $IDR=1,0$  % je 2,22 puta na pozitivnoj i 2,57 puta na negativnoj strani veća od iste praznog okvira i njena vrijednost je 9498,0 kNmm odnosno 12809,0 kNmm.

Histerezna energija uzorka od razine neznatnog oštećenja do razine osrednjeg oštećenja, raste 2,67 puta na pozitivnoj odnosno 3,11 na negativnoj strani, putem drobljenja uglova i dijagonalnog vlačnog sloma kao posljedica djelovanja samo iz jednog smjera. Od razine osrednjeg oštećenja do razine teškog oštećenja tj. oštećenja pred slom, pri katnom pomaku  $IDR=0,50$  %, raste 2,14 puta na pozitivnoj odnosno 2,51 puta na negativnoj strani. Od katnog pomaka  $IDR=0,50$  % do  $IDR=1,0$  % prirast raspršene energije je 1,23 puta na pozitivnoj odnosno 1,15 na negativnoj strani.

a) Krivulje odnosa  $E$  (kNm) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $E/E_{REF}$  i IDR (%)



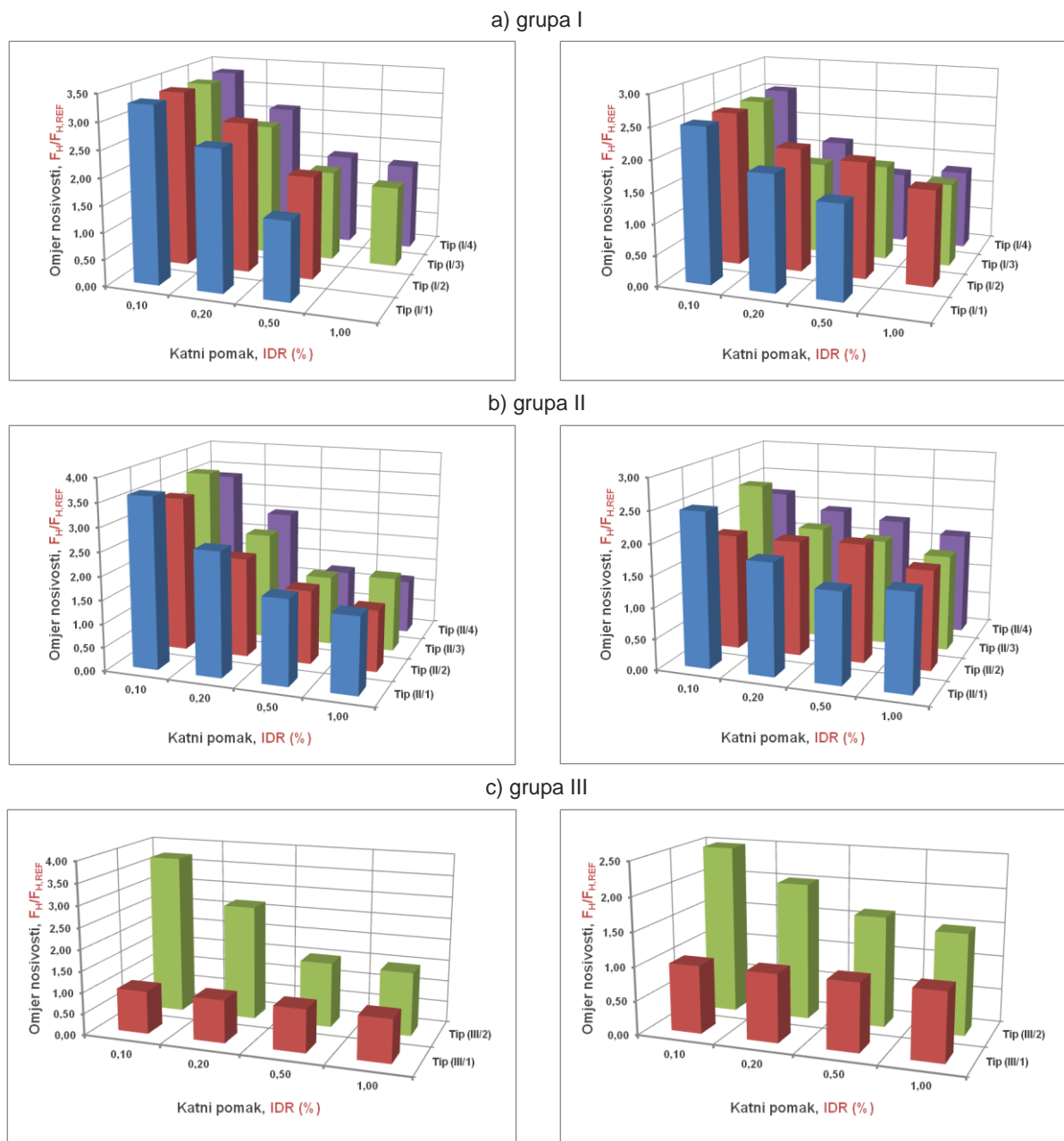
Slika 4.9. Histerezna energija uzoraka grupe III,  $E$  (kNm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

## 4.7. Cjelokupni prikaz

Prema odnosima nosivosti, krutosti i histerezne energije opisanih u podpoglavljima 4.4., 4.5. i 4.6., dan je usporedni grafički prikaz za pozitivne i negativne cikluse u odnosu na pripadni katni pomak.

### 4.7.1. Nosivost u horizontalnom smjeru

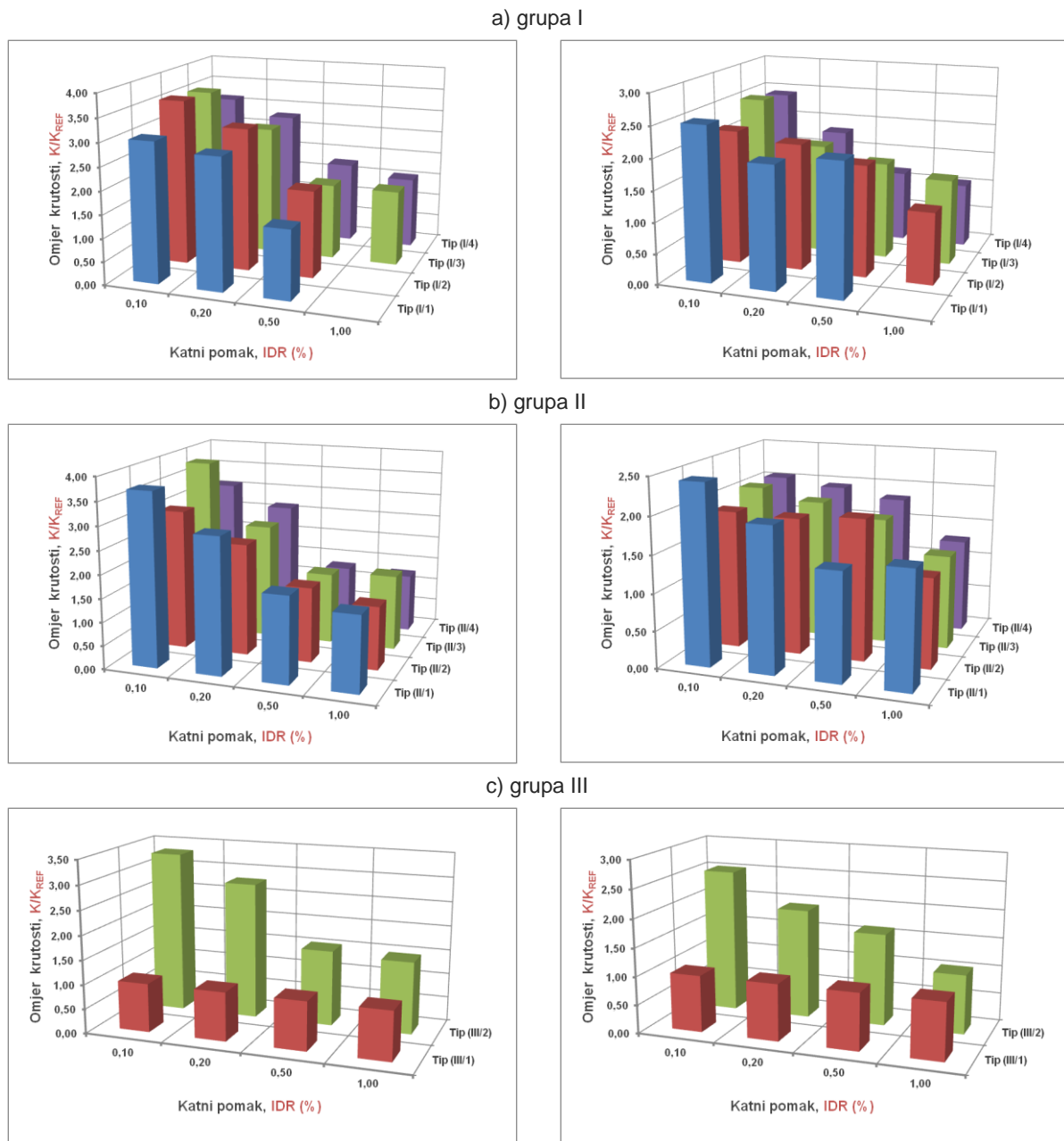
Nosivost uzoraka sa zidanim ispunom u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakim katnim pomacima, prikazan je na slici 4.10.



Slika 4.10. Nosivost uzoraka  $F_H / F_{H,REF}$  pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) za pozitivne cikluse (lijevo) i negativne (desno)

## 4.7.2. Krutost u horizontalnom smjeru

Krutost uzoraka sa zidanim ispunom u odnosu na krutost praznog okvira pri jednakim katnim pomacima, prikazana je na slici 4.11. Posebno je dan prikaz za pozitivne i negativne cikluse, zbog utjecaja otklonjenog otvora.

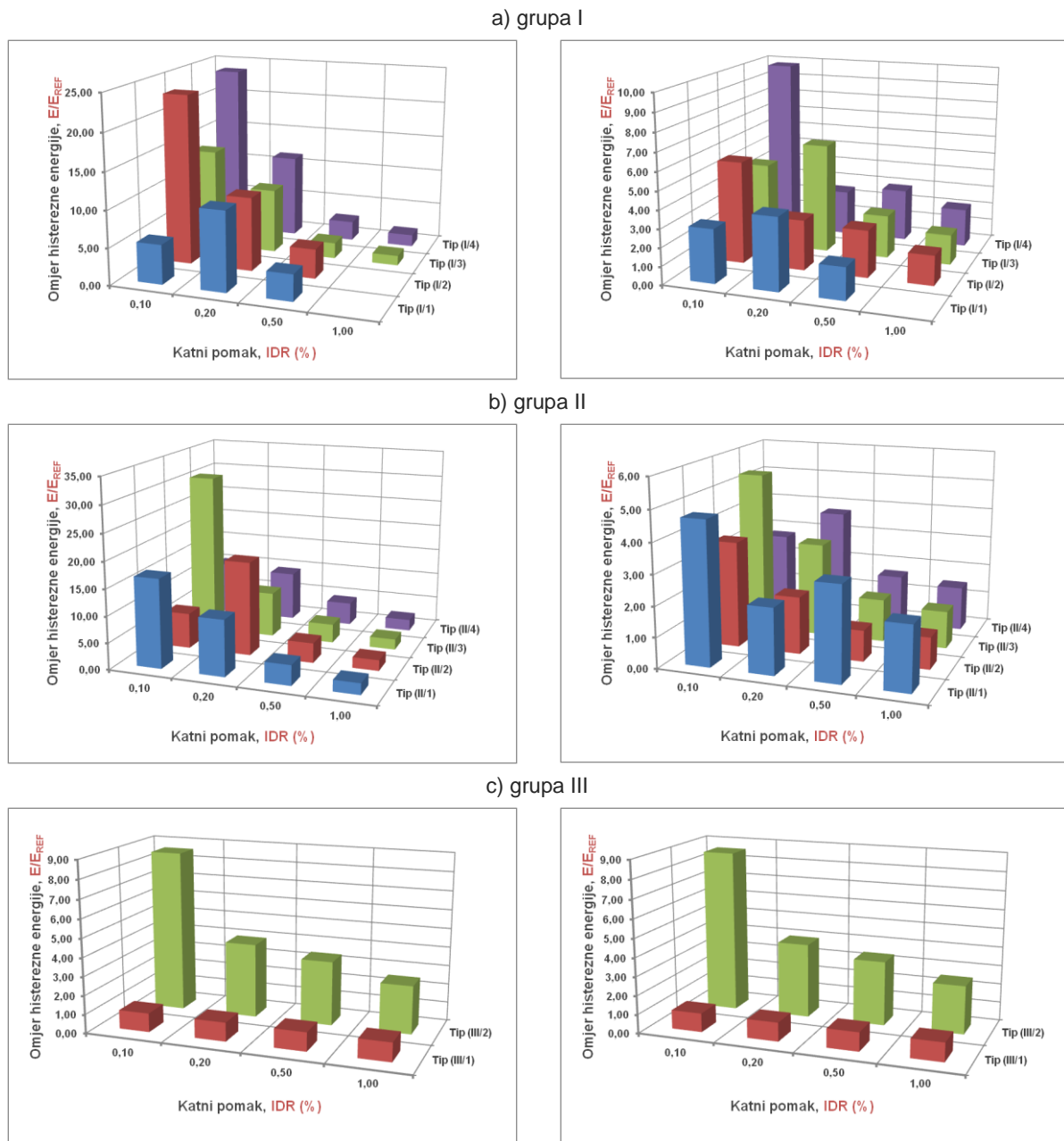


**Slika 4.11.** Krutost uzoraka  $K/K_{REF}$  pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) za pozitivne cikluse (lijevo) i negativne (desno)

Na slici 4.11. c, jasno je vidljivo povećanje krutosti armirano-betonskog okvira bez ispuna u odnosu na uzorak s punim zidanim ispunom. Vidljivo je također kako je krutost uzorka sa zidanim ispunom pri katnom pomaku od IDR=1,0 % postala jednaka krutosti praznog okvira.

### 4.7.3. Histerezna energija

Histerezna energija uzoraka sa zidanim ispunom u odnosu na istu praznog okvira pri jednakim katnim pomacima, prikazana je na slici 4.12. Posebno je dan prikaz za pozitivne i negativne cikluse, zbog utjecaja otklonjenog otvora.



**Slika 4.12.** Krutost uzoraka  $E/E_{REF}$  pri odabranim katnim pomacima, IDR (%) za pozitivne cikluse (lijevo) i negativne (desno)

Uzorci sa zidanim ispunom, prema slici 4.12. imaju histereznu energiju pri krajnjem katnom pomaku veću od iste praznog okvira, bez obzira što je krutost uslijed oštećenja zidanog ispuna dostigla krutost praznog okvira.



#### 4.8. Sažetak i zaključak poglavlja

U ovom poglavlju međusobno su uspoređeni rezultati ispitivanja. Uspoređen je način sloma, oštećenost zidanog ispuna i ponašanja uzoraka. Razine oštećenosti uzoraka sa zidanim ispunom svrstavaju se unutar vrlo sličnih vrijednosti katnih pomaka stoga su ovi katni pomaci usvojeni kao ključni pri procjeni ponašanja. Svi uzorci sa zidanim ispunom pokazali su utjecaj ispuna do relativnog katnog pomaka od  $IDR=1,0\%$ , što je povećanje u odnosu na dosadašnja istraživanja. Osim toga, na armirano-betonskom okviru nisu uočene posmične pukotine. Oštećenja uzoraka vezana su za zidani ispun, dok armirano-betonski okvir nije pretrpio značajna oštećenja. Vrste oštećenja, a također niti način sloma zidanih ispuna nisu jednaki. Vertikalni serklaži vezali su oštećenje uglavnom na predodređeni zidni stup i učinili način sloma predvidljivijim. Prevladavajući slom ispuna određen je načinom raspucavanja.

Svrha je bila u pogledu ovih parametara prikazati razlike između uzoraka tj. izraziti utjecaj vrste otvora, smještaja otvora te izvedbe vertikalnih serklaža oko otvora. Ovo troje nisu pokazali znatan učinak na nosivost, krutost i histereznu energiju, ali su značajno utjecali na način sloma tj. prethodno na pojavu vrsta pukotina. Kako je uzorak s punim zidanim ispunom imao najveću ukupnu histereznu energiju, slijedi da je ista pod utjecajem otvora i vertikalnih serklaža, jer je vezana za način sloma. Uzorci bez izvedbe vertikalnih serklaža doživjeli su slom horizontalne reške morta iznad otvora za vrata ili iznad i ispod otvora za prozor, a zatim se zid razložio na dijelove unutar sebe. Predvidljiviji način sloma dogodio se na ispitnim uzorcima s vertikalnim serklažima, jer su dijelovi ziđa bili njima predodređeni. Time je utjecaj vrste otvora (prozor ili vrata) umanjen, a doprinos dijela ispuna iznad i ispod otvora neznatan. Uzorci s otklonjenim otvorom pokazali su da je vertikalni serklaž potrebno ojačati, zbog mogućeg sloma ispod nadvoja.

Utjecaj zidanog ispuna armirano-betonskih okvira u odnosu na prazan armirano-betonski okvir, dan je putem omjera nosivosti, krutosti i histerezne energije za pripadne katne pomake, odabrane u skladu s razinama oštećenosti. Ovime je dan uvid u ponašanje ovakvih konstrukcija te je otvorilo mogućnost za njihovo modeliranje. Uz pretpostavku zamjenske dijagonale ovakav prikaz daje mogućnost njene prilagodbe u skladu s promatranim slučajem otvora. Ovime je stvorena podloga za dodatna numerička istraživanja u ovome radu tj. za studiju utjecaja pojedinih parametara.

Izvedba vertikalnih serklaža oko otvora po visini ispuna omeđuje otvor i zidni ispun, stoga svojim smještajem predodređuje dijelove zidanog ispuna čime se pojednostavljuje proračun, a time prikladna točnost procjene. Otvore u nearmiranom zidanim ispunu, sa svojim smještajem, a također niti sam zidani ispun, ne smije se izostaviti u predviđanju odgovora armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom.

## Poglavlje 5.0.

# NUMERIČKO MODELIRANJE PRIMJENOM METODE KONAČNIH ELEMENATA

## 5.1. Uvod

U ovom poglavlju je prikazan odabrani numerički model. Primjenom metode konačnih elemenata usklađen je s rezultatima ispitivanja u svrhu proširenja istraživanja. Numerički proračun proveden je putem računalnog programa ATENA 2D, ver.4.3. Izrađen je nelinearni numerički mikro model u kojem su modelirani nelinearno ponašanje betona, armature, opeke i morta. On se zasniva na teorijskim rješenjima nelinearnog ponašanja materijala. Ovi modeli ovisni su o velikom broju ulaznih parametara, stoga je potrebna velika pažnja pri njihovom odabiru. Uz pomoć računalnog programa ATENA 2D v.4.3, koji se zasniva na metodi konačnih elemenata ishođeni su traženi parametri.

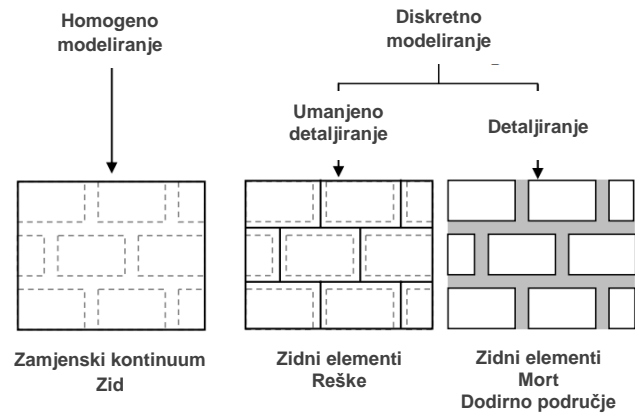
U poglavlju je opisan način modeliranja i usklađivanja parametara MKE proračuna, putem svojstava materijala dobivenih jednostavnim eksperimentima. Podudarnost između proračunskog modela i eksperimentalnih rezultata provjeravana je putem načina sloma, raspucavanja zidanog ispuna te histereznih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka tj. nosivosti.

## 5.2. Izvedba numeričkog modela

### 5.2.1. Modeliranje zidanog ispuna

Općenito, prema (44,48) postoje tri pristupa problemu modeliranja zidanog ispuna, homogeni (makro model), diskretni pojednostavljeni i diskretni detaljni, kao što je prikazano na slici 5.1. Pojednostavljeni diskretni model, u odnosu na homogeni pristup koji se zasniva na teorijama čvrstoće, ima mogućnost izravnog modeliranja reški morta zidanog ispuna i posebno zidnih elemenata te je stoga zahtjevniji. U odnosu na makro model koji je poželjan za inženjere u praksi, pojednostavljeni model je model s vjernijim prikazom, jer omogućava prikaz klizanja tj. sloma po reškama morta.

Detaljnim diskretnim modeliranjem, posebno se pristupa modeliranju zidnih elemenata i morta, s njima pripadnim svojstvima. U odnosu na detaljni diskretni model, u pojednostavljenom diskretnom modelu, debljina reške morta nije izravno modelirana, tj. zidni elementi su povećani kako bi se ona prikrla, a pripadna svojstva uvedena su putem pripadnih krutosti spoja morta i zidnih elemenata u kontaktne (engl. Interface) elemente. Ukoliko ne postoje znatna tlačna opterećenja, što je slučaj kod zidanog ispuna, debljina morta se smije izbjeći pojednostavljenim modeliranjem.

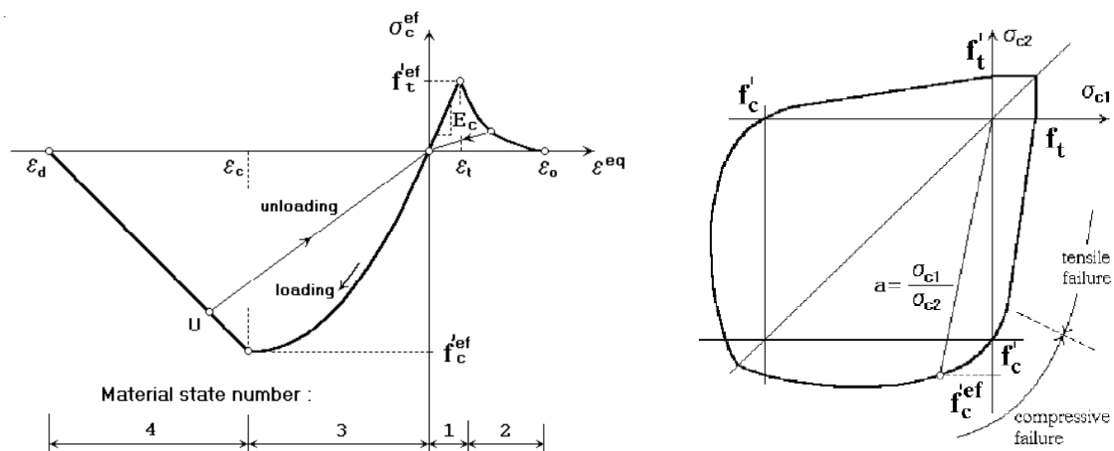


Slika 5.1. Načini modeliranja zidanog ispuna

Za modeliranje armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom primijenjen je pojednostavljeni diskretni model uz pomoć metode konačnih elemenata i teorijskih rješenja nelinearnog ponašanja materijala, sadržanih u računalnom programu ATENA 2D v.4.3.

#### a) Model materijala zidnih elemenata

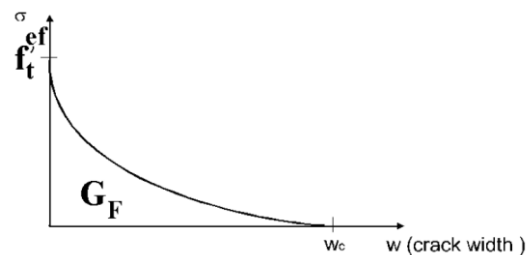
Za modeliranje zidnih elemenata tj. šupljih opečnih blokova, odabran je SBETA (CCSbetaMaterial) tzv. smeared-crack teorijski model materijala dan u računalnom programu ATENA 2D v.4.3. Prema njemu materijal postaje ortotropan pri pojavi pukotine, prije čega je homogen. Prvotno je namijenjen za modeliranje betona. Model obuhvaća: nelinearno ponašanje materijala u tlaku, slom u vlaku na osnovi nelinearne mehanike loma, čvrstoću pri dvoosnom stanju naprezanja, smanjenje tlačne čvrstoće nakon raspucavanja, očvršćivanje u vlaku, smanjenje posmične krutosti nakon sloma te dva modela za opis određivanje pukotina. Osnovu modela predstavlja jednoosni nelinearni odnos naprezanja i deformacija betona u tlaku i linearni u vlaku koji predstavlja materijal u dvoosnom stanju naprezanja.



Slika 5.2. Zamjenski jednoosni odnos naprezanja i deformacija (lijevo) i teorija čvrstoće pri dvoosnom stanju naprezanja (desno) modela materijala SBETA u ATENA-i 2D v.4.3.

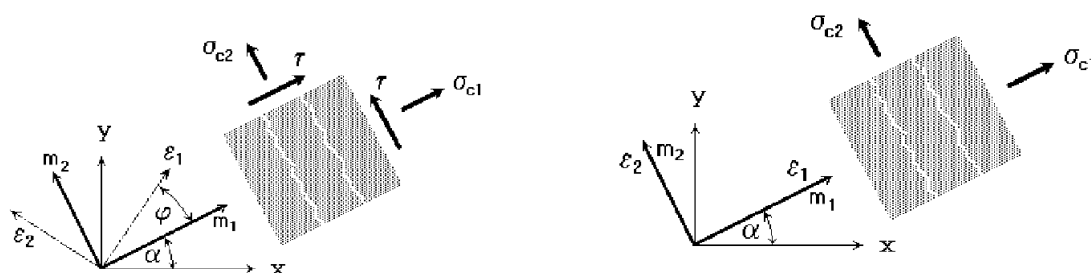
Na slici 5.2. prikazan je zamjenski jednoosni odnos napreznja i deformacija materijala te pripadna teorija čvrstoće za dvoosno stanje napreznja prema (50,51), putem kojeg se određuju parametri za zamjenski odnos. Svojstva materijala, putem kojih se navedeni odnos oblikuje, zahtijeva u nedostatku ostalih, poznavanje samo tlačne čvrstoće kocke betona. Ostala se svojstva procjenjuju na temelju numeričkih izraza i preporuka iz literature upisanih u sami program, kao npr. početni modul elastičnosti. Naime, kako se u ovom slučaju radi o glinenom zidnom elementu, bilo je potrebno poznavati što više svojstava istog. Svojstva dana na slici 5.2. redom su opisana u tablici 5.1.

Ponašanje u vlaknu do gubitka proračunske vlačne čvrstoće,  $f_t^{ef}$ , pretpostavlja se linearno-elastičnim s nagibom krivulje  $E_0$ , a nakon sloma, obilježenim nastankom pukotina, primjenjuje se model (engl. Fictitious crack model) pomoću kojeg se opisuje nastanak i širenje pukotine, koji se zasniva na zakonu širenja pukotine i energiji loma. Zakon širenja pukotine dan u ATENA-i 2D v.4.3. koji je usvojen pri modeliranju materijala, je eksponencijalna funkcija prema (50,52). Prikazana je na slici 5.3.



Slika 5.3. Odabrana eksponencijalna funkcija širenja pukotine za model materijala SBETA u ATENA-i 2D v.4.3.

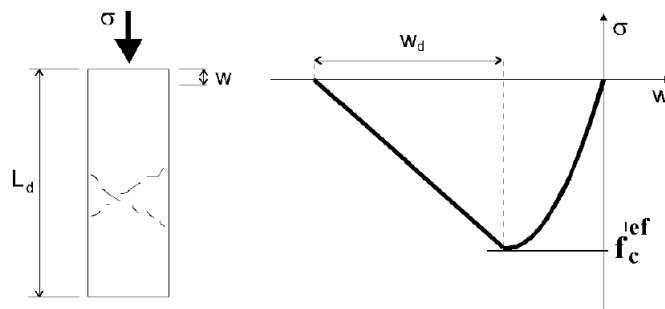
Energija loma,  $G_F$ , proračunava se numeričkim izrazom, na osnovu proračunske vlačne čvrstoće u funkciji dvoosne teorije čvrstoće, dok je  $w_c$  širina pukotine pri kojoj ona više ne prenosi napreznja. Pojava pukotina u ovom programu, modelira se putem dva tzv. „razmazana“ pristupa. „Razmazana“, jer nastankom pukotine nova svojstva vrijede za čitav volumen materijala unutar konačnog elementa. U okviru ovog pristupa postoje dva načina modeliranja pukotina: tzv. fixed crack model i tzv. rotated crack model (slika 5.3.)



Slika 5.4. Fixed crack model (lijevo) i rotated crack model (desno) za model materijala SBETA u ATENA-i 2D v.4.3.

Prvi model pretpostavlja da nastankom pukotine uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće, pukotina zadržava smjer glavnih naprezanja cijelo vrijeme nakon sloma, dok drugi model omogućuje rotaciju pukotine u skladu sa smjerovima glavnih deformacija. Za zidni element usvojen je posljednji, tj. rotated crack model, iz razloga što je predviđeno horizontalno cikličko opterećivanje uzorka (promjena smjera opterećenja) što bitno utječe na promjenu stanja naprezanja i deformacija u zidanom ispunu.

Numerički izrazom prema CEB-FIP Model Code 90 opisuje uzlazni dio krivulje materijala u tlaku. Prema dijagramu danom na slici 5.1. (lijevo) svojstva kojim se opisuje ova krivulja u uzlaznom dijelu su:  $E_c$ , sekantni modul elastičnosti,  $f_c^{ef}$ , proračunska tlačna čvrstoća materijala i  $\epsilon_c$ , normalna deformacija pri  $f_c^{ef}$ . Nakon dostizanja vršnog tlačnog naprezanja, slijedi omekšavanje u tlaku. Krajnja točka krivulje omekšavanja, prema slici 5.5., u tlaku je plastični pomak  $w_d$ . Eksperimentalno je potvrđeno, prema (50,53), da za normalni beton vrijednost ovog pomaka iznosi  $w_d=0,5$  mm, što je u ovom radu i usvojeno.



**Slika 5.5.** Krivulja omekšavanja za model materijala SBETA u ATENA-i 2D v.4.3.

Umanjenje tlačne čvrstoće materijala nije usvojeno, tj. pretpostavljeno je da u slučaju opterećenja na zidni element s pukotinom, okomito na smjer pukotine, on u potpunosti prenosi tlačno naprezanje. Također, je pretpostavljeno da porastom širine pukotina, materijal gubi posmičnu krutost, što se kontrolira putem tzv. „shear retention“ faktora. U programu je usvojena funkcija „Variable“ za ovaj slučaj.

Bitna i primijenjena svojstva usvojena za model materijala za zidni element navedena su u tablici 5.1.

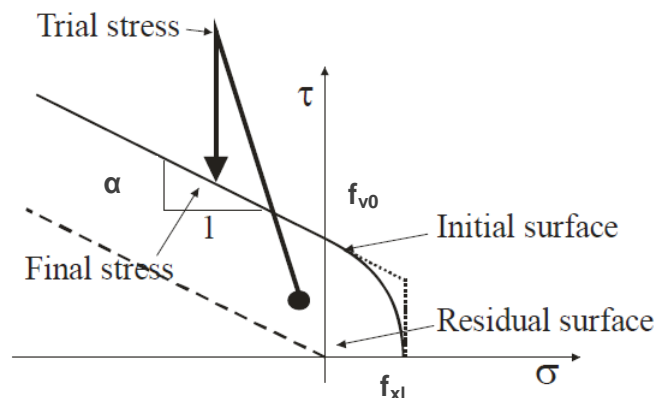
**Tablica 5.1.** Bitna i primijenjena svojstva zidnog elementa za model materijala SBETA u ATENA-i 2D v.4.3.

Svojstvo zidnog elementa	Oznaka	Vrijednost	Mjerne jedinice
Tlačna čvrstoća u vertikalnom smjeru; horizontalnom smjeru	$f_b$ ; $f_{bh}$	15,9; 2,3	N/mm <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća	$f_{bt}$ ; $f_{bht}$	1,59; 0,23	N/mm <sup>2</sup>
Poissonov omjer	$\mu$	0,05	-
Rotated crack model	-	-	-

## b) Model materijala za kontakt reške morta i zidnog elementa

Za modeliranje reški morta primijenjen je tzv. „Interface material model“, ugrađen u ATENA-i 2D v.4.3., kojim se opisan kontakt između dvaju zidnih elemenata, a među kojima je reška morta. Model se zasniva na Mohr-Coulombovoj teoriji čvrstoće. U skladu sa plohom sloma, danom na Slici 5.6., vidljivo je da ukoliko dođe do sloma početne posmične čvrstoće,  $f_{v0}$ , nosivost se i dalje postiže putem trenja,  $tg\alpha$ .

Gubitkom vlačne čvrstoće između reške morta i zidnog elementa  $f_{xl}$ , na desnoj strani plohe, kontakt element u potpunosti gubi nosivost (engl. tension cut-off) tj. nema više kontakta između zidnih elemenata. Također je vidljivo da uz prisutnost vlačnih naprezanja, posmična nosivost postaje manja.



Slika 5.6. Ploha sloma kontakt elementa u ATENA-i 2D v.4.3.

Pri izvedbi ispitnih uzoraka, vertikalne i horizontalne reške morta bile su ispunjene mortom te su im pripisana jednaka svojstva zbog jednostavnijeg proračuna i obrade podataka. Osim navedenih svojstava, potrebno je odrediti svojstva krutosti reške morta u normalnom  $K_{nn}$  i tangencijalnom smjeru  $K_{tt}$ . Kako bi se odredile vrijednosti ovih krutosti potrebno je imati rezultate dobro dokumentiranih eksperimentalnih ispitivanja, koji su dani u tablici 5.2.

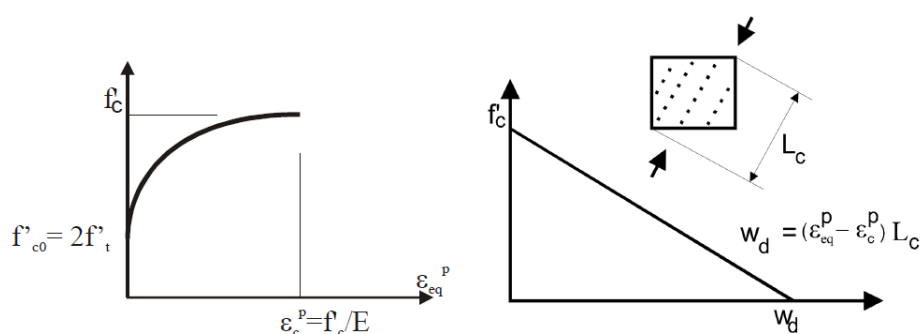
Tablica 5.2. Bitna i primijenjena svojstva reške morta tj. kontakt elementa u ATENA-i 2D v.4.3.

Svojstvo reške morta	Oznaka	Vrijednost	Mjerne jedinice
Početna posmična čvrstoća ziđa	$f_{v0}$	0,35	N/mm <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća ziđa	$f_{xl}$	0,25	N/mm <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja ziđa	$tg\alpha$	0,25	
Poissonov omjer ziđa	$\mu$	0,1	-
Modul elastičnosti ziđa okomito na reške morta	E	3900	N/mm <sup>2</sup>
Deformacija pri slomu ziđa u tlaku	$\epsilon_u$	5,7	mm/m
Debljina reške morta	t	10	mm

## 5.2.2. Model materijala betona i armature i njihove veze

### a) Model materijala za beton

Za model betona, usvojen je tzv. „Fracture-plasticmodel“, (CC3DnonLinCementitious2), kojim se opisuje raspucavanje (engl. fracturing) u vlaku i plastično ponašanje u tlaku. Slično, kao i SBETA model, zasniva se na ortotropnom razmazanom opisu pukotina i jednoosnom odnosu naprezanja i deformacija, osim što je teorija čvrstoće za dvoosno stanje naprezanja drukčija. Plastično tlačno očvršćivanje ili omekšavanje opisano je Menetrey-William-ovom plohom sloma, kao što je prikazano na slici 5.7. Rankine-ova teorija čvrstoće, ekspanzionalno omekšavanje te rotated ili fixed model pukotina omogućeni su u ovom modelu. Usvojen je tzv. rotated model.



**Slika 5.7.** Plastično tlačno očvršćivanje ili omekšavanje u ATENA-i 2D v.4.3.

Od svojstava betona, poznata je bila samo tlačna čvrstoća betonske kocke, dobivena eksperimentalnim putem, te su na temelju iste određene preostale vrijednosti potrebne za proračun. Kako postoje različite čvrstoće betona za beton nadvoja i vertikalnih serklaža u odnosu na beton okvira, u tablici 5.3. su navedena najbitnija svojstva usvojena za beton okvira, dok su u tablici 5.4. navedena ista za vertikalne serklaže i nadvoje.

**Tablica 5.3.** Bitna i primijenjena svojstva betona okvira u ATENA-i 2D v.4.3.

Svojstva modela materijala	Oznaka	Vrijednost	Mjerne jedinice
Tlačna čvrstoća valjka	$f_c$	38,25	N/mm <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća	$f_t$	3,036	N/mm <sup>2</sup>
Poissonov omjer	$\mu$	0,2	-
Modul elastičnosti	$E$	35570	N/mm <sup>2</sup>
Plastična deformacija pri slomu	$\epsilon_u$	1,07	mm/m
Faktor umanjenja tlačne čvrstoće nakon sloma	$r_{c,lim}$	0,20	-
Kritični pomak pri slomu u tlaku	$w_d$	0,5	mm
Jedinična energija sloma	$G_F$	$7,6 \times 10^{-5}$	MN/m
Rotated crack model	-	-	-



**Tablica 5.4.** Bitna i primijenjena svojstva betona nadvoja i vertikalnih serklaža u ATENA-i 2D v.4.3.

Svojstvo reške morta	Oznaka	Vrijednost	Mjerne jedinice
Tlačna čvrstoća valjka	$f_c$	25,50	$N/mm^2$
Vlačna čvrstoća	$f_t$	2,317	$N/mm^2$
Poissonov omjer	$\mu$	0,2	-
Modul elastičnosti	E	30320	$N/mm^2$
Plastična deformacija pri slomu	$\epsilon_u$	0,84	mm/m
Faktor umanjenja tlačne čvrstoće nakon sloma	$r_{c,lim}$	0,20	-
Kritični pomak pri slomu u tlaku	$w_d$	0,5	mm
Jedinična energija sloma	$G_F$	$5,8 \times 10^{-5}$	MN/m
Rotated crack model	-	-	-

#### b) Model materijala za armaturu

Armatura se može modelirati na dva različita načina: diskretnim i razmazanim. U ovome radu, uzdužna i poprečna armatura modelirani su diskretnim načinom. Razmazani pristup prikladniji je za armaturne mreže. ATENA 2D v.4.3 nudi nekoliko vrsta modela ponašanja za materijal armature: bilinearni, multilinearni, itd. Odnos naprezanja i deformacija u čeliku armature u ovome radu opisan je cikličkim nelinearnim modelom Menegotto i Pinto (1973). Ovaj model prikladan je u slučaju cikličkog opterećivanja, što i je u ovom slučaju. On daje bilinearno ponašanje materijala s očvršćivanjem do sloma. Drugi modeli se nisu pokazali prikladnima za proračun, jer su uzrokovali nestabilnost proračuna.

Veza između armature i okolnog betona iz razloga jednostavnosti proračuna i unosa manjeg broja svojstava pretpostavljena je savršenom.

Bitna svojstva armature primijenjena u ovome radu, granica tečenja, modul elastičnosti, granica loma i deformacija pri lomu, navedena su u tablici 5.5. Također je usvojeno svojstvo da je armatura aktivna u tlaku.

**Tablica 5.5.** Bitna i primijenjena svojstva armature okvira, nadvoja i vertikalnih serklaža u ATENA-i 2D v.4.3.

Svojstvo reške morta	Oznaka	Vrijednost	Mjerne jedinice
Granica tečenja	$f_y$	600,0	$N/mm^2$
Vlačna čvrstoća	$f_t$	700,0	$N/mm^2$
Modul elastičnosti	E	210000	$N/mm^2$
Plastična deformacija pri slomu	$\epsilon_{lim}$	100	mm/m
Savršeno prijanjanje s betonom			

### 5.2.3. Pregled odabranih početnih svojstava materijala

U tablici 5.7. dan je pregled usvojenih svojstava za svaki materijal odnosno za teorijski model.

Tablica 5.7. Bitna i primijenjena početna svojstva materijala za model u ATENA-i 2D v.4.3.

Element	Model materijala (konačni element)	Svojstvo materijala	Oznaka	Vrijednost	Mjerne jedinice
Zidni element	CCSbetaMaterial (CCIsoQuad)	Tlačna čvrstoća	$f_b; f_{bh}$	15,9; 2,3	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća	$f_{bt}$	1,59	$N/mm^2$
		Poissonov omjer	$\mu$	0,05	-
		Rotated crack model	-	-	-
Mort	Interface material Model (CCIsoGap)	Početna posmična čvrstoća ziđa	$f_{v0}$	0,35; 0,70	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća ziđa	$f_{xl}$	0,45	$N/mm^2$
		Kut unutarnjeg trenja ziđa	$tg\alpha$	0,25; 0,80	
		Poissonov omjer ziđa	$\mu$	0,1	-
		Modul elastičnosti ziđa okomito na reške morta	$E$	3900	$N/mm^2$
		Deformacija pri slomu ziđa u tlaku	$\epsilon_u$	5,7	mm/m
Beton okvira	CC3DNonLinCementitious2 (CCIsoQuad)	Tlačna čvrstoća valjka	$f_c$	38,25	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća	$f_t$	3,036	$N/mm^2$
		Poissonov omjer	$\mu$	0,2	-
		Modul elastičnosti	$E$	35570	$N/mm^2$
		Plastična deformacija pri slomu	$\epsilon_u$	1,07	mm/m
		Faktor umanjenja tlačne čvrstoće nakon sloma	$r_{c,lim}$	0,20	-
		Kritični pomak pri slomu u tlaku	$w_d$	0,5	mm
		Jedinična energija sloma	$G_F$	$7,6 \times 10^{-5}$	MN/m
		Rotated crack model	-	-	-
Beton nadvoja i vertikalnog serklaža	CC3DNonLinCementitious2 (CCIsoQuad)	Tlačna čvrstoća valjka	$f_c$	25,50	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća	$f_t$	2,317	$N/mm^2$
		Poissonov omjer	$\mu$	0,2	-
		Modul elastičnosti	$E$	30320	$N/mm^2$
		Plastična deformacija pri slomu	$\epsilon_u$	0,84	mm/m
		Faktor umanjenja tlačne čvrstoće nakon sloma	$r_{c,lim}$	0,20	-
		Kritični pomak pri slomu u tlaku	$w_d$	0,5	mm
		Jedinična energija sloma	$G_F$	$5,8 \times 10^{-5}$	MN/m
		Rotated crack model	-	-	-
Armatura	Cyclic reinforcement (CCIsoTruss)	Granica tečenja	$f_y$	600,0	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća	$f_t$	700,0	$N/mm^2$
		Modul elastičnosti	$E$	210000	$N/mm^2$
		Plastična deformacija pri slomu	$\epsilon_{lim}$	100	mm/m

## 5.2.4. Primijenjeni konačni elementi

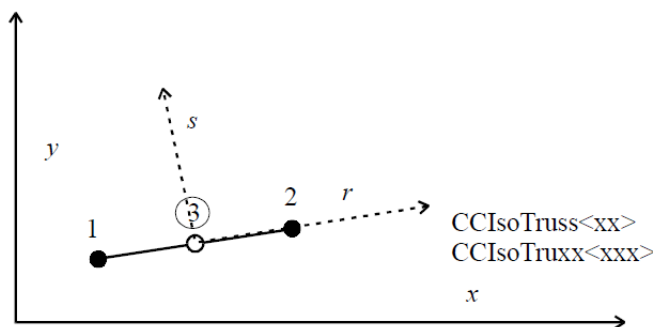
Nakon što su usvojeni modeli ponašanja materijala od kojih su izvedeni konstruktivni elementi, potrebno je pridružiti im pripadne konačne elemente (tablica 5.7.) koji će najbolje opisati njihove konstruktivne osobine. U ovom radu pristupilo se izradi 2D modela, stoga nema volumenskih konačnih elemenata, već linijski konačni elementi za šipke armature i kontaktne elemente te plošni elementi. Model je izveden u skladu s mjerilom M 1:2,5.

U računalnom programu ATENA 2D v.4.3 odabrani su sljedeći konačni elementi, počevši s najjednostavnijima:

### a) Modeliranje šipki armature

Za modeliranje diskretnih šipki uzdužne i poprečne armature na modelu, Primijenjeni su 2D Truss konačni elementi (slika 5.8.). To su izoparametarski konačni elementi s kvadratnom funkcijom oblika. Ovi elementi nemaju savojnu krutost, već isključivo krutost u uzdužnom smjeru. Kada se primjenjuju na modelu potrebno im je navesti ploštinu šipki armature i materijal.

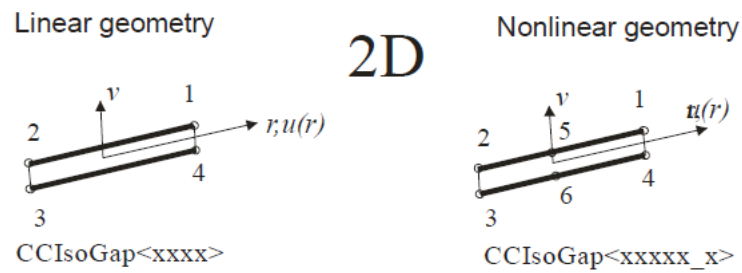
Šipke armature se modeliraju kao diskretne putem koordinata. Kada su omeđene betonom njihovu vezu program odmah prepoznaje i pridaje joj svojstva u skladu s odabranom vezom armature i betona, koja je u ovom slučaju savršena.



Slika 5.8. CCISOTruss konačni element u ATENA-i 2D v.4.3.

### b) Modeliranje kontakta zidnih elemenata i morta

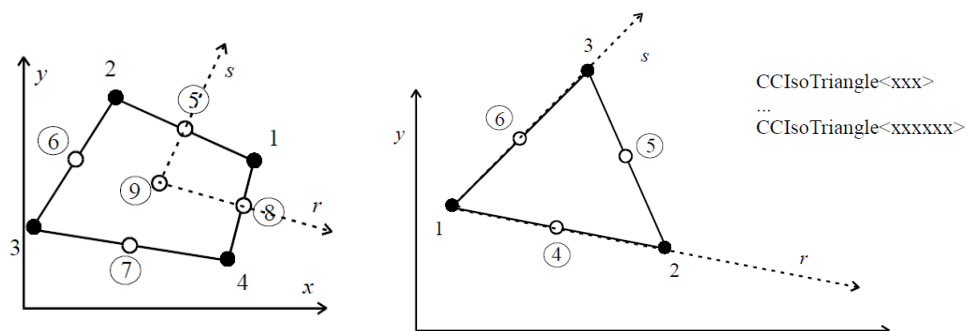
Kako bi se modelirao kontakt između zidnih elemenata, koji je predstavljen putem tzv. „Interface material modela“, primjenjuju se tzv. GAP elementi, u ovom slučaju CCISOGap iz računalnog programa ATENA 2D v.4.3, izvedeni iz izoparametarskih elemenata. Prikazani su na slici 5.9. Sastoje se od dvije linije, smještene na suprotnim stranama kontakta. U početnom stanju ove linije su spojene ili s malim razmakom. Kada nastane razmak (engl. Gap), više ne postoji njihovo međudjelovanje, no naime kada se ponovno spoje, prijenos naprezanja putem trenja je opet moguć.



Slika 5.9. CCIsoGap elementi u ATENA-i 2D v.4.3.

c) Modeliranje okvira, nadvoja, vertikalnih serklaža i zidnih elemenata

Plošni konačni elementi usvojeni za dani model su izoparametarski četverostrani konačni elementi s devet čvorova i bi-kvadratnom funkcijom oblika. U računalnom programu ATENA 2D v.4.3, označeni su s CCIsoQuad. Osim četverostranih primijenjeni su i trostrani plošni konačni elementi, CCIsoTriangle, zbog geometrijskih razloga, tj. pravilnije mreže konačnih elemenata. Slika 5.10. prikazuje navedene elemente.



Slika 5.10. CCIsoQuad elementi u ATENA-i 2D v.4.3.

### 5.2.5. Mreža konačnih elemenata

U skladu s izmjerama elemenata ispitnog uzorka, kako bi konačni element zadržao približno kvadratni oblik, odabrana je duljina i visina konačnog elementa  $L_{(e)}/H_{(e)}=0,05/0,05$  m. U skladu s (86), pri modeliranju zidnih ispuna, konačni element bi najmanje trebao biti veličine zidnog elementa. U ovom slučaju zidni element je sačinjen od osam konačnih elemenata. Duljine konačnih linijskih elemenata prilagođene su ravninskim.

Ovime je također stup okvira po visini poprečnog presjeka podijeljen na četiri elementa, što s obzirom da se primjenjuju konačni elementi s devet čvorova čini optimalan izbor, zbog savijanja u stupovima i linearne raspodjele naprezanja te također s izmjerama duljina prvih pukotina na stupu okvira.

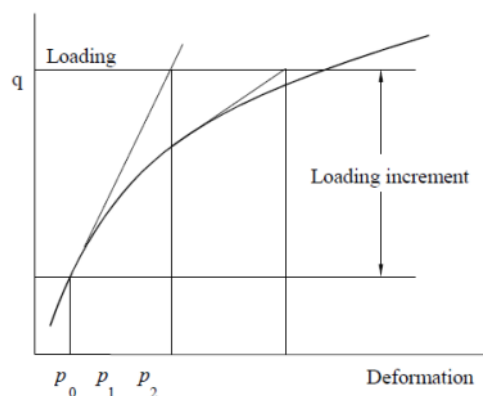
Rješenja uvelike ovise o gustoći mreže konačnih elemenata, ali također i trajanje proračuna. Većom gustoćom mreže postizemo veću točnost, ali produljujemo vrijeme proračuna. Parcijalnom diskretizacijom, proglašujemo mrežu samo na ključnim mjestima, dok na onima na kojima je polje pomaka stalnije, mrežu ostavimo rjeđom. Naime, ukoliko nismo sigurno ili ne možemo točno pretpostaviti koja su mjesta konstrukcije sigurna, ovim pristupom si činimo modeliranje složenijim.

### 5.2.6. Odabir pristupa rješavanju nelinearnih jednadžbi

Svojstva ispitnog uzorka i zamjenskog proračunskog modela ovise o povijesti opterećivanja iste. Odabrana metoda rješavanja nelinearnih jednadžba, tj. odabrani pristup za dobivanje iterativnog rješenja je **Newton-Raphson metoda**, jer su **ispitivanja provedena s kontrolom sile**. Razlike među metodama, u skladu s (50), su:

#### a) Newton-Raphson metoda

Newton-Raphson metoda je inkrementalni koncept rješavanja, na principu proračuna pomaka uslijed poznatog opterećenja posredstvom tangencijalne matrice krutosti. Bitna svojstva proračuna su da se kontrolira sila kao i u eksperimentu te je stoga razina opterećenja poznata i algoritam iterativno traži stanje ravnoteže za točno ovu razinu opterećenja. Ukoliko krivulja odnosa opterećenja i pomaka postigne maksimum (slika 5.11.), te je tražena razina opterećenja poslije njega, u njegovoj okolini nije moguće pronaći stanje ravnoteže te proračun otkazuje. Algoritam posjeduje kvadratnu konvergenciju.

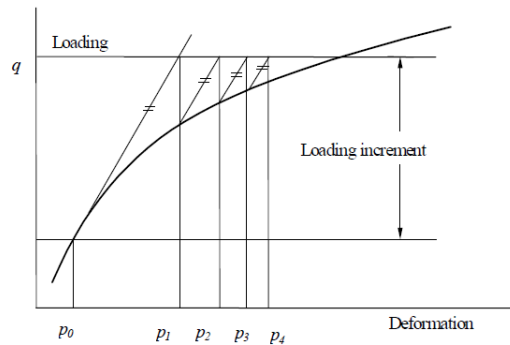


Slika 5.11. Standardna Newton-Raphson metoda

#### b) Preinačena Newton-Raphson metoda

Standardna Newton-Raphson metoda sa svakom novom iteracijom proračunava nanovo tangencijalnu matricu krutosti te je rješenje za stanje koje nije stanje ravnoteže izgubljeno.

Putem preinačene metode, proračunata matrica krutosti na početku ostaje jednaka svaku narednu iteraciju, te se određuje pripadni pomak sve do stanja ravnoteže, jer teorijski nije važno kakav iterativni put do rješenja treba već da je ono postignuto. Problem je što se gubi kvadratna konvergencija te je pri dostizanju razina opterećenja pri blažem nagibu krivulje potreban sve veći broj iteracija (slika 5.12.).

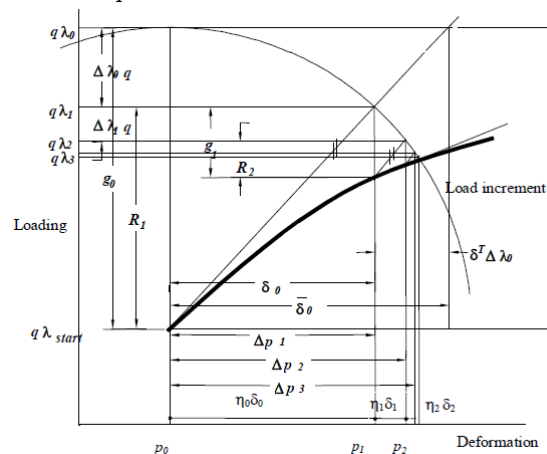


Slika 5.12. Preinačena Newton-Raphson metoda

### c) Arc-Length metoda

Newton-Raphson metoda ima jednu prednost, ali dva nedostatka. Prednost je ta da je moguće proračunati odgovor konstrukcije za točno određenu razinu opterećenja. Slabosti metode su da je u potpunosti s kontrolom sile te stoga nije moguće prevladati ekstreme te biti određen kod krivulja kod kojih se pojavljuje tečenje.

Pomoću Arc-Length metode ovaj je problem riješen. Proračun počinje linearnim prediktorom, koji je jednak kao u Newton-Raphson metodi, ali koji ne iterira horizontalno, već po luku, stoga se opterećenje i pomak mijenjaju s iteracijama. To za posljedicu ima gubitak kontrole opterećenja te stoga više nije moguće za točno određeno opterećenje naći pomake i unutarnje sile., ali je moguće nositi se s nepravilnim krivuljama i prevladati ekstreme (slika 5.13.). Ova metoda se najviše primjenjuje za probleme stabilnosti.



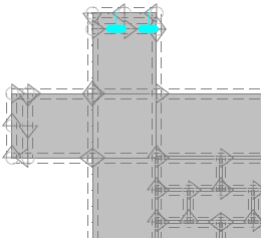
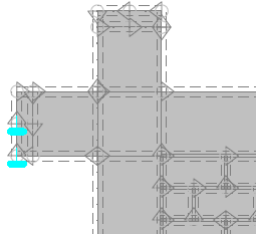
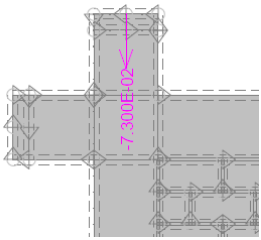
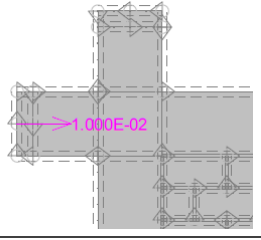
Slika 5.13. Arc-Length metoda

## 5.2.7. Modeliranje rubnih uvjeta na numeričkom modelu

### a) Rubni uvjeti za pomake i sile

Rubni uvjeti modelirani su sukladno eksperimentalnim ispitivanjima, što je detaljno objašnjeno u poglavlju 2.0. Tablica 5.8. prikazuje rubne uvjete primijenjene na proračunskom modelu. U skladu s poglavljem 2.0., modeliran je horizontalni pomično-upeti oslonac na vrhu stupa te je zbog utjecaja koncentrirane sile na modelu dodana čelična pločica debljine 5 cm ispod točke unosa sile.

**Tablica 5.8.** Rubni uvjeti za pomake i sile u ATENA-i 2D v.4.3.

Redni broj rubnog uvjeta	Opis rubnog uvjeta	Smještaj rubnog uvjeta	Prikaz rubnog uvjeta
1.	Nepomični linijski oslonac u x- i y- smjeru	Dno temeljne grede	-
2.	Pomično-upeti linijski oslonac u x-smjeru	Vrhovi stupova tj. na čeličnim pločicama	
3.	Pomično-upeti linijski oslonac u x-smjeru	Lijevi kraj grede tj. na čeličnoj pločici	
4.	Pomično-upeti linijski oslonac u x-smjeru	Desni kraj grede tj. na čeličnoj pločici	-
5.	Koncentrirana sila u y-smjeru	Vrhovi stupova tj. na čeličnim pločicama	
6.	Koncentrirana sila u x-smjeru	Lijevi kraj grede tj. na čeličnoj pločici	
7.	Koncentrirana sila u x-smjeru	Desni kraj grede tj. na čeličnoj pločici	-



## b) Redosljed primjene rubnih uvjeta

Prvo se koncentrirana sila u y-smjeru (vertikalna stalna sila) nanosi na vrhove stupa preko čelične pločice, u pet koraka do pune vrijednosti (rubni uvjet broj 5), dok je istovremeno aktivan nepomičan linijski oslonac na dnu temeljne grede (1). Dakle, rubni uvjeti (1) i (5) aktivni su prvih pet koraka proračuna.

Nakon toga, zamjenjuje se rubni uvjet (5) s rubnim uvjetom (2), tj. pomičnim osloncem u x-smjeru, u svrhu održanja vrijednosti sile te osiguranja eksperimentalnih uvjeta. Na ovaj način ispunjen je uvjet stalne vertikalne sile i pomičnog oslonca na vertikalnom modelu. Istovremeno se aktivira koncentrirana sila u x-smjeru s lijeva (horizontalna sila) što je rubni uvjet broj (6) te pripadni pomični linijski oslonac u x-smjeru (3). Ova sila se nanosi u inkrementima  $\Delta F_H=10,0$  kN do željene vrijednosti nakon čega joj se zadaje suprotan predznak dok njena vrijednost ne dođe nazad u nulu.

Kada povratna krivulja dođe do razine opterećenja vrijednosti nula, započinje nanošenje opterećenja na isti način, ali na drugom kraju grede. Nanošenje opterećenja jednako je obostrano kao i pri eksperimentalnom ispitivanju.

### 5.2.8. Osvrt na primijenjeni numerički model

Pri modeliranju su jednako važni svi koraci, počevši s odabirom teorijskog modela materijala, pa sve do odabira prikladnih rubnih uvjeta. Mikro modeliranje primjenom metode konačnih elemenata pruža velike mogućnosti u prikazu ponašanja armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom. Omogućava zasebno modeliranje reški morta i zidnih elemenata te daje jasan uvid u način sloma, raspodjelu pukotina i naprezanja, ukratko vrlo detaljan opis stvarnog stanja. Zbog toga, pri unosu podataka je zahtijevan vrlo veliki broj parametara za model materijala. Oni su ili dobiveni ispitivanjima ili zbog složenosti eksperimenata proračunati putem preporučenih empirijskih izraza. U svakom slučaju nije uvijek moguće imati na raspolaganju sve eksperimentalne podatke. Osim toga jednostavna ispitivanja često ne udovoljavaju u potpunosti stvarnim uvjetima u konstrukciji te je stoga uvijek potrebna kalibracija numeričkog i fizikalnog modela.

Razlika u odgovoru između fizikalnog i numeričkog modela također proizlazi iz idealizacije numeričkog modela. Bez obzira na stupanj njegove složenosti, numerički model uvijek podliježe određenim pretpostavkama. Svrha modeliranja jest da sa što manjim i jednostavnijim modelom prikaže što vjernije stanje fizikalnog modela. Primjer za to je modeliranje zidanog ispuna. Nedostatak ispitivanja vodi nas također k tome. Primjer pojednostavljenja modela također je modeliranje ležajnih i sudarnih reški morta jednakim parametrima.

Kao što je pojašnjeno ranije, kalibracija odabranog pojednostavljenog diskretnog modela je nužnost zbog: nedostatka eksperimentalnih podataka za sve tražene parametre, idealizacija modela materijala, pojednostavljenje numeričkog modela, odabrane razine modeliranja, itd. Općenito, odabrani 2D model prikladan je iz razloga što je uzorak opterećivan u svojoj ravni, u kojoj je bio i odgovor zidanog ispuna. Pri numeričkom modeliranju u ovom slučaju, ležajne i sudarne reške morta u kontaktu sa zidnim elementima na modelu su jednakih materijalnih svojstava. Tlačna čvrstoća ovih dvaju reški je jednaka, no naime početna posmična čvrstoća i kut unutarnjeg trenja nisu, zbog šupljina zidnog elementa. Kao osnovna, usvojena su svojstva ležajnih reški morta, jer su za ovaj slučaj važnija. Vlačna čvrstoća prionjivosti zidnog elementa i reške morta nije eksperimentalno određena te je pronađena putem kalibracije.

Glineni zidni elementi s vertikalnim šupljinama, koji su iz tog razloga ortotropnih svojstava, modelirani su kao puni s pripisanim materijalnim svojstvima u vertikalnom smjeru (tlačna i vlačna čvrstoća, Poissonov omjer, itd.) koja su preuzeta da vrijede za cijeli zidni element u svim smjerovima, do pojave pukotine. Svojstva materijala zidnog elementa i njega samog kako je navedeno nisu jednaka, jer sadržava šupljine. Modeliranje ortotropnog elementa na odabranoj razini modeliranja nije moguće, stoga je kao mjerodavan odabran vertikalni smjer, iz praktičnih razloga. Vlačna čvrstoća odabrana je kao 1/10 tlačne čvrstoće. Šipke armature su modelirane s osnim razmacima, kao linijski elementi kojima debljina nije modelirana izravno. Prionjivost armature i betona je usvojena kao savršena.

Svrha kalibracije bila je prije svega uskladiti načine sloma numeričkog i fizikalnog modela, zatim nosivost, krutost i histerezo ponašanje. Pojednostavljenje modeliranja šupljih zidnih elemenata kao punih ostaviti će trag na ponašanje numeričkih modela u odnosu na fizikalne. Uslijed veće čvrstoće, jer je usvojena veća tj. vertikalna čvrstoća, materijal će se prije pomaknuti nego zdrobiti unutar sebe, kao što je to većinom bio slučaj u eksperimentima. Tlačna čvrstoća u horizontalnom smjeru zidnih elemenata bila je približno 1/5 iste u vertikalnom. To je bitno kod uzoraka bez izvedbe vertikalnih serklaža oko otvora, kod kojih je uslijed sloma horizontalne reške morta u ravnini gornjeg i donjeg ruba otvora nastao zidni stup. Iz tog razloga za kalibraciju je odabran uzorak s punim ispunom, jer je u tom slučaju čvrstoća zidnog elementa u horizontalnom smjeru (usvojena vertikalna) ipak trostruko manja od iste od stupa armirano-betonskog okvira.

**Spomenuti nedostatak proračunskog modela odraziti će se na to, da će numerički modeli uzoraka s otvorima zapravo predstavljati pune zidne elemente te će stoga biti podložniji horizontalnom slomu po reškama morta, koji bi se u protivnome vjerojatno dogodio s kasnije, jer bi gubitkom tlačne čvrstoće u horizontalnom smjeru nastupilo i drobljenje zidnih elemenata.**

### 5.3. Usklađivanje numeričkog i fizikalnog modela

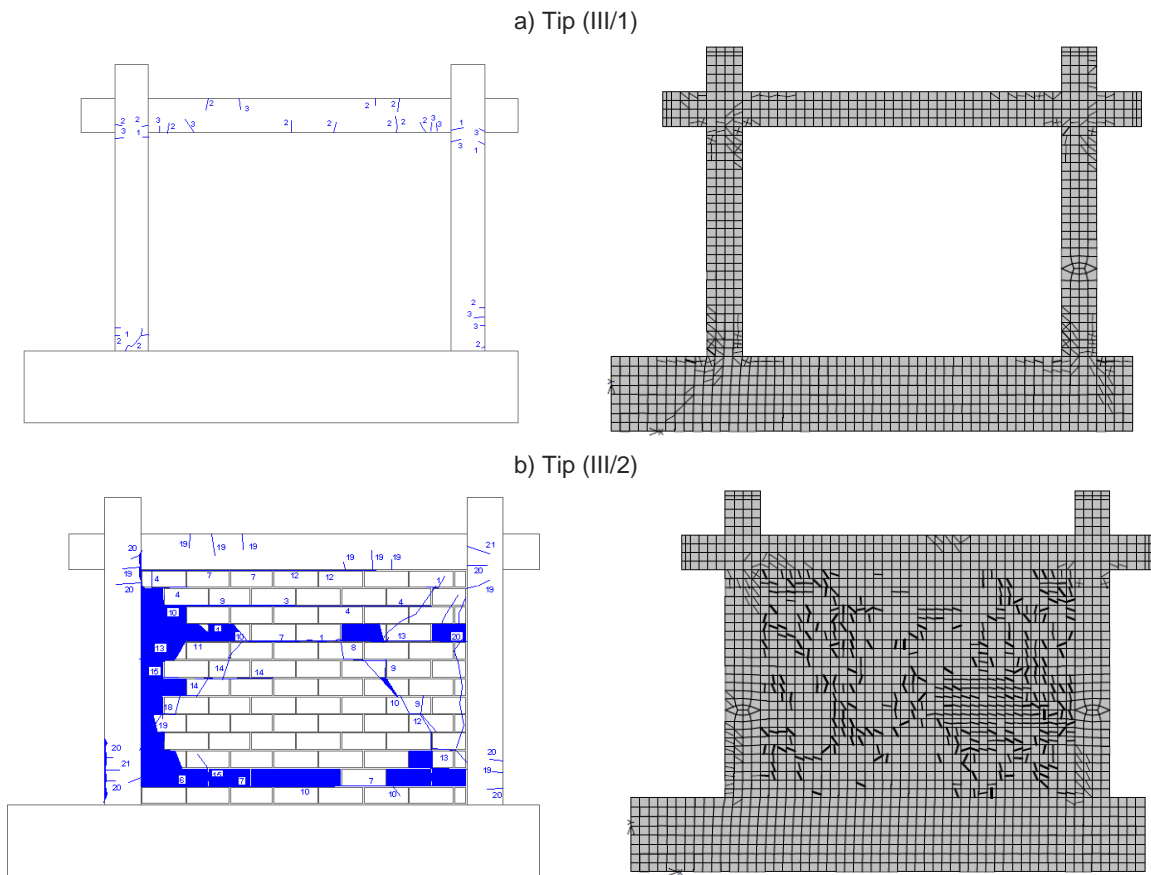
#### 5.3.1. Uvod

Pri numeričkom modeliranju prihvaćena su svojstva materijala poznata iz ispitivanja, opisana u poglavlju 2.0. i preporuke iz literature, pošto se sva svojstva nisu mogla utvrditi eksperimentima. Iz tog razloga numerički je model bilo nužno kalibrirati. Također i iz razloga, jer postoje određene nesigurnosti pri ispitivanjima i izvedbi fizikalnih modela. U skladu s tim uspoređeni su: način sloma, pukotinsko stanje, krutost, histerezna energija i nosivost numeričkog modela u usporedbi s rezultatima ispitivanja uzoraka opisanih u poglavljima 3.0. i 4.0. Kako bi se pojednostavila kalibracija armirano-betonskog okvira sa zidanim ispunom, prvo je kalibriran MKE model armirano-betonskog okvira, a zatim isti s punim zidanim ispunom.

#### 5.3.2. Uzorci grupe III

a) Fizikalni i numerički model tip (III/1): armirano-betonski okvir

Slika 5.14.a prikazuje usporedbu oštećenja pri katnom pomaku fizikalnog i numeričkog modela tip (III/1).



Slika 5.14. Pukotinsko stanje pred slom rezultata fizikalnih (lijevo) i numeričkih modela (desno):

a) tip (III/1) i b) tip (III/2)

### a-1) Usporedba pukotinskog stanja

Posmični slom na armirano-betonskim stupovima tijekom ispitivanja i proračuna nije uočen što potvrđuje prikladnost odabranog teorijskog modela materijala za beton. Dodatno, usporedbom pukotinskog stanja numeričkog i fizikalnog modela na slici 5.14., pri kranjem katnom pomaku, utvrđena je velika sličnost, uz neznatne razlike u pukotinama u sredini raspona gornje grede, a koje su nastale uslijed savijanja. Na prikazu fizikalnog modela izuzete su pukotine na temeljnoj gredi. Najveća koncentracija pukotina je pri dnu i vrhu stupa (pri dnu spoja s gredom).

### a-2) Usporedba nosivosti

Vrijednosti horizontalnih sila pri odabranim razinama oštećenja fizikalnog i numeričkog modela prikazane u tablici 5.9. Najveće su se razlike dogodile pri negativnim ciklusima, gdje razlika u nosivosti pri katnom pomaku  $IDR=0,10\%$  iznosi 55% i pri  $IDR=0,20\%$  iznosi 35%. Pozitivna strana pokazuje neznatne razlike. Iz usporedbe primarnih krivulja, može se zaključiti da je nosivost armirano-betonskog okvira bez zidanog ispuna prikladno je opisana numeričkim modelom, uzevši u obzir moguće nesigurnosti pri izvedbi fizikalnog modela.

**Tablica 5.9.** Nosivost  $F_H$  (kN) pri odabranim katnim pomacima  $IDR$  (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima tip (III/1) i tip (III/2)

Uzorak	IDR (%)	Pozitivna strana			Negativna strana		
		Eksperiment	ATENA	Razlika (%)	Eksperiment	ATENA	Razlika (%)
Tip (III/1)	0,10	61	50	8	-80	-60	15
	0,20	99	100	-11	-139	-90	25
	0,50	161	160	-9	-153	-160	-15
	1,00	174	190	-19	-169	-	-
Tip (III/2)	0,10	227	200	2	-200	-200	-10
	0,20	267	260	-7	-282	-230	8
	0,50	245	260	-16	-250	-	-
	1,00	258	270	-15	-252	-	-

### a-3) Usporedba krutosti

Vrijednosti krutosti pri odabranim razinama oštećenja fizikalnog i numeričkog modela prikazane u tablici 5.10. Početna krutost pri negativnim ciklusima se razlikuje od iste na pozitivnim ciklusima, ali razlika nestaje pri ostalim odabranim razinama oštećenja. Razlog tome je nesimetrična pojava vlačnih pukotina uslijed savijanja na stupu na fizikalnom modelu, dok je simetrična na numeričkom modelu, što je moguća posljedica popravka armirano-betonskih okvira.

**Tablica 5.10.** Krutost K (kN/mm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima tip (III/1) i tip (III/2)

Uzorak	IDR (%)	Pozitivna strana			Negativna strana		
		Eksperiment	ATENA	Razlika (%)	Eksperiment	ATENA	Razlika (%)
Tip (III/1)	0,10	45	39	3	-60	-39	25
	0,20	34	33	-7	-48	-36	15
	0,50	22	23	-15	-22	-22	-10
	1,00	12	14	-27	-16	-	-
Tip (III/2)	0,10	151	147	-7	-151	-151	-10
	0,20	94	83	2	-94	-84	1
	0,50	35	54	-64	-36	-	--
	1,00	18	12	23	-17	-	-

#### a-4) Usporedba histerezne energije

Vrijednosti histerezna energije pri odabranim razinama oštećenja fizikalnog i numeričkog modela prikazane u tablici 5.11. Histerezna energija je dobivena kao suma ploština koju zatvaraju pojedinačne histerezne petlje ciklusa horizontalnog opterećivanja pri stalnom vertikalnom opterećenju do promatranog katnog pomaka. Histerezna energija na numeričkom i fizikalnom (eksperimentalnom) modelu na pozitivnoj strani je gotovo jednaka te se smatra da ju je numerički model uspješno opisao. Na negativnoj strani postoje odstupanja. Razlike u histereznoj energiji fizikalnog i numeričkog modela posljedica su pretpostavki kao što je potpuna veza između betona i armature. Osim toga 2D numerički model nije u stanju predvidjeti sva moguća oštećenja nastala na fizikalnom modelu, a koja utječu na histereznu energiju. Uzevši u obzir i nesigurnosti pri izvedbi fizikalnih modela, numerički model se smatra prikladnim.

**Tablica 5.11.** Ukupna histerezna energija E (kNm), pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima tip (III/1) i tip (III/2)

Uzorak	IDR (%)	Pozitivna strana			Negativna strana		
		Eksperiment	ATENA	Razlika (%)	Eksperiment	ATENA	Razlika (%)
Tip (III/1)	0,10	66	52	11	164	64	61
	0,20	339	261	13	1111	296	73
	0,50	1870	1258	23	3224	1838	43
	1,00	4269	4659	-19	4994	3844	23
Tip (III/2)	0,10	1347	1151	5	1413	1093	23
	0,20	3602	3446	-6	4407	4514	-2
	0,50	7712	6226	9	11043	4859	56
	1,00	9498	9739	-32	12809	11600	9

Početna svojstva materijala usvojena za numerički model armirano-betonskog okvira, navedena u tablici 5.7., smatraju se prikladnima za daljnji nastavak proračuna, kojima je cilj uskladiti ponašanje armirano-betonskog okvira sa zidanim ispunom. Svojstva materijala, usvojena za teorijske modele materijala su zadržana, usprkos razlikama pri negativnim ciklusima pri nižim katnim pomacima. Ovime je završeno usklađivanje numeričkog modela armirano-betonskog okvira s rezultatima ispitivanja.

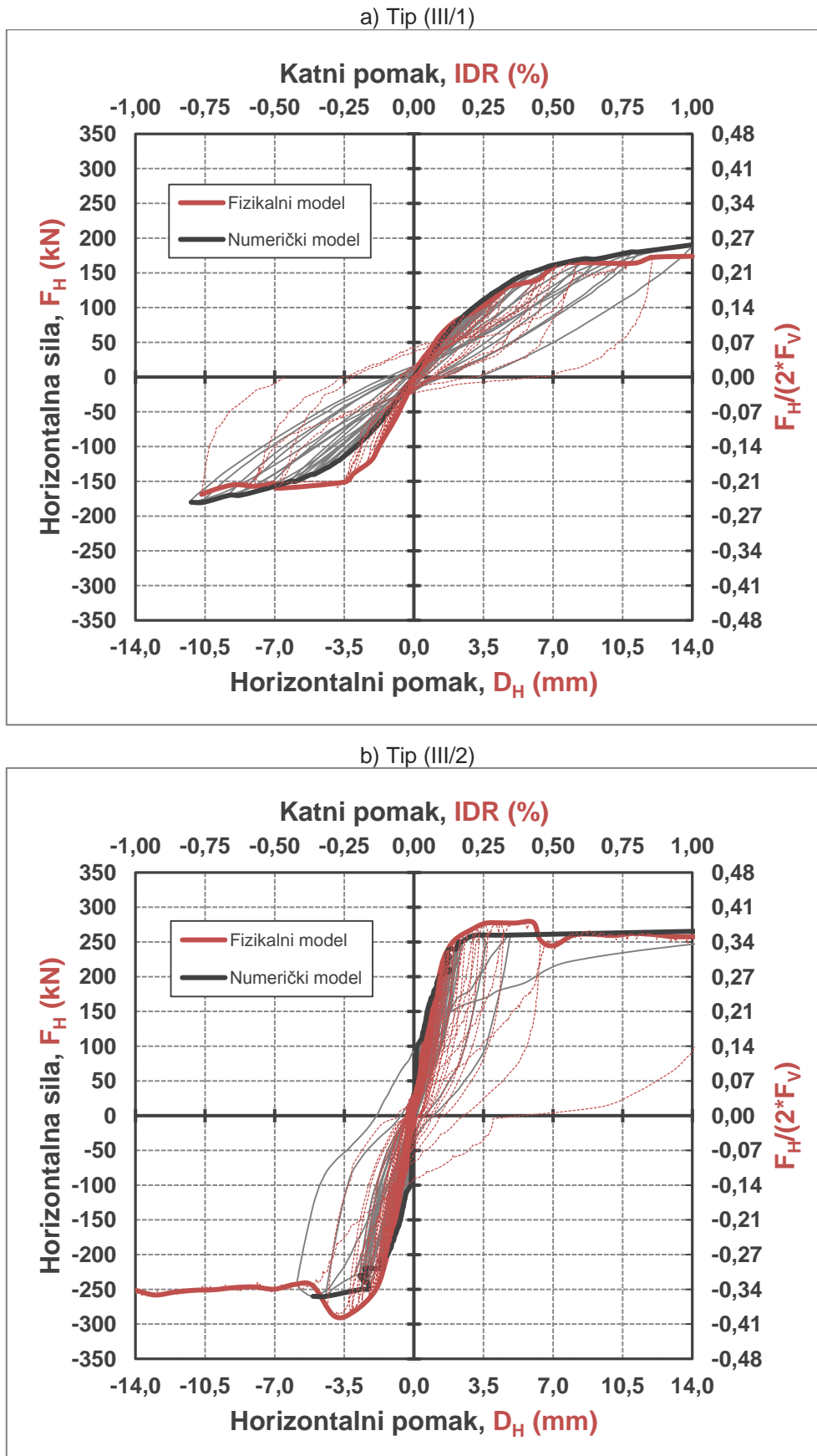
b) Uzorak tip (III/2): armirano-betonski okvir sa zidanim ispunom

Na slici 5.14.b dan je prikaz oštećenja pri krajnjem katnom pomaku, a na slici 5.15.b dana je usporedba histereznih i pripadnih primarnih krivulja, za fizikalni i numerički model. Kako bi se što vjerodostojnije predstavio fizikalni model, kao što je navedeno, posebno su modelirani zidni elementi. Kako je riječ o pojednostavljenom modeliranju reške morta putem svojstava kontakta zidnih elemenata i morta. Numerički model armirano-betonskog okvira prethodno je već kalibriran. Prema eksperimentalnim opažanjima, parametri kontakta zidnih elemenata i reški morta su vrlo osjetljivi na udio morta koji se upustio u šupljine bloka. Ti parametri su početna posmična čvrstoća i kut unutarnjeg trenja ziđa. Vrlo je velika pažnja posvećena stoga modeliranju tj. odabiru ovih dvaju parametara. Početna svojstva dana su u tablici 5.7., no naime kako njihovim primjenom rezultati nisu bili zadovoljavajući, tj. nosivost je bila puno slabija od očekivane, odabrani su oni koji se poklapaju s rezultatima kada je mort bio upušten. Rezultati dobiveni eksperimentalnim putem za mort koji se uklještio u šupljine blokova, s većim vrijednostima ovih dvaju parametara, pokazali su se vjernijima za opis ponašanja.

Od ostalih parametara, vlačna čvrstoća kontakta, koja je usvojena putem preporuka iz literature (44), pokazala se prihvatljivom. Krutosti kontaktnih elemenata (normalna i posmična) određene su putem modula elastičnosti i Poissonovog omjera ziđa te su kao takve i prihvaćene, kao što je to preporučeno u (26). U svakom slučaju određivanje početnih parametara pri modeliranju zidanog ispuna zahtijeva eksperimentalne podatke i preporuke iz literature. Ovdje je težnja bila ka tome da se odabir svojstava materijala može poduprijeti konkretnim eksperimentalnim dokazima ili numeričkim izrazima.

Tablica 5.12. Odabrana bitna svojstva modela materijala zidnog elementa

Svojstvo zidnog elementa	Oznaka	Vrijednost	Mjerne jedinice
Tlačna čvrstoća u vertikalnom smjeru	$f_b$	15,9	N/mm <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća	$f_{bt}$	1,59	N/mm <sup>2</sup>
Poissonov omjer	$\mu$	0,05	-
Rotated crack model	-	-	-



Slika 5.15. Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) tip (III/1) i b) tip (III/2)



#### b-1) Način sloma i pukotinsko stanje pred slom zidanog ispuna

Prema slici 5.14., pukotinsko stanje pred slom na proračunskom modelu pokazuje podudarnost s istim fizikalnim modelom. Pukotinsko stanje karakteriziraju dijagonalne vlačne pukotine, klizanje po reškama morta i drobljenje ispuna uz stup okvira. Drobljenje ispuna uz stup okvira više je naglašeno na lijevoj strani fizikalnog, dok je na numeričkom modelu to desna strana zidanog ispuna. Smjer i raspodjela dijagonalnih vlačnih pukotina su jednakih smjerova, tj. od uglova ka sredini. Pukotine na okviru su posljedica savijanja u oba slučaja.

Način sloma prevladava klizanjem po reškama morta u srednjoj trećini ispuna, prema kojima se kreću višestruke dijagonalne pukotine kroz zidne elemente. To je u suglasnosti sa eksperimentalnim rezultatima.

#### b-3) Nosivost, $F_H$ (kN)

Usporedbom primarnih krivulja na slici 5.15. te prema podacima danim u tablici 5.9., usporedno na fizikalnom i numeričkom modelu, utvrđeno je da su razlike između vrijednosti horizontalne sile za odabrane katne pomake neznatne, iako na numeričkom modelu ne postoji dodatni ciklus koji bi dopunio nedostajući dio krivulje na negativnoj strani.

#### b-3) Krutost, $K$ (kN/mm)

Krutost je prikazana u tablici 5.10., usporedno za fizikalni i numerički model za odabrane katne pomake. Jednako kao i za nosivost, uz neznatna odstupanja, krutosti numeričkog i fizikalnog modela za odabrane katne pomake su vrlo slične te je u tom pogledu numerički model također dobro opisao stvarni.

#### b-4) Histerezna energija, $E$ (kNmm)

Usporedba vrijednosti histerezna energije na fizikalnom i numeričkom modelu prikazana je u tablici 5.11. Razlika u ukupnoj histereznoj energiji prihvaćena je kao zadovoljavajuća, obzirom da proračunom uslijed numeričke nestabilnosti, nije obuhvaćen još jedan ciklus.

S obzirom na opisanu podudarnost između načina sloma fizikalnog i numeričkog modela, neznatne razlike u nosivosti, krutosti i histereznoj energiji, početna svojstva modela ponašanja materijala zadovoljavaju tražene vrijednosti, tj. nije potrebna njihova daljnja kalibracija. Neznatne razlike potječu pojednostavljenja modela npr. razmatranje veze između betona i armature potpunom. Usvojene vrijednosti su za početnu posmičnu čvrstoću,  $f_{vk0}=0,70 \text{ N/mm}^2$  i  $\text{tg}\alpha=0,80$  za kut unutarnjeg za trenja. Kao što je ranije spomenuto povećanje početne posmične čvrstoće uzrokovano je uklještenjem morta u šupljine glinenog

bloka, čime je dobivena veća otpornost ka klizanju. Usvojena vlačna čvrstoća kontakta reške morta  $f_{xl}=0,45 \text{ N/mm}^2$  u skladu je s preporukama iz literature (44) za šuplje glinene blokove s približno 50% šupljina, dakle približno kao kod u ovom radu usvojenog zidnog elementa.

Kako vrijednosti navedene literaturi nisu egzaktna, već je dan raspon vrijednosti, ovdje je usvojena srednja vrijednost vlačne čvrstoće za kontaktni element. Prilikom proračuna od velikog su značaja bile vrijednosti: početne posmične čvrstoće, kuta unutarnjeg trenja te tlačne čvrstoće zidnog elementa.

Zidni element uslijed ograničenja računalnog programa modeliran je kao tzv. „smeared-crack“. Problem je nastao pri odabiru tlačnu čvrstoću, jer je zidni element ortotropan, a model ponašanja materijala pretpostavlja da je riječ o kvazi-krtom homogenom materijalu. Kako smjer glavnih tlačnih naprezanja nije poznat unaprijed, nije jednostavno odabrati tlačnu čvrstoću zidnog elementa. U ovom radu probno je proveden proračun s usvojenom horizontalnom čvrstoćom zidnog elementa za cijeli element, a zatim s vertikalnom. Rezultati za pukotinsko stanje sa sedam puta manjom horizontalnom tlačnom  $f_{bh}=2,30 \text{ N/mm}^2$  i pripadnom deset puta manjom vlačnom čvrstoćom  $f_{bht}=0,23 \text{ N/mm}^2$  (u skladu s (44)), pokazali su bolju sliku pukotina uz sami stup, uslijed drobljenja zidnih elemenata, što se pokazalo kao prednost, no naime s druge strane njihova primjena rezultirala je manjom nosivošću i preranim drobljenjem u drugim dijelovima ispuna te što se pokazalo kao bitan nedostatak, jer je uzrokovalo manju nosivost i krutost numeričkog modela.

Zidni elementi s vertikalnom tlačnom  $f_b=15,9 \text{ N/mm}^2$  i pripadnom deset puta manjom vlačnom čvrstoćom  $f_{bt}=1,59 \text{ N/mm}^2$ , već u samom početku su poželjniji odabir, iz praktičnih razloga. Ova čvrstoća prikladnija je za projektante, jer je podatak o vertikalnoj čvrstoći obvezni dio dokumentacije koja prati svaki zidni element. U ovom slučaju nosivost, krutost, histerezna energija, način sloma i pukotinsko stanje bili su u skladu s prethodnim opisom. Naime, nedostatak je bio u tome što nije bilo intenzivnog drobljenja uz visinu stupa, već su nastajale samo višestruke tanke pukotine. Uzevši nedostatke u obzir, bolji rezultat dala je vertikalna tlačna čvrstoća zidnog elementa. Ovo će kasnije pokazati nedostatke kod modela s otvorima bez vertikalnih serklaža, kod kojih će zidni element imati veću snagu u horizontalnom smjeru nego što ju je on stvarno imao, te će stoga numerički model kao posljedicu pokazati brži slom iz razloga što će se zidni elementi prije pomicati nego drobiti, što kod punog (neoslabiljenog ispuna) ne dolazi do izražaja na taj način.

U tablici 5.12. navedena su bitna odabrana svojstva numeričkog modela materijala za zidne elemente.

U tablici 5.13. navedene su prednosti i posljedice nužnog odabira jedne vrste čvrstoće kao reprezentativne, a ne druge i obrnuto, dobivene provjerom putem numeričkog modela. S obzirom da zidani ispun s „homogenim“ zidnim elementima s vertikalnom čvrstoćom za oba smjera, ipak zadovoljava kriterije potrebne za puni zidani ispun, može se smatrati da i modeli s otvorom pokazuju dobru podudarnost u slučaju punog zidnog elementa.

**Tablica 5.13.** Prednosti i nedostaci odabira tlačne čvrstoće zidnog elementa kao reprezentativne vrijednosti za čitav element

Horizontalna tlačna čvrstoća zidnog elementa $f_{bh}$ (N/mm <sup>2</sup> )		Vertikalna tlačna čvrstoća zidnog elementa $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	
Prednost	Nedostatak	Prednost	Nedostatak
Dobro opisuje slabi horizontalni smjer	Sklon vertikalnom drobljenju	Dobro opisuje jaki vertikalni smjer	Nedostatak horizontalnog drobljenja
Pukotine uslijed drobljenja u blizini stupa su bliže fizikalnom modelu	Prerani vlačni slom na zidanom ispunu	Vlačne pukotine se dobro slažu s fizikalnim modelom	Rjeđe raspucavanje uz blizini stupa
Podatak nije dostupan od proizvođača	Pad nosivosti	Prikladna nosivost, krutost, histerezna energija	Element se prije pomakne nego zdrobi (otvori!)
	Nestvarni pomaci	Praktičan odabir	

## 5.4. Provjera usvojenog numeričkog modela

### 5.4.1. Uvod

Provjera usvojenog numeričkog modela za armirano-betonski okvir i zidani ispun, provedena je na uzorcima grupe I i II. Mogućnosti numeričkog modela da na vjerodostojan način opiše nelinearno ponašanje armirano-betonskog okvira sa punim zidanim ispunom i bez njega, što uključuje način sloma te nosivost, krutost i histereznu energiju, su potvrđene. Utvrđena svojstva numeričkog modela sada će se koristiti za provedbu provjere u usporedbi s fizikalnim modelima grupe I i II. Svrha je utvrditi prilagodljivost odabranih parametara na nove modele, u ovom slučaju s otvorima. Glineni šuplji zidni element je stoga i u ovom modelu zamijenjen punim jednakih izmjera i sa svojstvima u vertikalnom smjeru.

U skladu s utvrđenim svojstvima materijala numeričkih modela danim u tablicama 5.7. i 5.12. izveden je numerički model preostalih fizikalnih modela. Rezultati provjere opisani su posebno za svaku grupu i svaki uzorak.

Na slici 5.17. dan je pregled pukotinskog stanja pred slom usporedno numeričkih i fizikalnih za grupu I, a zatim na slici 5.18., isto za one grupe II. Nakon toga objašnjen je način sloma svakog pojedinog ispitnog uzorka s osvrtom na fizikalni model.

### 5.4.2. Uzorci grupe I

Kao i na fizikalnim modelima, numerički modeli grupe I, pokazuju isključivo savojne vlačne pukotine te tanke tlačne na armirano-betonskim okvirima, stoga posmične pukotine nemaju utjecaj na ponašanje istih.

#### a) Način sloma i pukotinsko stanje pred slom zidanog ispuna

U skladu sa slikom 5.16., dan je opis načina i oblika sloma, numeričkih i fizikalnih modela grupe II:

#### a-1) Fizikalni i numerički model tip (I/1)

Pukotinsko stanje pred slom na numeričkom modelu pokazuje podudarnost s istim fizikalnog modela. Pukotinsko stanje karakteriziraju dijagonalne vlačne pukotine, klizanje po reškama morta u ravni iznad otvora i drobljenje zidanog ispuna pri dnu otvora.

Dijagonalne vlačne pukotine pod kutom su od 65 °. Vidljivo je da je veća brojnost dijagonalnih pukotina u dijelu zidanog ispuna pored otvora, što je u skladu s eksperimentima. Horizontalni slom dogodio se na više reški morta, a najizraženije u ravni iznad nadvoja otvora.

Prevladava slom smicanjem, uslijed drobljenja uglova, ali uz prisutnost dijagonalnih vlačnih pukotina, kako na fizikalnom tako i na numeričkom modelu. Utjecaj punih zidnih elemenata, umjesto šupljih, očituje se u manje zahvaćenom području drobljenjem zidnih elemenata te lakšem pomicanju zidnih elemenata koji bi u protivnome na fizikalnom modelu ipak pretrpjeli oštećenja zbog male horizontalne tlačne čvrstoće. To vodi ka bržem horizontalnom slomu. Globalno gledano to nije utjecalo na način sloma, ali se odrazilo na nosivost.

Pojava pukotina na armirano-betonskom okviru se podudara na svim promatranim mjestima (krajevi stupova i greda).

#### a-2) Fizikalni i numerički model tip (I/2)

Pukotinsko stanje pred slom na numeričkom modelu pokazuje podudarnost s istim fizikalnog modela. Prevladava posmični način sloma. Pukotinsko stanje karakteriziraju dijagonalne vlačne pukotine, klizanje po reškama morta u ravni iznad i ispod otvora i drobljenje zidanog ispuna pri dnu otvora.

Dijagonalne vlačne pukotine pod kutom su od  $45^\circ$ . Utjecaj punih zidnih elemenata, umjesto šupljih, očituje se kao i u prethodnom slučaju u manje zahvaćenom području drobljenjem zidnih elemenata i pomicanjem tj. guranjem umjesto oštećivanjem zidnih elemenata, ali to globalno nije utjecalo na način sloma.

Pojava pukotina na armirano-betonskom okviru se podudara na svim promatranim mjestima (krajevi stupova i greda).

#### a-3) Fizikalni i numerički model tip (I/3)

Pukotinsko stanje pred slom na numeričkom modelu pokazuje podudarnost s istim fizikalnog modela. Oštećenja uz rub otvora te iznad nadvoja prisutna su kod oboje. Vidljivo je da je došlo do sloma horizontalne reške morta iznad otvora (prekid dijagonalnih pukotina). Dijagonalne vlačne pukotine su pod kutom od  $45^\circ$ . Također na kraćem dijelu zidanog ispuna pored otvora uhvaćeno je drobljenje zidnog elementa. Prevladava posmični slom dijela ispuna pored otvora.

Utjecaj punih zidnih elemenata vodio je ka izravnijem utjecaju na horizontalni slom reške morta iznad otvora, jer su se zidni elementi lakše pomicali nego drobili na dijelu pored otvora, ispod ravni gornjeg ruba otvora.

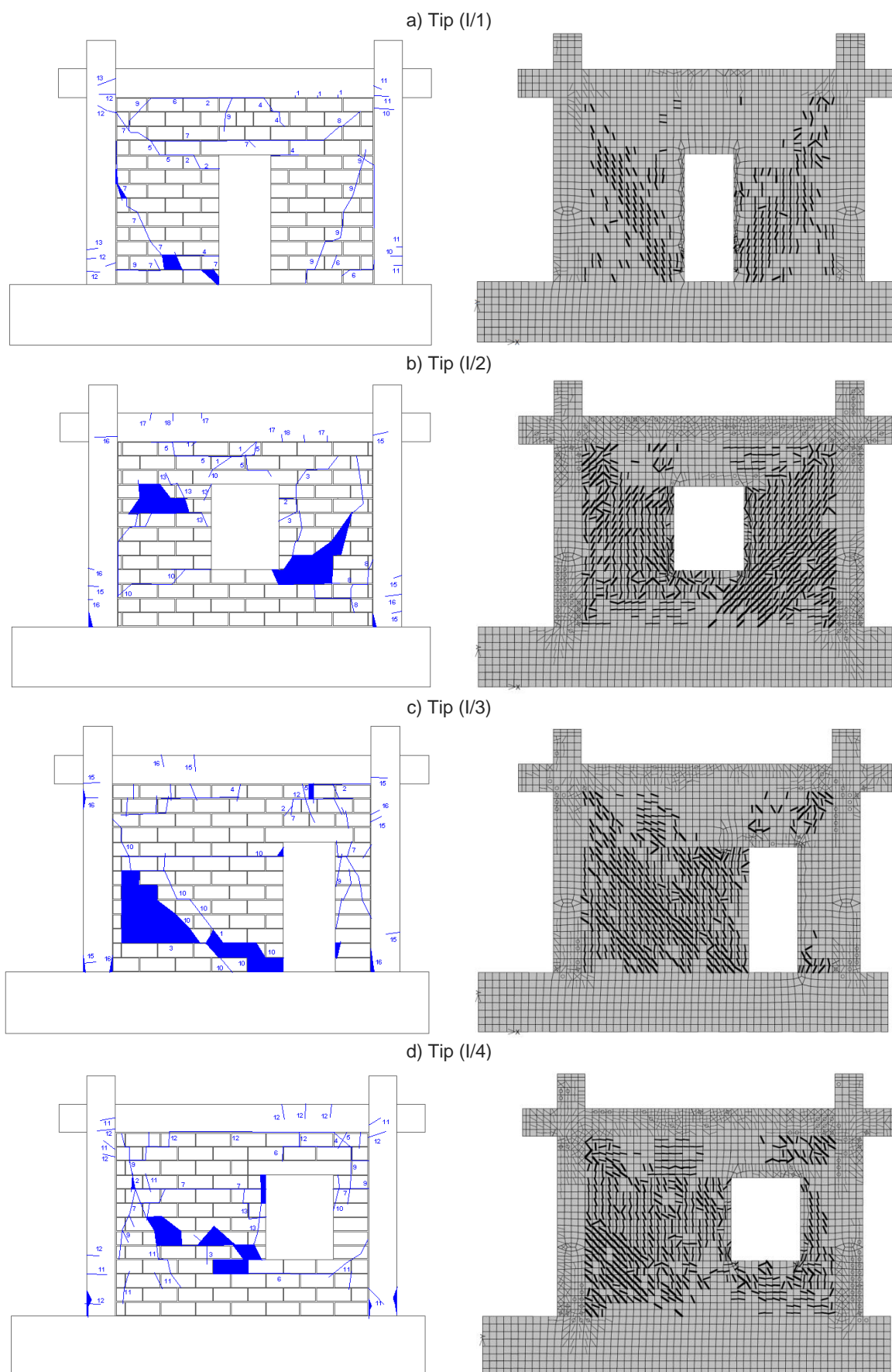
Pojava pukotina na armirano-betonskom okviru se podudara na svim promatranim mjestima (krajevi stupova i greda).

#### a-4) Fizikalni i numerički model tip (I/4)

Pukotinsko stanje pred slom na numeričkom modelu pokazuje podudarnost s istim fizikalnog modela, kao i kod svih prethodnih modela, bez obzira na složenost pukotinskog stanja, što čini računalnim program sasvim prikladnim za opis načina sloma. Dobro je uhvaćeno raspucavanje uz stup okvira, horizontalni posmični slomovi iznad i ispod otvora. Dijagonalne vlačne pukotine su pod kutom od  $45^\circ$ . Također na kraćem dijelu zidanog ispuna pored otvora uhvaćeno je drobljenje zidnog elementa. Prevladava posmični slom dijela ispuna pored otvora uz prisutnost horizontalnog sloma reški morta i unutar tog dijela. Brojnost pukotina ukazuje na potencijalno raspadanje zidnih elemenata. Pukotine nastale uz vertikalni rub otvora vidljive su na oba modela.

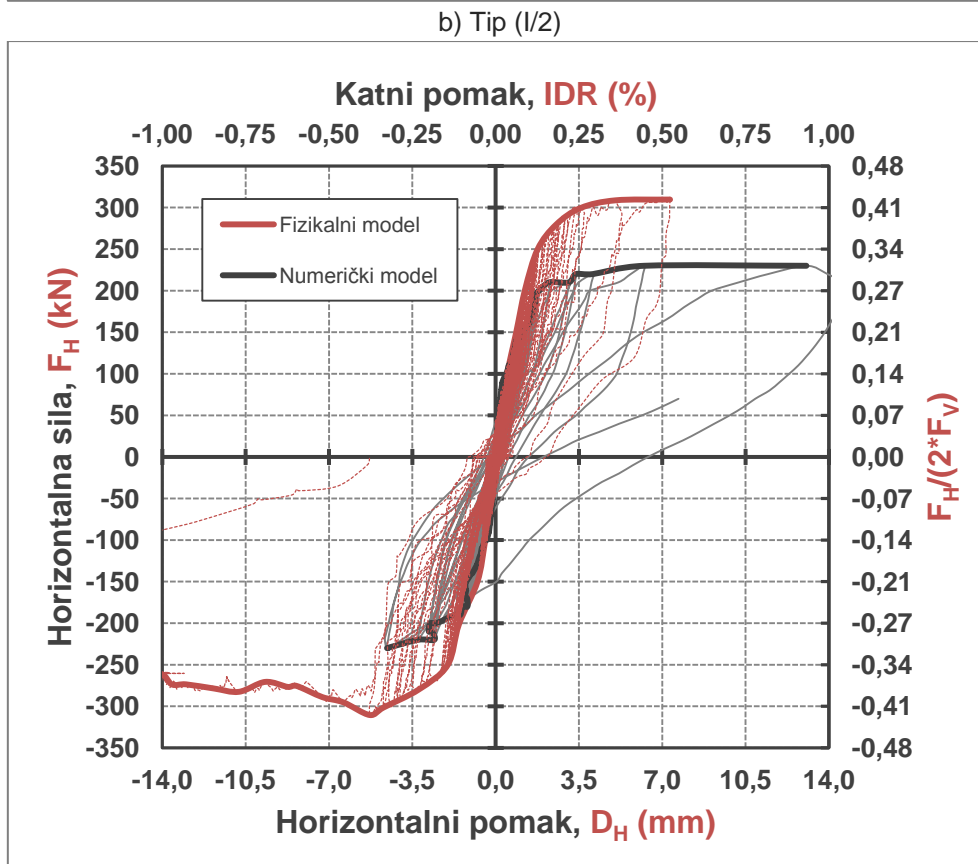
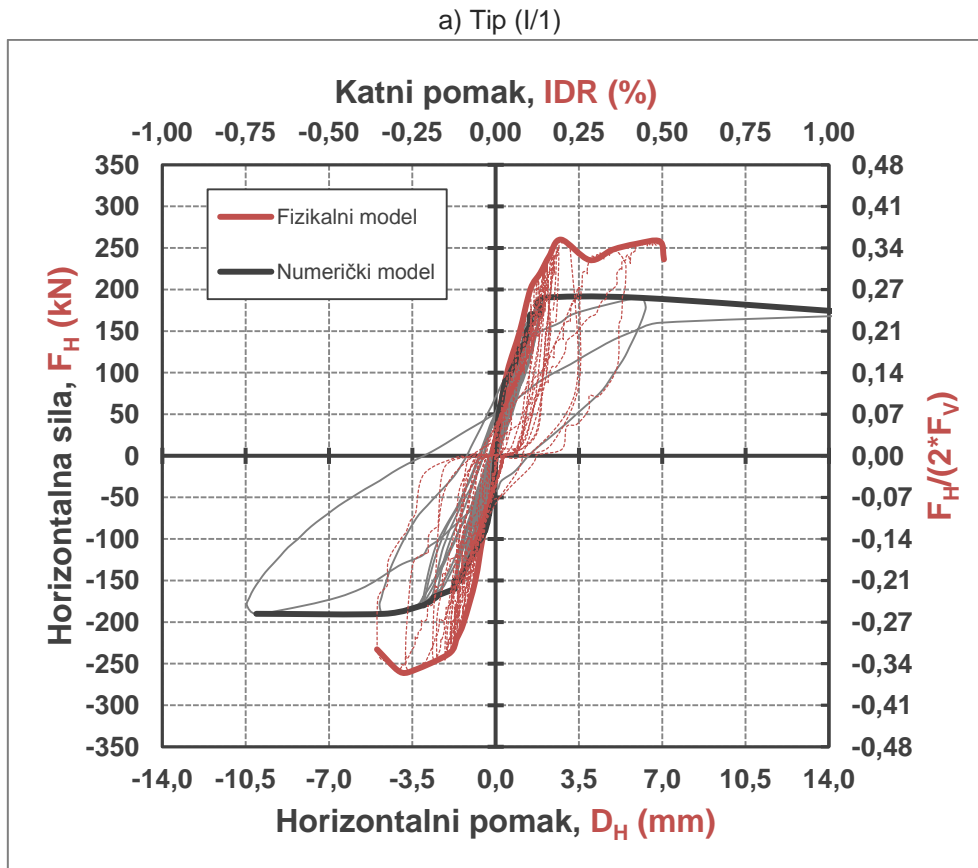
Utjecaj punih zidnih elemenata vodio je ka izravnijem utjecaju na horizontalni slom reški morta iznad i ispod otvora, jer su se zidni elementi lakše pomicali nego drobili na dijelu pored otvora.

Pojava pukotina na armirano-betonskom okviru se podudara na svim promatranim mjestima (krajevi stupova i greda).



**Slika 5.16.** Usporedba eksperimentalnih (lijevo) i numeričkih rezultata (desno) ispitnih uzoraka:  
a) Tip (I/1), b) Tip (I/2) , c) Tip (I/3) i d) Tip (I/4)

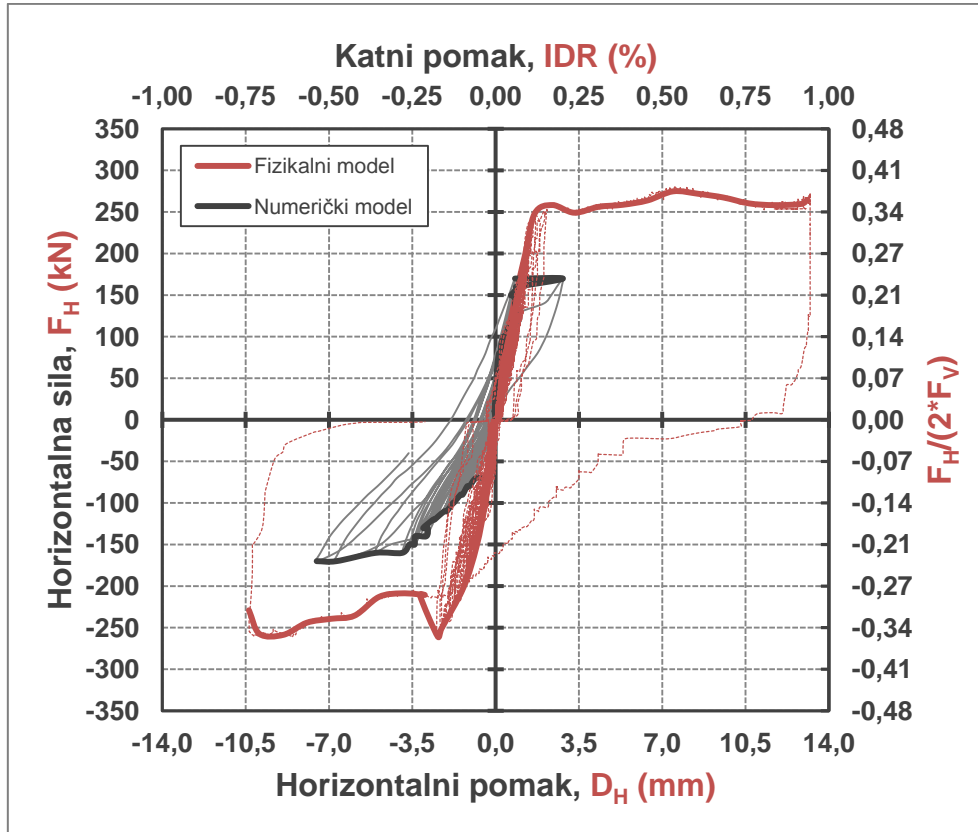




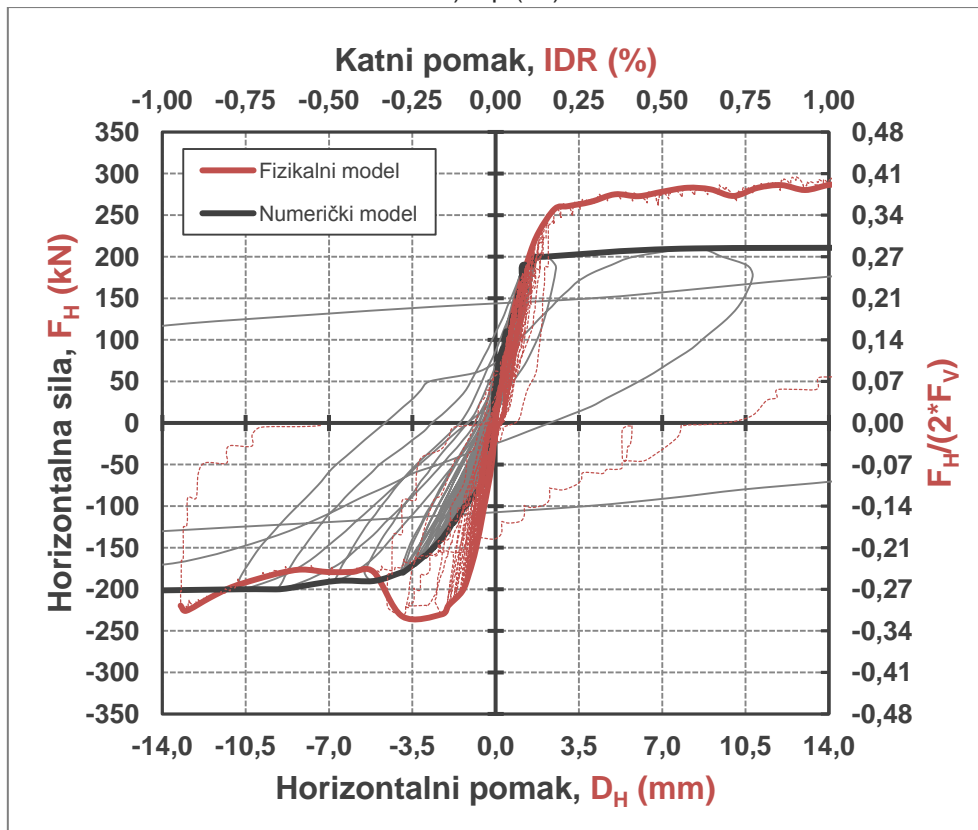
Slika 5.17. Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) Tip (I/1) i b) Tip (I/2)



a) Tip (I/3)



b) Tip (I/4)



Slika 5.18. Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) Tip (I/3) i b) Tip (I/4)

b) Nosivost,  $F_H$  (kN)

Na slikama 5.17. i 5.18., dana je usporedba histerezenih petlji i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela. U tablici 5.14. dana su svojstva nosivosti obaju modela za odabrane katne pomake.

**Tablica 5.14.** Nosivost  $F_H$  (kN) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe I

Ispitni uzorak	IDR (%)	Pozitivna strana			Negativna strana		
		Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)	Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)
Tip (I/1)	0,10	200	140	30	-201	-130	35
	0,20	260	170	35	-260	-170	35
	0,50	236	160	32	-233	-170	27
	1,00	-	170		-	-	
Tip (I/2)	0,10	201	150	25	-201	-150	25
	0,20	280	170	39	-280	-210	25
	0,50	310	160	48	-289	-	
	1,00	-	170		-261	-	
Tip (I/3)	0,10	199	150	25	-201	-90	55
	0,20	249	170	32	-211	-130	38
	0,50	275	-		-239	-150	37
	1,00	265	-		-229	-	
Tip (I/4)	0,10	201	150	25	-202	-70	65
	0,20	261	180	31	-230	-140	39
	0,50	278	210	24	-179	-180	-1
	1,00	286	180	37	-220	-170	23

Numerički modeli, iako su uspješno opisali način sloma i pukotinsko stanje, pokazali su manju nosivost pri horizontalnom cikličkom i vertikalnom stalnom opterećenju, prosječno oko 30 %. Vrlo važna početna posmična čvrstoća i kut unutarnjeg trenja ovdje su u drugim okolnostima popustili uslijed izravnijeg opterećenja prenesenog putem „punih“ zidnih elemenata s velikom tlačnom čvrstoćom, što je dovelo do ranijeg pomicanja pojedinih dijelova ispuna, a time i do pada nosivosti.

Model zidnog elementa kao punog, ali s horizontalnom tlačnom i pripadnom vlačnom čvrstoćom opet se prerano drobi i lomi dijagonalno. Dakle, ukoliko bi se radilo o punim zidnim elementima na fizikalnom modelu, ovdje nema razloga sumnjati da bi nosivost bila uhvaćena ispravno, jer su prethodni proračuni potvrdili valjanost usvojenih parametara. Stoga, može se smatrati da numerički model predstavlja odgovor s punim zidanim ispunom s 20%-tnom greškom ukoliko se radi o šupljim glinenim blokovima. Razlog je dakle u vrlo niskoj horizontalnoj čvrstoći blokova.

c) Krutost, K (kN/mm)

U tablici 5.15. dana su svojstva nosivosti obaju modela za odabrane katne pomake numeričkog i fizikalnog modela s razlikom u vrijednostima.

**Tablica 5.15.** Krutost K (kN/mm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe I

Uzorak	IDR (%)	Pozitivna strana			Negativna strana		
		Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)	Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)
Tip (I/1)	0,10	137	104	24	-145	-108	26
	0,20	95	53	44	-88	-59	33
	0,50	33	23	30	-26	-26	0
	1,00	-	11	-	-17	-	-
Tip (I/2)	0,10	163	109	33	-150	-126	16
	0,20	103	60	42	-87	-79	9
	0,50	42	23	45	-35	-	-
	1,00	-	12	-	-22	-	-
Tip (I/3)	0,10	160	164	2	-131	-61	53
	0,20	93	60	35	-100	-46	54
	0,50	37	-	-	-40	-21	48
	1,00	20	-	-	-18	-	-
Tip (I/4)	0,10	142	124	13	-150	-51	66
	0,20	93	72	23	-96	-51	47
	0,50	40	25	38	-47	-25	47
	1,00	19	17	11	-	-12	-

Iako se primarne krivulje numeričkog i fizikalnog modela u početku poklapaju, pri odabranim katnim pomacima one uslijed manje vrijednosti horizontalne sile pri tome pomaku pokazuju odstupanja od prosječno 30%. Tendencija je ka padu krutosti s porastom pomaka u oba slučaja. Krutosti su ipak sličnije na pozitivnoj strani, dok na negativnoj strani pokazuju veća odstupanja, osobito u slučaju otklonjenog otvora.

Problem punog zidnog elementa umjesto ortotropnog šupljeg i održava se kako i na nosivost tako naravno i na krutost. Numerički model stoga podcjenjuje i nosivost i krutost fizikalnog modela, ali uspješno modelira način sloma, koji je kako posljedica materijalnih svojstava ujedno i posljedica geometrije ispuna i otvora.

Prema opisu načina sloma, vrste pukotina koje uzrokuju gubitak krutosti su jednake na oba modela. To su dakle dijagonalne vlačne pukotine, tlačne pukotine te horizontalno klizanje po reškama morta koje je uslijed „punog“ jakog zidnog elementa izraženije nego na fizikalnom modelu.

d) Histerezna energija, E (kNmm)

U tablici 5.16. dana su svojstva nosivosti obaju modela za odabrane katne pomake numeričkog i fizikalnog modela s razlikom u vrijednostima.

**Tablica 5.16.** Histerezna energija E (kNmm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe I

Uzorak	IDR (%)	Pozitivna strana			Negativna strana		
		Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)	Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)
Tip (I/1)	0,10	352	422	17	486	434	11
	0,20	3668	2262	38	4410	1539	65
	0,50	6714	4230	37	5706	3233	43
	1,00	-	5755	-	-	-	-
Tip (I/2)	0,10	1522	777	49	924	807	13
	0,20	3420	2290	33	3072	2421	21
	0,50	7469	4590	39	8335	-	-
	1,00	-	6084	-	8190	-	-
Tip (I/3)	0,10	890	848	5	760	169	78
	0,20	2982	1396	53	6711	651	90
	0,50	4007	-	-	7654	2039	73
	1,00	5668	-	-	8281	-	-
Tip (I/4)	0,10	1555	869	44	1611	396	75
	0,20	3859	2938	24	2772	896	68
	0,50	4994	4840	3	9332	2603	72
	1,00	6969	5298	24	10527	6138	42

Histerezna energija povećava se sa zalaženjem u nelinearno – plastično područje te sve većim raspucavanjem zidanog ispuna. Ovo raspucavanje je dobro usklađeno između dvaju modela, fizikalnog i numeričkog, osim što je kod fizikalnog naglašenije drobljenje zidanog ispuna, a kod numeričkog klizanje po reškama morta. Dijagonalne vlačne pukotine uglavnom su podjednake. Razlike su na strani fizikalnog modela, koji osim veće nosivosti također ima više histerezne energije, zbog većih ploština unutar histereznih petlji. Pri malim katnim pomacima, IDR=0,10%, ove vrijednosti nisu toliko izražene, već nakon što se dogodi popuštanje modela.

Razlika u histereznoj energiji fizikalnog i numeričkog modela, pri krajnjem katnom pomaku, također je oko 30%.

Također, „puni“ zidni element posljedica je nesklada dvaju modela u histereznoj energiji, što je postati vidljivo na modelima Grupe II, gdje su ispun i otvor omeđeni vertikalnim serklažima, tj. spriječen je horizontalni slom po reškama morta.

### 5.4.3. Uzorci grupe II

Kao i na fizikalnim modelima, numerički modeli Grupe II, pokazuju isključivo savojne vlačne pukotine te tanke tlačne na armirano-betonskim okvirima, stoga posmične pukotine nemaju utjecaj na ponašanje istih. Pojava pukotina na armirano-betonskom okviru se podudara na svim promatranim mjestima (krajevi stupova i greda). Utjecaj punih zidnih elemenata, umjesto šupljih, je znatno umanjen stoga fizikalni i numerički modeli imaju sličan odgovor.

#### a) Način sloma i pukotinsko stanje pred slom zidanog ispuna

Pukotinsko stanje pred slom na numeričkom modelu pokazuje podudarnost s istim fizikalnog modela za sve slučajeve. Pukotinsko stanje karakteriziraju pretežno dijagonalne vlačne pukotine i drobljenje uglova. Numerički model dobro opisuje ulogu vertikalnog serklaža kao omeđujućeg elementa.

U skladu sa slikom 5.19., dan je opis načina i oblika sloma, numeričkih i fizikalnih modela grupe II:

#### a-1) Fizikalni i numerički model tip (II/1)

Dijagonalne vlačne pukotine kreću se od ugla zidanog ispuna uz okvir ka uglu uz serklaž. Prevladava slom savijanjem, uslijed drobljenja uglova, ali uz prisutnost dijagonalnih vlačnih pukotina, kako na fizikalnom tako i na numeričkom modelu.

#### a-2) Fizikalni i numerički model tip (II/2)

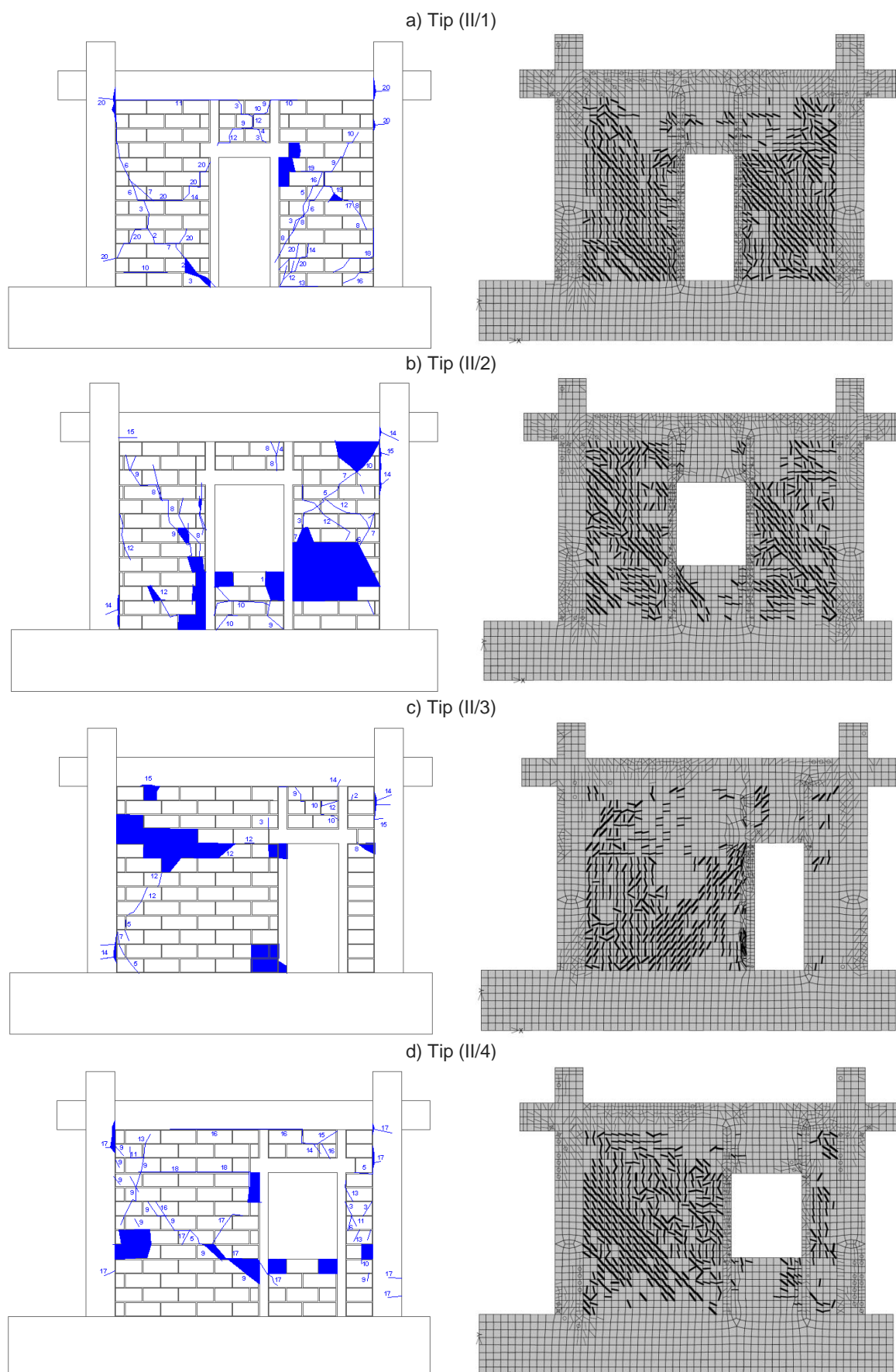
Prevladava posmični način sloma omeđenog zidanog ispuna. Prevladavaju dijagonalne vlačne pukotine pod kutom su od  $45^\circ$ . Model dobro opisuje prijelaz pukotine u područje ispod otvora.

#### a-3) Fizikalni i numerički model tip (II/3)

Dijagonalne vlačne pukotine su pod kutom od  $45^\circ$ . Također pri dnu serklaža ispuna uhvaćeno je drobljenje zidnog elementa. Prevladava posmični slom omeđenog ispuna. U ravni ispod nadvoja oba modela, s lijeve strane, lomi se vertikalni serklaž.

#### a-4) Fizikalni i numerički model tip (II/4)

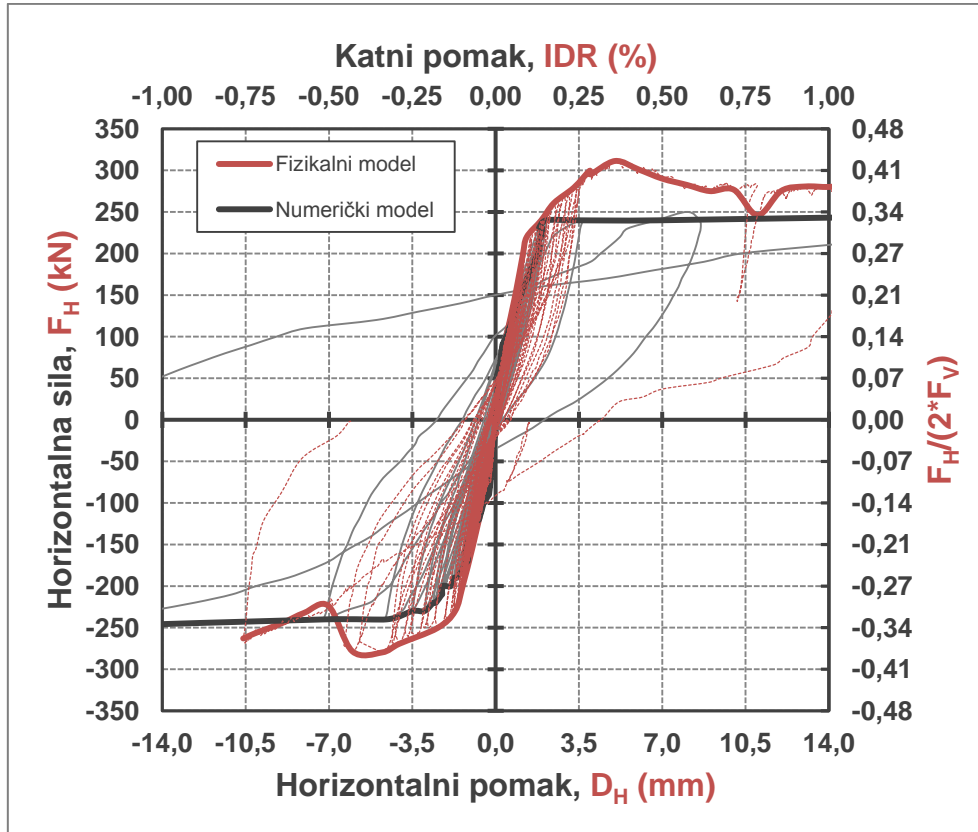
Numerički model dobro opisuje oštećenje uz stup okvira, smjer dijagonalnih pukotina te oštećenja ispod otvora. Prevladava posmični slom omeđenog zidanog ispuna popraćen drobljenjem uglova.



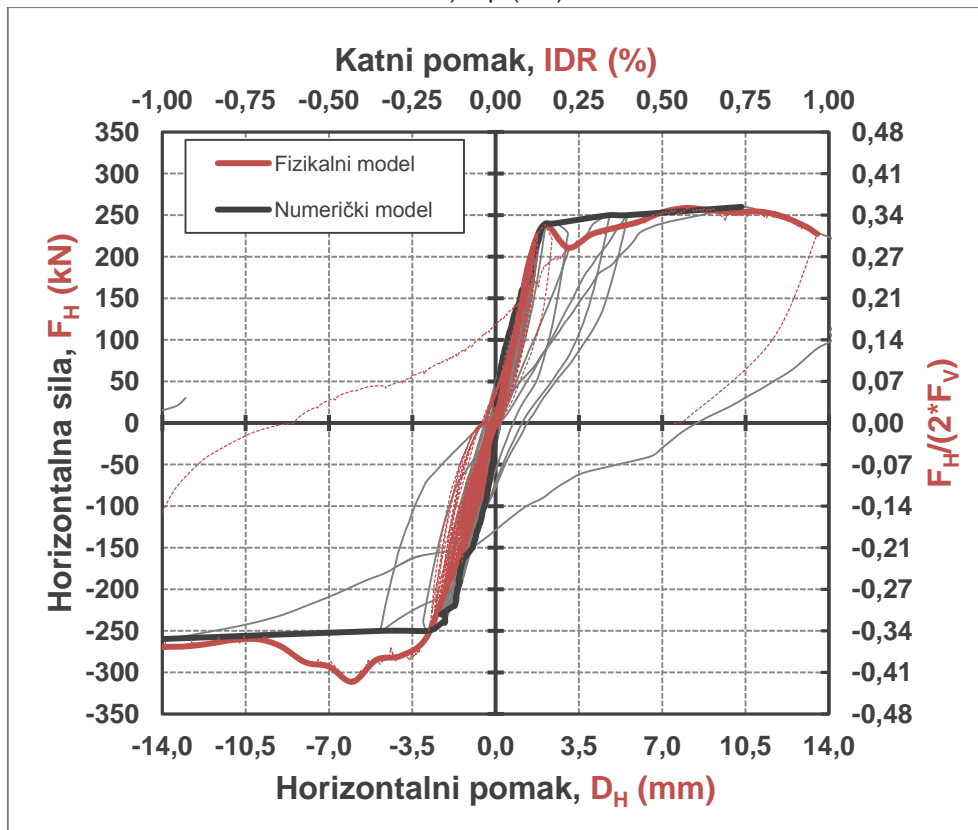
Slika 5.19. Usporedba eksperimentalnih (lijevo) i numeričkih rezultata (desno) ispitnih uzoraka:

a) Tip (II/1), b) Tip (II/2) , c) Tip (II/3) i d) Tip (II/4)

a) Tip (II/1)



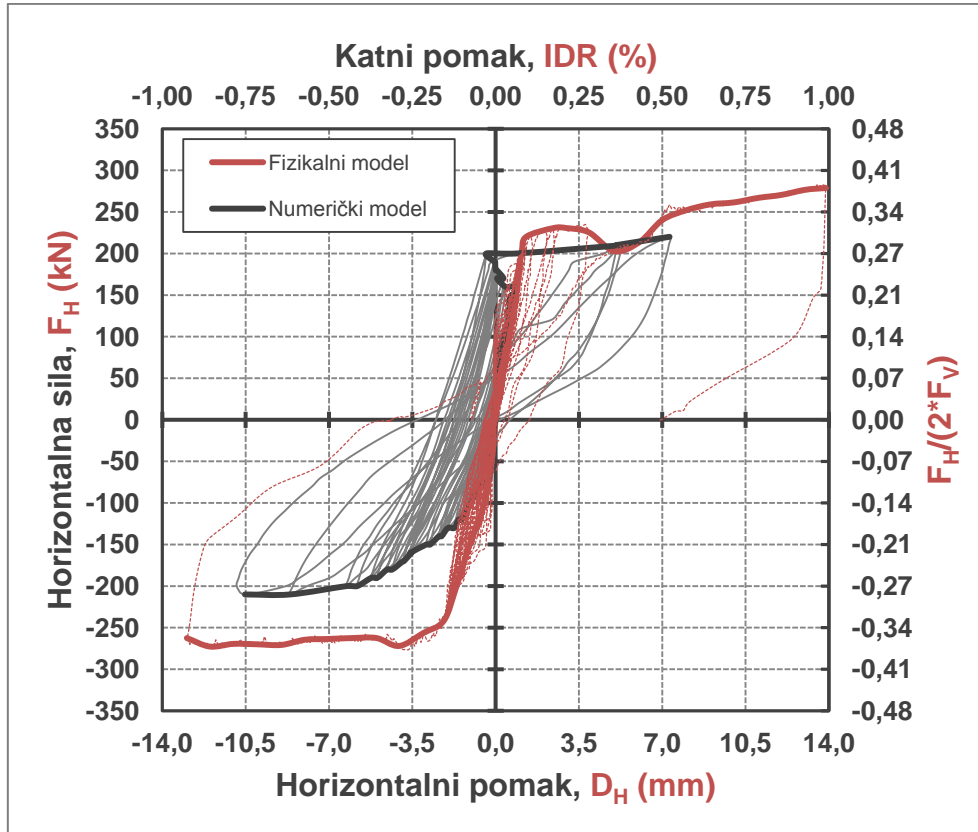
b) Tip (II/2)



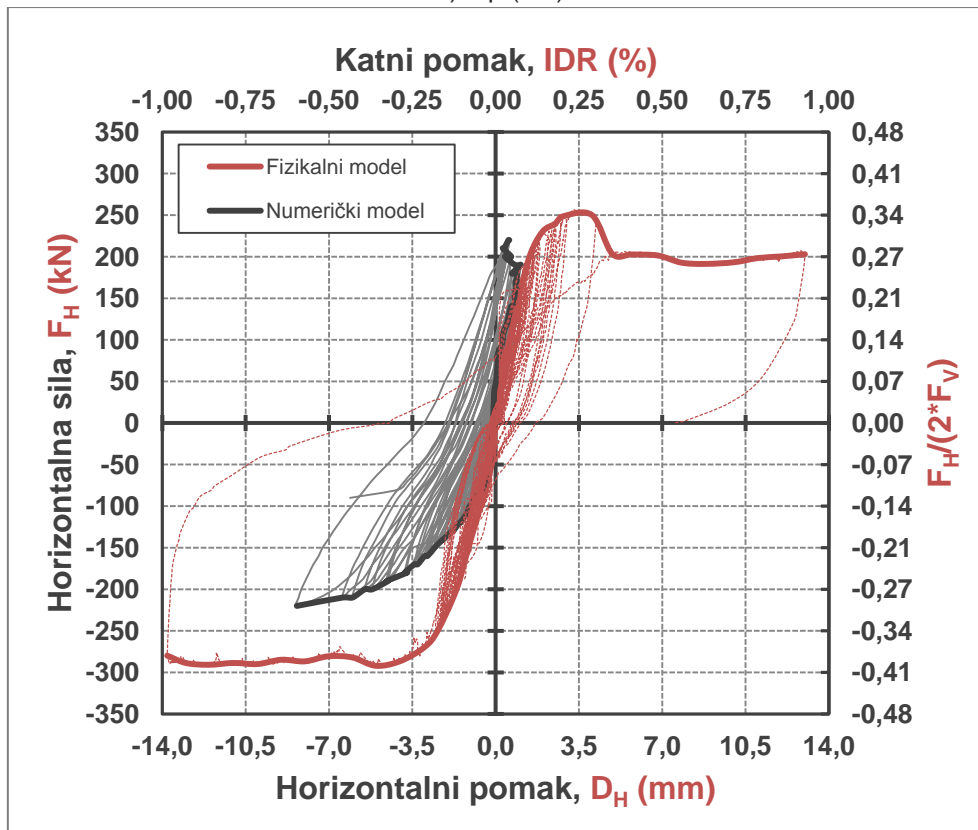
Slika 5.20. Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) Tip (II/1) i b) Tip (II/2)



a) Tip (II/3)



b) Tip (II/4)



Slika 5.21. Usporedba histerezenih i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela: a) Tip (II/3) i b) Tip (II/4)

## b) Nosivost, $F_H$ (kN)

Na slikama 5.20. i 5.21., dana je usporedba histerezenih petlji i primarnih krivulja odnosa horizontalnih sile i pomaka fizikalnog i numeričkog modela. U tablici 5.17. dana su svojstva nosivosti obaju modela za odabrane katne pomake.

**Tablica 5.17.** Nosivost  $F_H$  (kN) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe II

Uzorak	IDR (%)	Pozitivna strana			Negativna strana		
		Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)	Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)
Tip (II/1)	0,10	220	180	18	-200	-150	33
	0,20	261	240	8	-250	-200	25
	0,50	290	240	17	-224	-240	7
	1,00	280	250	11	-263	-230	14
Tip (II/2)	0,10	201	170	15	-151	-170	13
	0,20	211	240	12	-260	-200	30
	0,50	254	250	2	-293	-240	22
	1,00	227	260	13	-270	-260	4
Tip (II/3)	0,10	220	110	50	-201	-100	101
	0,20	230	150	35	-257	-150	71
	0,50	240	220	8	-264	-190	39
	1,00	279	-	-	-263	-	-
Tip (II/4)	0,10	202	210	4	-175	-120	46
	0,20	249	-	-	-270	-160	69
	0,50	201	-	-	-281	-210	34
	1,00	203	-	-	-280	-	-

Numerički i fizikalni model pokazuju odstupanja prosječno 20% s obzirom na nosivost. Modeli s otvorom u sredini slažu se dobro, dok su numerički modeli s otklonjenim otvorom pokazali manju nosivost nego fizikalni model, što je uvjetovano popuštanjem vertikalnog serklaža.

Slom horizontalne reške morta, te slabog vertikalnog serklaža, u ravni ispod nadvoja, na fizikalnom i numeričkom modelu tip (II/3) se drukčije odrazio. Puni zidni elementi numeričkog modela bili su destruktivniji spram serklaža nego šuplji na fizikalnom modelu, što je dovelo do manje nosivosti.

Isto se dogodilo na numeričkom modelu tip (II/4), gdje se vertikalnom serklažu na istom mjestu dogodio slom. Premda je fizikalni model pokazao slom reške morta u ravni ispod nadvoja, slom vertikalnog serklaža se nije dogodio. Razlog tome također su šuplji zidni elementi.

c) Krutost, K (kN/mm)

U tablici 5.18. dana su svojstva nosivosti obaju modela za odabrane katne pomake numeričkog i fizikalnog modela s razlikom u vrijednostima.

**Tablica 5.18.** Krutost K (kN/mm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe II

Uzorak	IDR (%)	Pozitivna strana			Negativna strana		
		Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)	Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)
Tip (II/1)	0,10	168	131	22	-145	-118	23
	0,20	97	58	40	-95	-70	36
	0,50	41	35	15	-32	-34	6
	1,00	20	15	25	-25	-16	56
Tip (II/2)	0,10	136	122	10	-112	-119	6
	0,20	81	68	16	-90	-72	25
	0,50	36	47	23	-42	-56	33
	1,00	17	34	50	-19	-18	6
Tip (II/3)	0,10	174	84	52	-122	-88	39
	0,20	83	60	28	-92	-55	67
	0,50	34	26	24	-38	-27	41
	1,00	20	-	-	-20	-	-
Tip (II/4)	0,10	140	703	80	-122	-82	49
	0,20	88	-	-	-94	-56	68
	0,50	29	-	-	-40	-28	43
	1,00	16	-	-	-20	-	-

Početne krutosti numeričkog i fizikalnog modela do IDR=0,05% su jednake, u skladu sa slikama 5.20. i 5.21., dok pri odabranim katnim pomacima one prosječno pokazuju odstupanje od 30%.

Problem punog zidnog elementa odražava se kako i na nosivost tako i na krutost. Numerički model stoga podcjenjuje i nosivost i krutost fizikalnih modela s otklonjenim otvorom, ali uspješno modelira način sloma, koji je kako posljedica materijalnih svojstava ujedno i posljedica geometrije ispuna i otvora.

Prema opisu načina sloma, vrste pukotina koje uzrokuju gubitak krutosti su jednake na oba modela. To su dakle dijagonalne vlačne pukotine, tlačne pukotine te horizontalno klizanje po reškama morta koje je uslijed „punog“ jakog zidnog elementa izraženije nego na fizikalnom modelu.

d) Histerezna energija, E (kNmm)

U tablici 5.19. dana su svojstva nosivosti obaju modela za odabrane katne pomake numeričkog i fizikalnog modela s razlikom u vrijednostima.

**Tablica 5.19.** Histerezna energija E (kNmm) pri odabranim katnim pomacima IDR (%) dobivena na fizikalnim i numeričkim modelima grupe II

Uzorak	IDR (%)	Pozitivna strana			Negativna strana		
		Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)	Fizikalni model	Numerički model	Razlika (%)
Tip (II/1)	0,10	1099	615	44	771	574	26
	0,20	3583	4431	19	2404	2386	1
	0,50	7096	5209	27	10005	4255	57
	1,00	9061	13523	33	10574	7334	31
Tip (II/2)	0,10	439	990	56	574	952	40
	0,20	6020	3247	46	2095	4064	48
	0,50	6990	4247	39	3290	4944	33
	1,00	8626	5688	34	5218	10469	50
Tip (II/3)	0,10	2000	3517	43	875	282	68
	0,20	2897	3732	22	3445	736	79
	0,50	6666	5543	17	4557	3567	22
	1,00	8492	-	-	6172	-	-
Tip (II/4)	0,10	669	2393	72	452	333	26
	0,20	3173	-	-	4146	970	77
	0,50	8123	-	-	5319	3435	35
	1,00	9303	-	-	7280	-	-

Numerički i fizikalni model pokazuju odstupanja prosječno 30% u histereznoj energiji, kao posljedica drukčijeg usmjeravanja energije opterećenja, tj. na horizontalni slom reške morta kod numeričkog modela, na drobljenje kod fizikalnog, što vodi do drukčije konstrukcije povratnih krivulja.

## 5.5. Sažetak i zaključak poglavlja

U ovom poglavlju je prikazan odabrani numerički model primjenom metode konačnih elemenata koji je usklađen (kalibriran) s rezultatima ispitivanja u svrhu proširenja istraživanja. Numerički proračun proveden je putem računalnog programa ATENA 2D, ver.4.3. Izrađen je nelinearni numerički mikro model u kojem su modelirani nelinearno ponašanje betona, armature, opeke i morta. Pri tom je mort modeliran kao nelinearni kontakt element bez debljine. S obzirom na složenost numeričkog modela i primjenjivost rezultata izvršena je kalibracija modela usporedbom numeričkih s rezultatima provedenih ispitivanja. Kao mjera uspješnosti kalibracije su iskorišteni mehanizmi sloma te primarne krivulje ponašanja modela. Numerički model prvo je kalibriran je u skladu s fizikalnim modelima grupe III. Ulazni parametri za materijal su temeljni na svojstvima primijenjenih gradiva uz neznatne prilagodbe. Rezultati proračuna upućuju na to da je numeričkim modelom moguće opisati nelinearno ponašanje uzoraka te predvidjeti njihov način sloma.

Uočeni su problemi u pogledu modeliranja ortotropnih zidnih elemenata, koji su u nedostatku modela, modelirani kao puni zidni elementi. Ovime je zidani ispun postao podložniji slomu po horizontalnim reškama morta, ali je uslijed prisutnosti vertikalnih serklaža ovaj utjecaj bio umanjen. Zaključeno je da je postavljeni numerički model dobro kalibriran te da su rezultati analiza usporedivi s rezultatima eksperimentalnih istraživanja.

## Poglavlje 6.0.

# ANALIZA UTJECAJA VERTIKALNIH SERKLAŽA

### 6.1. Uvod

U ovom poglavlju dana je studija utjecaja vertikalnih serklaža, drugih izmjera i smještaja otvora te drugih izmjera zidanog ispuna na odgovor armirano-betonskih okvira. Postojeća baza ispitanih fizikalnih modela proširena je numeričkim pojednostavljenim diskretnim modelima. Primijenjen je računalni program ATENA 2D v.4.3 koji se zasniva na metodi konačnih elemenata. Teorijski modeli materijala i pripadna im svojstva usvojeni su u skladu s kalibriranim modelima. Studija uključuje ukupno dvadeset novih modela s tri odnosa izmjera zidanog ispuna. Vertikalno opterećenje je usvojeno stalno, dok je horizontalno nanošeno u ciklusima, kao i tijekom ispitivanja. Rezultati studije dani su u obliku opisa načina sloma, histereznih i primarnih krivulja, promjene krutosti i histerezne energije.

### 6.2. Opis i izmjere numeričkih modela

#### 6.2.1. Pregled numeričkih modela

Numerički modeli svrstani su u tri grupe, ovisno o izmjerama zidanog ispuna. Grupu IV čine modeli s odnosom izmjera  $\alpha=L_1/H_1=0,72$ , kao i u prethodno opisanim fizikalnim modelima. Grupu V i VI čine modeli s odnosom izmjera zidanog ispuna 0,59 i 0,93, dakle manjim i većim od onog fizikalnih modela. Za razliku od grupe IV, putem modela grupe V i VI istražuje se samo jedan otvor za prozor omeđen vertikalnim serklažima. Svojstva vertikalnog serklaža jednaka su za modele svih grupa. Udaljenost otvora od stupa okvira određena je na isti način kao i za uzorke. Rubni uvjeti su jednaki za sve modele. Modeli su umanjениh izmjera u skladu s mjerilom M 1:2,5. Detaljan opis modela ovih grupa je sljedeći:

#### a) Numerički modeli grupe IV

U svrhu prve studije izvedeno je ukupno dvanaest numeričkih modela. Numeričke modele grupe IV čine dvije skupine. Prvu čine otvori čija je ploština manja od  $A_0 < 1,5 \text{ m}^2$  te drugu otvori s ploštinom većom od  $A_0 > 1,5 \text{ m}^2$ . U prvoj skupini prisutni su otvori za prozor bez vertikalnog serklaža, a u drugoj otvori za prozor ili vrata sa i bez vertikalnog serklaža. Razmatran je utjecaj otvora smještenog u sredini i s otklonom. Pregled numeričkih modela grupe IV dan je u tablicama 6.1. i 6.2.

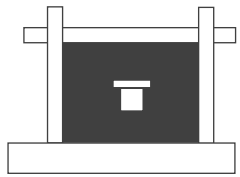
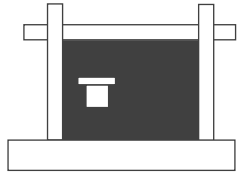
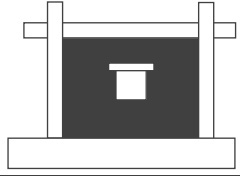
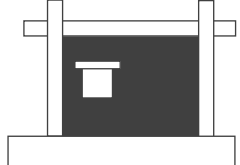
Izmjere elemenata armirano-betonskog okvira, ujedno i plan armature te izmjere zidanog ispuna, zidnih elemenata i reški morta, jednake su kao za proračunske modele usklađivane s eksperimentalnim odgovorom, opisane u prethodnom poglavlju.

U skladu sa smjernicama za odabir najprikladnijih otvora stambenih i poslovnih objekata, danih u (27), odabrane su četiri vrste zidnih otvora, pravokutnog oblika, s pripadnim izmjerama. Normirane građevinske izmjere odabranih otvora su za prozore u stvarnom (i pripadnom umanjenom mjerilu),  $L_o/H_o=750/750$  (300/300) mm i  $L_o/H_o=1000/1000$  (400/400) mm te je njihova ploština manja od  $A_o < 1,5 \text{ m}^2$ . Preostala dva otvora imaju veću ploštinu tj.  $A_o > 1,5 \text{ m}^2$ , i čine ih otvor za prozor,  $L_o \times H_o = 1250/1250$  (500/500) mm i otvor za vrata,  $L_o \times H_o = 1125/2250$  (450/900) mm. Izmjere zidanog ispuna su  $L_i \times H_i = 4,5/3,25$  (1,8/1,3) m, dok je debljina ispuna  $T_i = 0,30$  (0,12) m.

Obzirom na mogućnost izvedbe, predviđeno je otvor bude smješten u sredini ili s otklonom  $O_o$ . Ova izmjera predstavlja udaljenost od unutarnje strane stupa armirano-betonskog okvira, do osi otvora. U slučaju otklona ova udaljenost izražava se kao  $O_o = H_i/5 + L_o/2$ , gdje je  $H_i$  visina zidanog ispuna, dok u slučaju otvora smještenog u sredini ova udaljenost iznosi,  $O_o = L_o/2$  tj. polovini duljine ispuna. Otkloni otvora također su navedeni u tablicama 6.1. i 6.2. Kod otvora za prozor visina parapeta iznosi  $H_N = 1,0$  (0,40) m. Ona je usvojena je za sve proračunske modele s otvorima za prozor.

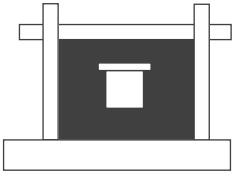
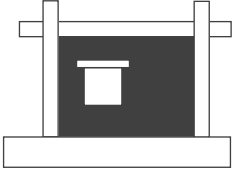
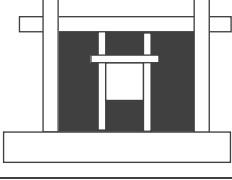
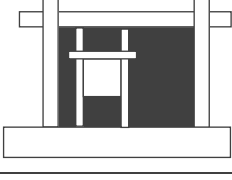


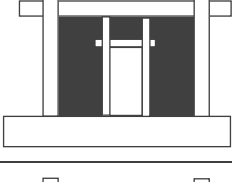

Vertikalni serklaži su izvedeni s jednakim izmjerama i planom uzdužne i poprečne armature kao i na fizikalnim modelima.

**Tablica 6.1.** Pregled numeričkih modela grupe IV s ploštinom otvora  $A_o < 1,5 \text{ m}^2$

Numerički model	Način izvedbe otvora unutar zidanog ispuna (bez vertikalnih serklaža) u stvarnim izmjerama (i pripadnim umanjenim)				
	Zidani ispun $L_i/H_i = 4,5/3,25$ (1,8/1,3) m	Otvor			
		Izmjere otvora $L_o/H_o$ (m)	Ploština $A_o$ ( $\text{m}^2$ )	Otklon $O_o$ (m)	Parapet $H_N$ (m)
Tip (IV/1)		0,75/0,75 (0,30/0,30)	0,5625 (0,09)	2,25 (0,90)	1,0 (0,40)
Tip (IV/2)		0,75/0,75 (0,30/0,30)	0,5625 (0,09)	2,25 (0,41)	1,0 (0,40)
Tip (IV/3)		1,0/1,0 (0,40/0,40)	1,0 (0,16)	1,025 (0,41)	1,0 (0,40)
Tip (IV/4)		1,0/1,0 (0,40/0,40)	1,0 (0,16)	1,775 (0,71)	1,0 (0,40)



**Tablica 6.2.** Pregled numeričkih modela grupe IV s ploštinom otvora  $A_o > 1,5 \text{ m}^2$

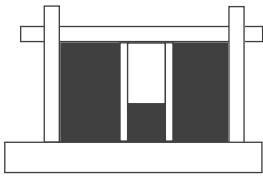
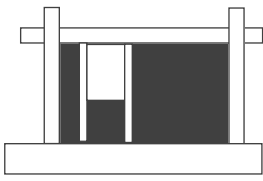
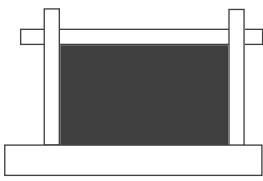
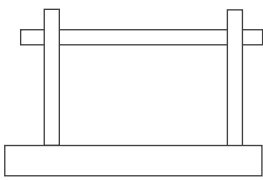
Numerički model	Način izvedbe otvora unutar zidanog ispuna (bez vertikalnih serklaža) u stvarnim izmjerama (i pripadnim umanjjenim)				
	Zidani ispun $L_i/H_i=4,5/3,25$ (1,8/1,3) m	Otvor			
		Izmjere $L_o/H_o$ (m)	Ploština $A_o$ ( $\text{m}^2$ )	Otklon $O_o$ (m)	Parapet $H_N$ (m)
Tip (IV/5)		1,25/1,25 (0,50/0,50)	1,5625 (0,25)	2,25 (0,90)	1,0 (0,40)
Tip (IV/6)		1,25/1,25 (0,50/0,50)	1,5625 (0,25)	1,275 (0,51)	1,0 (0,40)
Tip (IV/7)		1,25/1,25 (0,50/0,50)	1,5625 (0,25)	1,025 (0,41)	1,0 (0,40)
Tip (IV/8)		1,25/1,25 (0,50/0,50)	1,5625 (0,25)	1,275 (0,51)	1,0 (0,40)
Tip (IV/9)		1,125/2,25 (0,45/0,90)	2,53 (0,41)	2,25 (0,90)	0,0 (0,0)
Tip (IV/10)		1,125/2,25 (0,45/0,90)	2,53 (0,41)	1,21 (0,485)	0,0 (0,0)
Tip (IV/11)		1,125/2,25 (0,45/0,90)	2,53 (0,41)	1,025 (0,41)	0,0 (0,0)
Tip (IV/12)		1,125/2,25 (0,45/0,90)	2,53 (0,41)	1,21 (0,485)	0,0 (0,0)

b) Numerički modeli grupe V

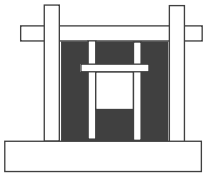
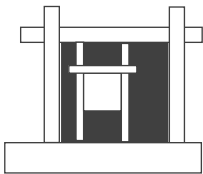
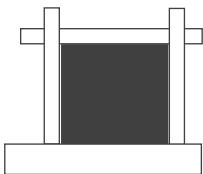
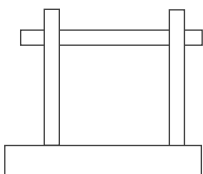
Pojednostavljeni diskretni modeli grupe V izvedeni su također u mjernom odnosu M 1:2,5. Pregled ovih modela dan je u tablici 6.3. Grupu V čine ukupno 4 proračunska diskretna pojednostavljena modela. Dva numerička modela su s otvorom, dok su preostala dva armirano-betonski okvir s punim ispunom te prazan okvir. Svrha je bila odrediti utjecaj drugog omjera izmjera zidanog ispuna s otvorom i vertikalnim serklažima. Ploština danog otvora veća je od  $1,5 \text{ m}^2$ . Duljina ispuna pored otklonjenog otvora, iznosi  $L_p=H_i/5$  te visina parapeta  $H_N=0,40 \text{ m}$ . Omjer izmjera zidanog ispuna iznosi  $L_i/H_i=5,5/3,25$  ( $2,2/1,3$ ) m, u stvarnom (i pripadnom umanjenom) mjerilu.

Odabrani otvor je zidarskih izmjera  $L_o \times H_o=1250 \times 1500$  ( $500 \times 600$ ) mm, u stvarnom i umanjenom mjerilu, kao što je to u slučaju uzoraka pripremljenih za ispitivanja. Nanošenje opterećenja također je cikličko u horizontalnom smjeru i stalno u vertikalnom smjeru te su rubni uvjeti jednaki kao i na kalibriranom modelu.

Tablica 6.3. Pregled numeričkih modela grupe V s pripadnim izmjerama

Numerički model	Način izvedbe otvora unutar zidnog ispuna (bez vertikalnih serklaža) u stvarnim izmjerama (i pripadnim umanjenim)				
	Zidani ispun $L_i/H_i=5,5/3,25$ ( $2,2/1,3$ ) m	Otvor			
		Izmjere $L_o/H_o$ (m)	Ploština $A_o$ ( $\text{m}^2$ )	Otklon $O_o$ (m)	Parapet $H_N$ (m)
Tip (V/1)		1,25/1,50 (0,50/0,60)	1,875 (0,30)	2,25 (0,90)	1,0 (0,40)
Tip (V/2)		1,25/1,50 (0,50/0,60)	1,875 (0,30)	1,275 (0,51)	1,0 (0,40)
Tip (V/3)		-	-	-	-
Tip (V/4)		-	-	-	-

**Tablica 6.4.** Pregled matematičkih modela grupe VI s pripadnim izmjerama

Numerički model	Način izvedbe otvora unutar zidnog ispunu (bez vertikalnih serklaža) u stvarnim izmjerama (i pripadnim umanjenim)				
	Zidani ispun $L_i/H_i=3,5/3,25$ (1,4/1,3) m	Otvor			
		Izmjere $L_o/H_o$ (m)	Ploština $A_o$ (m <sup>2</sup> )	Otklon $O_o$ (m)	Parapet $H_N$ (m)
Tip (VI/1)		1,25/1,50 (0,50/0,60)	1,875 (0,30)	2,25 (0,90)	1,0 (0,40)
Tip (VI/2)		1,25/1,50 (0,50/0,60)	1,875 (0,30)	1,275 (0,51)	1,0 (0,40)
Tip (VI/3)		-	-	-	-
Tip (VI/4)		-	-	-	-

### c) Numerički modeli grupe VI

Pojednostavljeni diskretni modeli grupe VI također su izvedeni su u mjernom odnosu M 1:2,5. Grupu VI čine ukupno 4 proračunska diskretna pojednostavljena modela. Dva numerička modela su s otvorom i vertikalnim serklažima, dok su preostala dva armirano-betonski okvir s punim ispunom te prazan okvir. Pregled ovih modela zajedno sa osnovnim izmjerama i ploštinom otvora dan je u tablici 6.4. Odnos izmjera zidanog ispunu iznosi  $L_i/H_i=3,5/3,25$  (1,4/1,3) m, u stvarnom (i pripadnom umanjenom) mjerilu. U odnosu na prethodnu studiju, zidani ispun je sličniji kvadratu. Ploština danog otvora veća je od 1,5 m<sup>2</sup> kao i u prethodnoj studiji. Duljina ispunu pored otklonjenog otvora također iznosi  $L_p=H_i/5$  te visina parapeta  $H_N=0,40$  m.

Rubni uvjeti te opterećenje usvojeno je u skladu s kalibriranim modelom opisanom u prethodnom poglavlju.

## 6.2.2. Svojstva materijala

Početna svojstva teorijskih modela materijala jednaka za sve numeričke modele, a usvojena su u skladu s kalibriranim modelima. Navedena su u tablici 6.5.

Tablica 6.5. Bitna i primijenjena početna svojstva materijala za model u ATENA-i 2D v4

Element	Model materijala (konačni element)	Svojstvo materijala	Oznaka	Vrijednost	Mjerne jedinice
Zidni element	CCSbetaMaterial (CCIsoQuad)	Tlačna čvrstoća	$f_b; f_{bh}$	15,9; 2,3	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća	$f_{bt}$	1,59	$N/mm^2$
		Poissonov omjer	$\mu$	0,05	-
		Rotated crack model	-	-	-
Mort	Interface material Model (CCIsoGap)	Početna posmična čvrstoća ziđa	$f_{v0}$	0,35; 0,70	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća ziđa	$f_{xl}$	0,45	$N/mm^2$
		Kut unutarnjeg trenja ziđa	$tg\alpha$	0,25; 0,80	
		Poissonov omjer ziđa	$\mu$	0,1	-
		Modul elastičnosti ziđa okomito na reške morta	$E$	3900	$N/mm^2$
		Deformacija pri slomu ziđa u tlaku	$\epsilon_u$	5,7	mm/m
Beton okvira	CC3DNonLinCementitious2 (CCIsoQuad)	Tlačna čvrstoća valjka	$f_c$	38,25	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća	$f_t$	3,036	$N/mm^2$
		Poissonov omjer	$\mu$	0,2	-
		Modul elastičnosti	$E$	35570	$N/mm^2$
		Plastična deformacija pri slomu	$\epsilon_u$	1,07	mm/m
		Faktor umanjenja tlačne čvrstoće nakon sloma	$r_{c,lim}$	0,20	-
		Kritični pomak pri slomu u tlaku	$w_d$	0,5	mm
		Jedinična energija sloma	$G_F$	$7,6 \times 10^{-5}$	MN/m
		Rotated crack model	-	-	-
Beton nadvoja i vertikalnog serklaža	CC3DNonLinCementitious2 (CCIsoQuad)	Tlačna čvrstoća valjka	$f_c$	25,50	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća	$f_t$	2,317	$N/mm^2$
		Poissonov omjer	$\mu$	0,2	-
		Modul elastičnosti	$E$	30320	$N/mm^2$
		Plastična deformacija pri slomu	$\epsilon_u$	0,84	mm/m
		Faktor umanjenja tlačne čvrstoće nakon sloma	$r_{c,lim}$	0,20	-
		Kritični pomak pri slomu u tlaku	$w_d$	0,5	mm
		Jedinična energija sloma	$G_F$	$5,8 \times 10^{-5}$	MN/m
		Rotated crack model	-	-	-
Armatura	Cyclic reinforcement (CCIsoTruss)	Granica tečenja	$f_y$	600,0	$N/mm^2$
		Vlačna čvrstoća	$f_t$	700,0	$N/mm^2$
		Modul elastičnosti	$E$	210000	$N/mm^2$
		Plastična deformacija pri slomu	$\epsilon_{lim}$	100	mm/m

### 6.3. Rezultati proračuna obzirom na način sloma numeričkih modela

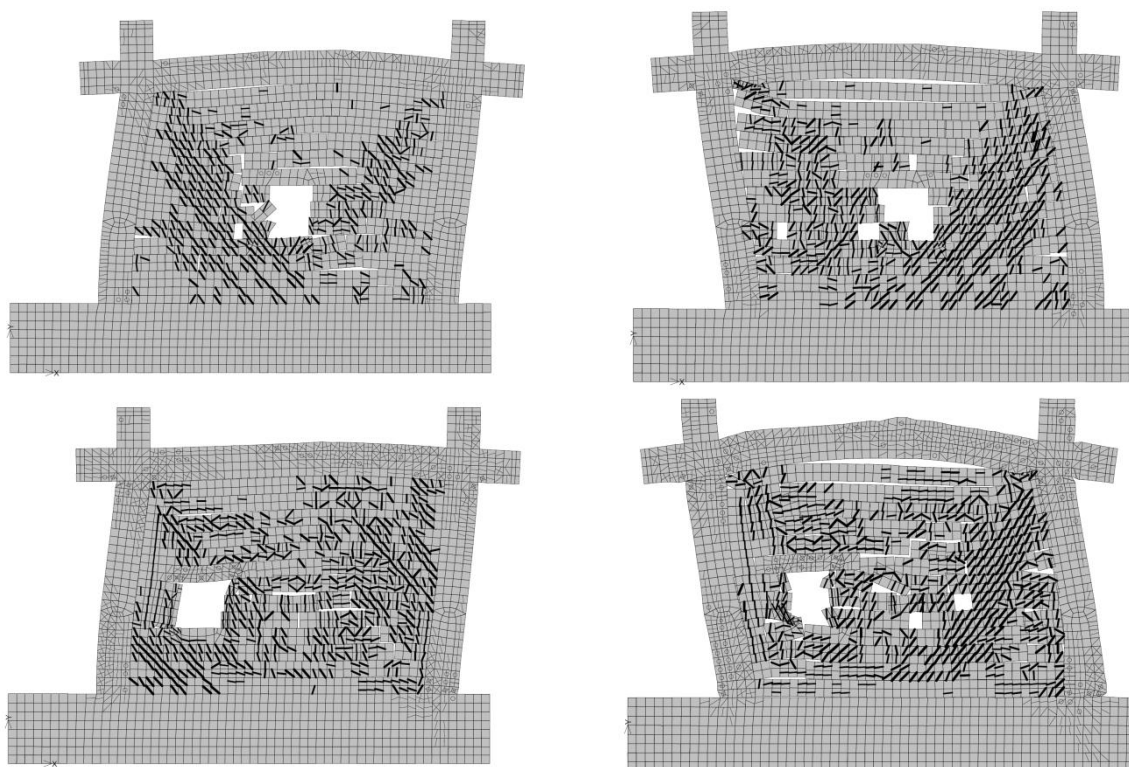
#### 6.3.1. Numerički modeli grupe IV

a) Otvori za prozor ploštine  $A_0 < 1,5 \text{ m}^2$

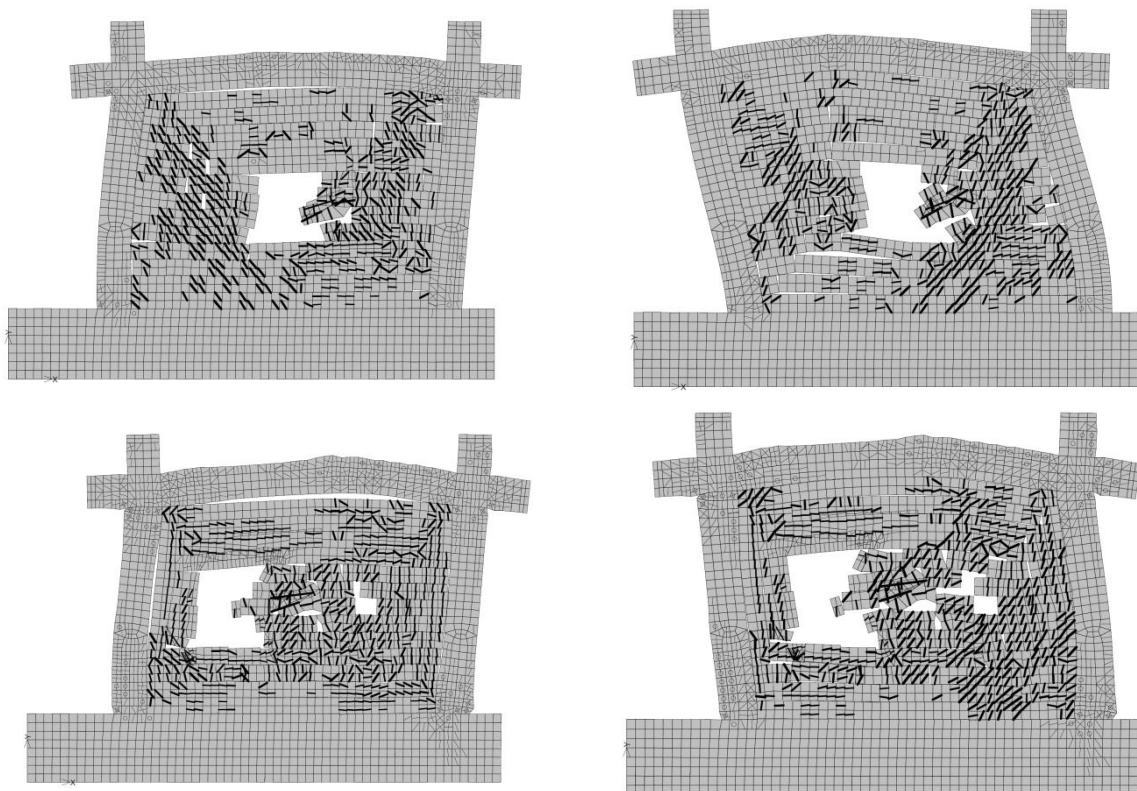
Na slikama 6.1. i 6.2. prikazana je oštećenost armirano-betonskih uzoraka sa zidanim ispunom i otvorom ploštine manje od  $1,5 \text{ m}^2$ , pred slom zidanog ispuna za  $IDR=1,0\%$ . Također, na slikama 6.3. i 6.4. prikazana je raspodjela glavnih tlačnih naprezanja za isti katni pomak, za pozitivne i negativne cikluse. U skladu s danim slikama način sloma zidanog ispuna bio je sljedeći:

- Model tip (IV/1) s otvorom u sredini pokazao je prevladavajući posmični slom zidnog stupa s dijagonalnim vlačnim pukotinama pod kutom od  $45^\circ$  od gornjeg ugla ispuna ka temeljnoj gredi te od donjeg ugla ispuna ka gornjoj gredi. Ove pukotine su dvije tlačne dijagonale koje se javljaju u zidanom ispunu. Intenzitet naprezanja je veći u dijagonali na strani opterećenja. Dogodio se i horizontalni slom reške morta u ravni iznad i ispod otvora. Vertikalni rubovi otvora se raspadaju.
- Model tip (IV/2) s otklonjenim otvorom gubi nosivost uslijed dijagonalnog vlačnog tj. posmičnog sloma zidnog stupa. Smjer pukotine je od gornjeg ugla ispuna pod kutom od  $45^\circ$ . Na strani otvora, otvor priječi put tlačne dijagonale te se naprezanja koncentriraju uz rub otvora. Smjer tlačne dijagonale na zidnom stupu jednak je kao u slučaju otvora u sredini, što znači da nije zahvaćen utjecajem otvora. Pojava druge tlačne dijagonale primjetna je pri opterećivanju sa strane gdje je otvor, kao i u slučaju otvora u sredini.
- Model tip (IV/3) s otvorom veće ploštine nego prethodni uzorci pokazuje nastanak tlačnih dijagonala (vlačnih pukotina) jednak kao i u slučaju uzorka tip (IV/1). Međutim, oštećenja na zidnom stupu su veća. Razlog tome je slabija horizontalna ravan iznad i ispod otvora koja se lomi te većinu naprezanja preuzima nastali zidni stup omeđen ovim ravninama sloma. Primjetna je pojava druge tlačne dijagonale pod kutom od  $45^\circ$  s druge strane otvora. Prevladava posmični slom s osobitim naglaskom na područje omeđeno horizontalnim slomom reške morta.
- Model tip (IV/4) s otklonjenim otvorom na strani suprotno otvoru pokazuje znatna oštećenja u području ispuna omeđenom horizontalnim slomom u ravni iznad i ispod otvora. Otvor priječi tlačnu dijagonalu, stoga se umjesto dvije dijagonale na zidnim stupovima kao u slučaju otvora u sredini, javlja jedna dijagonala na zidnom stupu i jedna na gredi. Prevladava posmični slom zidnog stupa oblikovanog horizontalnim slomom reški morta u ravni iznad i ispod otvora. Na ovome dijelu prisutan je također i horizontalni slom.

Nema znakova posmičnog sloma na armirano-betonskim okvirima.

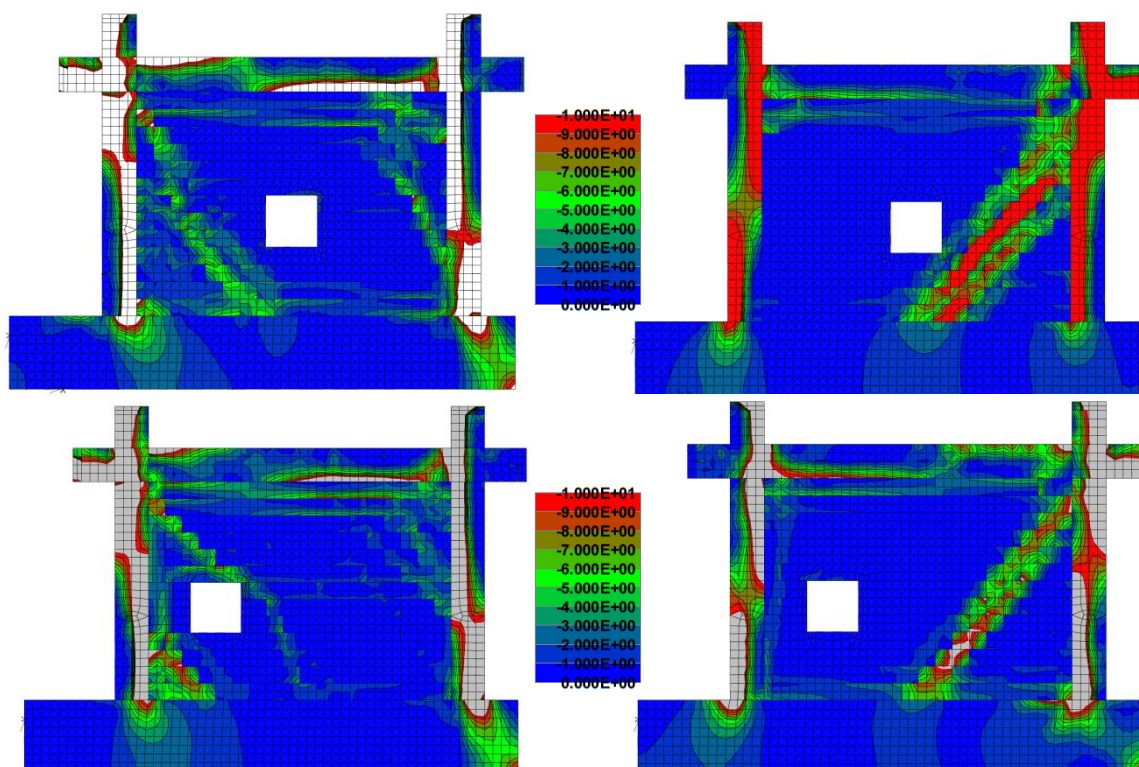


Slika 6.1. Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/1) gore i tip (IV/2) dolje

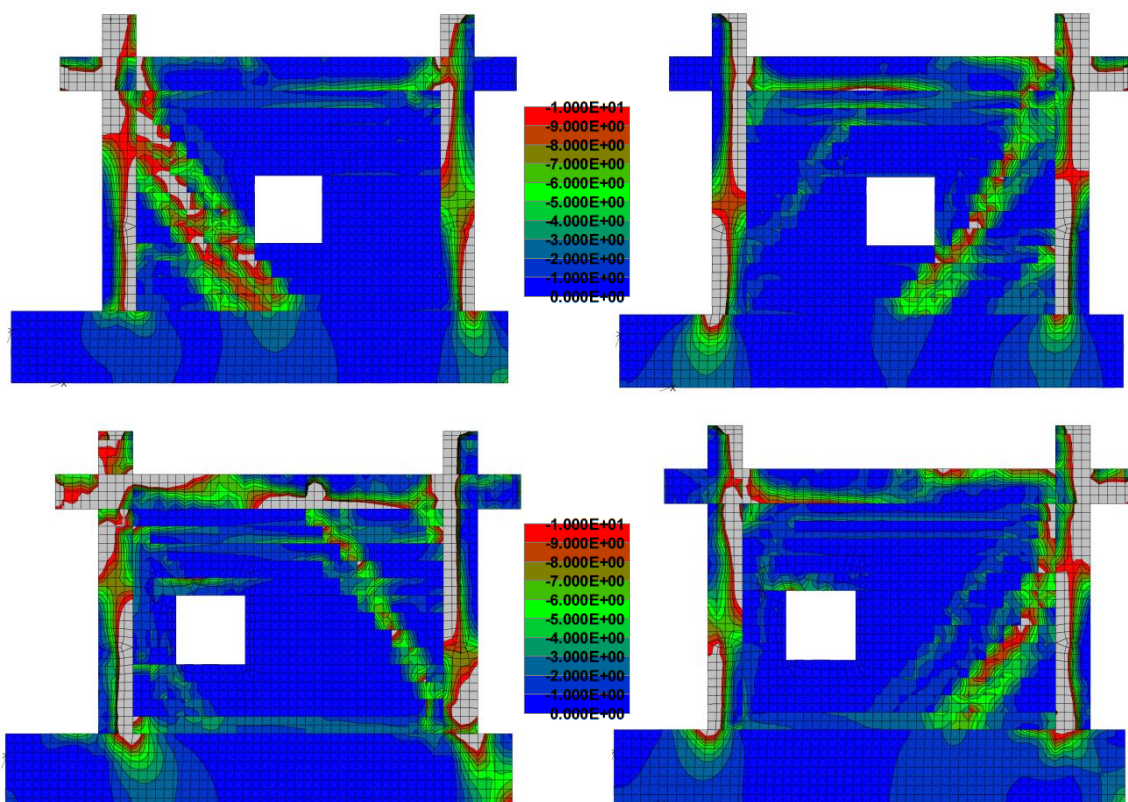


Slika 6.2. Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/3) gore i tip (IV/4) dolje





Slika 6.3. Raspodjela glavnih tlačnih naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/1) gore i tip (IV/2) dolje



Slika 6.4. Raspodjela glavnih tlačnih naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/3) gore i tip (IV/4) dolje

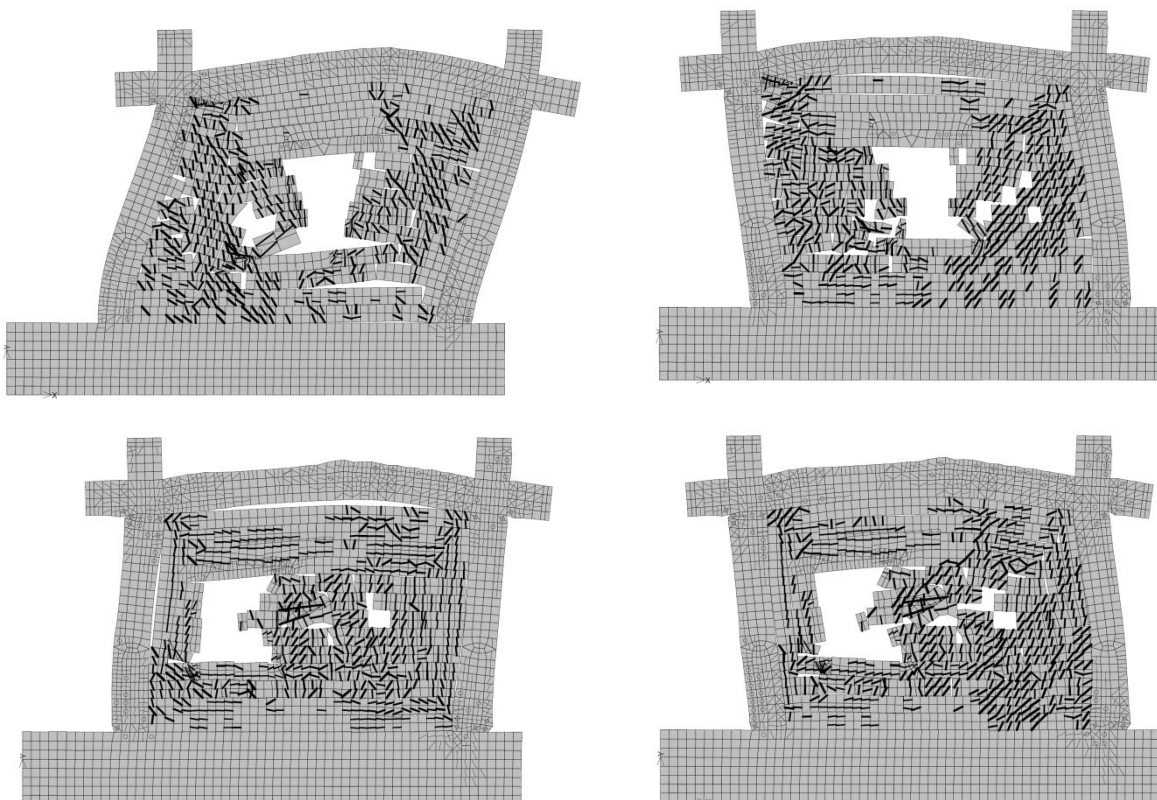


b) Otvori za prozor ploštine  $A_0 > 1,5 \text{ m}^2$

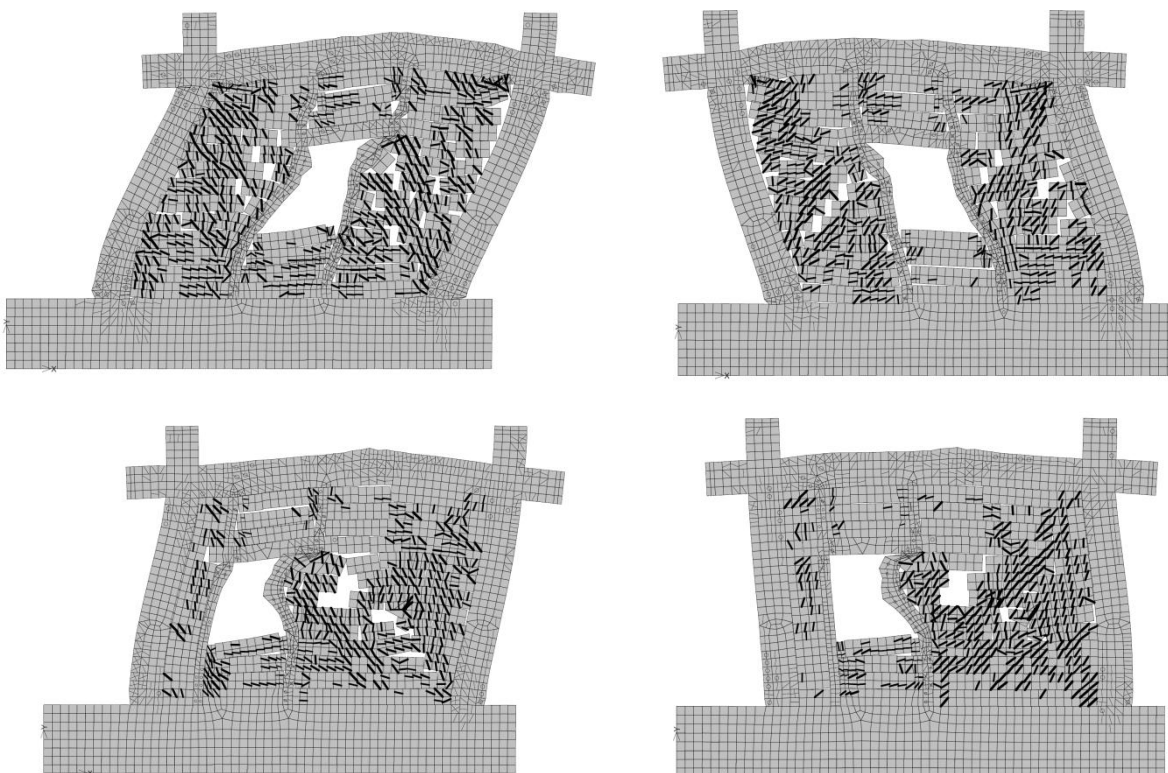
Na slikama 6.5. i 6.6. prikazana je oštećenost armirano-betonskih uzoraka sa zidanim ispunom i otvorom bez i sa vertikalnim serklažima ploštine veće od  $1,5 \text{ m}^2$ , pred slom zidanog ispuna za  $\text{IDR}=1,0\%$ . Također, na slikama 6.7. i 6.8. prikazana je raspodjela glavnih tlačnih naprezanja za isti katni pomak, za pozitivne i negativne cikluse. U skladu s danim slikama način sloma zidanog ispuna bio je sljedeći:

- Model tip (IV/5) s otvorom u sredini pokazao je oblikovanje dvaju tlačnih dijagonala pod kutom od približno  $45^\circ$  u zidnim stupovima, što je dovelo do posmičnog sloma. Također je nastala i tlačna dijagonala u zidnoj gredi iznad otvora. Najveća brojnost pukotina tj. oštećenost zidanog ispuna je u području omeđenom horizontalnim slomom reški morta iznad i ispod otvora. Rub otvora biva osobito ugrožen te se raspada. Zaključak je da su uslijed danih pukotina dijelovi ispuna pred slom postali skloni ispadanju iz ravni.
- Model tip (IV/6) s otklonjenim otvorom gubi nosivost posmičnim slomom zidnog stupa. Prethodno tome nastao je horizontalni slom reški morta u ravni iznad i ispod otvora te unutar oblikovanog zidnog stupa. Nastanak druge tlačne dijagonale u zidnom stupu priječi otvor. Nastaje tlačna dijagonala u zidnoj gredi iznad otvora. Rub oko otvora se raspada. Zaključak je da su uslijed danih pukotina dijelovi ispuna pred slom postali skloni ispadanju iz ravni.
- Model tip (IV/7) s vertikalnim serklažima i otvorom u sredini nosivost gubi uslijed posmičnog sloma zidnog stupa predodređenog vertikalnim serklažima. Prema slikama oštećenja vidljivo je kako se vertikalni serklaž opire pomicanju dijelova ispuna te horizontalnom slom reške morta. Nastala je tlačna dijagonala su svakom zidnom stupu od gornjeg ugla ispuna ka stopi serklaža. Prisutne su i tlačne dijagonale na zidnoj gredi iznad i ispod otvora. Oštećenja su uglavnom ograničena na zidne stupove.
- Model tip (IV/8) s otklonjenim otvorom i vertikalnim serklažima nosivost također gubi uslijed posmičnog sloma. Dijagonalne vlačne pukotine nastaju na zidnom stupu, od gornjeg ugla ispuna ili serklaža ka donjim nasuprotnim uglovima ispuna ili serklaža. Zidni stup je bio predodređen izvedbom vertikalnih serklaža. Glavnina oštećenja je bila koncentrirana pored otvora na strani većeg dijela ispuna. Zbog njegova sloma nastalo je tečenje armirano-betonskog okvira.

Na armirano-betonskom okviru nisu opažene posmične pukotine. Utjecaj vertikalnih serklaža je u usmjeravanju oštećenja te u jasnom izdvajanju elemenata zidnog ispuna koji imaju bitnu nosivu ulogu. Kada vertikalnih serklaža nema rubovi otvora se raspadaju te je ispun skloniji ispadanju van ravni.

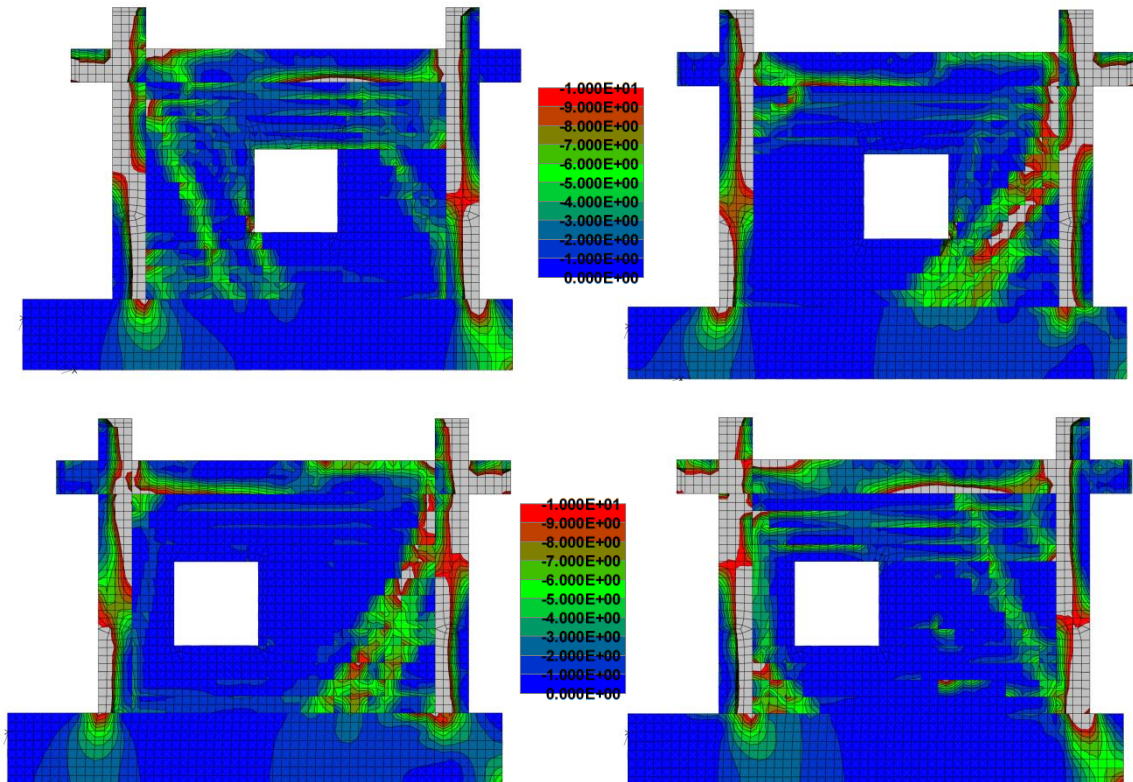


Slika 6.5. Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/5) gore i tip (IV/6) dolje

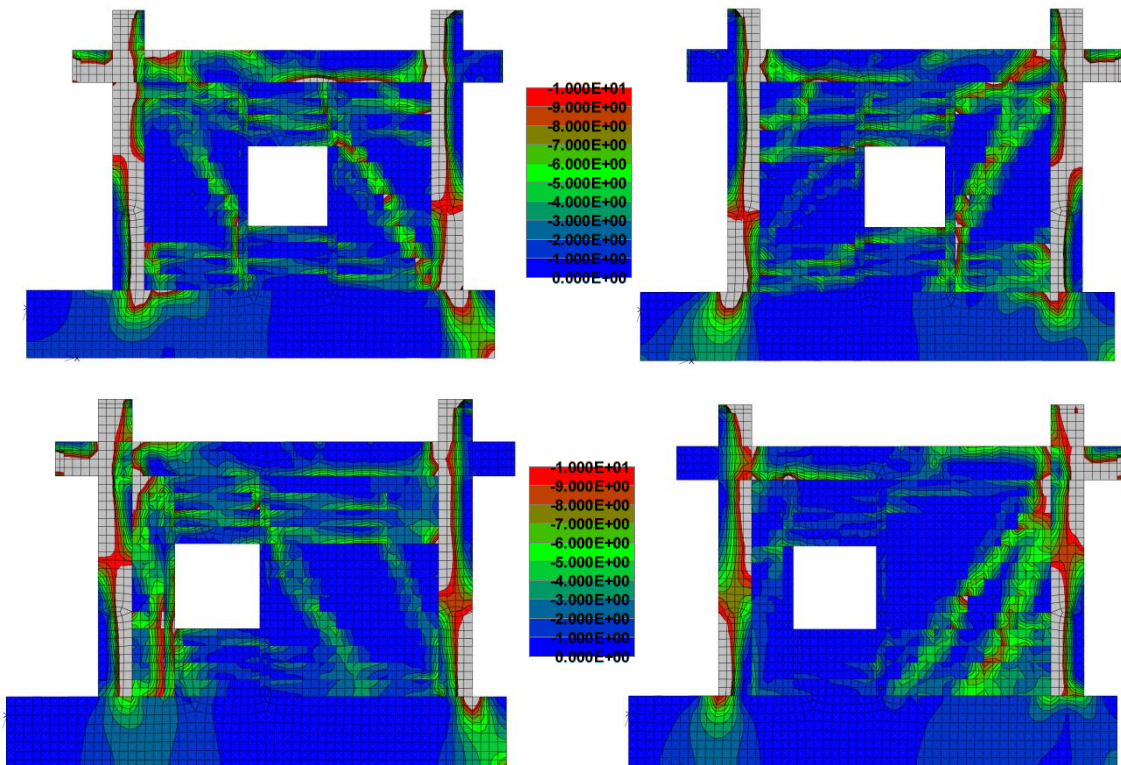


Slika 6.6. Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/7) gore i tip (IV/8) dolje





Slika 6.7. Raspodjela glavnih tlačnih napreznja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/5) gore i tip (IV/6) dolje



Slika 6.8. Raspodjela glavnih tlačnih napreznja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/7) gore i tip (IV/8) dolje

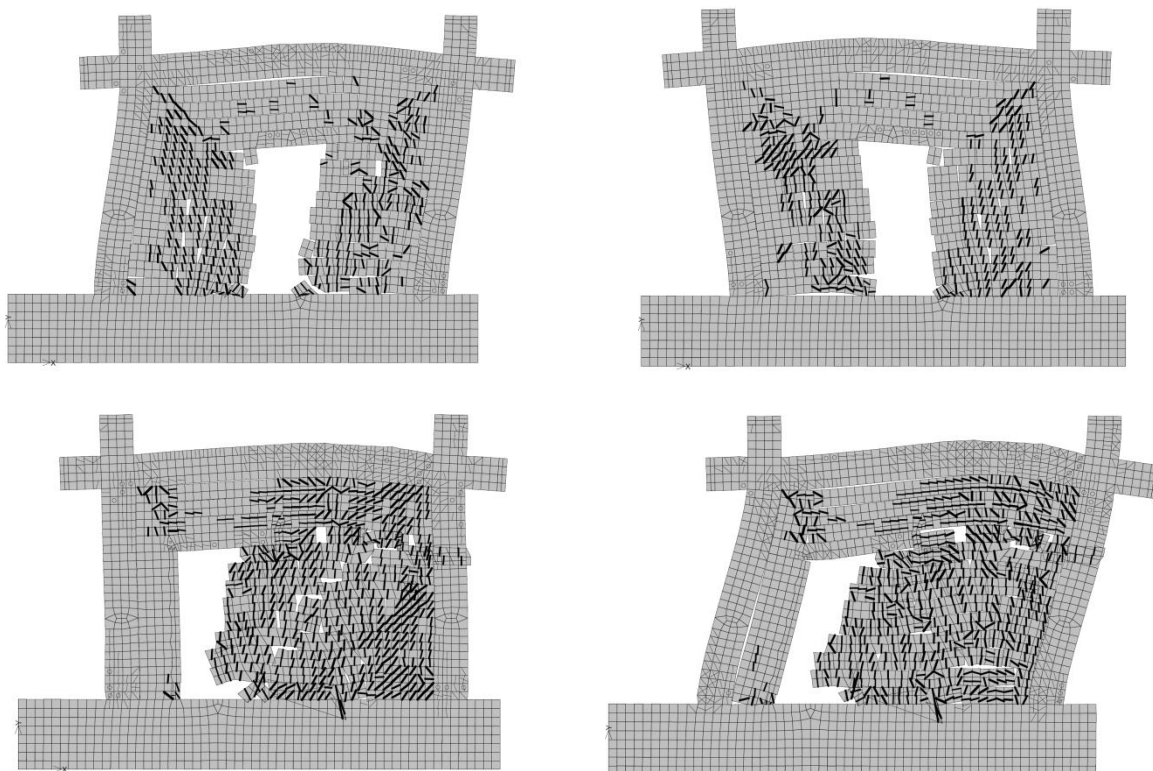
c) Otvori za prozor ploštine  $A_o > 1,5 \text{ m}^2$

Na slikama 6.9. i 6.10. prikazana je oštećenost armirano-betonskih uzoraka sa zidanim ispunom i otvorom bez i sa vertikalnim serklažima ploštine veće od  $1,5 \text{ m}^2$ , pred slom zidanog ispuna za  $\text{IDR}=1,0\%$ . Također, na slikama 6.11. i 6.12. prikazana je raspodjela glavnih tlačnih naprezanja za isti katni pomak, za pozitivne i negativne cikluse. U skladu s danim slikama način sloma zidanog ispuna bio je sljedeći:

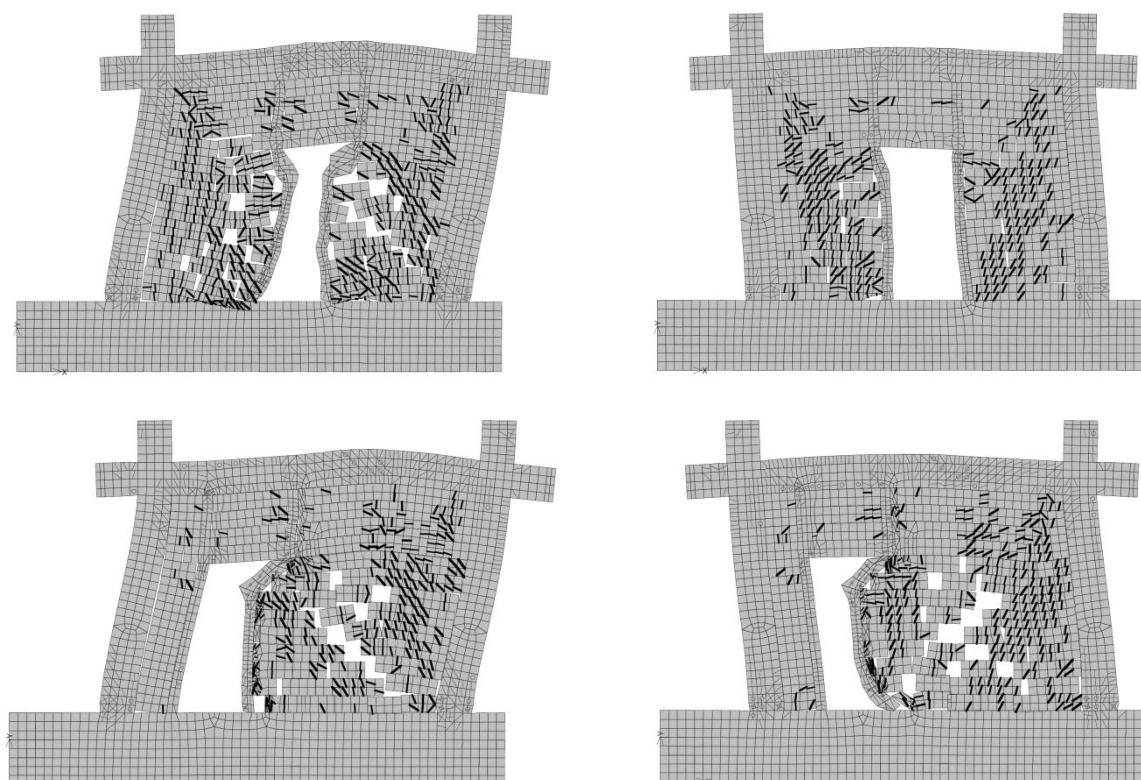
- Model tip (IV/9) s otvorom u sredini bez vertikalnih serklaža, nosivost gubi posmičnim slomom zidnog stupa oblikovanog horizontalnim slomom reške morta iznad otvora. Dijagonalna vlačna pukotina na zidnom stupu je pod kutom od  $65^\circ$ . Prisutno je drobljenje u gornjem uglu ispuna.
- Model tip (IV/10) s otklonjenim otvorom bez vertikalnih serklaža, nosivost također gubi posmičnim slomom zidnog stupa oblikovanog horizontalnim slomom reške morta iznad otvora. Dijagonalna vlačna pukotina na zidnom stupu je pod kutom od  $45^\circ$ . Prisutno je drobljenje u gornjem uglu ispuna te znatno raspadanje ispuna. U odnosu na prethodni model, oštećenja su ograničena na jedan dio ispuna.
- Model tip (IV/11) s vertikalnim serklažima i otvorom u sredini, nosivost gubi posmičnim slomom zidnog stupa, koji je za razliku od modela tip (IV/9), predodređen izvedbom vertikalnog serklaža. Iako je prisutna tlačna dijagonala iznad otvora, glavnina oštećenja koncentrirana je na zidne stupove, osobito u blizini otvora. Prisutno je znatno deformiranje vertikalnog serklaža, što upućuje na to da bi ga trebalo ojačati.
- Model tip (IV/12) s vertikalnim serklažima i otklonjenim otvorom, nosivost gubi posmičnim slomom zidnog stupa, koji je za razliku od modela tip (IV/10), predodređen izvedbom vertikalnog serklaža. Iako je prisutna tlačna dijagonala iznad otvora, glavnina oštećenja također je kao i u prethodnom slučaju koncentrirana na zidne stupove, osobito u blizini otvora. Također je prisutno i znatno deformiranje vertikalnog serklaža, što upućuje na to da bi ga trebalo ojačati.

U načinu sloma vertikalni serklaži imaju ulogu da sprječavaju horizontalni slom reške morta oslabljene prisutnošću otvora. Također, povećavaju stabilnost ispuna i preveliko raspadanje pri većim katnim pomacima. U oba slučaja, s otvorom za prozor ili vrata, putem vertikalnih serklaža oblikovan je zidni stup čitavom visinom ispuna, za razliku od slučaja kada vertikalni serklaž nije prisutan. Premda prevladava posmični slom za sve modele, koncentracija štete te smjer vlačnih pukotina nije jednak. Smjer vlačnih pukotina ovisio je o izmjerama zidnog stupa. U usporedbi sa slučajem kada vertikalnog serklaža nema, oštećenost ispuna znatnija, svakako bi u skladu s danim slikama, trebalo dodatno ojačati serklaž povećanjem poprečnog presjeka, kvalitete betona, armature i sl.

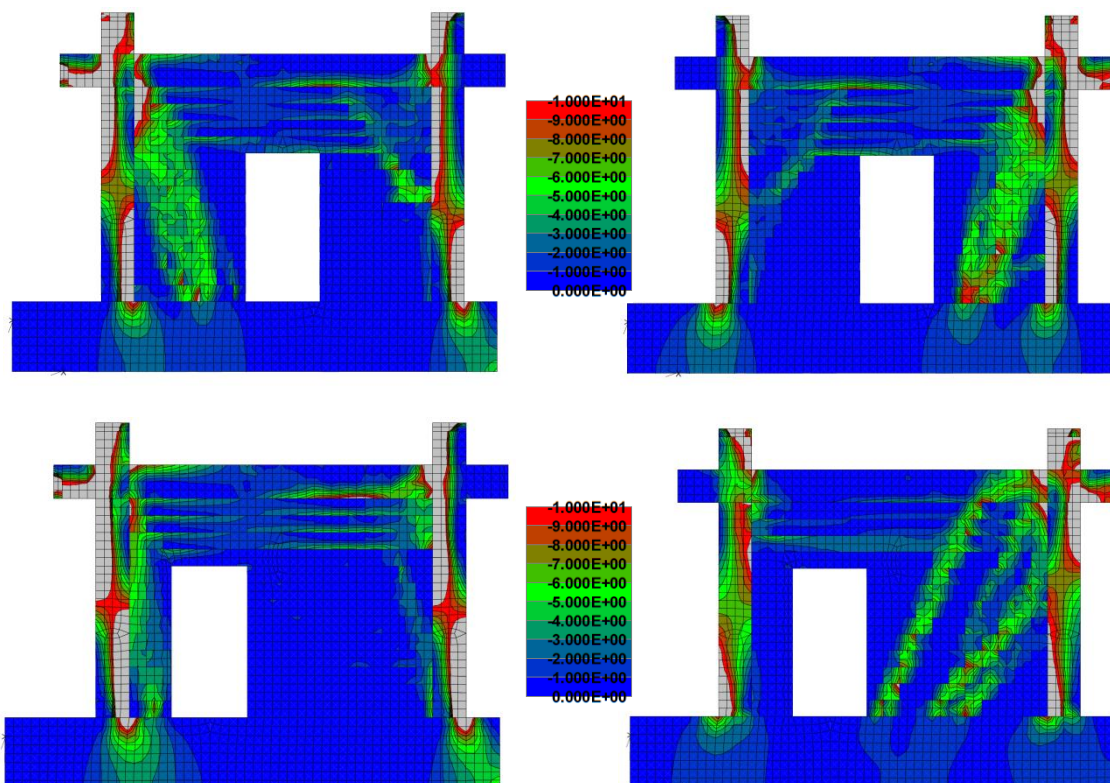




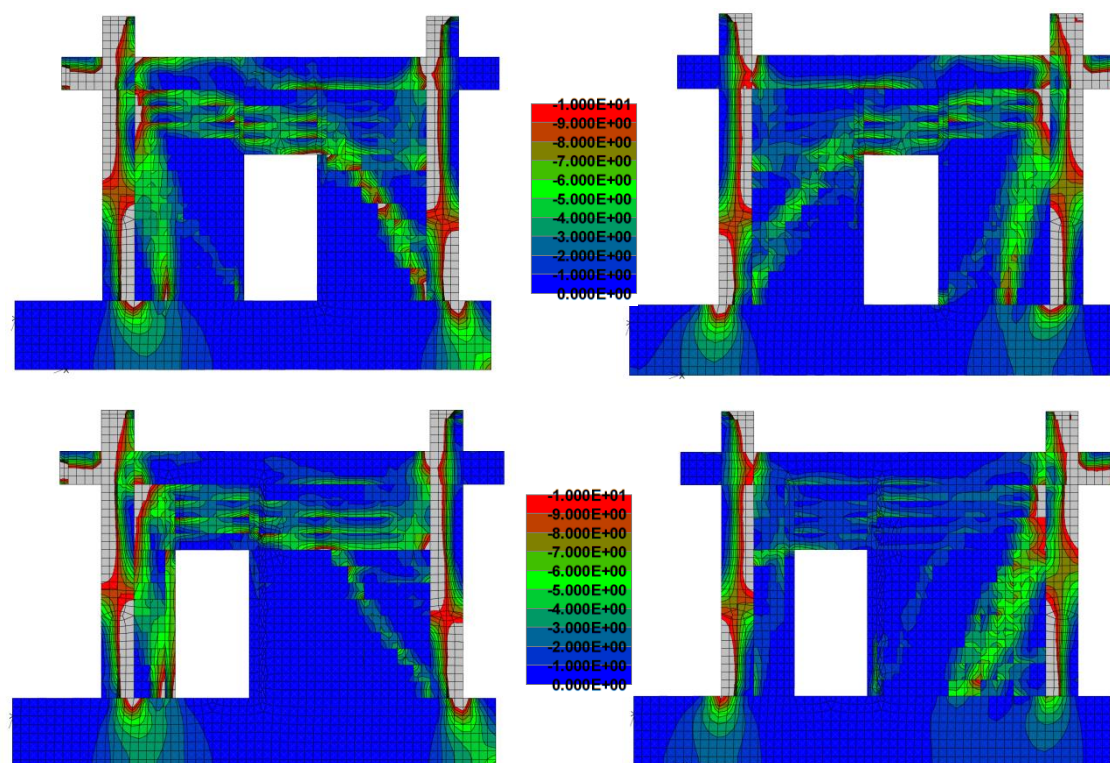
**Slika 6.9.** Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/9) gore i tip (IV/10) dolje



**Slika 6.10.** Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/9) gore i tip (IV/10) dolje



Slika 6.11. Raspodjela glavnih tlačnih naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/11) gore i tip (IV/12) dolje



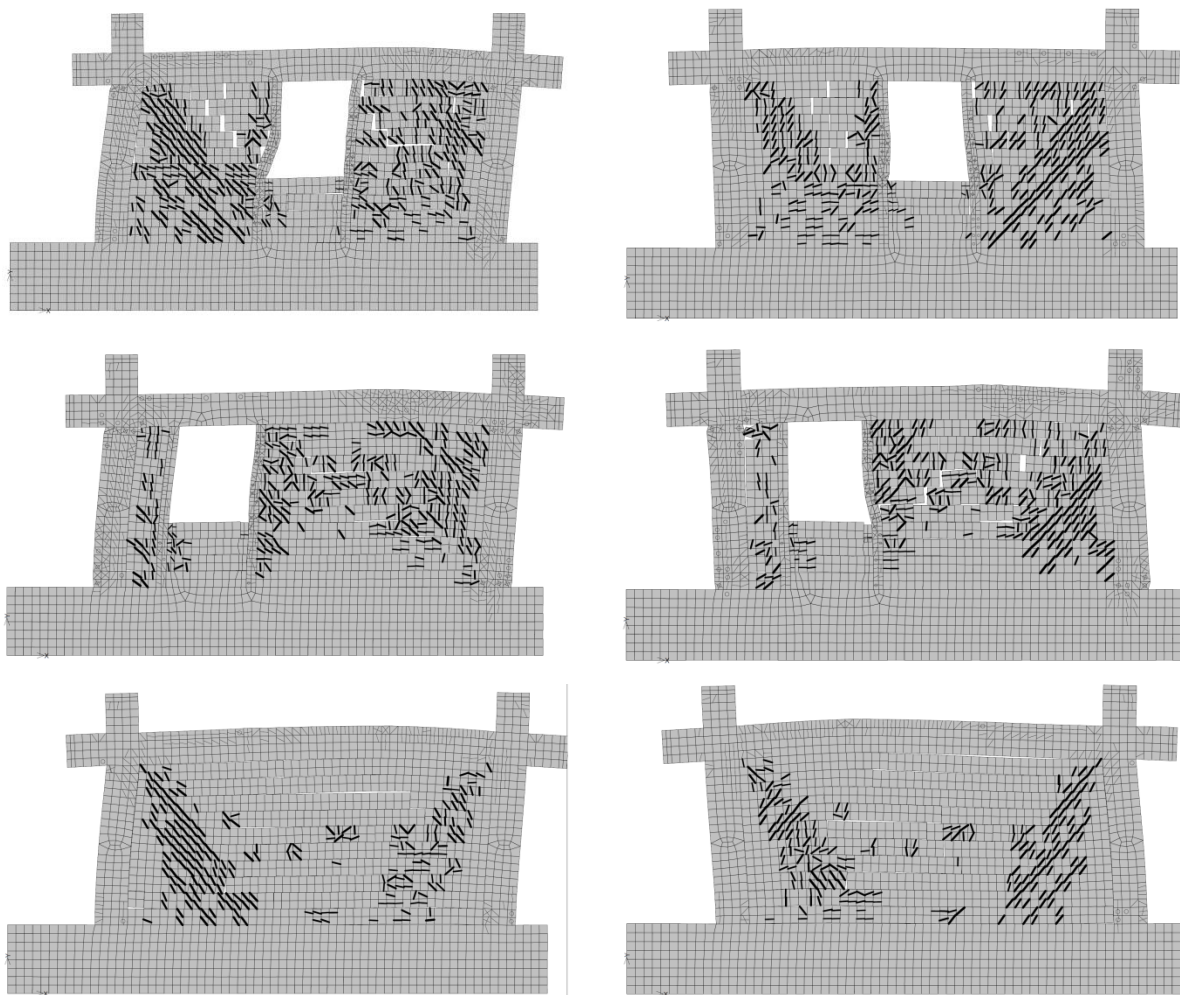
Slika 6.12. Raspodjela glavnih tlačnih naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (IV/11) gore i tip (IV/12) dolje



### 6.3.2. Numerički modeli grupe V

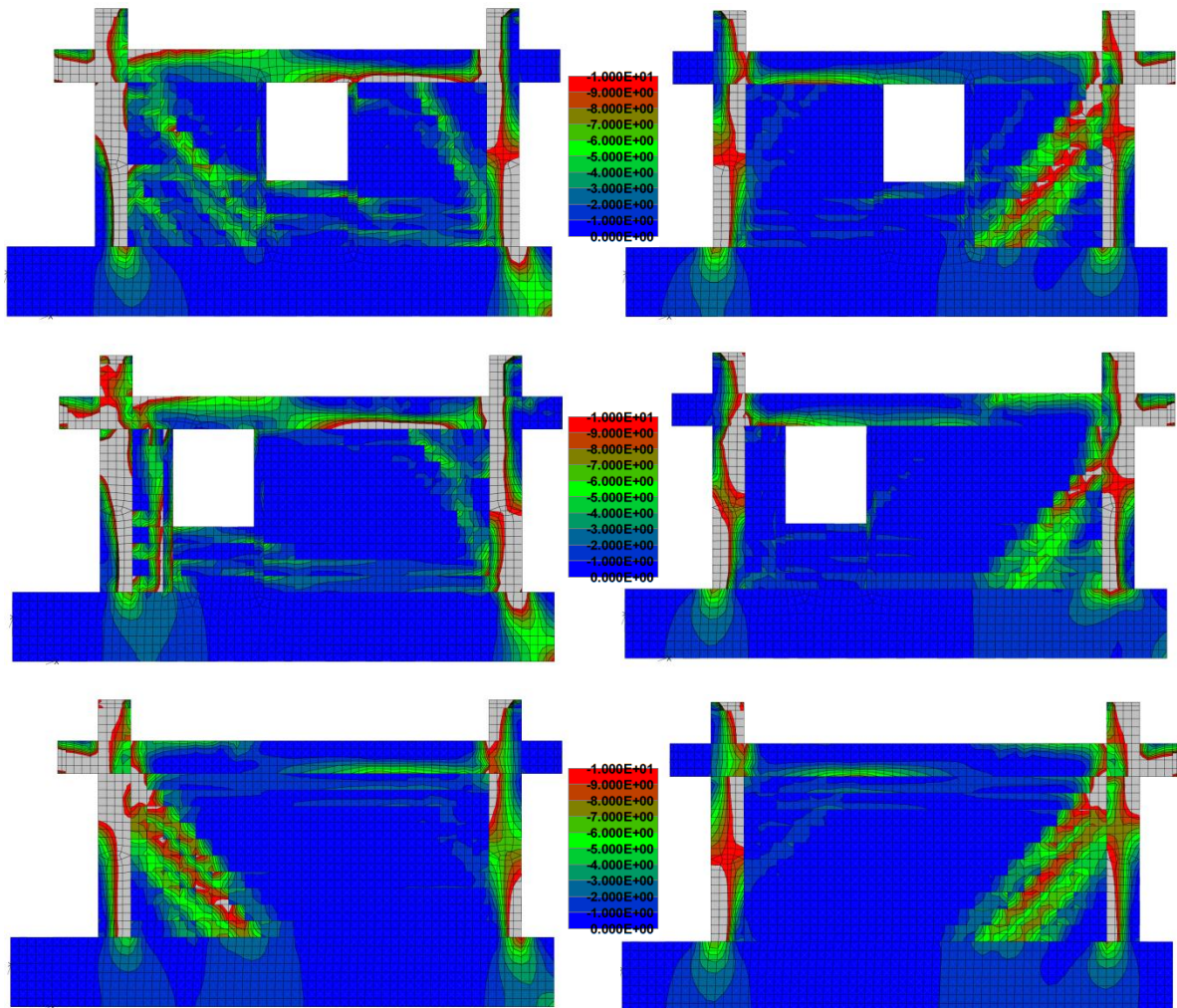
Modeli grupe V su modeli s vertikalnim serklažima i otvorom za prozor, putem kojih je istražen utjecaj otvora s novim odnosom izmjera zidanog ispuna, tj.  $\alpha=L_i/H_i=0,53$ . Način sloma i raspodjela glavnih tlačnih naprezanja prikazana je na slikama 6.13. i 6.14.

Prema slikama gubitak nosivosti zidanog ispuna za slučaj otvora u sredini bio je posmični slom s dijagonalnim vlačnim pukotinama na zidnim stupovima omeđenih vertikalnim serklažima. Prisutne su dijagonalne pukotine na zidnim stupovima, koje su dovele do sloma i jedna na zidnoj gredi ispod otvora. U slučaju otklonjenog otvora, dogodio se prevladavajući posmični slom, ali i slom klizanjem po reškama morta zidnog stupa. Opažena je jedna tlačna dijagonala od gornjeg ugla ispuna ka donjoj gredi, pod kutom od  $45^\circ$ . U slučaju punog ispuna prevladava klizanje po horizontalnim reškama morta i pomični slom uslijed dijagonalnih vlačnih pukotina. Prevladavaju vlačne savojne i tlačne pukotine na okviru. Na spoju stupa i gornje grede primijećen je mogući posmični slom na stupu okvir s ispunom.



Slika 6.13. Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (V/1), tip (V/2) i tip (V/3)





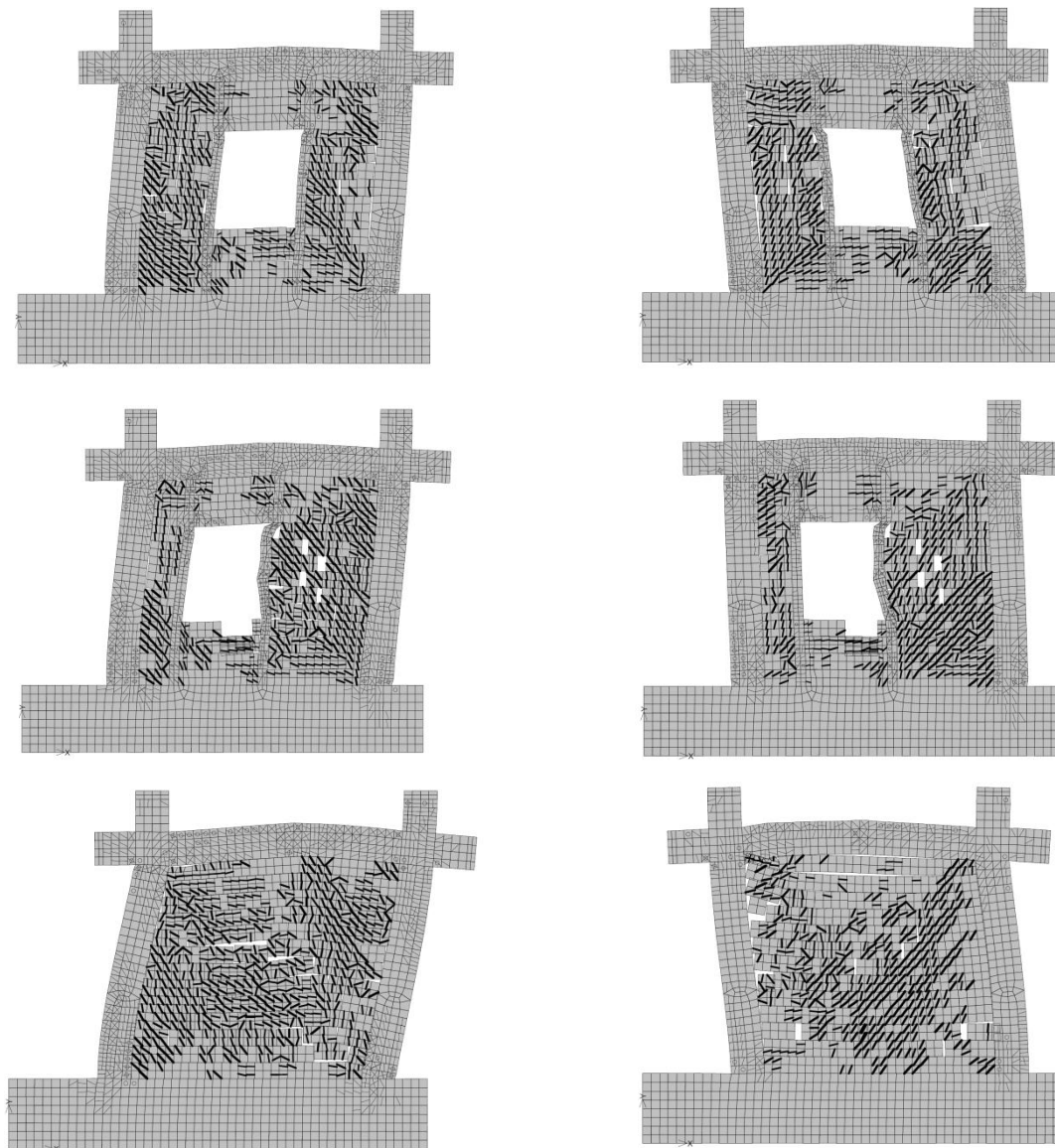
Slika 6.14. Raspodjela glavnih tlačnih napreznja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (V/1), tip (V/2) i tip (V/3)

### 6.3.3. Numerički modeli grupe VI

Modeli grupe VI su modeli s vertikalnim serklažima i otvorom za prozor, putem kojih je istražen utjecaj otvora i vertikalnih serklaža s dodatnim odnosom izmjera zidanog ispuna, tj.  $\alpha=L_1/H_1=0,93$ . Način sloma i raspodjela glavnih tlačnih napreznja prikazana je na slikama 6.15. i 6.16.

Posmični slom punog zidanog ispuna, razlikuje se od posmičnog sloma zidanog ispuna s otklonjenim i s otvorom u sredini ispuna. Vertikalni serklaži oko otvora su kao i u prethodnim slučajevima predodredili zidne stupove. Otklonjeni otvor spriječio je dodatni zidni stup, stoga je u zidanom ispuna nastala samo jedna dijagonala u zidnom stupu te dvije u zidnoj gredi. Dijagonala u zidnom stupu je bila dominantna. U slučaju otvora u sredini, nastale su dvije tlačne dijagonale na zidnom stupu i dvije na zidnoj gredi.

Armirano-betonski okvir nije pokazao znakove posmičnih pukotina.



Slika 6.15. Oštećenost pred slom za IDR=1,0 % modela tip (VI/1), tip (VI/2) i tip (VI/3)

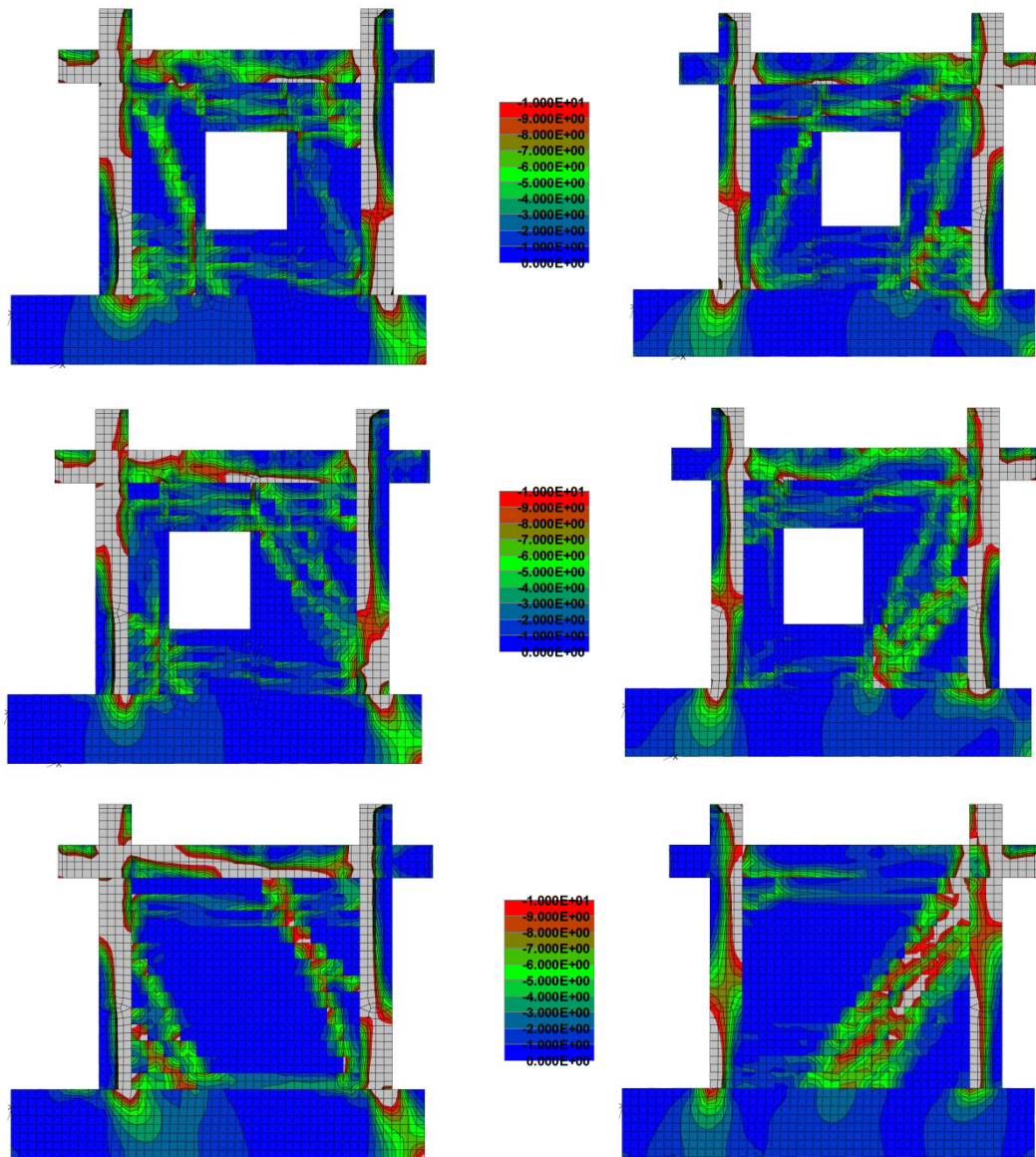
#### 6.3.4. Diskusija o slomu zidanog ispuna

Način sloma pokazao se ovisnim o vertikalnim serklažima, smještaju i vrsti otvora te o izmjerama zidanog ispuna tj. armirano-betonskog okvira.

##### a) Utjecaj vertikalnih serklaža

Vertikalni serklaž predodredio je izmjere zidnog stupa unutar ispuna te time umanjio utjecaj vrste otvora na način sloma, pod uvjetom da je sačuvao čvrstoću. Spriječio je horizontalan slom reške morta u ravni iznad i ispod otvora. Ispun nije bio podložan složenom načinu sloma. Obzirom na vrstu oštećenja i geometriju zidnog stupa prevladavao je posmični slom. Zbog vertikalnog serklaža predodređeni zidni stup bio je veće ploštine nego kada serklaža nema, kada nastaje zidni stup visine otvora. Time se oštećenja raspodjeljuju na veću ploštinu te se njihov utjecaj ublažava, što se odražava na stabilnost dijelova ispuna.





**Slika 6.16.** Raspodjela glavnih tlačnih naprezanja pred slom za IDR=1,0 % modela tip (VI/1), tip (VI/2) i tip (VI/3)

b) Utjecaj smještaja i vrste otvora

Smještaj i vrsta otvora znatno utječu na način sloma ukoliko nema vertikalnih serklaža, jer o širini i visini otvora te njegovu smještaju ovise izmjere zidnog stupa. Kada serklaža nema, ispun je podložan složenom načinu sloma. To se prvenstveno očituje horizontalnim slomom reške morta u ravni iznad i ispod otvora čime se oblikuju zidni stupovi i grede. Slom zidnog stupa doveo je do sloma čitavog ispuna. Ukoliko su prisutni serklaži ne dolazi do horizontalnog sloma, ali se u blizini otvora javlja veća brojnost pukotina tj. drobljenja ispuna. Omeđeni parapet također je na sebe preuzeo dio oštećenja. Zidne grede oblikovane iznad otvora uglavnom nisu bile oštećene, ali se putem njih opterećenje prenosilo na zidne stupove. Otklonjeni otvor blokirao je razvoj tlačne dijagonale.

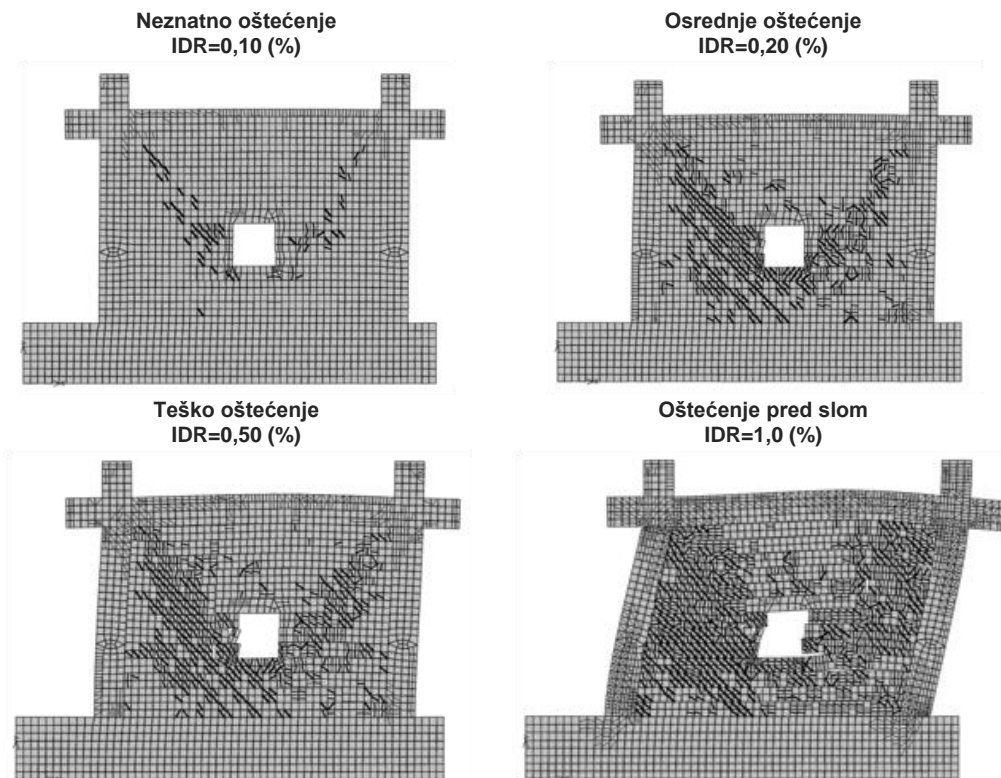
c) Utjecaj odnosa izmjera zidanog ispuna

Odnos izmjera zidanog ispuna utjecao je zajedno s otvorom i vertikalnim serklažima na izmjere zidnog stupa. Kod širih ispuna prve i druge grupe, način sloma punog ispuna bio je slom klizanjem po reškama morta s kosim vlačnim pukotinama od uglova ispuna prema ravni horizontalnog sloma reške morta, dok je kod približno kvadratnog ispuna, slom bio posmični. Pokazalo se da armirano-betonski okviri sa zidanim ispunom grupe V imaju tendenciju ka posmičnom slomu na stupu u blizini spoja s gornjom gredom.

d) Kose vlačne pukotine

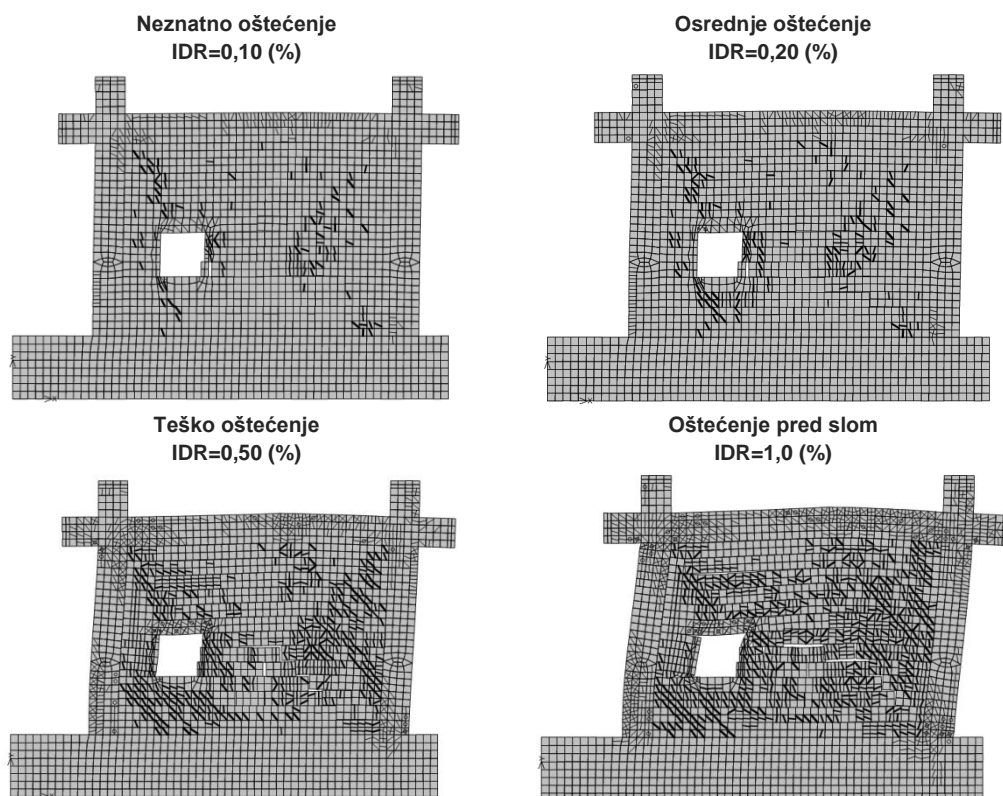
Dijagonalne i ne-dijagonalne kose vlačne pukotine su, ako su izmjere zidnog stupa dozvoljavale, nastale pod kutom od  $45^\circ$  prema horizontali. U slučaju omeđenog otvora za prozor smještenog u sredini, nastale su dvije glavne ne-dijagonalne vlačne pukotine. One su se razvile s početkom u donjem uglu otvora i krajem u gornjem uglu ispuna. Produžile su se na parapet. Za slučaj bez vertikalnih serklaža završetak pukotine je bio u dodiru sa stupom, na horizontalnoj ravni sloma morta iznad otvora. Otklonjeni otvor, sa serklažom ili bez, blokirao je razvoj tlačne dijagonale. U slučaju otvora za vrata u sredini, nastala je dijagonalna vlačna pukotina na zidnom stupu. Za slučaj punog zidanog ispuna, kose pukotine su nastajale s počecima u blizini gornjih i donji uglova ispuna.

Na slikama 6.20. do 6.31. vidljiva su oštećenja ispuna sa i bez vertikalnog serklaža, time i utjecaja vertikalnog serklaža, modela grupe IV.

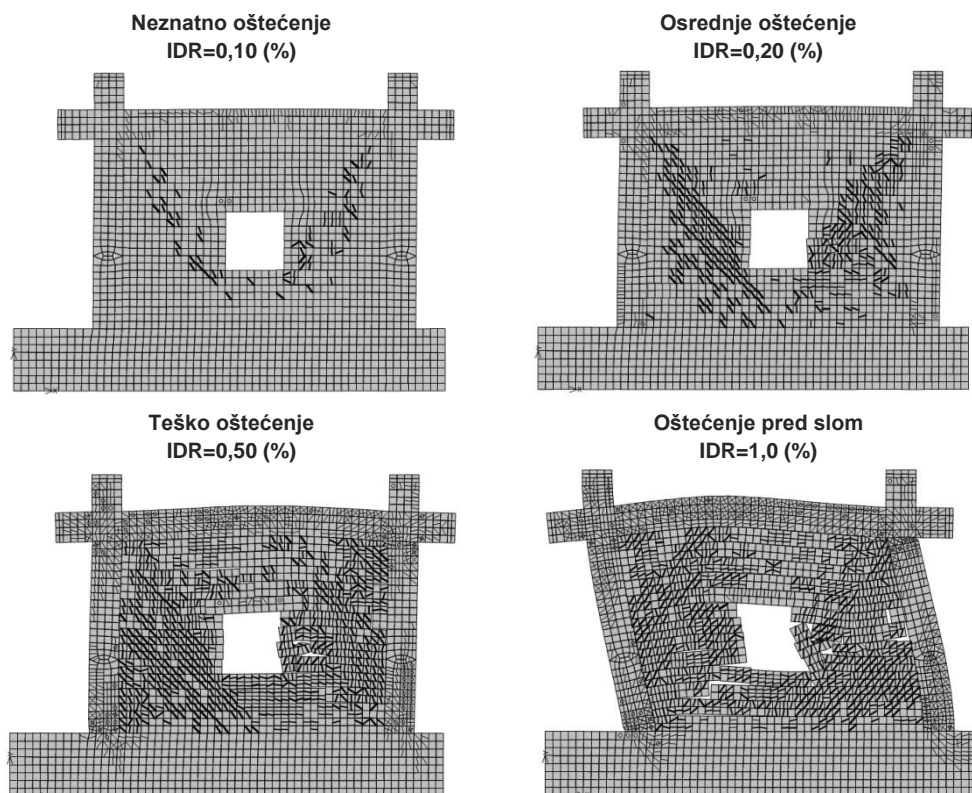


Slika 6.17. Razine oštećenja modela tip (IV/1) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)

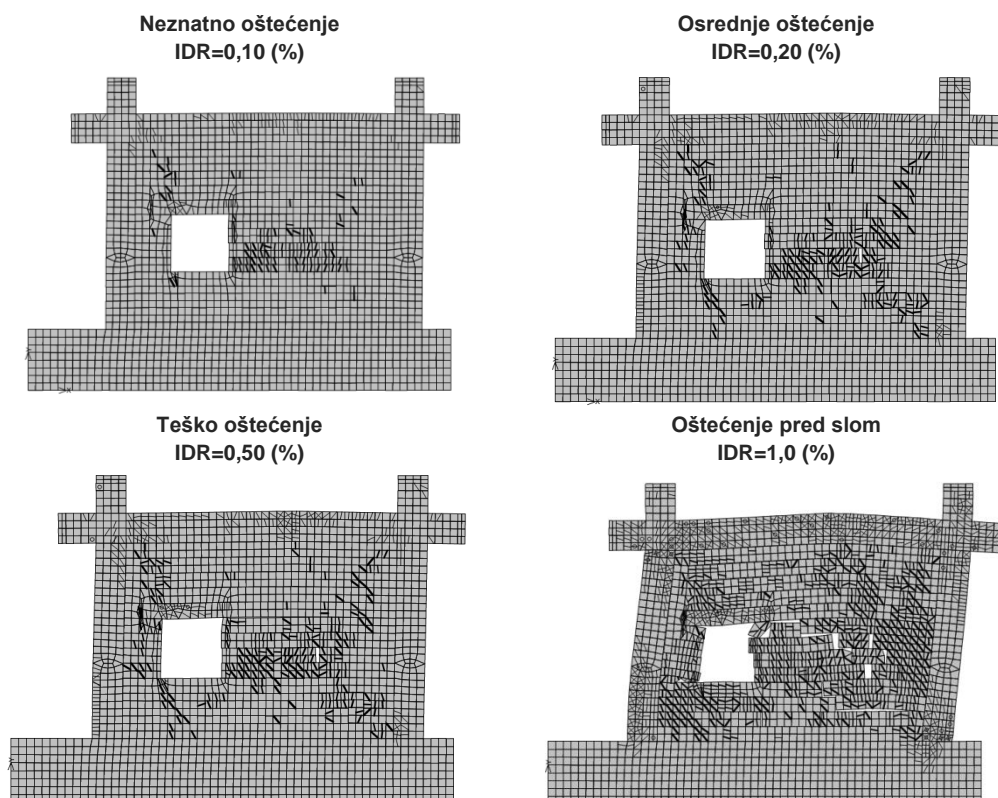




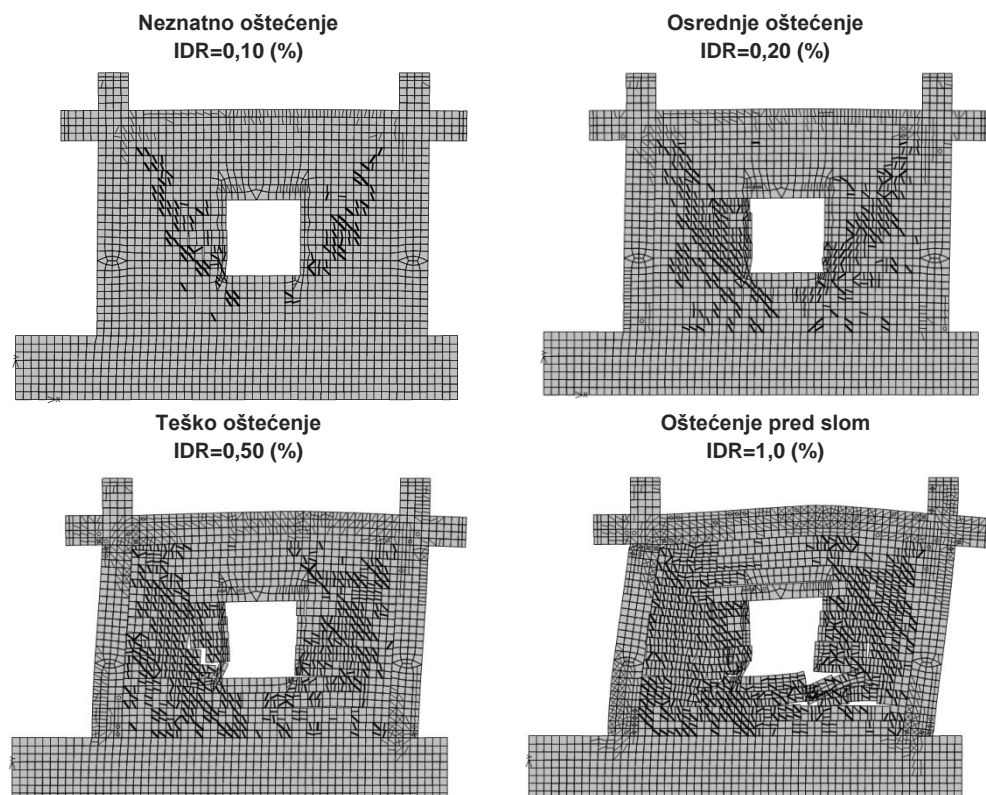
Slika 6.18. Razine oštećenja modela tip (IV/2) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)



Slika 6.19. Razine oštećenja modela tip (IV/3) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)

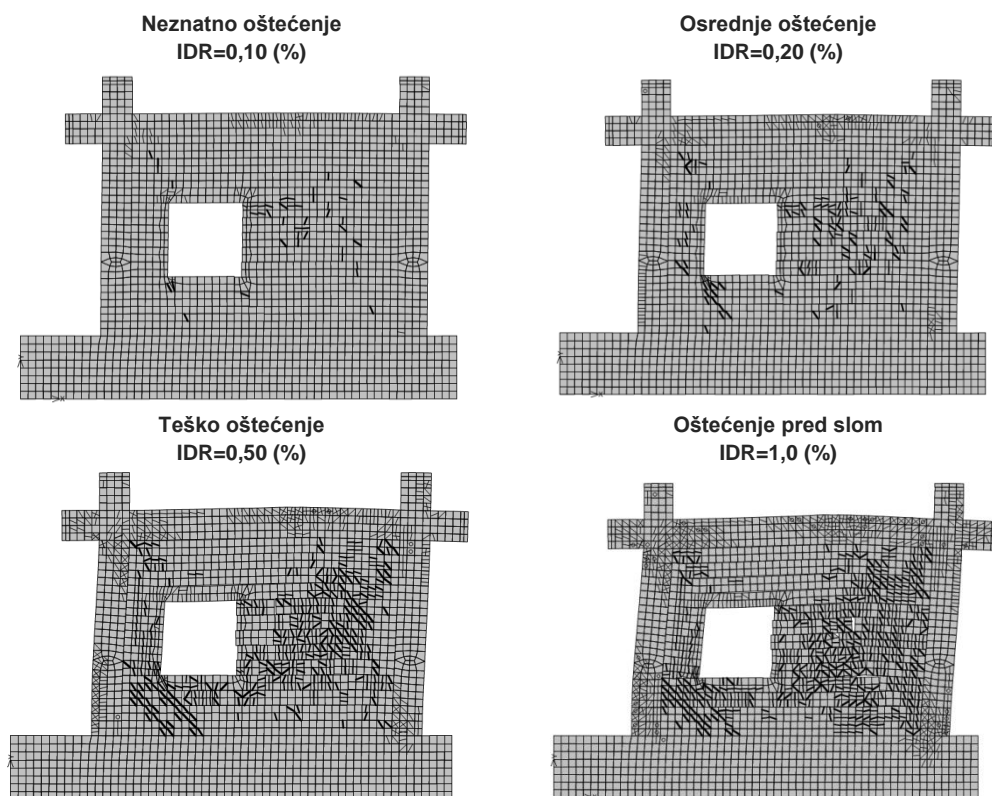


Slika 6.20. Razine oštećenja modela tip (IV/4) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)

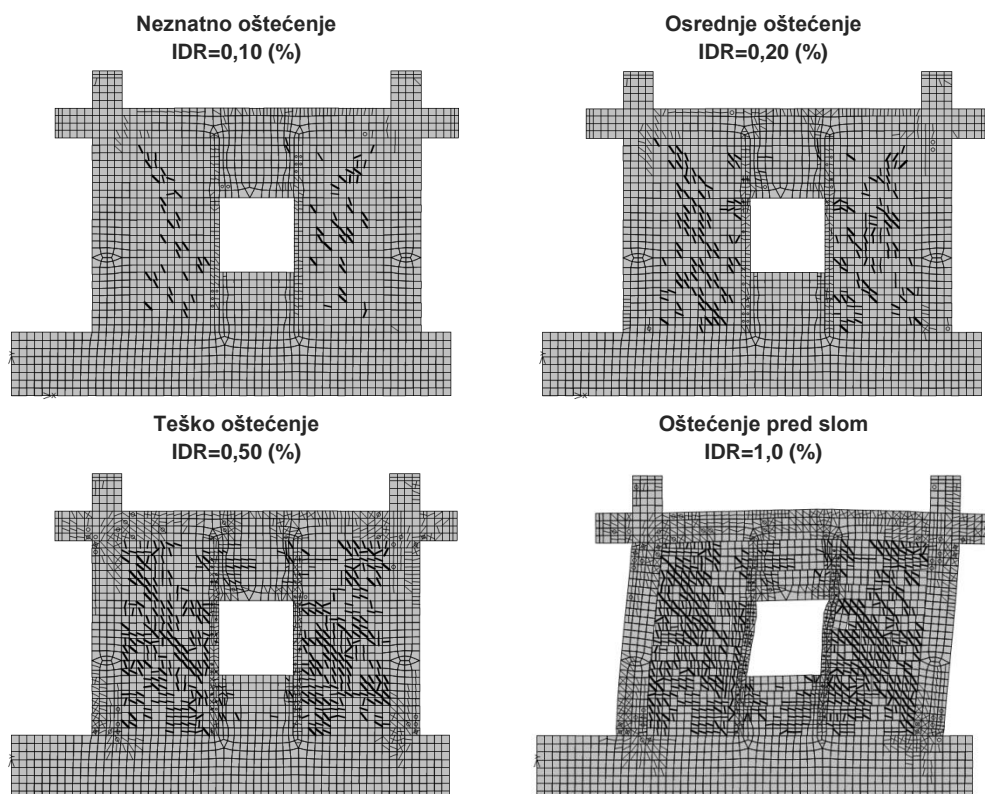


Slika 6.21. Razine oštećenja modela tip (IV/5) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)



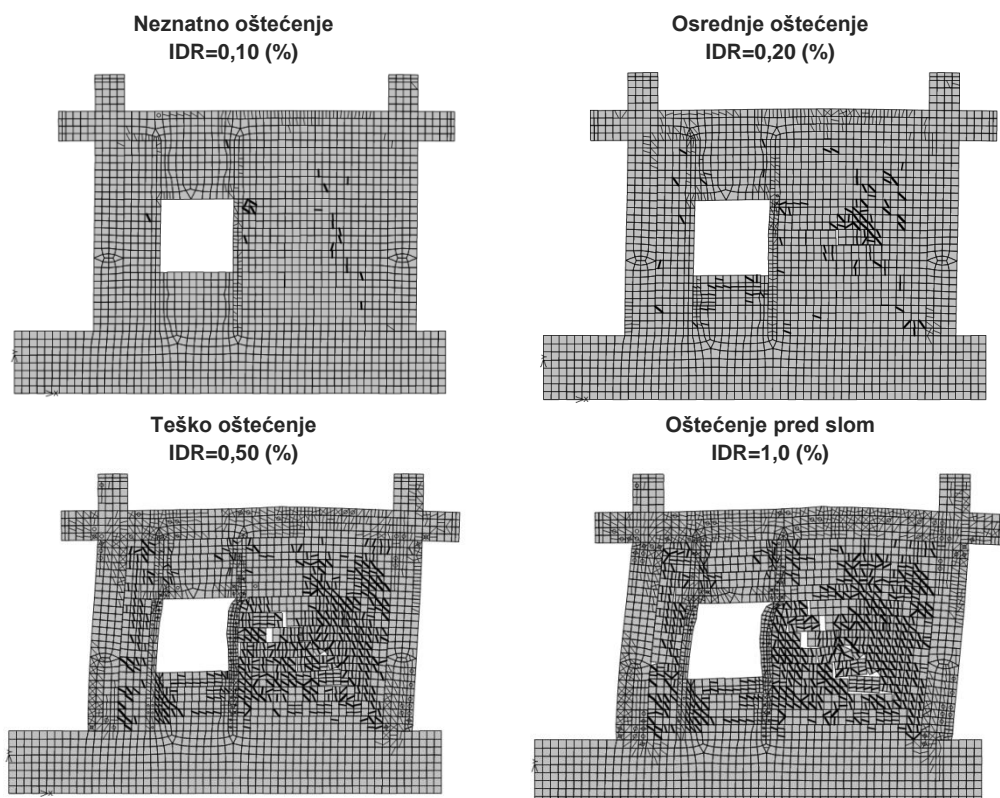


Slika 6.22. Razine oštećenja modela tip (IV/6) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)

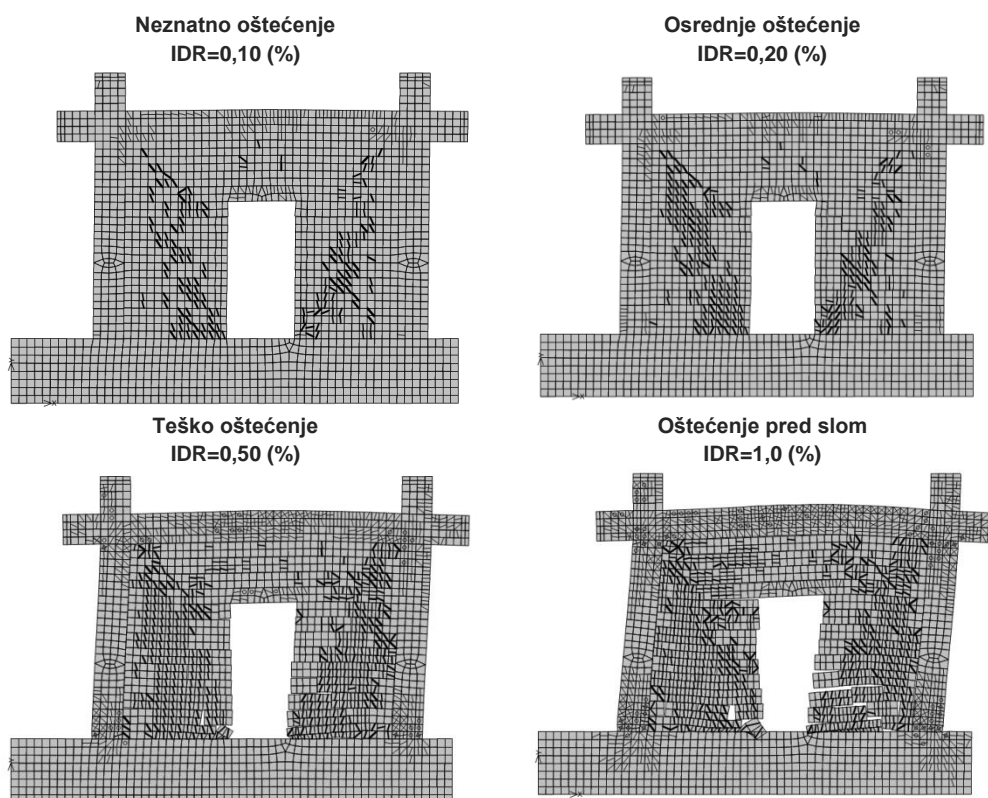


Slika 6.23. Razine oštećenja modela tip (IV/7) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)

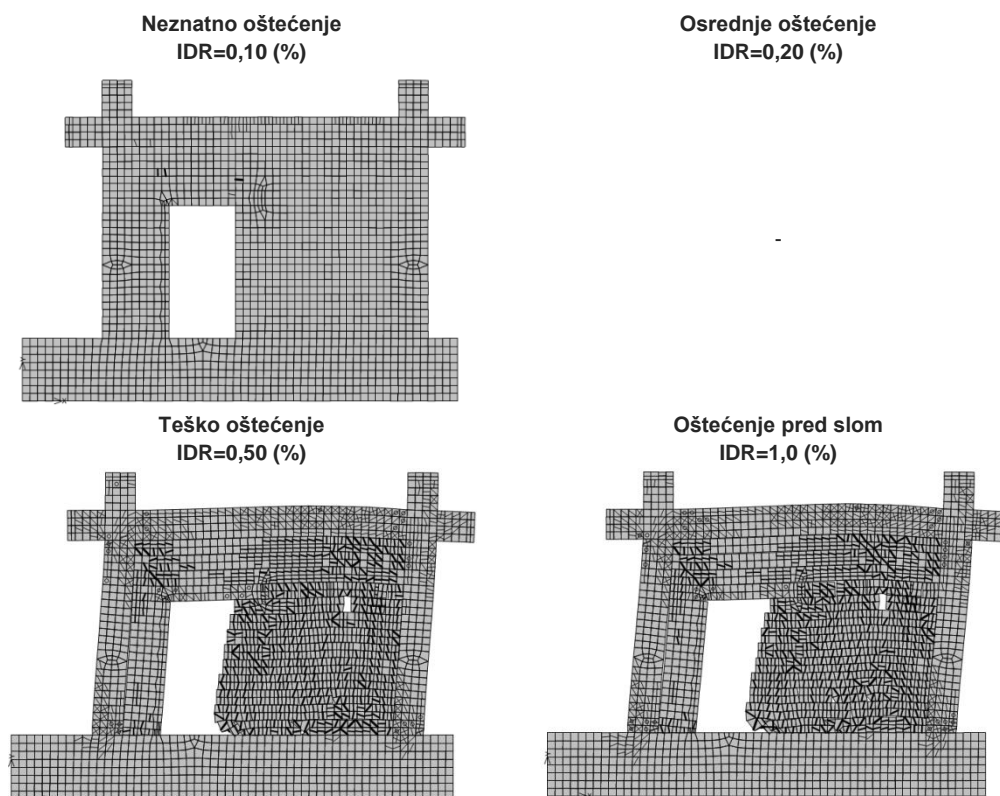




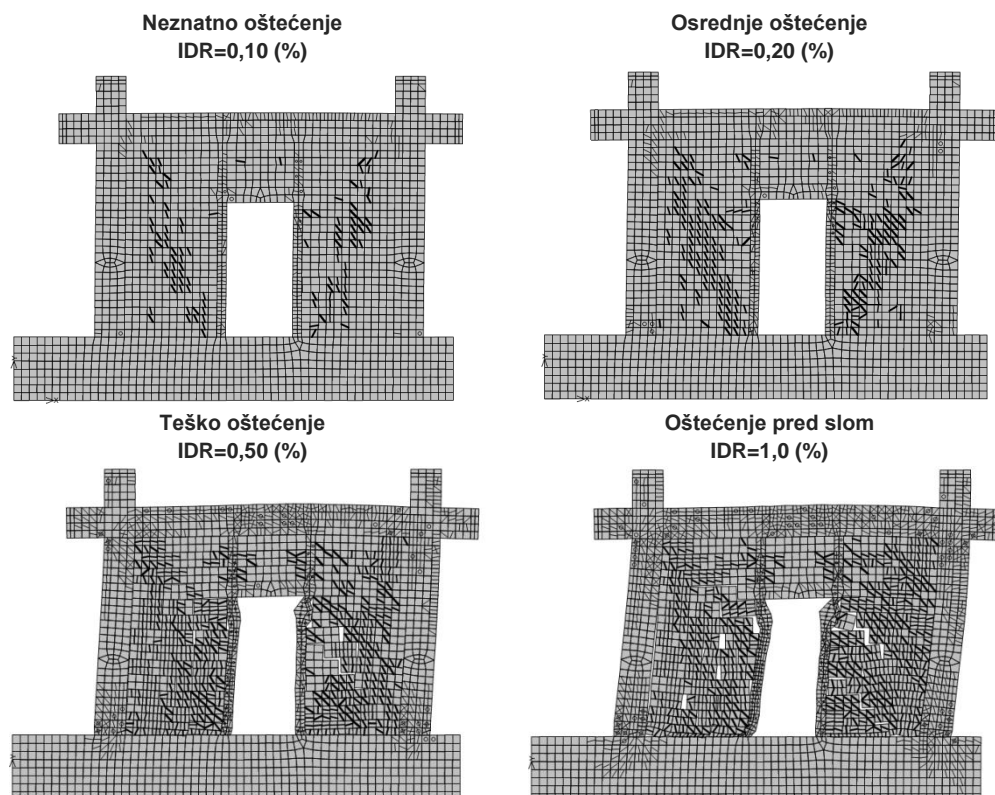
Slika 6.24. Razine oštećenja modela tip (IV/8) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)



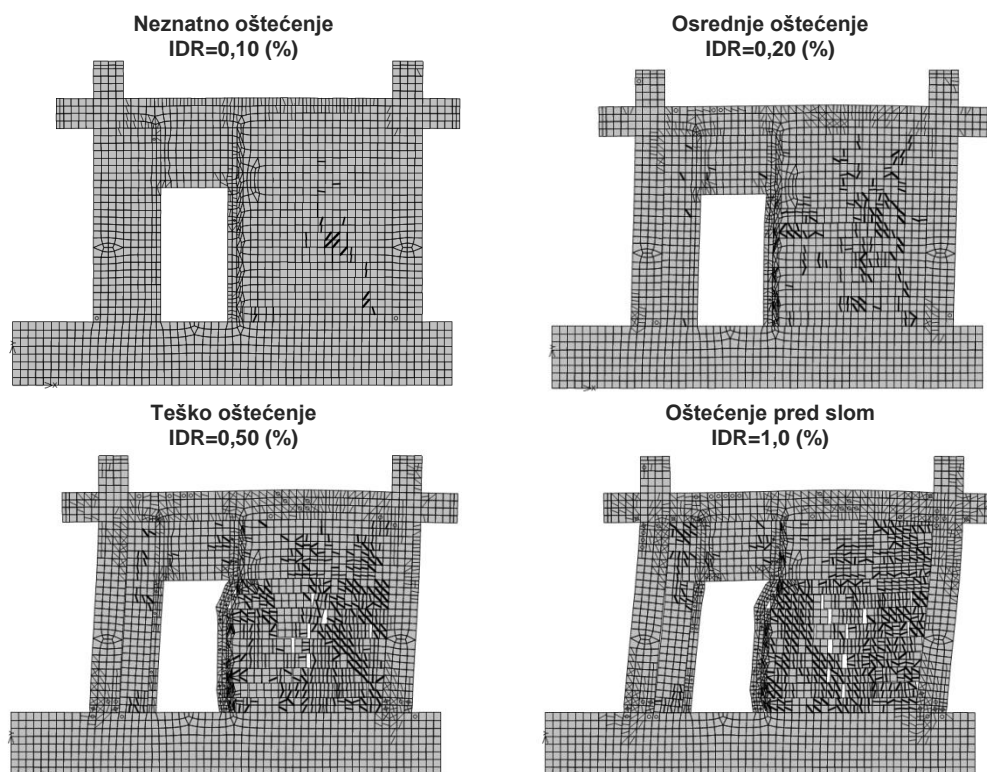
Slika 6.25. Razine oštećenja modela tip (IV/9) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)



Slika 6.26. Razine oštećenja modela tip (IV/10) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)



Slika 6.27. Razine oštećenja modela tip (IV/11) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)



Slika 6.28. Razine oštećenja modela tip (IV/12) pri odabranim katnim pomacima, IDR (%)

## 6.4. Histerezne i primarne krivulje

Histerezne i primarne krivulje prikazuju odnos horizontalnih sila  $F_H$  (kN) te odnosa horizontalnog i vertikalnog opterećenja  $F_H/2 \times F_V$  i horizontalnih  $D_H$  (mm) te katnih pomaka IDR (%). Dan je općenit opis histereznog ponašanja (simetrično, nesimetrično, linearno, nelinearno) te osvrta na broj velikih ciklusa prije dostizanja katnog pomaka IDR=1,0%.

### 6.4.1. Numerički modeli grupe IV

Histerezne petlje i pripadne primarne krivulje dane su na slikama 6.29. do 6.34.

#### a) Utjecaj otvora ploštine $A_O < 1,5 \text{ m}^2$

Otvori u sredini nisu znatno utjecali su na izgled histereznih i primarnih krivulja, ali otklonjeni otvori su utjecali na simetriju krivulje te na primjetan pad nosivosti. Također, kod otklonjenih otvora, broj velikih ciklusa do dostizanja tečenja armirano-betonskog okvira je veći zbog čega je i histerezna energija veća. Za razliku od njih, modeli s otvorom u sredini pokazuju linearno ponašanje do dostizanja granice tečenja. Razlog tome je što su zidani ispuni na strani otvora slabiji te se tu ranije javljaju oštećenja.

#### b) Utjecaj otvora ploštine $A_O > 1,5 \text{ m}^2$

Prisutnost vertikalnog serklaža utjecala je na očuvanje simetričnosti histerezne petlje te očuvanju nosivosti i krutosti u usporedbi s modelom s punim ispunom. Modeli s vertikalnim



serklažima imali su veći broj velikih ciklusa do dostizanja tečenja armirano-betonskog okvira. To upućuje na to da vertikalni serklaži čuvaju stabilnost ispuna te sprječavaju njegovo prerano urušavanje. Također, to upućuje na to da je razina histerezne energije veća. Modeli bez vertikalnih serklaža, u slučaju otvora u sredini, pokazali su veću nosivost nego u slučaju otklonjenih otvora. Također, histerezne petlje u slučaju otklonjenih otvora nisu bile simetrične.

Otklonjeni otvor uzrokovao je rani pad krutosti kod svih numeričkih modela grupe IV. Numerički modeli s otvorom za vrata, bez prisutnosti vertikalnih serklaža, pokazali su najmanju nosivost i krutost u usporedbi s drugim numeričkim modelima. Isti s vertikalnim serklažima imali su nosivost podjednaku kao i u slučaju punog ispuna. Slabija strana zidanog ispuna je ona na kojoj se nalazi otvor, međutim primjenom vertikalnih serklaža utjecaj otklonjenog otvora se umanjuje. Najveći broj velikih ciklusa, od modela s otvorima za vrata, imao je model s otklonjenim otvorom bez vertikalnih serklaža.

#### 6.4.2. Numerički modeli grupe V i VI

##### a) Numerički modeli grupe V

Na slikama 6.35. i 6.36. dane su histerezne petlje i primarne krivulje numeričkih modela grupe V. Prema njima vertikalni serklaž nije očuvao simetriju histerezne petlje u slučaju otklonjenog otvora te su također nosivost i krutost bile manje u odnosu na puni ispun. Međutim, u slučaju otvora u sredini nosivost je neznatno manja u odnosu na puni ispun.

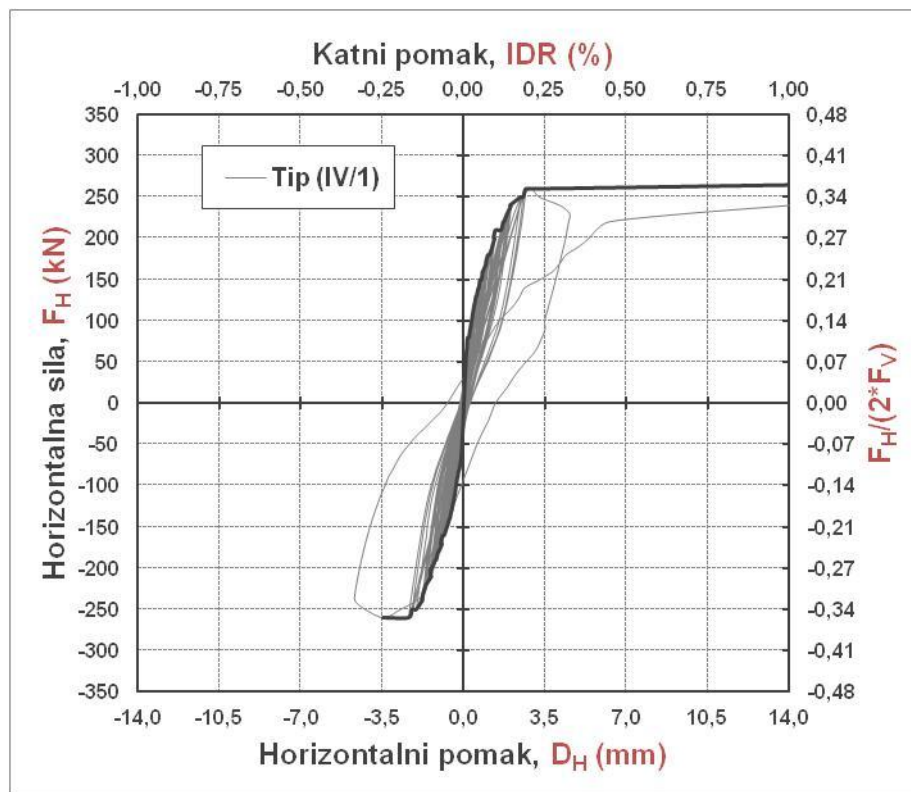
Otklonjeni otvor pokazao je najveći broj velikih ciklusa prije dostizanja granice tečenja armirano-betonskog okvira, dok je u slučaju punog ispuna ili s otvorom u sredini oblik sloma bio krtiji. Obilježje toga je velik broj ciklusa u linearnom području te jedan ili najviše dva u nelinearnom području.

##### b) Numerički modeli grupe VI

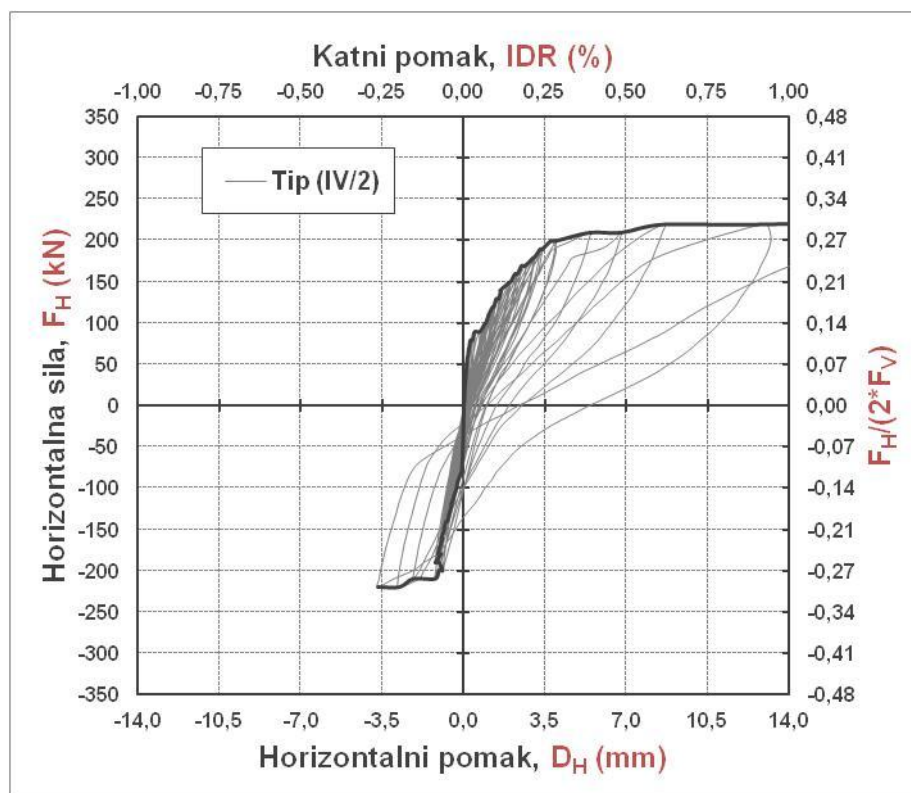
Na slikama 6.37. i 6.38. dane su histerezne petlje i primarne krivulje numeričkih modela grupe VI. Prema njima vertikalni serklaž je očuvao simetriju histerezne petlje, ali je u slučaju otklonjenog otvora bila izraženija nelinearnost primarne krivulje. U slučaju otvora u sredini te punog ispuna primarna krivulja je linearna do dostizanja granice tečenja, a zatim postaje horizontalna do sloma zidanog ispuna. Nosivost i krutost su bile manje u odnosu na puni ispun za otklonjeni otvor i otvor u sredini, u čijem slučaju je odgovor sličan.

**Modeli s otklonjenim otvorom imali su nelinearno ponašanje na strani otvora, dok su imali linearno ponašanje na suprotnoj strani, do dostizanja granice tečenja. Do dostizanja graničnog pomaka veći broj velikih ciklusa ostvarili su ovi modeli. U slučaju otvora u sredini, serklaži su omogućili veći broj velikih ciklusa.**

a) tip (IV/1)

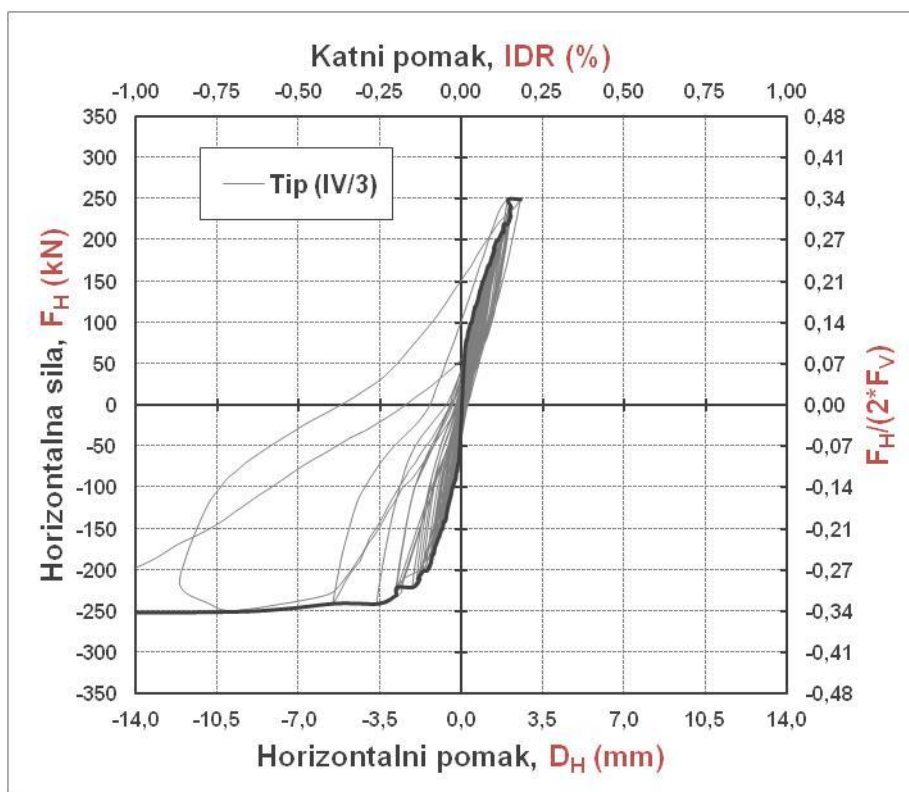


b) tip (IV/2)

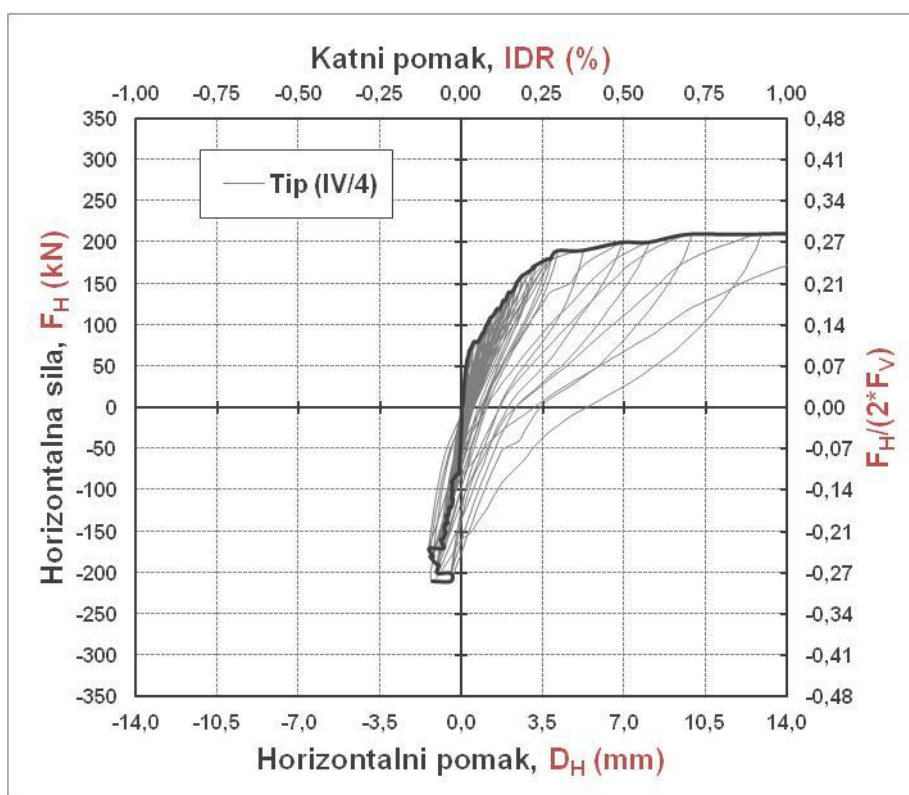


Slika 6.29. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela  
a) tip (IV/1) i b) tip (IV/2)

a) tip (IV/3)



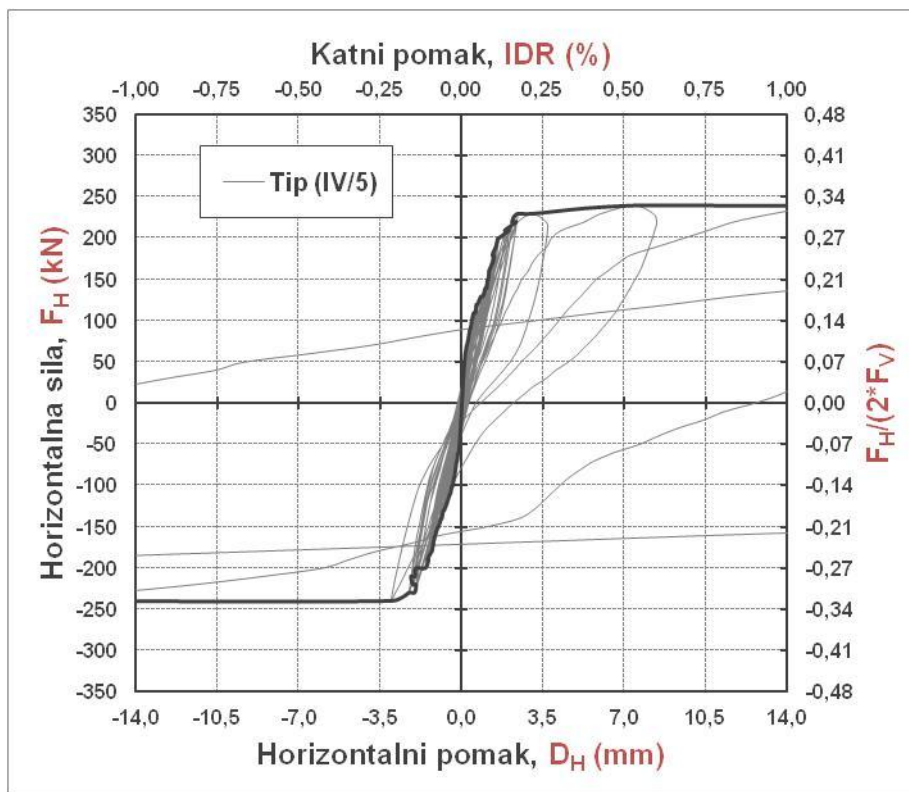
b) tip (IV/4)



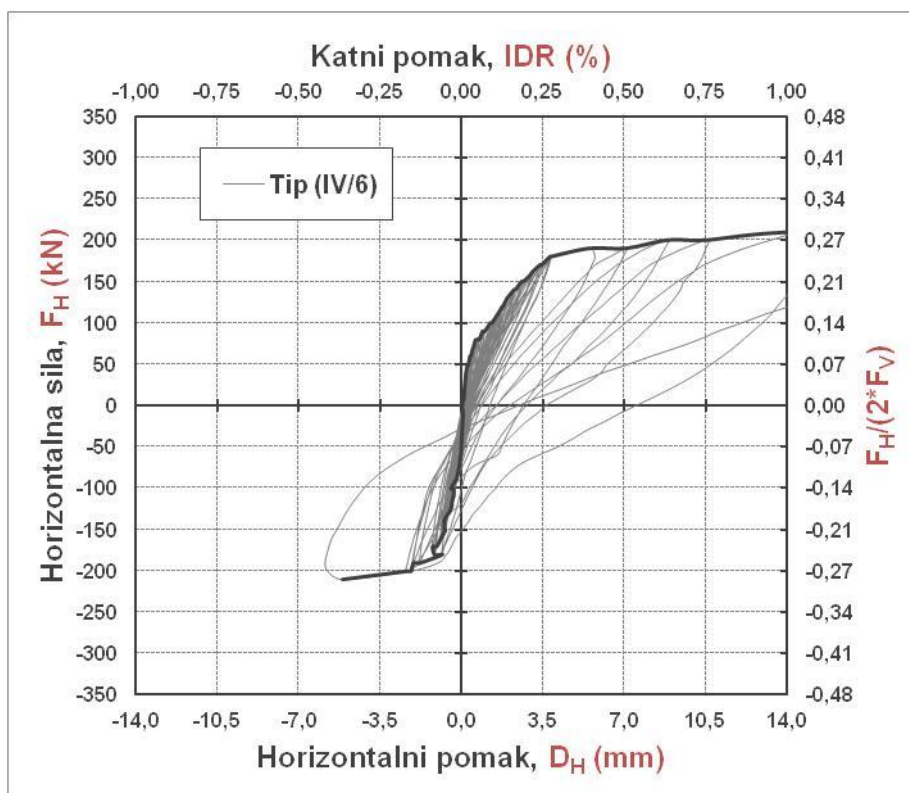
Slika 6.30. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (IV/3) i b) tip (IV/4)



a) tip (IV/5)

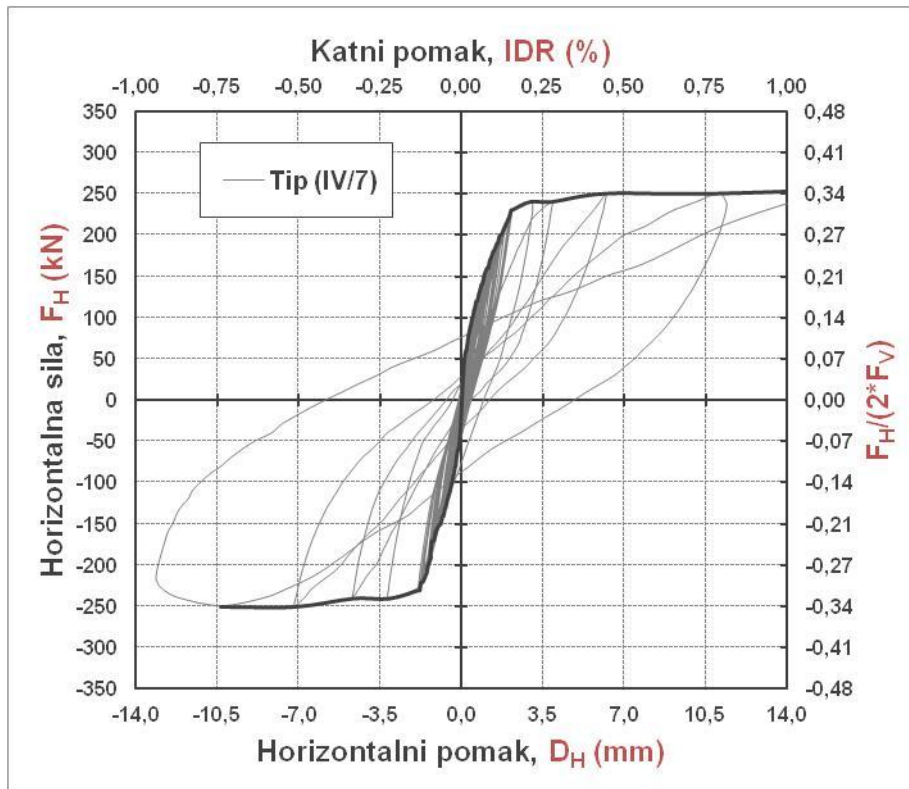


b) tip (IV/6)

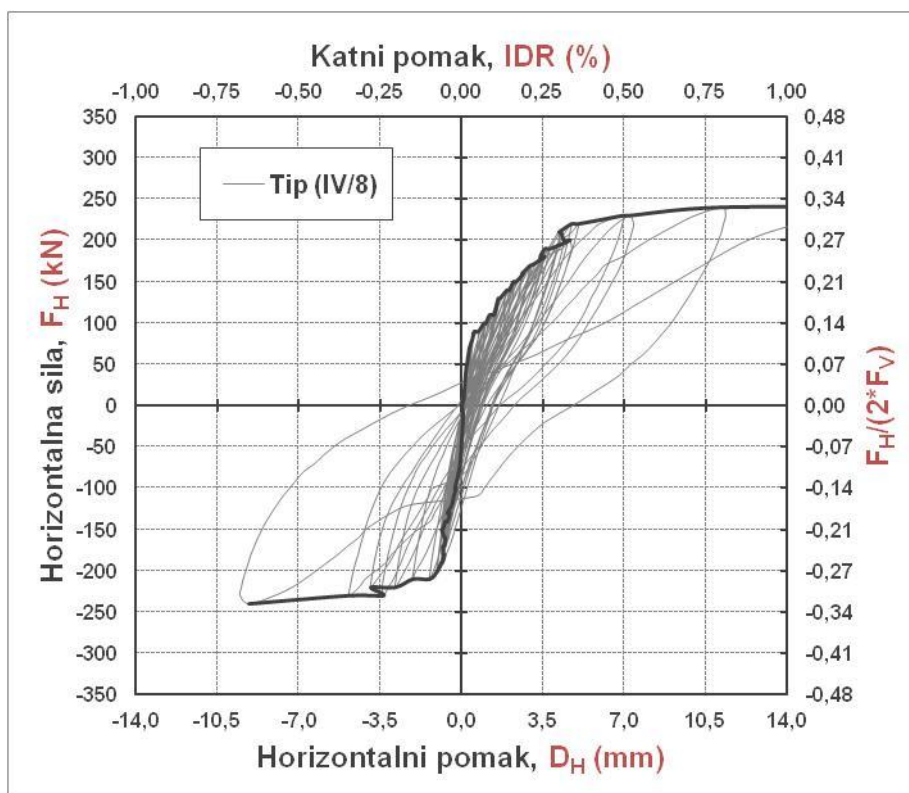


Slika 6.31. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (IV/5) i b) tip (IV/6)

a) tip (IV/7)

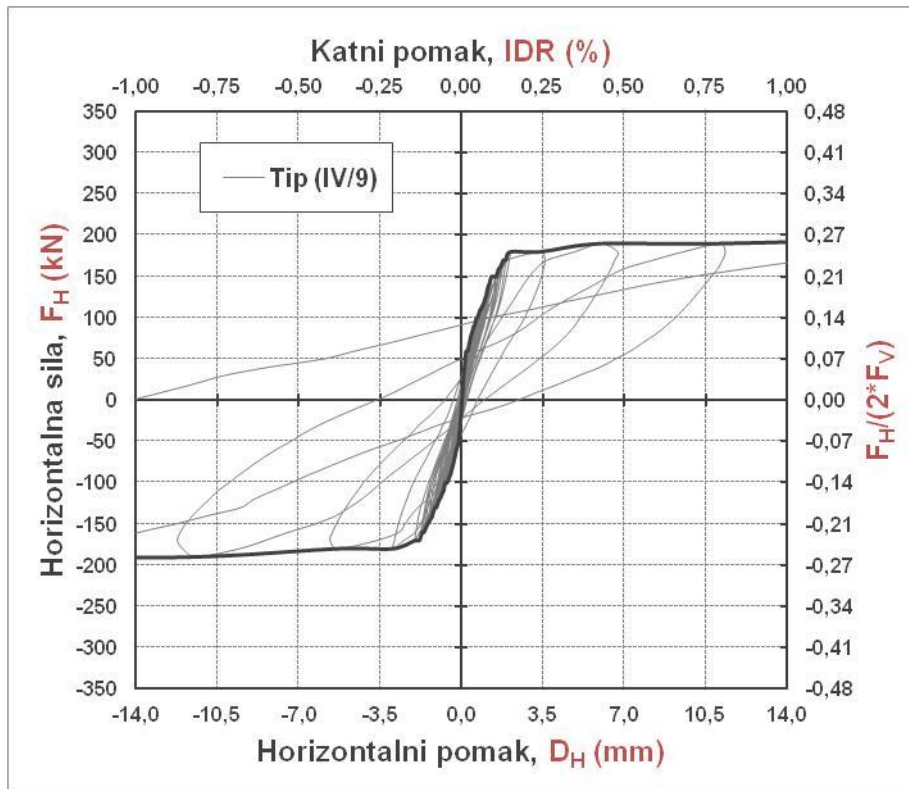


b) tip (IV/8)

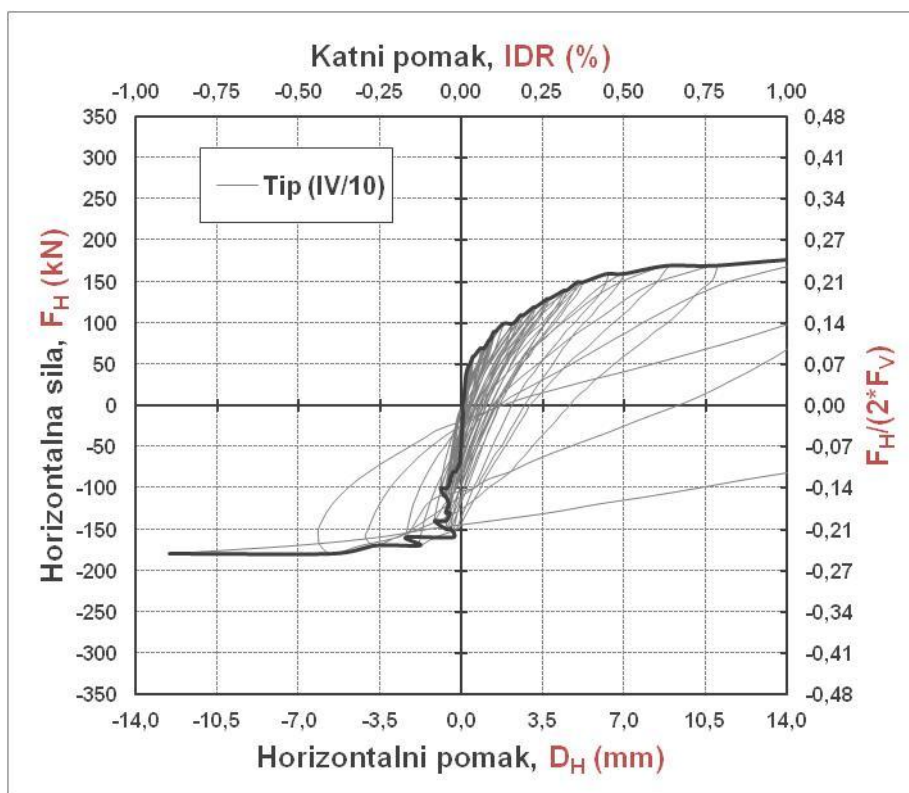


Slika 6.32. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela  
a) tip (IV/7) i b) tip (IV/8)

a) tip (IV/9)

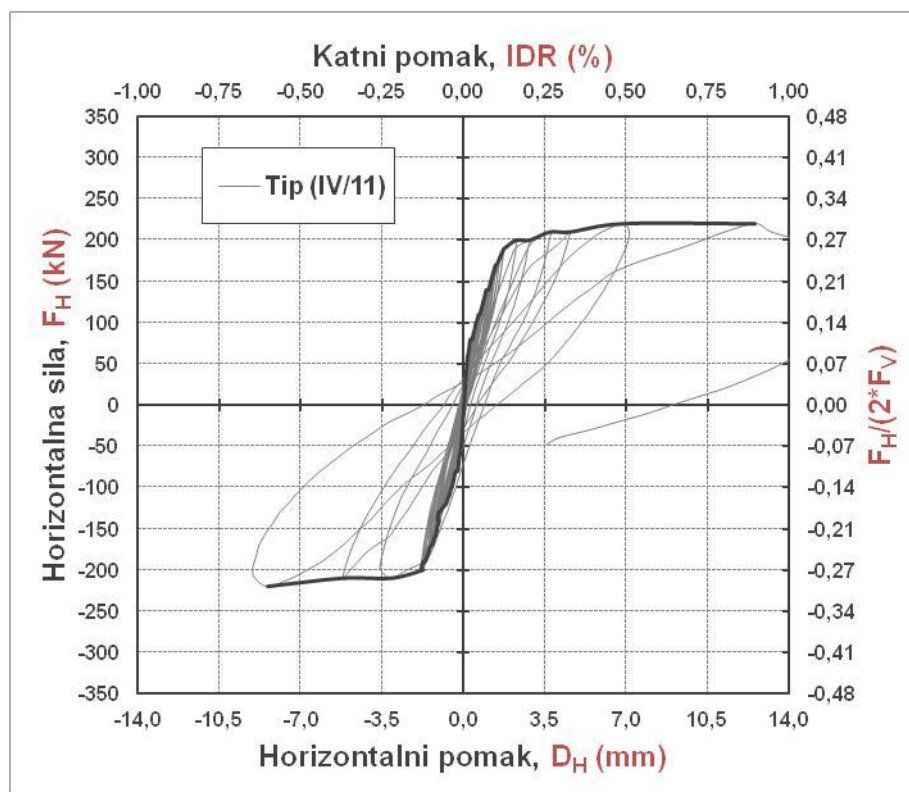


b) tip (IV/10)

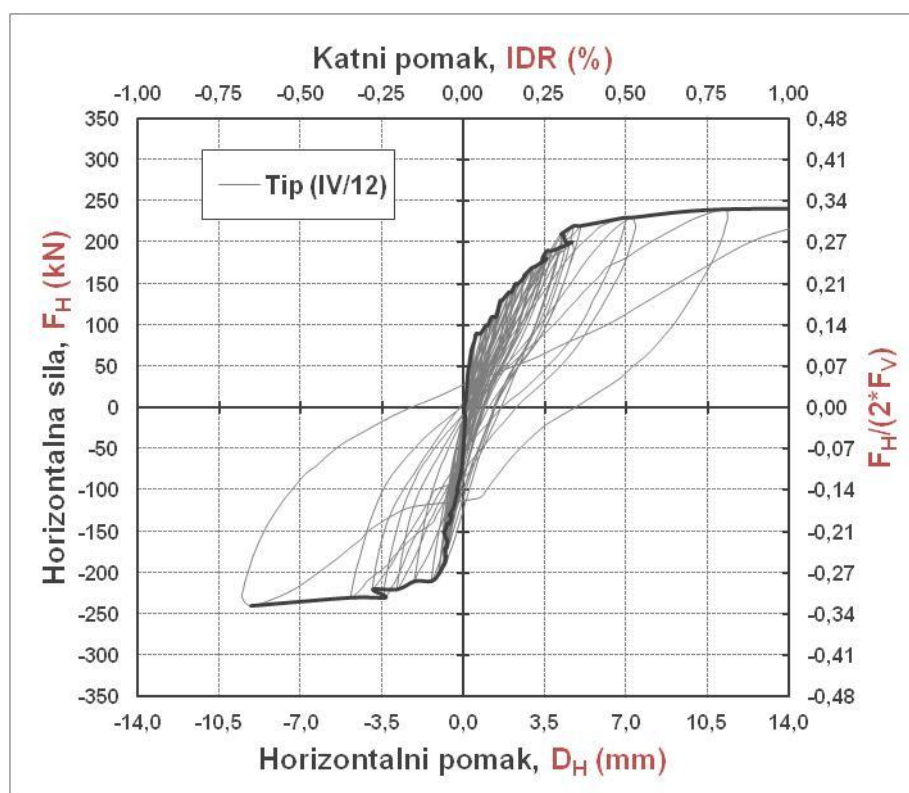


Slika 6.33. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela  
a) tip (IV/9) i b) tip (IV/10)

a) tip (IV/11)



b) tip (IV/12)

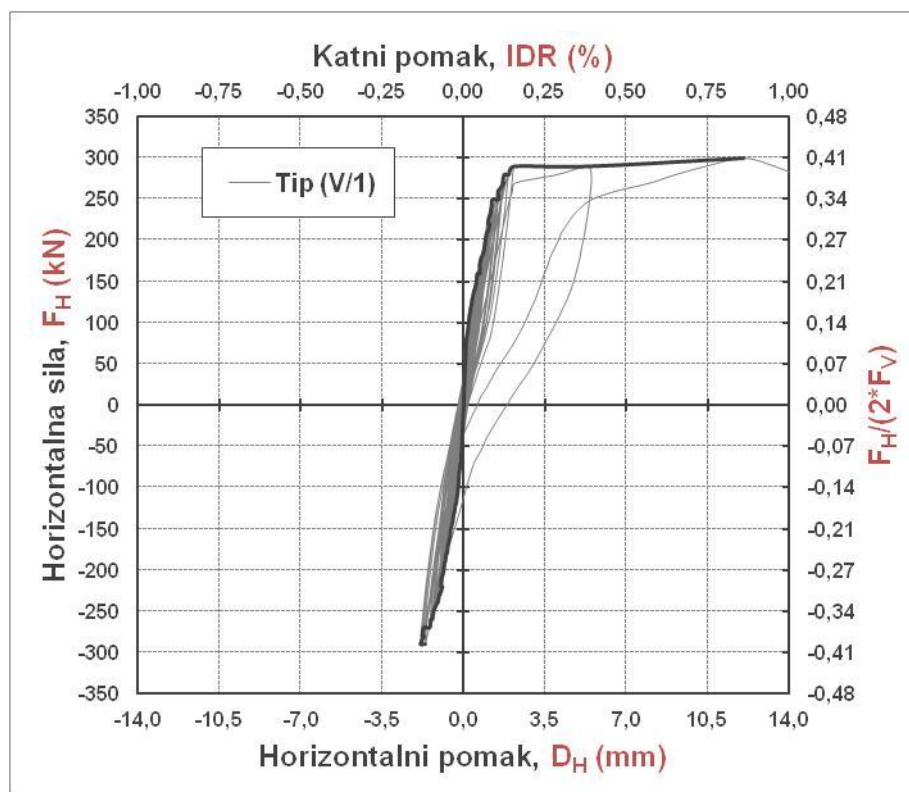


Slika 6.34. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela

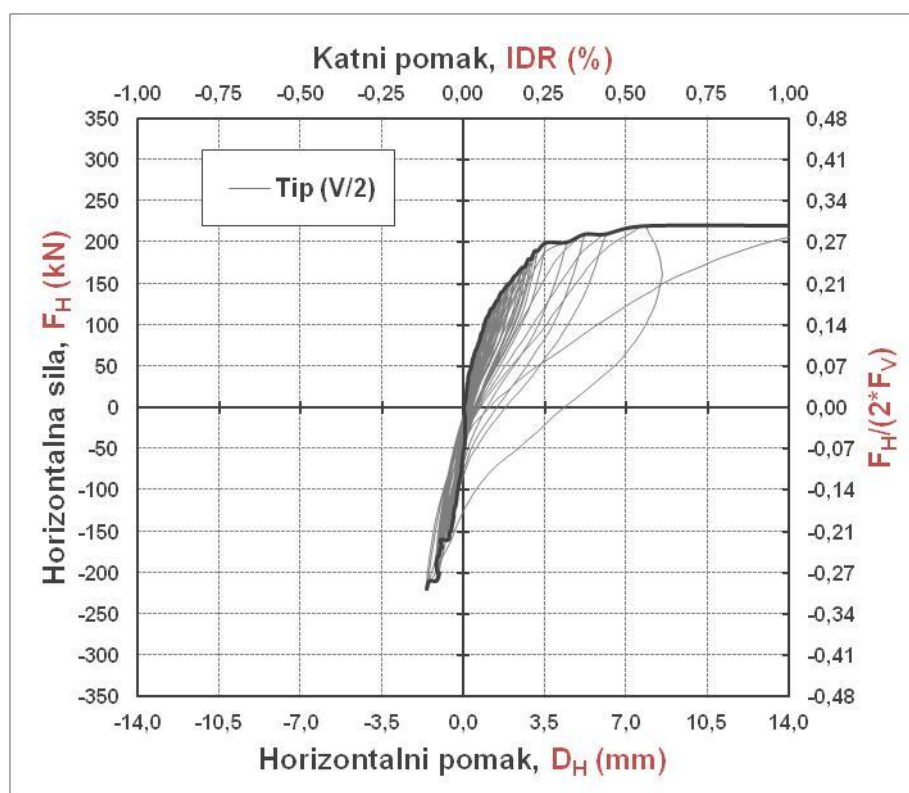
a) tip (IV/11) i b) tip (IV/12)



a) tip (V/1)

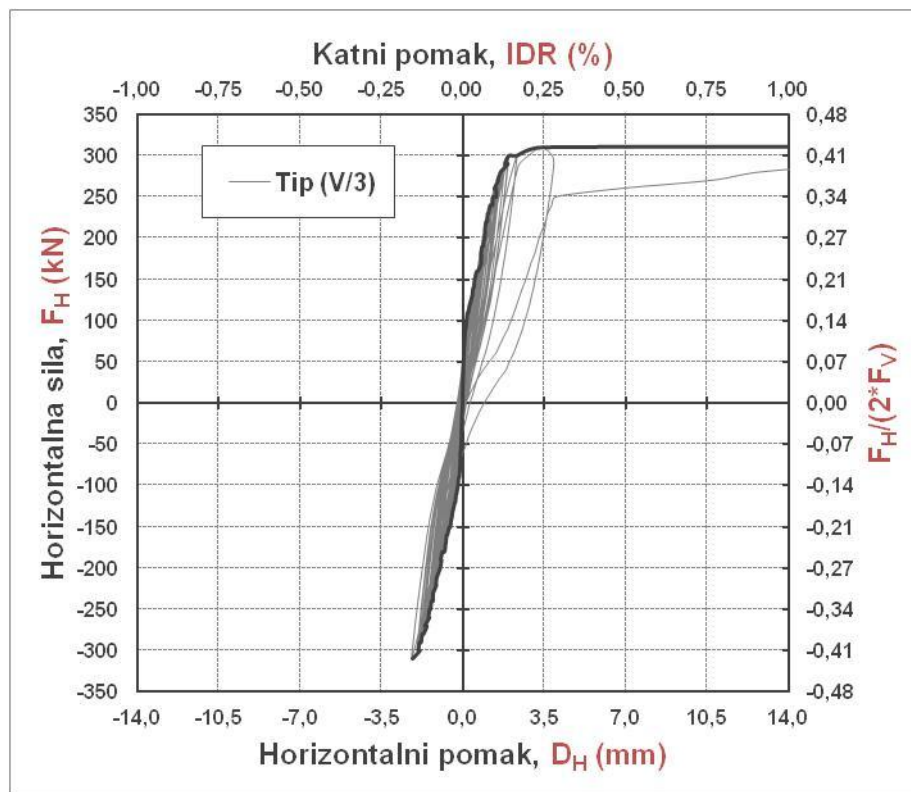


b) tip (V/2)

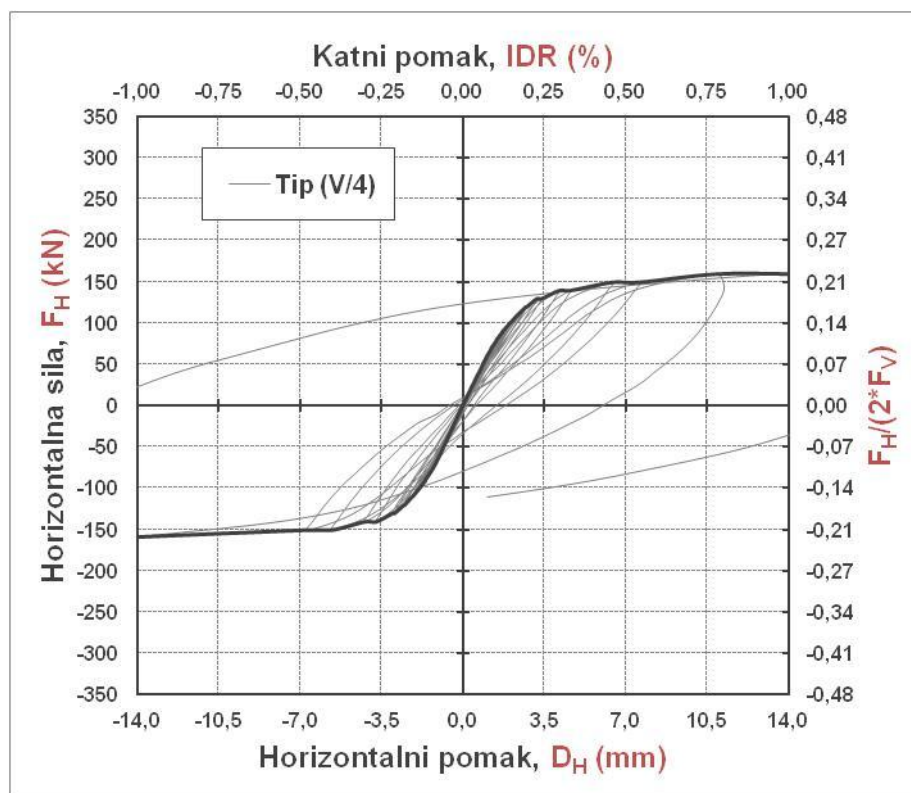


Slika 6.35. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela a) tip (V/1) i b) tip (V/2)

a) tip (V/3)



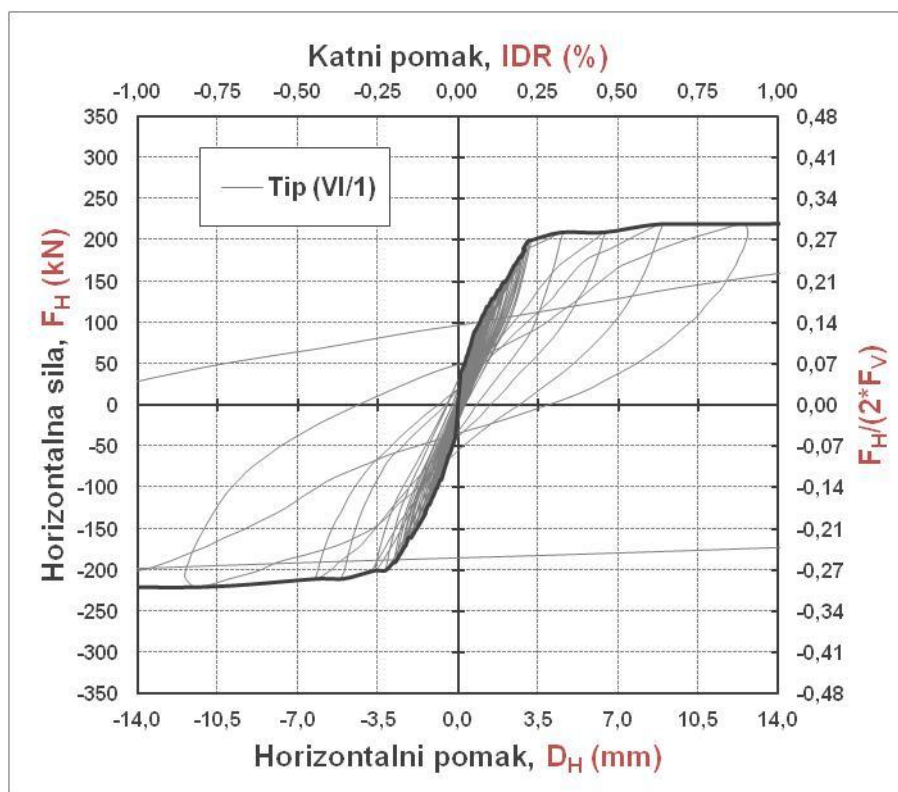
b) tip (V/4)



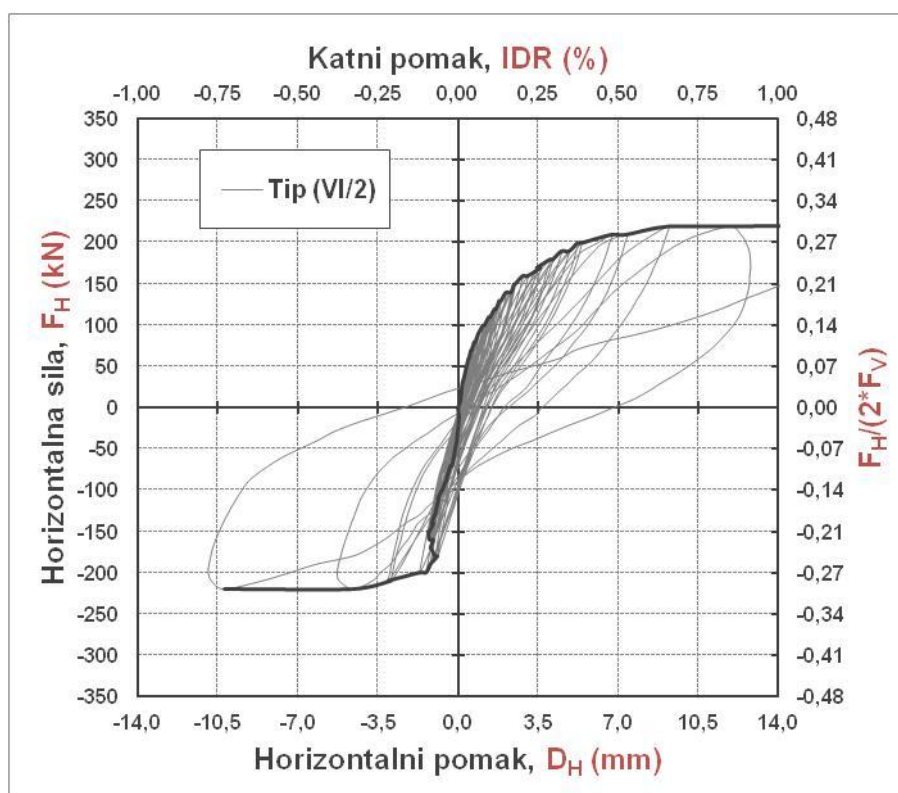
Slika 6.36. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela  
a) tip (V/3) i b) tip (V/4)



a) tip (VI/1)

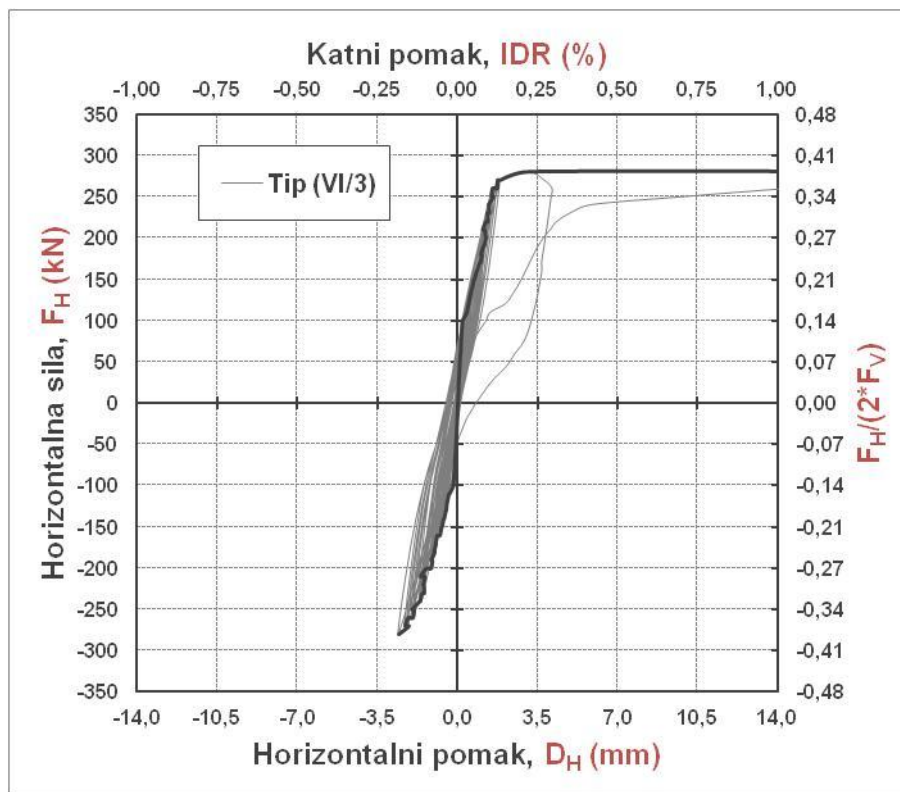


b) tip (VI/2)

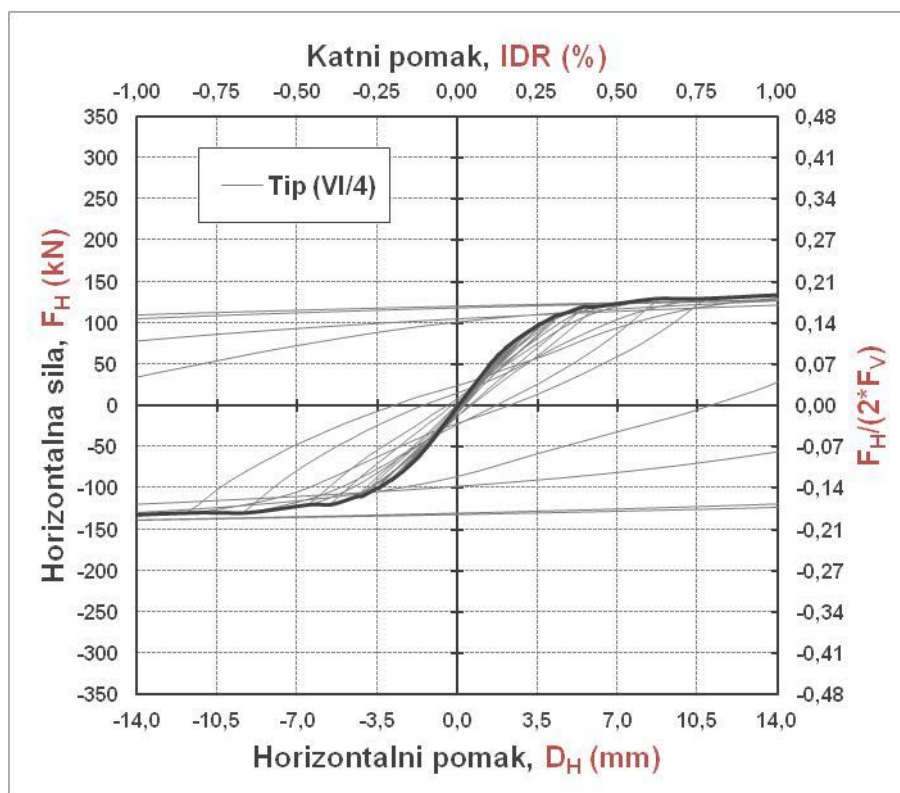


Slika 6.37. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela  
a) tip (VI/1) i b) tip (VI/2)

a) tip (VI/3)



b) tip (VI/4)



Slika 6.38. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela  
a) tip (VI/3) i b) tip (VI/4)

## 6.5. Nosivost u horizontalnom smjeru

### 6.5.1. Numerički modeli grupe IV

U tablicama 6.6. i 6.7. te na slikama 6.39. do 6.41. prikazana je horizontalna nosivost  $F_H$  (kN), i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na prazan okvir.

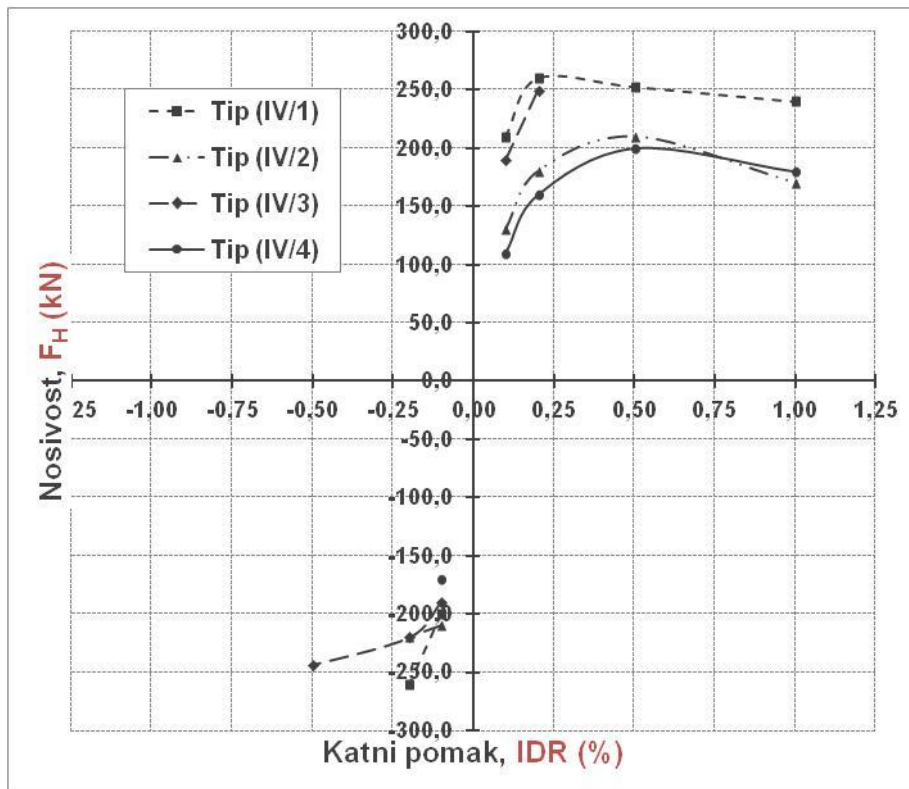
**Tablica 6.6.** Nosivost numeričkih modela grupe IV,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (IV/1)	210	(3,46)	260	(2,62)	253	(1,57)	240	(1,38)
Tip (IV/2)	130	(2,14)	180	(1,81)	210	(1,31)	170	(0,98)
Tip (IV/3)	190	(3,13)	249	(2,51)	-	-	-	-
Tip (IV/4)	110	(1,81)	160	(1,61)	200	(1,25)	180	(1,04)
Tip (IV/5)	190	(3,13)	230	(2,32)	240	(1,49)	240	(1,38)
Tip (IV/6)	110	(1,81)	150	(1,51)	190	(1,18)	210	(1,21)
Tip (IV/7)	180	(2,97)	240	(2,42)	250	(1,56)	267	(1,54)
Tip (IV/8)	110	(1,81)	160	(1,61)	230	(1,43)	240	(1,38)
Tip (IV/9)	90	(1,48)	110	(1,11)	160	(1,00)	190	(1,09)
Tip (IV/10)	110	(1,81)	160	(1,61)	200	(1,25)	180	(1,04)
Tip (IV/11)	170	(2,80)	200	(2,02)	220	(1,37)	220	(1,27)
Tip (IV/12)	110	(1,81)	170	(1,71)	230	(1,43)	240	(1,38)
Tip (III/1)	61	(1,00)	99	(1,00)	161	(1,00)	174	(1,00)
Tip (III/2)	200	(3,28)	260	(2,63)	220	(1,37)	250	(1,44)

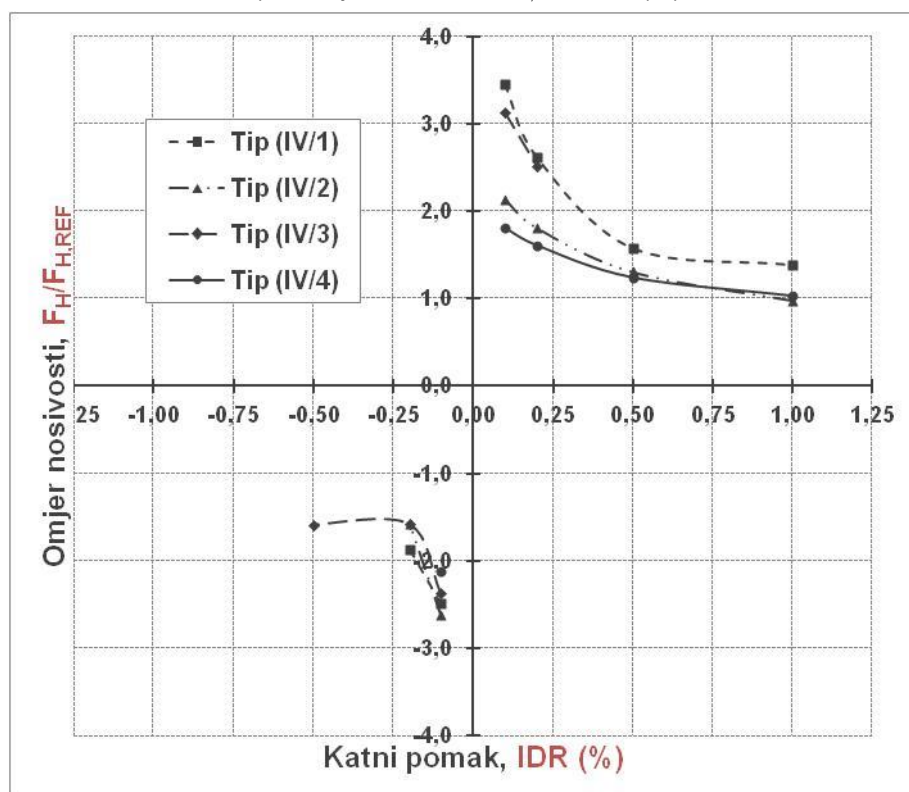
**Tablica 6.7.** Nosivost numeričkih modela grupe IV,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (IV/1)	-200	-(2,49)	-260	-(1,87)	-	-	-	-
Tip (IV/2)	-210	-(2,61)	-220	-(1,58)	-	-	-	-
Tip (IV/3)	-190	-(2,37)	-220	-(1,58)	-243	-(1,59)	-200	-(1,18)
Tip (IV/4)	-170	-(2,12)	-	-	-	-	-	-
Tip (IV/5)	-190	-(2,37)	-240	-(1,72)	-240	-(1,57)	-240	-(1,42)
Tip (IV/6)	-170	-(2,12)	-202	-(1,45)	-	-	-	-
Tip (IV/7)	-200	-(2,49)	-240	-(1,72)	-250	-(1,63)	-190	-(1,13)
Tip (IV/8)	-210	-(2,61)	-220	-(1,58)	-235	-(1,53)	-	-
Tip (IV/9)	-150	-(1,87)	-180	-(1,29)	-183	-(1,19)	-	-
Tip (IV/10)	-140	-(1,74)	-163	-(1,17)	-180	-(1,18)	-	-
Tip (IV/11)	-170	-(2,12)	-210	-(1,51)	-216	-(1,41)	-	-
Tip (IV/12)	-210	-(2,61)	-220	-(1,58)	-235	-(1,53)	-	-
Tip (III/1)	-80	-(1,00)	-139	-(1,00)	-153	-(1,00)	-	-
Tip (III/2)	-110	-(1,38)	-230	-(1,65)	-240	-(1,57)	-	-

a) Krivulje odnosa  $F_H$  (kN) i IDR (%)

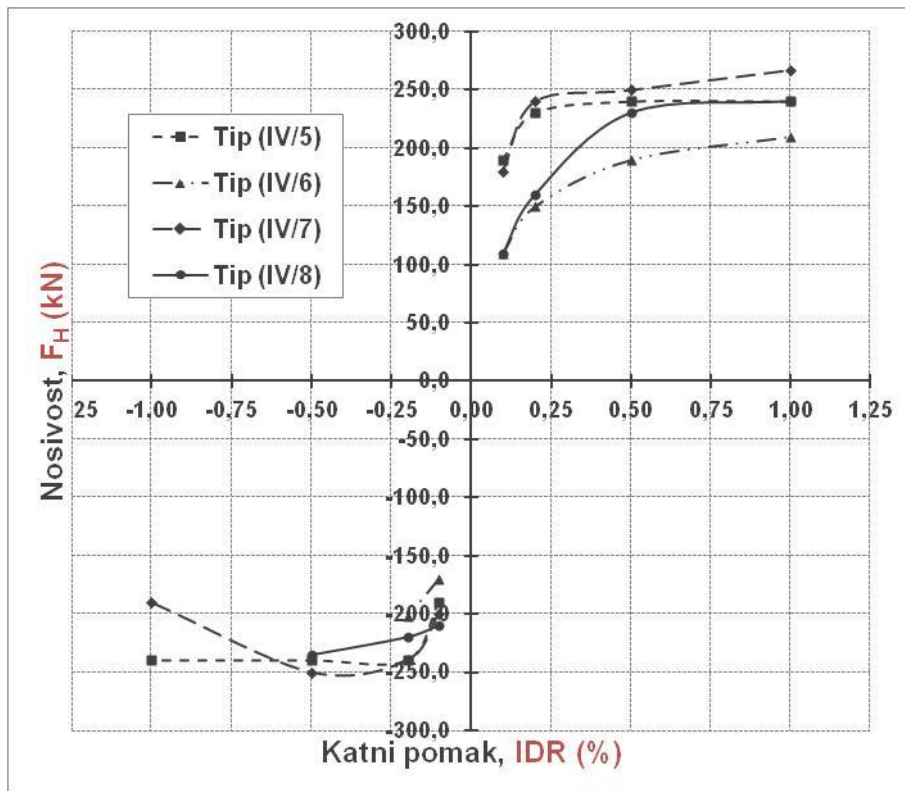


b) Krivulje odnosa  $F_H/F_{H,REF}$  i IDR (%)

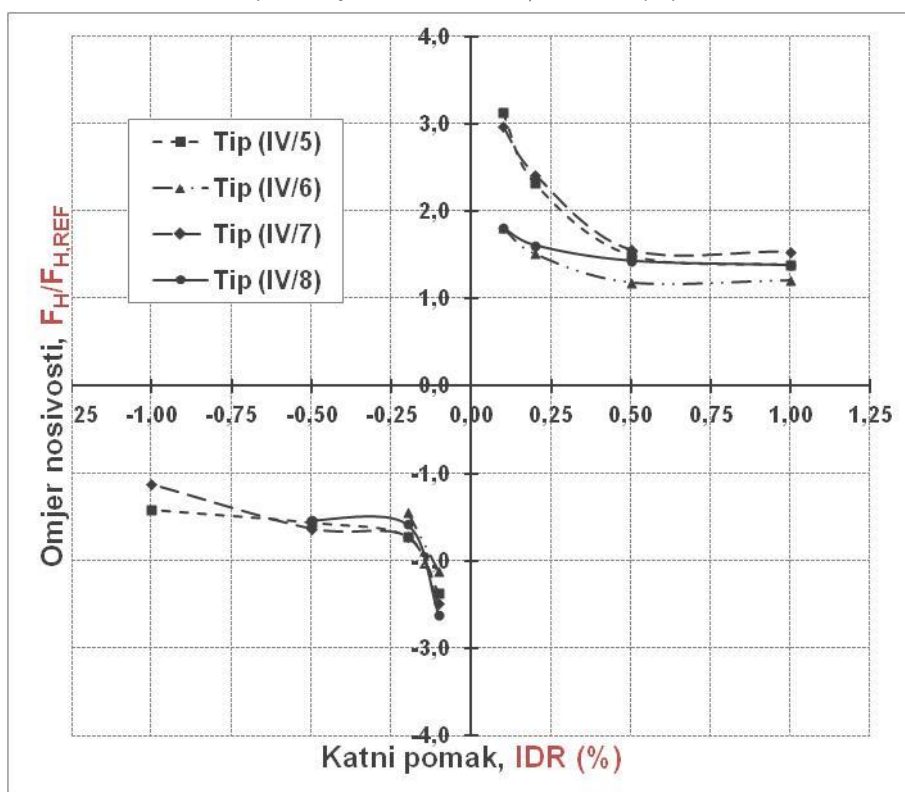


Slika 6.39. Nosivost numeričkih modela grupe IV,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

a) Krivulje odnosa  $F_H$  (kN) i IDR (%)



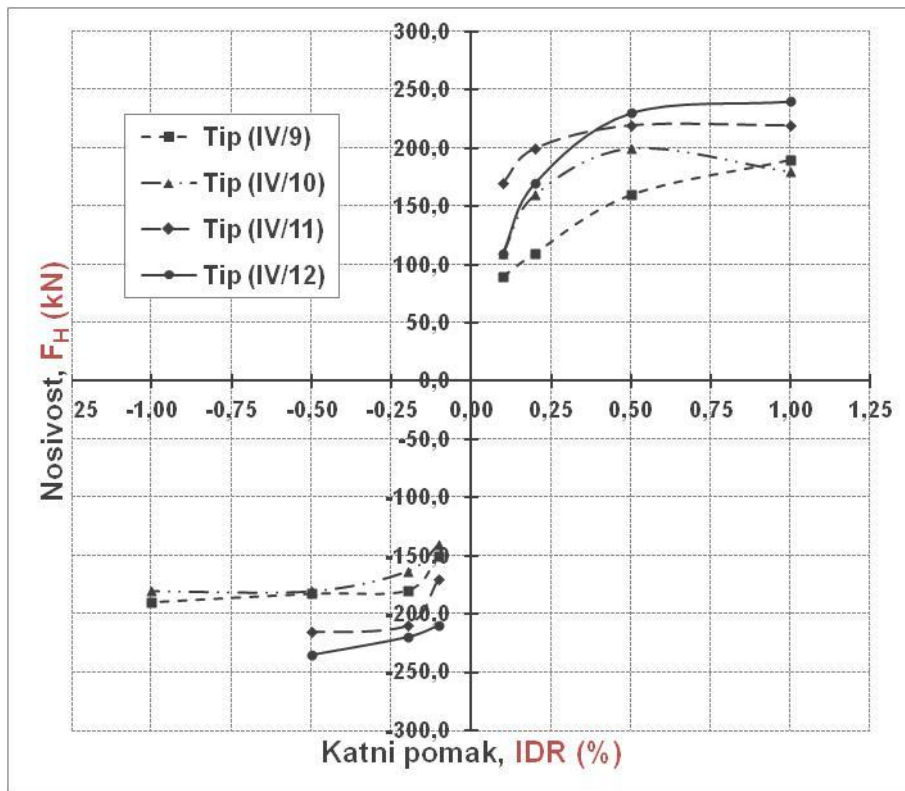
b) Krivulje odnosa  $F_H/F_{H,REF}$  i IDR (%)



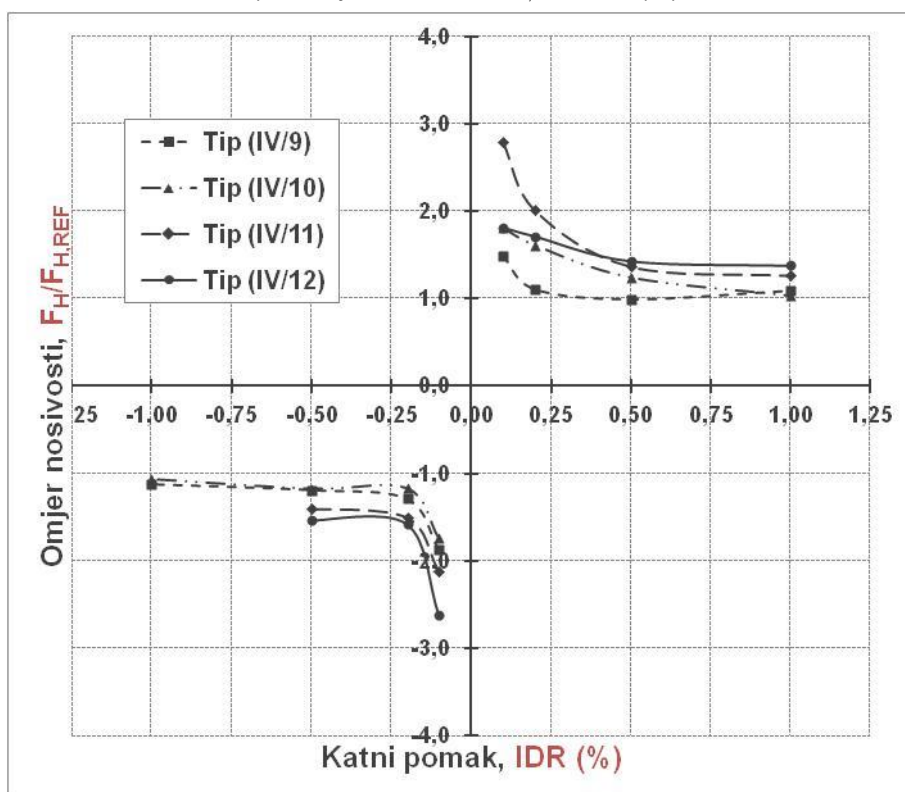
Slika 6.40. Nosivost numeričkih modela grupe IV,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)



a) Krivulje odnosa  $F_H$  (kN) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $F_H/F_{H,REF}$  i IDR (%)



Slika 6.41. Nosivost numeričkih modela grupe IV,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)



## 6.5.2. Numerički modeli grupe V i VI

U tablicama 6.8. i 6.9. te 6.10. i 6.11. te na slikama 6.42 i 6.43. dan je prikaz stvarnih nosivosti te omjera stvarne i nosivosti praznog okvira.

### a) Numerički modeli grupe V

**Tablica 6.8.** Nosivost matematičkih modela grupe V,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (V/1)	260	(3,25)	290	(2,42)	290	(1,93)	300	(1,88)
Tip (V/2)	130	(1,63)	180	(1,50)	220	(1,47)	220	(1,38)
Tip (V/3)	250	(3,13)	300	(2,50)	310	(2,07)	310	(1,94)
Tip (V/4)	80	(1,00)	120	(1,00)	150	(1,00)	160	(1,00)

**Tablica 6.9.** Nosivost matematičkih modela grupe V,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (V/1)	-260	-(3,25)	-	-	-	-	-	-
Tip (V/2)	-210	-(2,63)	-	-	-	-	-	-
Tip (V/3)	-240	-(3,00)	-	-	-	-	-	-
Tip (V/4)	-80	-(1,00)	-130	-(1,00)	-150	-(1,00)	-160	-(1,00)

### b) Numerički modeli grupe VI

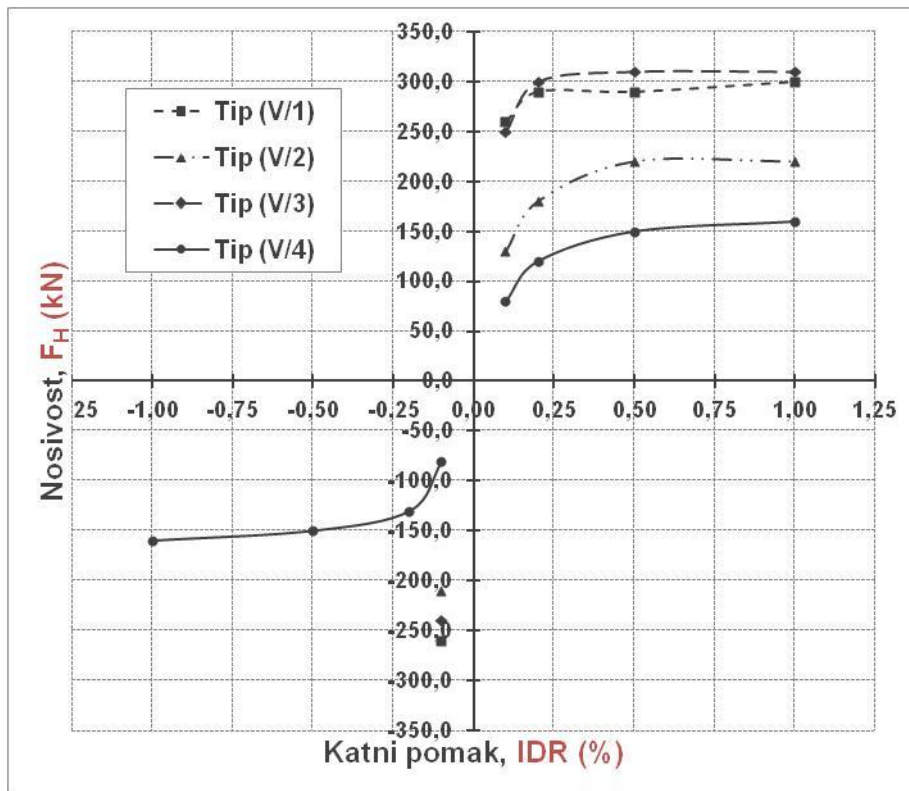
**Tablica 6.10.** Nosivost matematičkih modela grupe VI,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (VI/1)	120	(2,40)	180	(2,00)	210	(1,75)	220	(1,57)
Tip (VI/2)	110	(2,20)	160	(1,78)	210	(1,75)	220	(1,57)
Tip (VI/3)	230	(4,60)	280	(3,11)	280	(2,33)	280	(2,00)
Tip (VI/4)	50	(1,00)	90	(1,00)	120	(1,00)	140	(1,00)

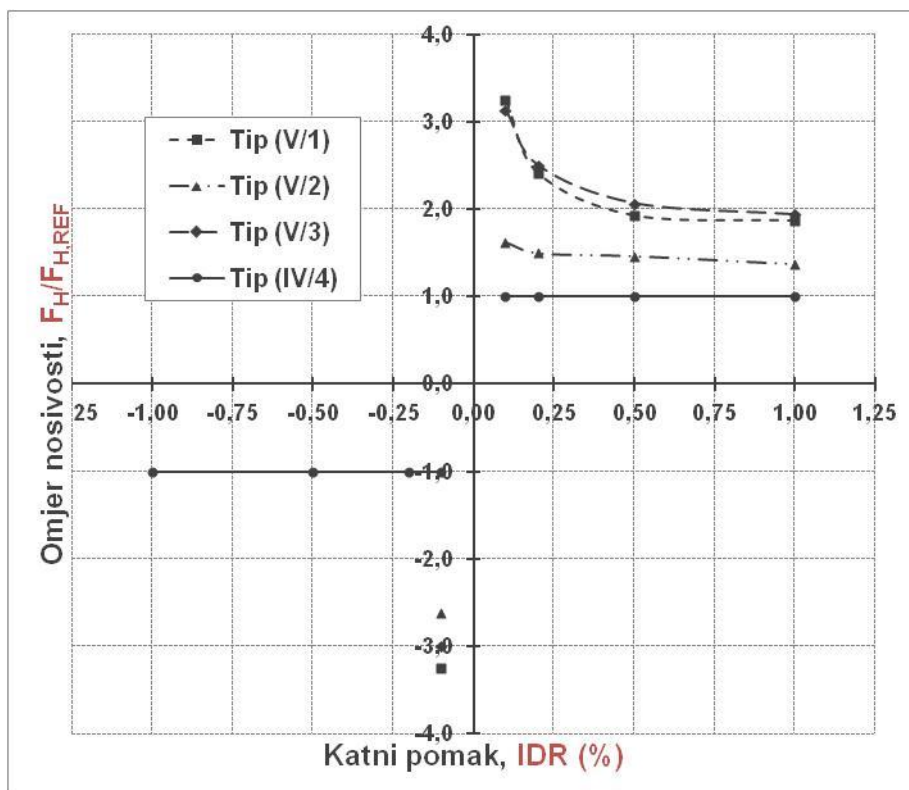
**Tablica 6.11.** Nosivost matematičkih modela grupe VI,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (VI/1)	-130	-(2,60)	-190	-(2,11)	-210	-(1,75)	-220	-(1,69)
Tip (VI/2)	-150	-(3,00)	-210	-(2,33)	-220	-(1,83)	-	-
Tip (VI/3)	-200	-(4,00)	-280	-(3,11)	-	-	-	-
Tip (VI/4)	-50	-(1,00)	-90	-(1,00)	-120	-(1,00)	-130	-(1,00)

a) Krivulje odnosa  $F_H$  (kN) i IDR (%)

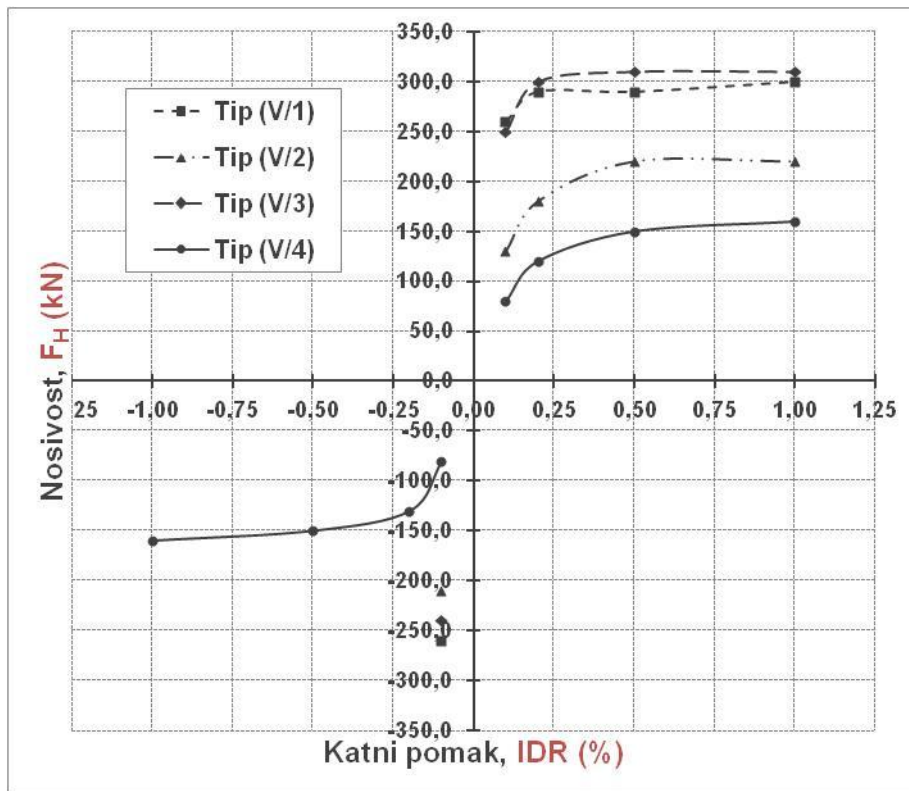


b) Krivulje odnosa  $F_H/F_{H,REF}$  i IDR (%)

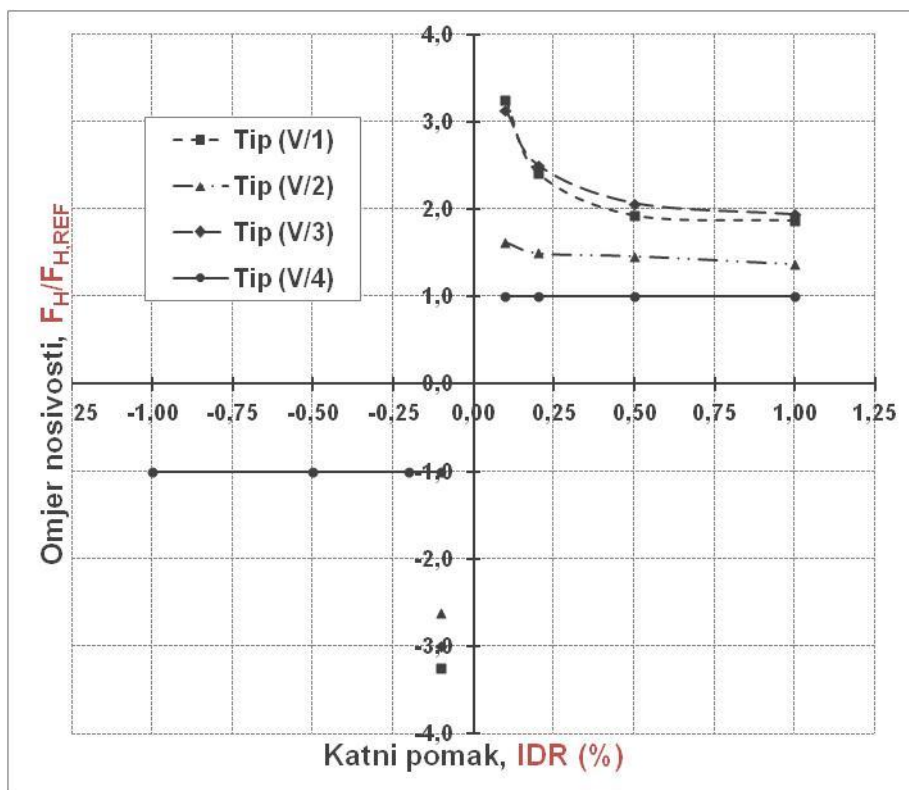


Slika 6.42. Nosivost numeričkih modela grupe V,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

a) Krivulje odnosa  $F_H$  (kN) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $F_H/F_{H,REF}$  i IDR (%)



Slika 6.43. Nosivost numeričkih modela grupe VI,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

## 6.6. Krutost u horizontalnom smjeru

### 6.6.1. Numerički modeli grupe IV

U tablicama 6.12. i 6.13. te na slikama 6.44. do 6.46. dana je horizontalna krutost  $K$  (kN), i omjer krutosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na prazan okvir.

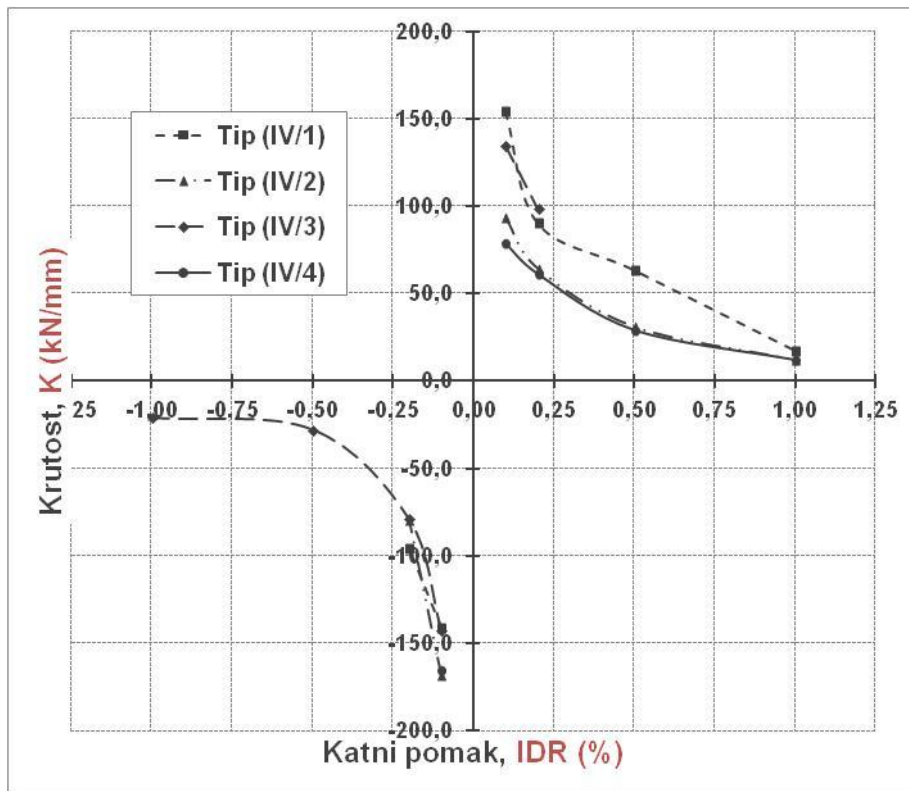
**Tablica 6.12.** Krutost numeričkih modela grupe IV,  $K$  (kN/mm) i omjer krutosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na krutost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (IV/1)	155	(3,40)	90	(2,69)	63	(2,82)	17	(1,38)
Tip (IV/2)	93	(2,06)	64	(1,92)	31	(1,38)	12	(0,97)
Tip (IV/3)	135	(2,97)	99	(2,94)	-	-	-	-
Tip (IV/4)	79	(1,73)	61	(1,83)	29	(1,30)	12	(0,96)
Tip (IV/5)	131	(2,88)	77	(2,29)	33	(1,45)	15	(1,24)
Tip (IV/6)	77	(1,70)	57	(1,69)	27	(1,19)	14	(1,15)
Tip (IV/7)	134	(2,95)	82	(2,43)	37	(1,66)	20	(1,58)
Tip (IV/8)	80	(1,75)	57	(1,71)	32	(1,42)	19	(1,49)
Tip (IV/9)	103	(2,27)	68	(2,03)	29	(1,29)	14	(1,15)
Tip (IV/10)	62	(1,37)	41	(1,24)	23	(1,02)	14	(1,13)
Tip (IV/11)	125	(2,75)	71	(2,11)	32	(1,43)	18	(1,41)
Tip (IV/12)	80	(1,75)	62	(1,84)	33	(1,47)	19	(1,49)
Tip (III/1)	45	(1,00)	34	(1,00)	22	(1,00)	12	(1,00)
Tip (III/2)	151	(3,32)	94	(2,80)	35	(1,55)	18	(1,48)

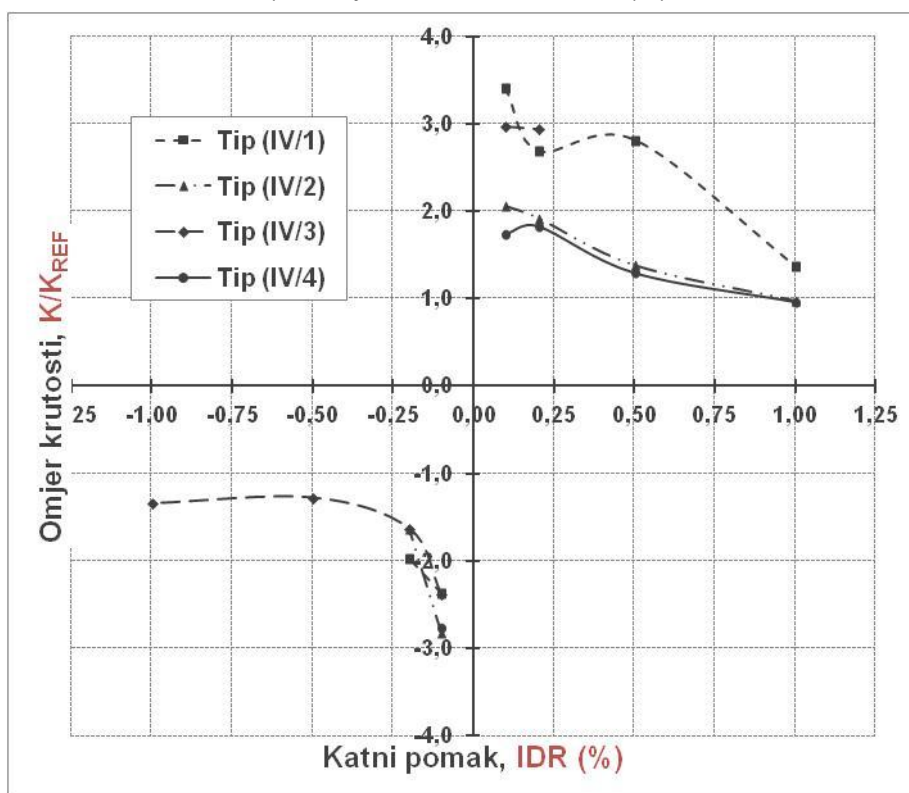
**Tablica 6.13.** Krutost numeričkih modela grupe IV,  $K$  (kN/mm) i omjer krutosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na krutost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (IV/1)	-142	-(2,38)	-96	-(1,98)	-	-	-	-
Tip (IV/2)	-168	-(2,83)	-79	-(1,64)	-	-	-	-
Tip (IV/3)	-142	-(2,39)	-79	-(1,63)	-28	-(1,28)	-21	-(1,34)
Tip (IV/4)	-165	-(2,77)	-	-	-	-	-	-
Tip (IV/5)	-132	-(2,22)	-86	-(1,77)	-64	-(2,91)	-37	-(2,36)
Tip (IV/6)	-150	-(2,51)	-78	-(1,60)	-	-	-	-
Tip (IV/7)	-135	-(2,27)	-77	-(1,59)	-35	-(1,59)	-24	-(1,53)
Tip (IV/8)	-153	-(2,57)	-77	-(1,60)	-37	-(1,69)	-26	-(1,66)
Tip (IV/9)	-102	-(1,71)	-60	-(1,25)	-29	-(1,33)	-14	-(0,90)
Tip (IV/10)	-110	-(1,84)	-60	-(1,24)	-29	-(1,31)	-14	-(0,91)
Tip (IV/11)	-119	-(2,00)	-68	-(1,40)	-32	-(1,48)	-26	-(1,66)
Tip (IV/12)	-153	-(2,57)	-77	-(1,60)	-37	-(1,69)	-26	-(1,66)
Tip (III/1)	-60	-(1,00)	-48	-(1,00)	-22	-(1,00)	-16	-(1,00)
Tip (III/2)	-151	-(2,53)	-94	-(1,93)	-36	-(1,63)	-17	-(1,04)

a) Krivulje odnosa  $K$ (kNmm) i IDR (%)

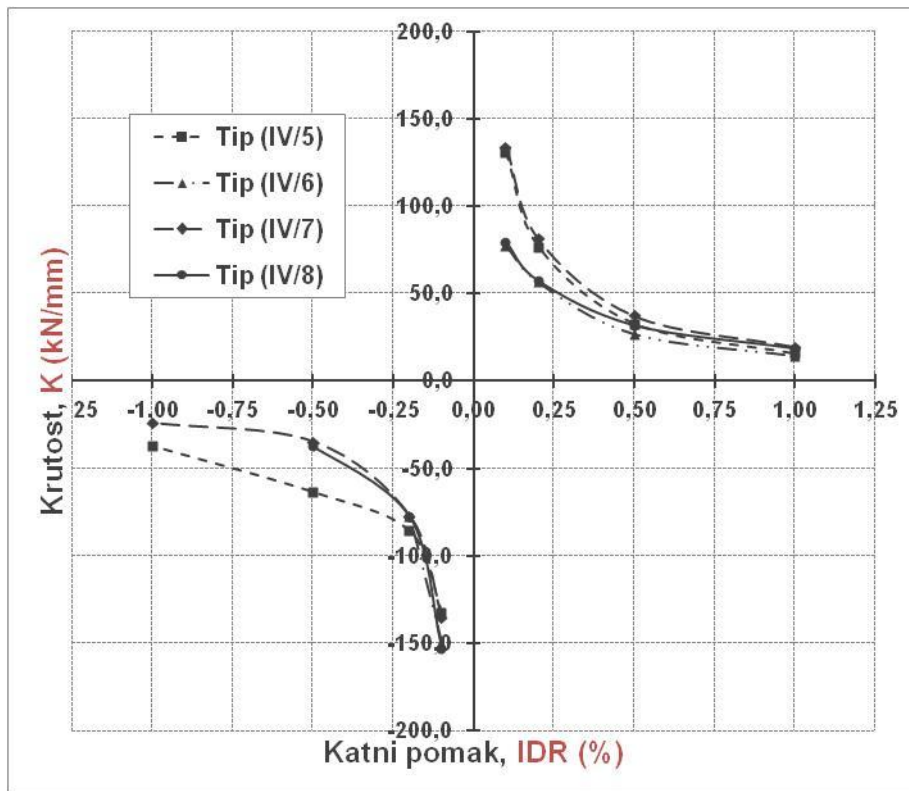


b) Krivulje odnosa  $K/K_{REF}$  i IDR (%)

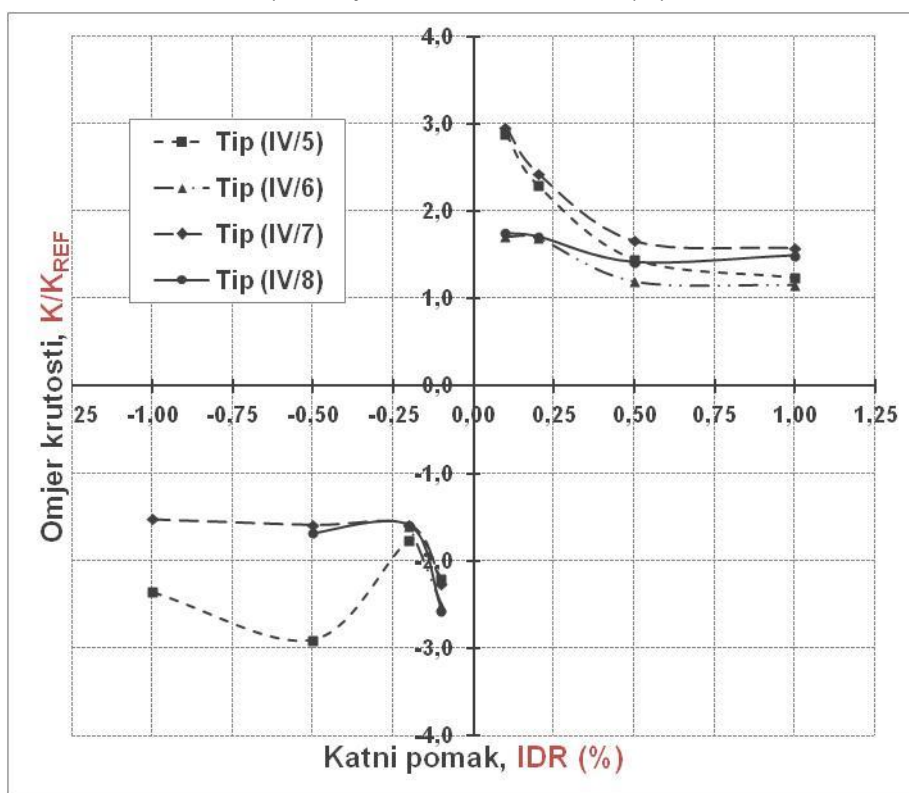


Slika 6.44. Krutost numeričkih modela grupe IV,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

a) Krivulje odnosa  $K$ (kN/mm) i IDR (%)



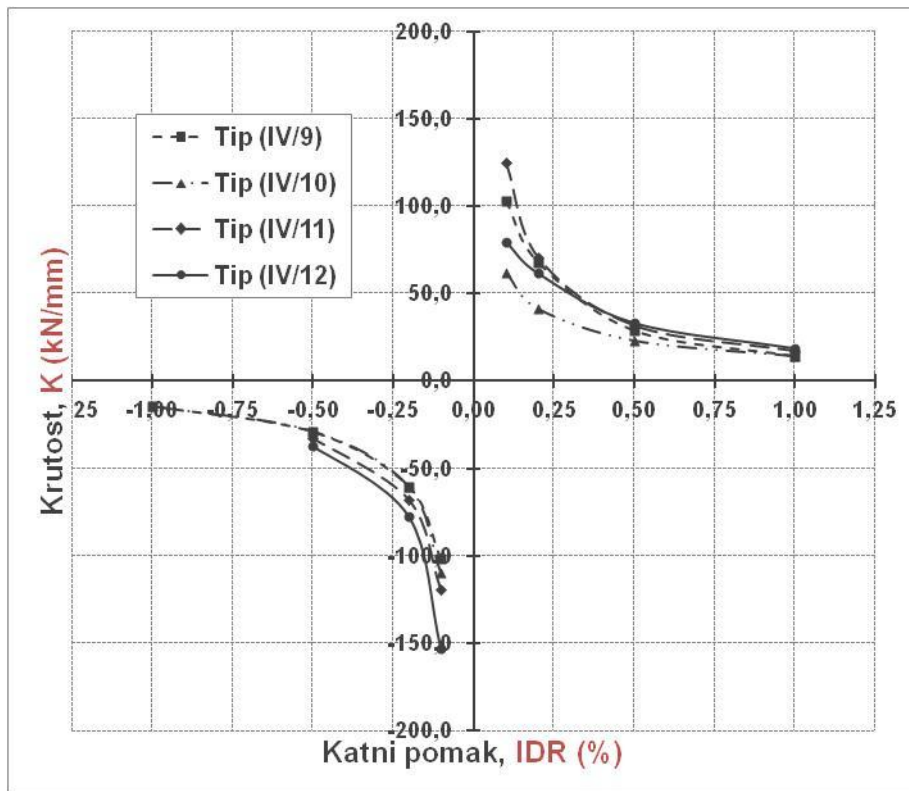
b) Krivulje odnosa  $K/K_{REF}$  i IDR (%)



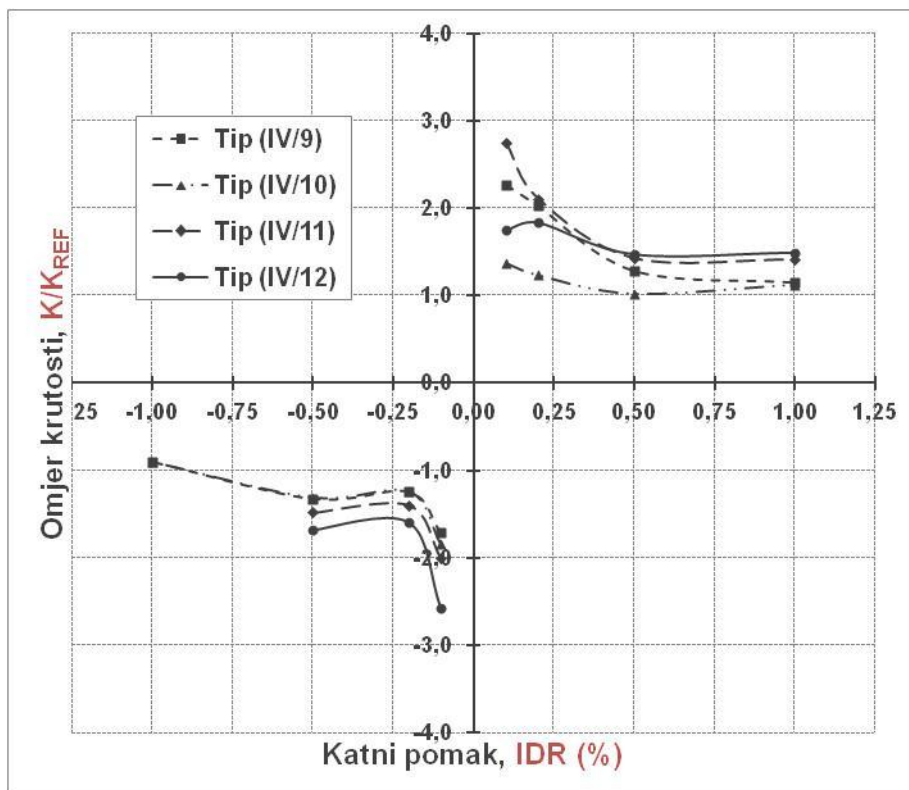
Slika 6.45. Krutost numeričkih modela grupe IV,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)



a) Krivulje odnosa  $K$ (kN/mm) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $K/K_{REF}$  i IDR (%)



Slika 6.46. Krutost numeričkih modela grupe IV,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

## 6.6.2. Numerički modeli grupe V i VI

U tablicama 6.14. i 6.15. te 6.16. i 6.17. te na slikama 6.47 i 6.48. dan je prikaz stvarnih krutosti te omjera stvarne i krutosti praznog okvira.

### a) Numerički modeli grupe V

**Tablica 6.14.** Krutost matematičkih modela grupe V,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (V/1)	186	(3,25)	104	(2,42)	41	(1,93)	21	(1,88)
Tip (V/2)	93	(1,63)	64	(1,50)	31	(1,47)	16	(1,38)
Tip (V/3)	179	(3,13)	107	(2,50)	44	(2,07)	22	(1,94)
Tip (V/4)	57	(1,00)	43	(1,00)	21	(1,00)	11	(1,00)

**Tablica 6.15.** Krutost matematičkih modela grupe V,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (V/1)	-186	-(3,25)	-	-	-	-	-	-
Tip (V/2)	-150	-(2,63)	-	-	-	-	-	-
Tip (V/3)	-171	-(3,00)	-	-	-	-	-	-
Tip (V/4)	-57	-(1,00)	-46	-(1,00)	-21	-(1,00)	-11	-(1,00)

### b) Numerički modeli grupe VI

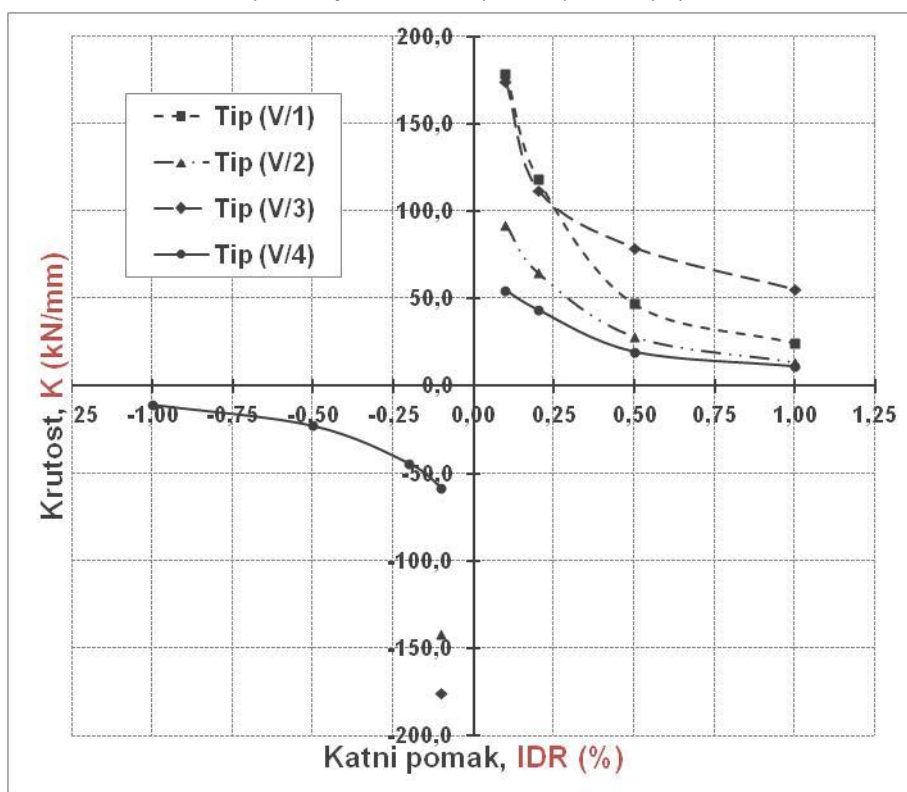
**Tablica 6.16.** Krutost matematičkih modela grupe VI,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (VI/1)	86	(2,40)	64	(2,00)	30	(1,75)	16	(1,57)
Tip (VI/2)	79	(2,20)	57	(1,78)	30	(1,75)	16	(1,57)
Tip (VI/3)	164	(4,60)	100	(3,11)	40	(2,33)	20	(2,00)
Tip (VI/4)	36	(1,00)	32	(1,00)	17	(1,00)	10	(1,00)

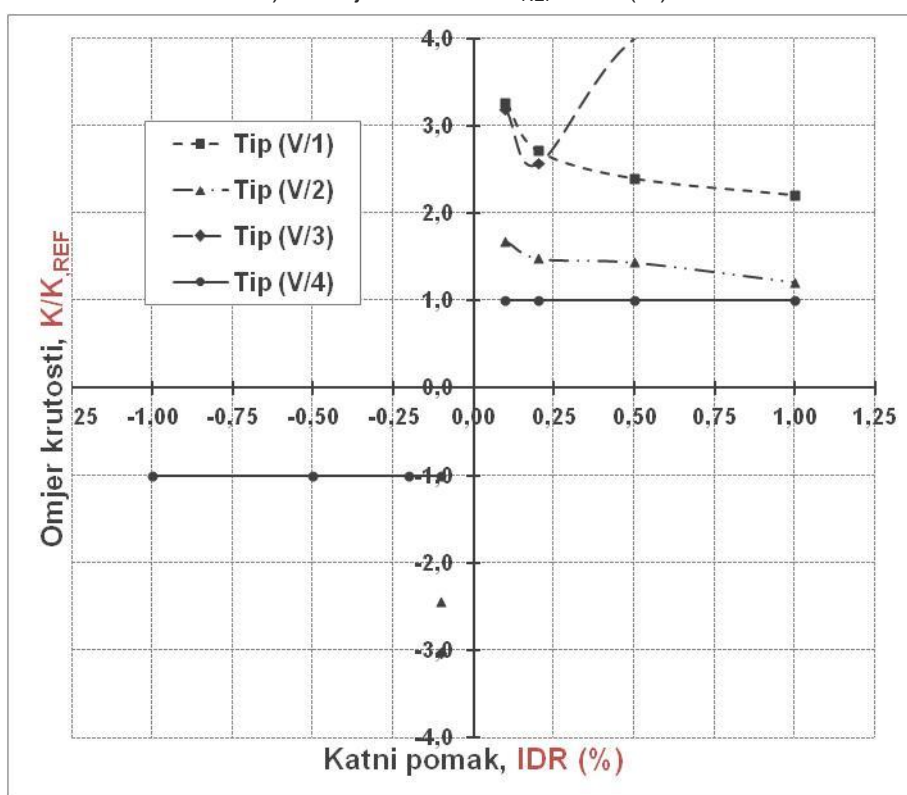
**Tablica 6.17.** Krutost matematičkih modela grupe VI,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (VI/1)	-93	-(2,60)	-68	-(2,11)	-30	-(1,75)	-16	-(1,69)
Tip (VI/2)	-107	-(3,00)	-75	-(2,33)	-31	-(1,83)	-	-
Tip (VI/3)	-143	-(4,00)	-100	-(3,11)	-	-	-	-
Tip (VI/4)	-36	-(1,00)	-32	-(1,00)	-17	-(1,00)	-9	-(1,00)

a) Krivulje odnosa  $K$ (kN/mm) i IDR (%)

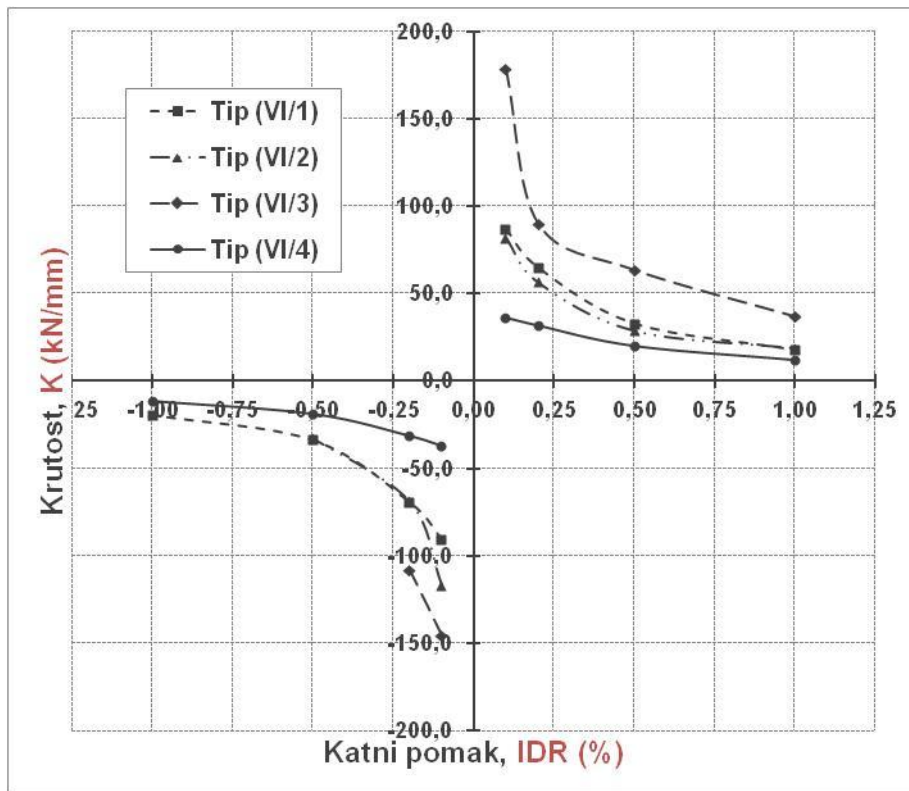


b) Krivulje odnosa  $K/K_{REF}$  i IDR (%)

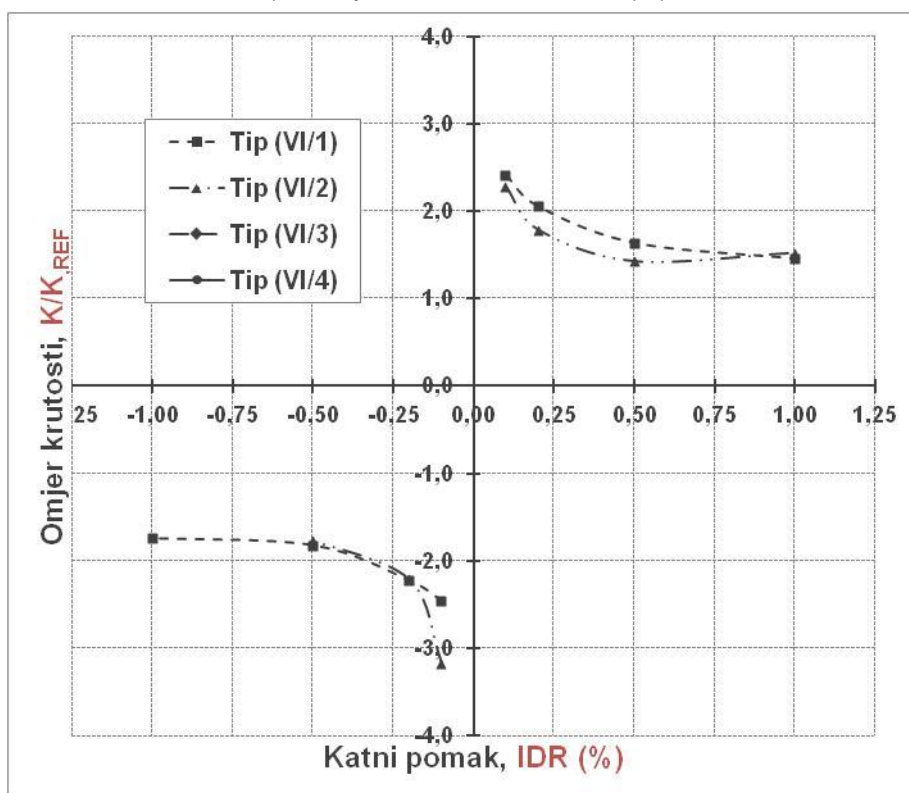


Slika 6.47. Krutost numeričkih modela grupe V,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

a) Krivulje odnosa  $K$ (kN/mm) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $K/K_{REF}$  i IDR (%)



Slika 6.48. Krutost numeričkih modela grupe VI,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

## 6.7. Histerezna energija

### 6.7.1. Numerički modeli grupe IV

U tablicama 6.18. i 6.19. te na slikama 6.49. do 6.51. prikazana je histerezna energija  $E$  (kNmm), i omjer histerezne energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na istu praznog okvira.

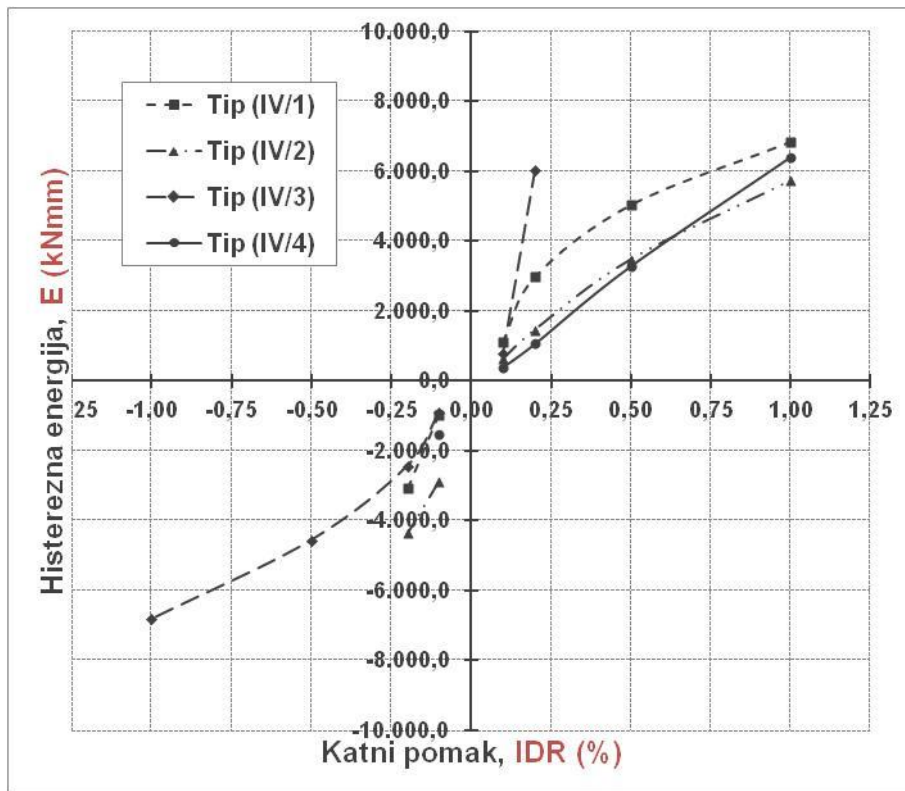
**Tablica 6.18.** Histerezna energija numeričkih modela grupe IV,  $E$  (kNmm) i omjer energija,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (IV/1)	1130	(17,22)	2981	(8,79)	5032	(2,69)	6831	(1,60)
Tip (IV/2)	626	(9,54)	1464	(4,31)	3480	(1,86)	5742	(1,34)
Tip (IV/3)	844	(12,86)	6046	(17,82)	-	-	-	-
Tip (IV/4)	393	(5,99)	1066	(3,14)	3275	(1,75)	6382	(1,49)
Tip (IV/5)	802	(12,22)	2756	(8,12)	4490	(2,40)	15513	(3,63)
Tip (IV/6)	332	(5,06)	950	(2,80)	2939	(1,57)	5777	(1,35)
Tip (IV/7)	1185	(18,06)	3027	(8,92)	5544	(2,96)	10737	(2,51)
Tip (IV/8)	355	(5,41)	1046	(3,08)	5039	(2,69)	9946	(2,33)
Tip (IV/9)	587	(8,95)	1706	(5,03)	8045	(4,30)	9359	(2,19)
Tip (IV/10)	259	(3,94)	692	(2,04)	2393	(1,28)	5796	(1,36)
Tip (IV/11)	936	(14,26)	1737	(5,12)	3737	(2,00)	6211	(1,45)
Tip (IV/12)	404	(6,15)	1761	(5,19)	5669	(3,03)	9946	(2,33)
Tip (III/1)	66	(1,00)	339	(1,00)	1870	(1,00)	4269	(1,00)
Tip (III/2)	1347	(20,53)	3602	(10,62)	7712	(4,12)	9498	(2,22)

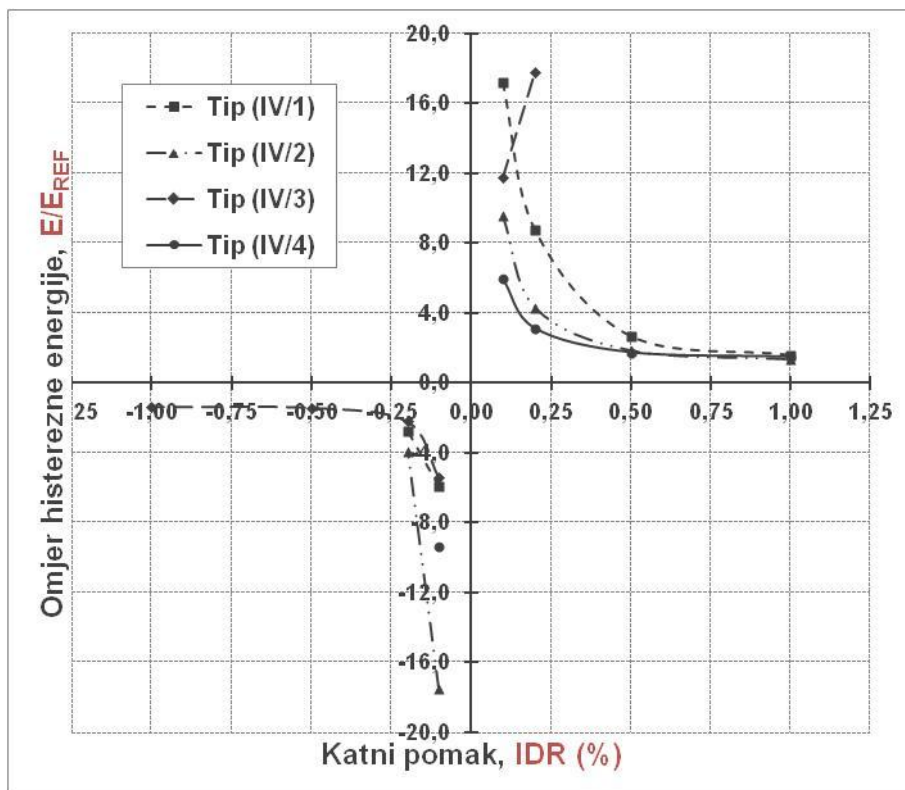
**Tablica 6.19.** Histerezna energija numeričkih modela grupe IV,  $E$  (kNmm) i omjer energija,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (IV/1)	967	(5,89)	3062	(2,76)	-	-	-	-
Tip (IV/2)	2873	(17,50)	4339	(3,91)	-	-	-	-
Tip (IV/3)	888	(5,41)	2427	(2,18)	4553	(1,41)	6821	(1,37)
Tip (IV/4)	1532	(9,33)	-	-	-	-	-	-
Tip (IV/5)	849	(5,17)	4266	(3,84)	9236	(2,86)	10661	(2,13)
Tip (IV/6)	1432	(8,72)	6169	(5,55)	-	-	-	-
Tip (IV/7)	1630	(9,93)	3420	(3,08)	4575	(1,42)	8698	(1,74)
Tip (IV/8)	2972	(18,10)	3807	(3,43)	8134	(2,52)	-	-
Tip (IV/9)	707	(4,31)	1375	(1,24)	3185	(0,99)	5901	(1,18)
Tip (IV/10)	2376	(14,47)	5500	(4,95)	13240	(4,11)	14139	(2,83)
Tip (IV/11)	773	(4,71)	2350	(2,12)	4222	(1,31)	-	-
Tip (IV/12)	2972	(18,10)	3800	(3,42)	8134	(2,52)	-	-
Tip (III/1)	-164	-(1,00)	-1111	-(1,00)	-3224	-(1,00)	-4994	-(1,00)
Tip (III/2)	-1413	-(8,61)	-4407	-(3,97)	-11043	-(3,42)	-12809	-(2,57)

a) Krivulje odnosa  $E$  (kNm) i IDR (%)



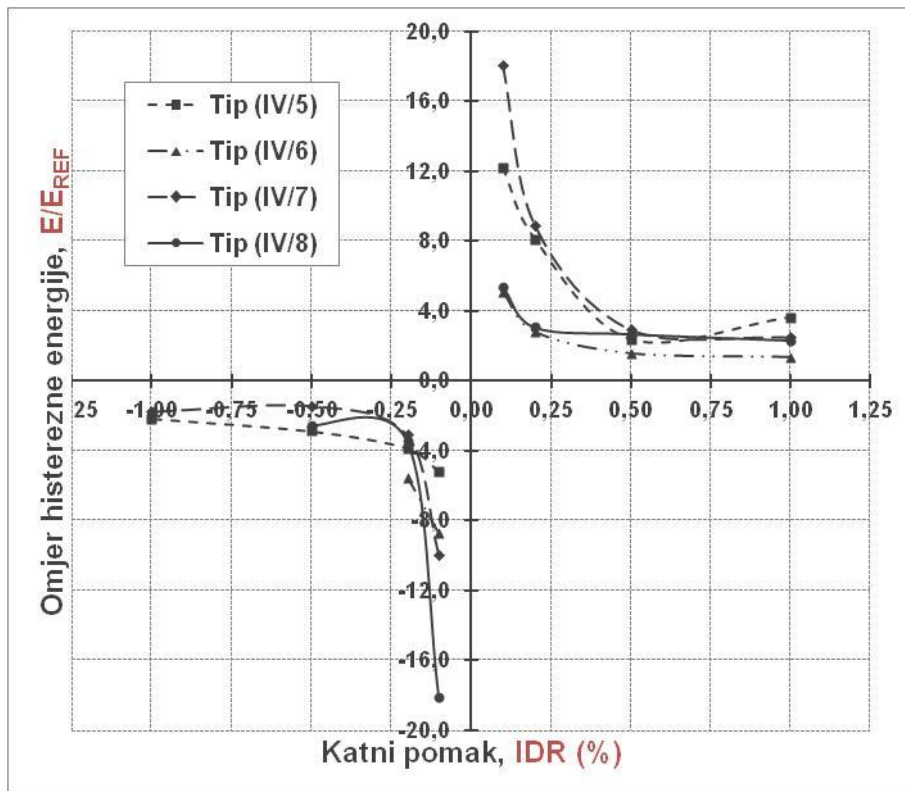
b) Krivulje odnosa  $E/E_{REF}$  i IDR (%)



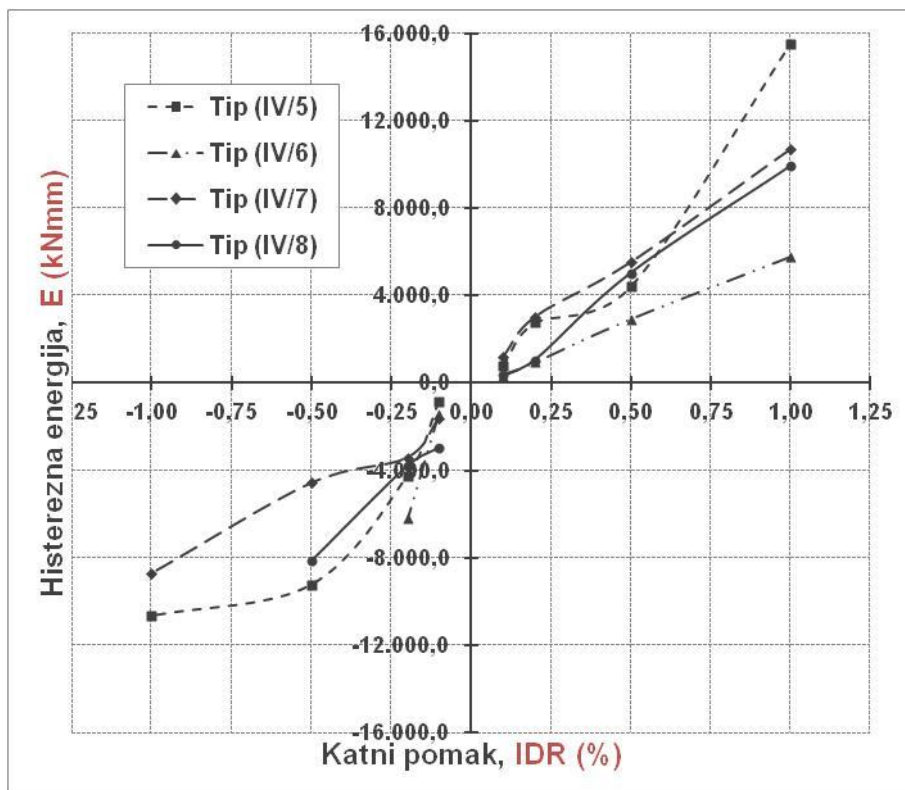
Slika 6.49. Histerezna energija numeričkih modela grupe IV,  $E$  (kNm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku,  $IDR$  (%)



a) Krivulje odnosa  $E$  (kNm) i IDR (%)

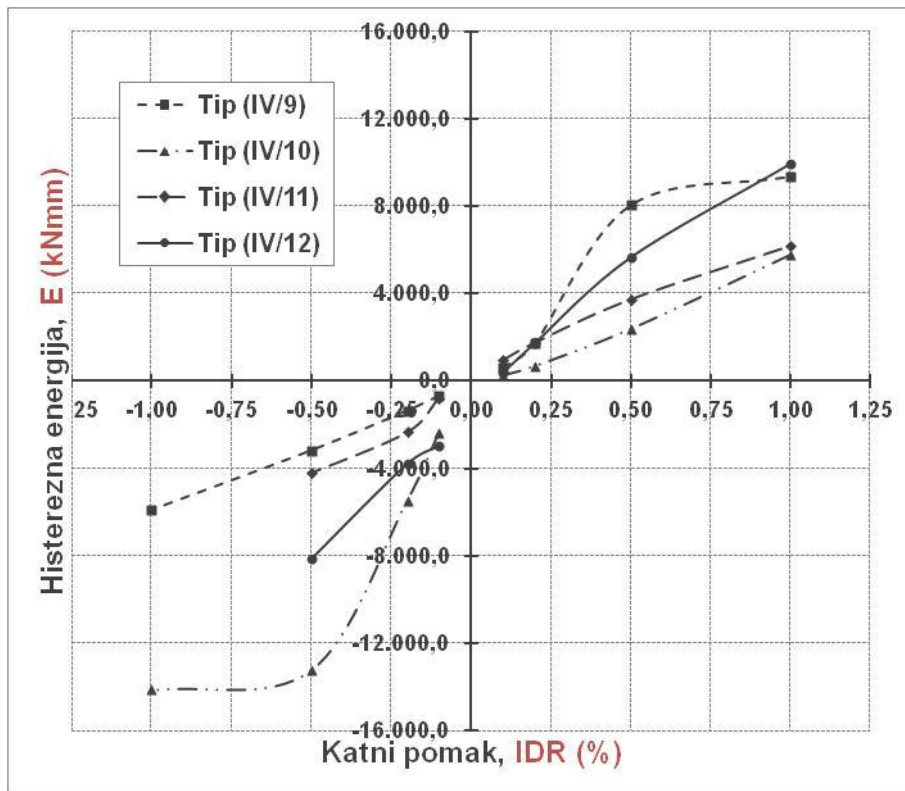


b) Krivulje odnosa  $E/E_{REF}$  i IDR (%)

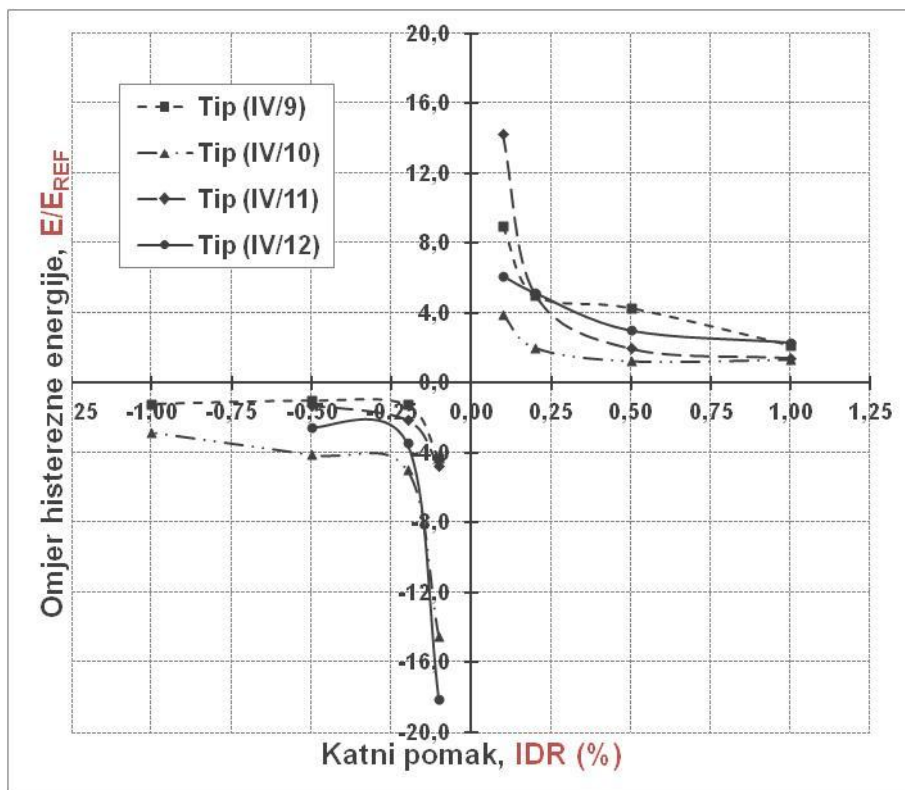


Slika 6.50. Histerezna energija numeričkih modela grupe IV,  $E$  (kNm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

(a) Krivulje odnosa  $E$  (kNm) i IDR (%)



(b) Krivulje odnosa  $E/E_{REF}$  i  $IDR$  (%)



Slika 6.51. Histerezna energija numeričkih modela grupe IV,  $E$  (kNm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku,  $IDR$  (%)

## 6.7.2. Numerički modeli grupe V i VI

U tablicama 6.20. i 6.21. te 6.22. i 6.23. te na slikama 6.51. i 6.52. dan je prikaz stvarnih krutosti te omjera stvarne i krutosti praznog okvira.

### c) Numerički modeli grupe V

**Tablica 6.20.** Histerezna energija numeričkih modela grupe V,  $E$  (kNmm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (V/1)	2014	(28,79)	3181	(9,22)	5065	(2,60)	7481	(0,88)
Tip (V/2)	517	(7,39)	1372	(3,98)	3908	(2,01)	6040	(0,71)
Tip (V/3)	3080	(44,02)	4625	(13,41)	5655	(2,90)	7269	(0,86)
Tip (V/4)	70	(1,00)	345	(1,00)	1948	(1,00)	8489	(1,00)

**Tablica 6.21.** Histerezna energija numeričkih modela grupe V,  $E$  (kNmm) i omjer energija,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (V/1)	1805	(13,41)	-	-	-	-	-	-
Tip (V/2)	1662	(12,35)	-	-	-	-	-	-
Tip (V/3)	1970	(14,64)	-	-	-	-	-	-
Tip (V/4)	135	(1,00)	591	(1,00)	2231	(1,00)	4848	(1,00)

### d) Numerički modeli grupe VI

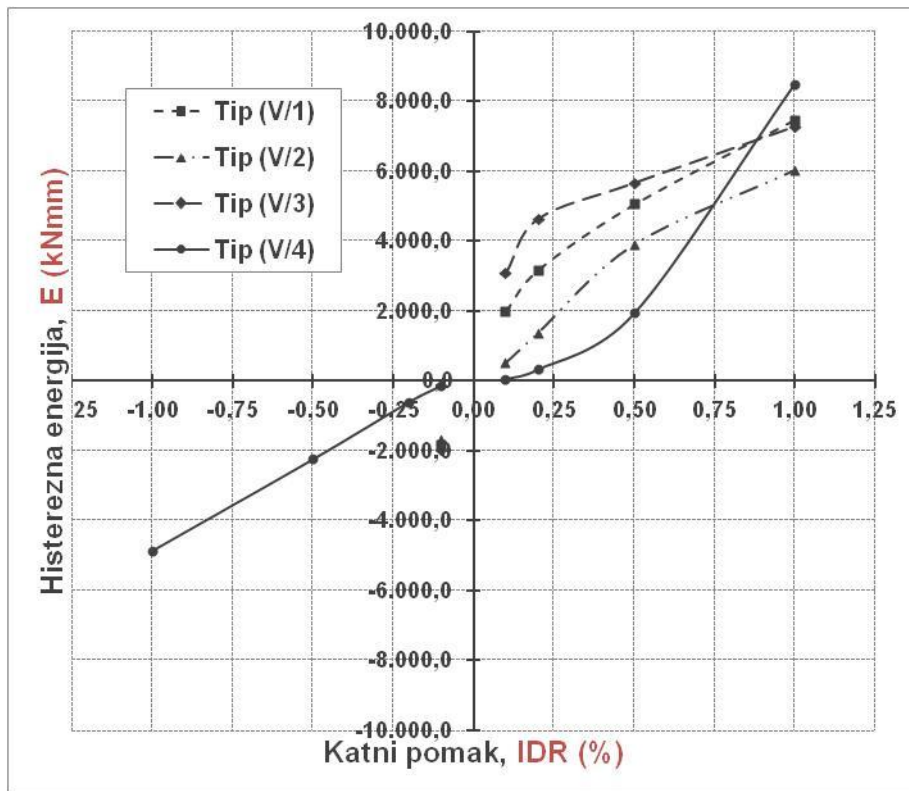
**Tablica 6.22.** Histerezna energija numeričkih modela grupe VI,  $E$  (kNmm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (VI/1)	526	(9,42)	1514	(5,78)	4830	(4,09)	13787	(3,79)
Tip (VI/2)	313	(5,61)	1186	(4,53)	3587	(3,04)	9320	(2,56)
Tip (VI/3)	2378	(42,62)	4151	(15,85)	5261	(4,45)	7440	(2,05)
Tip (VI/4)	56	(1,00)	262	(1,00)	1182	(1,00)	3637	(1,00)

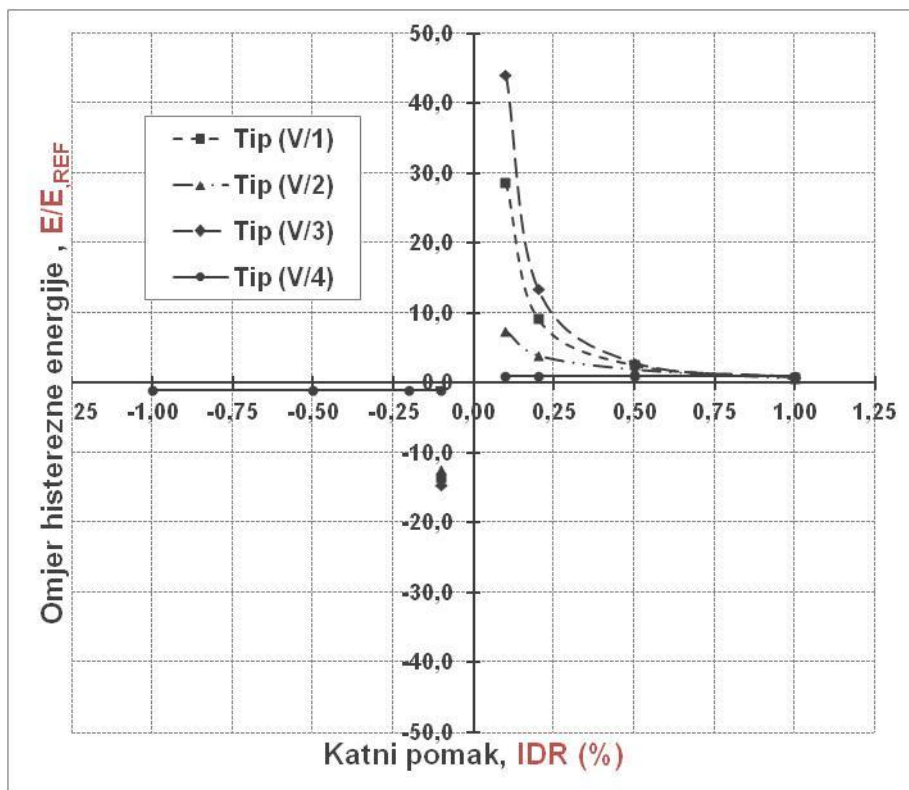
**Tablica 6.23.** Histerezna energija numeričkih modela grupe VI,  $E$  (kNmm) i omjer energija,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (VI/1)	548	(9,16)	2115	(6,89)	5546	(3,18)	8961	(1,50)
Tip (VI/2)	946	(16,95)	3712	(14,18)	7840	(6,63)	-	-
Tip (VI/3)	1282	(22,97)	4602	(17,57)	-	-	-	-
Tip (VI/4)	60	(1,07)	307	(1,17)	1745	(1,48)	5967	(1,00)

(a) Krivulje odnosa  $E$  (kNmm) i IDR (%)

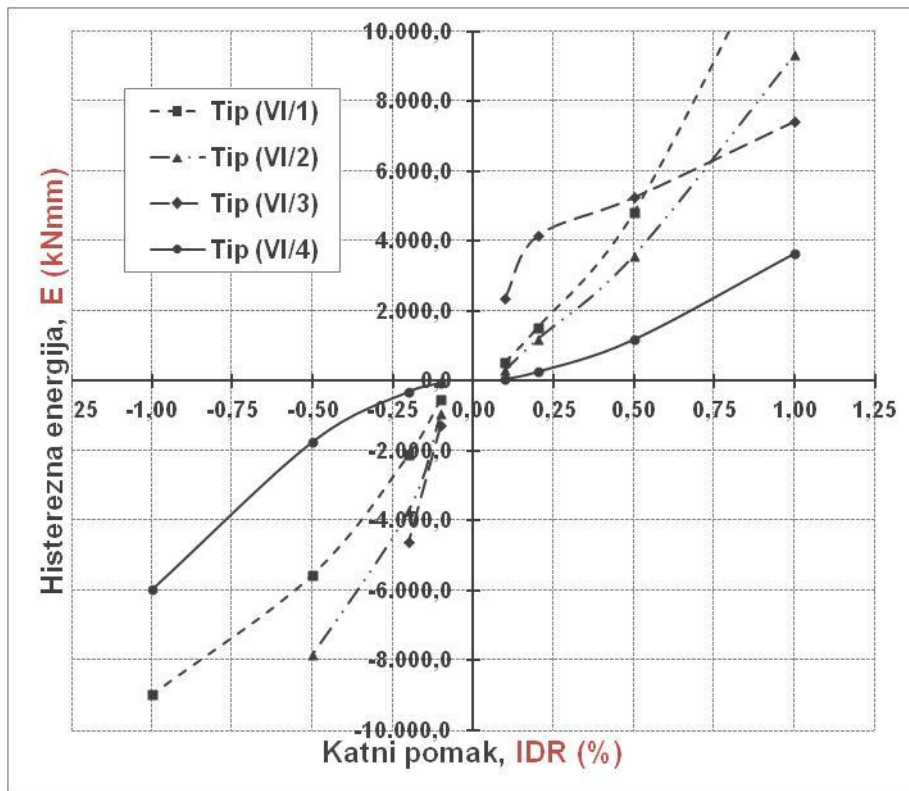


(b) Krivulje odnosa  $E/E_{REF}$  i IDR (%)

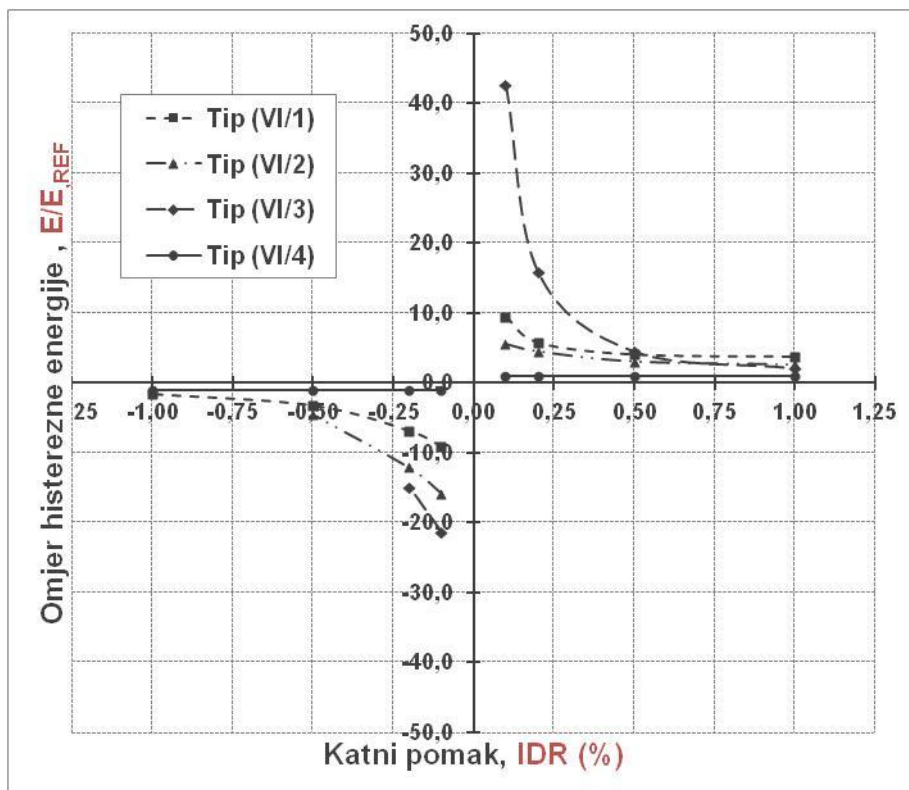


Slika 6.51. Histerezna energija numeričkih modela grupe V,  $E$  (kNmm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku,  $IDR$  (%)

(a) Krivulje odnosa  $E$  (kNmm) i IDR (%)



(b) Krivulje odnosa  $E/E_{REF}$  i IDR (%)



Slika 6.52. Histerezna energija numeričkih modela grupe VI,  $E$  (kNmm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)



### 6.7.3. Diskusija rezultata proračuna

Numerički modeli grupa IV, V i VI s punim ispunom ostvarili su promjene u krutosti i nosivosti te histerezoj energiji, obzirom na prisutnost vertikalnih serklaža, smještaj i vrstu otvora te izmjere zidanog ispuna. Razlike između krutosti te nosivosti modela pojedinih grupa u odnosu na prazan armirano-betonski okvir te okvir s punim ispunom su sljedeće:

a) Numerički modeli grupe IV

**Numerički modeli tip (IV/1) do (IV/4) su modeli s otvorima za prozor s  $A_o < 1,5m^2$ . U odnosu na slučaj s punim ispunom, modeli tip (IV/1) i tip (IV/3) s otvorom u sredini nisu pokazali znatna odstupanja u pogledu krutosti i nosivosti.** Za smjer opterećivanja sa strane s koje je otvor, krutost (nosivost) modela s otklonjenim otvorima tip (IV/2) odnosno tip (IV/4) bila je manja 1,62 odnosno 1,92 puta pri  $IDR=0,10\%$ , 1,5 puta pri  $IDR=0,20\%$ , 1,1 odnosno 1,3 puta pri  $IDR=0,50\%$  i 1,5 puta pri  $IDR=1,0\%$ . Sa suprotne strane istih modela razlike u krutosti i nosivosti nisu bile znatne. **Otklon otvora utjecao je na smanjenje krutosti (nosivosti) pri neznatnom (početna krutost) i osrednjem oštećenju, na pozitivnoj strani. Utjecaj se povećavao s izmjerama otvora. Na negativnoj strani krutost (nosivost) je bila jednaka kao i u slučaju punog ispuna pri svim razinama oštećenja.** U odnosu na prazan armirano-betonski okvir, nosivost modela bila je (na pozitivnoj strani) 1,73 do 3,40 puta veća pri  $IDR=0,10\%$ , 1,83 do 2,94 puta pri  $IDR=0,20\%$ , 1,30 do 2,82 puta veća pri  $IDR=0,50\%$  i 1,0 do 1,38 puta veća pri  $IDR=1,0\%$ , od čega niže vrijednosti poprimaju modeli s otklonjenim otvorom. S negativne strane, u slučaju otklonjenog otvora, razlike u krutosti (nosivosti) između modela s otvorom u sredini te onih s otklonjenim otvorom, nisu znatne. **Modeli s otvorima pokazali su povećanje krutosti i nosivosti u odnosu na prazan armirano-betonski okvir, od čega najviše modeli otvorom u sredini.** Uzrokovali su smanjenje ukupne histerezne ennergije za približno 30%.

**Numerički modeli tip (IV/5) do (IV/8) su modeli s otvorima za prozor s  $A_o > 1,5m^2$ .** U odnosu na puni ispun, modeli s otvorom za prozor u sredini tip (IV/5) bez vertikalnih serklaža te tip (IV/7) s vertikalnim serklažima, imali su manju krutost 1,15 puta pri  $IDR=0,10\%$ , 1,2 puta pri  $IDR=0,20\%$ , 1,1 odnosno 1,0 puta pri  $IDR=0,50\%$  i 1,2 odnosno 0,9 puta pri  $IDR=1,0\%$ . **U usporedbi krutosti i nosivosti modela s otvorom u sredini s vertikalnim serklažima i bez njih, ona je jednaka pri neznatnom i osrednjem oštećenju. Pri teškom i oštećenju pred slom krutost (nosivost) modela sa serklažima je jednaka kao i u slučaju punog ispuna, dok je krutost (nosivost) modela bez serklaža 20% manja.** U slučaju modela s otklonjenim otvorima, tip (IV/6) i tip (IV/8) krutost je bila manja 1,9 puta pri  $IDR=0,10\%$ , 1,7 puta pri  $IDR=0,20\%$ , 1,3 odnosno 1,1 puta pri  $IDR=0,50\%$  i 1,3 odnosno 1,0 puta pri  $IDR=1,0\%$ , u odnosu na puni ispun.



**Pri neznatnom i osrednjem oštećenju, krutost (nosivost) je dvostruko manja odnosu na slučaj s punim ispunom bez obzira na prisutnost vertikalnog serklaža. Pri većim katnim pomacima (teška i oštećenja pred slom) vertikalni serklaž je omogućio jednaku krutost (nosivost) kao i u slučaju punog ispuna, dok je model bez njega pokazao krutost manju za 20%. S negativne strane krutost (nosivost) je bila jednaka krutosti i nosivosti modela s punim ispunom. Otklon otvora uzrokovao je pad krutosti (nosivosti) u odnosu na slučaj s otvorom u sredini. S negativne strane, u slučaju otklonjenog otvora, razlike u krutosti (nosivosti) između modela s otvorom u sredini te onih s otklonjenim otvorom, nisu znatne. U odnosu na prazan armirano-betonski okvir, nosivost modela bila je (na pozitivnoj strani) 1,70 do 2,95 puta veća pri IDR=0,10%, 1,71 do 2,43 puta pri IDR=0,20%, 1,19 do 1,66 puta veća pri IDR=0,50% i 1,15 do 1,58 puta veća pri IDR=1,0%, od čega niže vrijednosti poprimaju modeli s otklonjenim otvorom. Otklonjenim otvor bez serklaža uzrokovao je smanjenje ukupne histerezne energije za 30%. Modeli sa serklažima su imali jednaku histereznu energiju kao i model s punim ispunom. Najveću je imao model s otvorom u sredini bez serklaža. Jednako je i za modele s otvorom za vrata.**

**Numerički modeli tip (IV/9) do (IV/12) su modeli s otvorima za vrata s  $A_o > 1,5m^2$ . U odnosu na puni ispun, modeli s otvorom za vrata u sredini tip (IV/9) bez vertikalnih serklaža te tip (IV/11) s vertikalnim serklažima, imali su manju krutost 1,47 odnosno 1,21 puta pri IDR=0,10%, 1,38 odnosno 1,32 puta pri IDR=0,20%, 1,52 odnosno 1,1 puta pri IDR=0,50% i 1,3 odnosno 1,0 puta pri IDR=1,0%. Model s vertikalnim serklažom je pri svim razinama oštećenja za slučaj otvora za vrata u sredini imao veću krutost i nosivost u odnosu na onaj isti serklaža. Pri teškom i oštećenju pred slom imao je jednaku krutost i nosivost kao i model s punim ispunom. Pri neznatnom i osrednjem oštećenju krutost (nosivost) mu je bila približno 20% manja. U slučaju modela s otklonjenim otvorima, tip (IV/10) i tip (IV/12) krutost (nosivost) je bila manja 2,44 odnosno 1,89 puta pri IDR=0,10%, 2,29 odnosno 1,52 puta pri IDR=0,20%, 1,5 odnosno 1,1 puta pri IDR=0,50% i 1,3 odnosno 1,0 puta pri IDR=1,0%. U odnosu na prazan armirano-betonski okvir, nosivost modela bila je (na pozitivnoj strani) 1,37 do 2,75 puta veća pri IDR=0,10%, 1,24 do 2,11 puta pri IDR=0,20%, 1,02 do 1,47 puta veća pri IDR=0,50% i 1,13 do 1,49 puta veća pri IDR=1,0%, od čega niže vrijednosti poprimaju modeli s otklonjenim otvorom. %.**

**Model s vertikalnim serklažom je pri svim razinama oštećenja za slučaj otklonjenog otvora za vrata imao veću krutost i nosivost. Pri teškom i oštećenju pred slom imao je jednaku krutost i nosivost kao i model s punim ispunom. Pri neznatnom i osrednjem oštećenju krutost (nosivost) mu je bila 90% odnosno i 60% manja. S negativne strane, u krutosti između modela s otvorom u sredini te onih s otklonjenim otvorom, nisu znatne, ako se posebno razmatraju modeli bez i sa vertikalnim**

**serklažima. Dakle, vertikalni serklaž je ovdje također omogućio povećanje krutosti i nosivosti.**

Izvedba vertikalnog serklaža umanjila je utjecaj otvora te je krutost i nosivost, iako manja nego u slučaju punog ispuna, bila jednaka neovisno o vrsti otvora. Razlike u krutosti i nosivosti u odnosu na izvedbu bez vertikalnog serklaža su znatne. U slučaju opterećivanja sa strane suprotno od otvora, serklaž je omogućio jednaku krutost i nosivost kao i u slučaju punog ispuna. Pri teškim i oštećenjima pred slom, vertikalni serklaž je omogućio jednaku krutost kao i u slučaju punog ispuna.

a) Numerički modeli grupe V i VI

**Numerički modeli s otvorima grupe V** imali su manju nosivost u usporedbi s modelom s punim ispunom. Model s punim ispunom imao je krutost i nosivost veću od modela s otvorom u sredini te s otklonjenim otvorom za 1,0 te 1,9 puta za  $IDR=0,10\%$ , 1,0 te 1,7 puta za  $IDR=0,20\%$ , 1,1 te 1,4 za  $IDR=0,50\%$  i 1,0 te 1,4 za  $IDR=1,0\%$ . U odnosu na prazan okvir krutost i nosivost modela s ispunom je bila veća za 1,63 do 3,25 puta za  $IDR=0,10\%$ , 1,5 do 2,5 puta za  $IDR=0,20\%$ , 1,4 do 2,1 za  $IDR=0,50\%$  i 1,4 do 1,9 za  $IDR=1,0\%$ .

**Model s otvorom u sredini imao je jednaku nosivost i krutost pri svim razinama oštećenja. Model s otklonjenim otvorom nije imao jednaku nosivost i krutost stoga vertikalni serklaž nije izjednačio odgovore na pozitivnoj i negativnoj strani u odnosu na puni ispun. Na negativnoj strani u slučaju otklonjenog otvora razlika je manja, ali model nije uspio doseći veće katne pomake.**

**Numerički modeli s otvorima grupe VI** imali su manju nosivost i krutost u usporedbi s modelom s punim ispunom. Model s punim ispunom imao je nosivost i krutost veću od modela s otvorom u sredini te s otklonjenim otvorom za 1,9 te 2,1 puta za  $IDR=0,10\%$ , 1,6 te 1,8 puta za  $IDR=0,20\%$ , 1,3 za  $IDR=0,50\%$  i 1,3 za  $IDR=1,0\%$ . U odnosu na prazan okvir nosivost modela s ispunom je bila veća za 2,20 do 4,60 puta za  $IDR=0,10\%$ , 1,78 do 3,11 puta za  $IDR=0,20\%$ , 1,8 te 2,3 za  $IDR=0,50\%$  i 1,6 do 2,0 za  $IDR=1,0\%$ .

**Model s otklonjenim otvorom te s otvorom u sredini imali su sličnu nosivost i krutost u odnosu na puni ispun. Model s otklonjenim otvorom ipak pokazuje neznatno lošije rezultate. Vertikalni serklaž nije umanjio utjecaj otvora niti otklona otvora, jer je ovdje riječ o iznimno velikom otvoru u odnosu na ispun.**

Pri krajnjem promatranom katnom pomaku, histerezna energija je jednaka u slučaju otvora u sredini i modela s punim ispunom, dok je model s otklonjenim otvorom pokazao najmanju histereznu energiju.

Nosivost svih modela u odnosu na model praznog okvira pada povećanjem razine oštećenosti tj. katnog pomaka te postaje slična pri najvećem katnom pomaku. Od modela s punim ispunom, najveću nosivost i krutost imao je model tip (V/3) s najvećom duljinom ispuna. Vertikalni serklaž u slučaju malih i srednjih otvora doprinosi nosivosti i krutosti, osobito pri većim oštećenjima. U slučaju velikih otvora serklaž ne uspijeva nosivost i krutost zadržati jednakom kao i kod punog ispuna, stoga je pod značajnim utjecajem otvora, ali uspijeva sačuvati integritet ispuna.

## 6.8. Sažetak i zaključak poglavlja

U ovom poglavlju razmatrana je studija utjecaja pojedinih parametara, kao što su različite izmjere odnosa stranica zidanog ispuna i nove izmjere otvora s mogućnošću izvedbe vertikalnog serklaža i smještaja s otklonom ili u sredini. Rezultati su prikazani tablično i putem dijagrama. Proširenje istraživanja je provedeno zbog raznolikosti u vrsti i izmjerama otvora te njihovu različitom utjecaju na način sloma te radi generalizacije zaključaka. Pokazano je da je smještaj otvora ključan, jer dokazano utječe na prijenos opterećenja u zidanom ispunu. Studija u ovim poglavljima obuhvaća dvanaest mogućih slučajeva za prvotni odnos strana ispuna ( $H_1/L_1=0,72$ ) te dodatnih osam slučajeva za druga dva odnosa izmjera ispuna ( $H_1/L_1=0,93$  i  $H_1/L_1=0,59$ ).

Ustanovljeno je da otklonjeni otvori utječu znatnije na umanjenje nosivosti i krutosti nego otvori u sredini, dok prisutnost vertikalnog serklaža omogućava zadržavanje nosivosti sličnoj onoj kao kod punog ispuna, neovisno o vrsti otvora, osobito pri većim oštećenjima ispuna. Utjecaj serklaža se smanjuje povećanjem ploštine otvora u odnosu na površinu ispuna. Kao najutjecajniji parametar pokazale su se izmjere zidanog ispuna.

## Poglavlje 7.0.

# ANALIZA UTJECAJA KOLIČINE POPREČNE ARMATURE I MATERIJALA ZIDANOG ISPUNA

## 7.1. Uvod

U ovom poglavlju prikazana je studija utjecaja količine poprečne armature armirano-betonskog okvira i drukčije vrste materijala punog zidnog ispuna. Cilj je bio utvrditi nosivost, krutost i histereznu energiju u odnosu na prazan armirano-betonski okvir. Primijenjeni su zidni elementi veće čvrstoće i/ili mort višeg razreda. Mort višeg razreda čvrstoće modeliran je povećanjem početne posmične čvrstoće, a utjecaj opeka putem tlačne čvrstoće. Ostala svojstva numeričkog modela usvojena su kao u prethodnim studijama.

## 7.2. Pregled numeričkih modela

Pojednostavljeni diskretni modeli grupe VII izvedeni su u mjernom odnosu M 1:2,5. Pregled ovih modela dan je u tablici 7.1. Omjer izmjera zidnog ispuna iznosi  $L_i/H_i=4,5/3,25$  (1,8/1,3) m, u stvarnom (i pripadnom umanjenom) mjerilu. Početna svojstva materijala armirano-betonskog okvira su jednaka kao i za numeričke modele prethodnih studija, koji su kalibrirani u skladu s fizikalnim modelima. Uvedene su promjene za zidni element i mort te količinu poprečne armature. Grupi VII čini ukupno šest novih numeričkih diskretnih pojednostavljenih modela.

**Tablica 7.1.** Pregled numeričkih modela grupe VII s pripadnim svojstvima zidnih elemenata i morta te količine poprečne armature

Numerički model	Način izvedbe zidnog ispuna u stvarnim izmjerama (i pripadnim umanjenim)				
	Poprečna armatura	Zidni element $L_B/H_B=0,50/0,25$ (0,20/0,10) m		Mort $T_M=0,01$ m	
		$f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{bt}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{vk0}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$tga$ (N/mm <sup>2</sup> )
Tip (VII/1)	Dvostruko prorijeđena	Puna opeka $f_b=20$ N/mm <sup>2</sup>	Puna opeka $f_{bt}=0,2$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M5 $f_{vk0}=0,7$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M5 $tga=0,8$ N/mm <sup>2</sup>
Tip (VII/2)	Detaljirana	Puna opeka $f_b=20$ N/mm <sup>2</sup>	Puna opeka $f_{bt}=0,2$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M5 $f_{vk0}=0,7$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M5 $tga=0,8$ N/mm <sup>2</sup>
Tip (VII/3)	Dvostruko prorijeđena	Puna opeka $f_b=20$ N/mm <sup>2</sup>	Puna opeka $f_{bt}=0,2$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M10 $f_{vk0}=1,0$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M10 $tga=0,8$ N/mm <sup>2</sup>
Tip (VII/4)	Detaljirana	Puna opeka $f_b=20$ N/mm <sup>2</sup>	Puna opeka $f_{bt}=0,2$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M10 $f_{vk0}=1,0$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M10 $tga=0,8$ N/mm <sup>2</sup>
Tip (VII/5)	Dvostruko prorijeđena	Glineni blok $f_b=15,9$ N/mm <sup>2</sup>	Glineni blok $f_{bt}=0,16$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M10 $f_{vk0}=1,0$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M10 $tga=0,8$ N/mm <sup>2</sup>
Tip (VII/6)	Detaljirana	Glineni blok $f_b=15,9$ N/mm <sup>2</sup>	Glineni blok $f_{bt}=0,16$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M10 $f_{vk0}=1,0$ N/mm <sup>2</sup>	Mort M10 $tga=0,8$ N/mm <sup>2</sup>

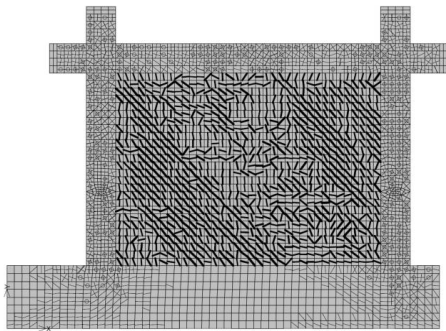
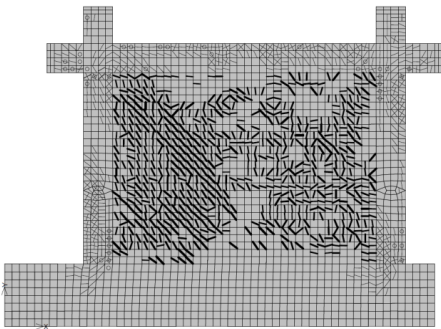
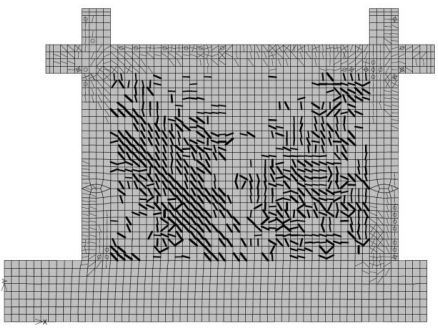
### 7.3. Rezultati numeričkih proračuna

Smanjenjem količine poprečne armature, cilj je bio istražiti mogućnosti posmičnog sloma stupova armirano-betonskog okvira. Naime, uslijed ograničenja teorijskog modela materijala, umjesto posmičnog sloma i smanjenja nosivosti, dobiveni su oprečni rezultati. Iz razloga što to nije u skladu sa očekivanim rezultatima (pad nosivosti), dobiveni rezultati nisu prikazani u nastavku poglavlja.

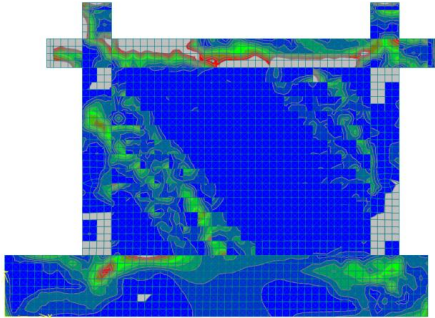
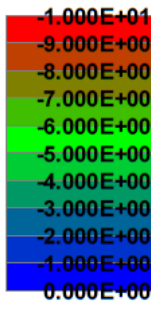
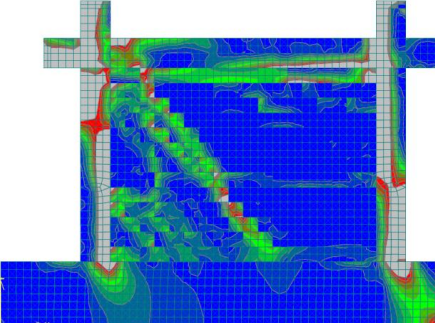
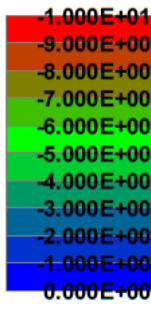
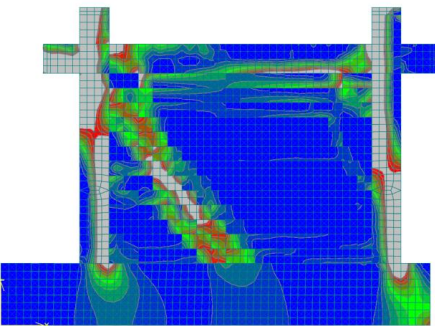
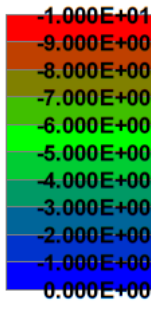
#### 7.3.1. Način sloma

U tablicama 7.2. i 7.3. dan je prikaz glavnih tlačnih naprezanja te oštećenosti pred slom pri  $IDR=1,0\%$ , s opisom načina sloma.

Tablica 7.2. Raspucalo stanje pred slom i opis načina sloma matematičkih modela u ATENA-i 2D v4

Numerički model	Raspucalo stanje pred slom	Način sloma
Tip (VII/2)		Dijagonalne vlačne pukotine i klizanje po reškama morta u sredini ispuna. Prevladava posmični slom.
Tip (VII/4)		Nastaju znatne dijagonalne vlačne pukotine. Dogodio se posmični slom.
Tip (VII/6)		Nastaju znatne dijagonalne vlačne pukotine. Dogodio se posmični slom.

Tablica 7.3. Glavna tlačna naprezanja pred slom matematičkih modela u ATENA-i 2D v4

Numerički model	Glavna tlačna naprezanja pred slom	Vrijednost (N/mm <sup>2</sup> )
Tip (VII/2)		
Tip (VII/4)		
Tip (VII/6)		

Model tip (VII/2) s mortom M5 i opečnim zidnim elementima pokazao je prevladavajući dijagonalni vlačni tj. posmični slom putem dvije kose pukotine pod kutom od 45° prema horizontali. Također je bilo vidljivo i klizanje po reškama morta u sredini ispuna, ali to nije dovelo do sloma. U slučaju primjene morta M10 na modelu tip (VII/4), dijagonalni vlačni slom je još izraženiji. Klizanje po reškama morta nije nastupilo. Za model tip (VII/6) s mortom M10 i glinenim blokovima način sloma je također bio uslijed dijagonalnih vlačnih pukotina tj. posmični slom.

**Način sloma stoga ovisi zidanog ispuna ovi o razredu čvrstoće morta i čvrstoći zidnih elemenata. Uslijed povećanja čvrstoće morta i/ili zidnih elemenata, umjesto slom klizanjem po reškama morta, nastao je prevladavajući dijagonalni vlačni tj. posmični slom.**

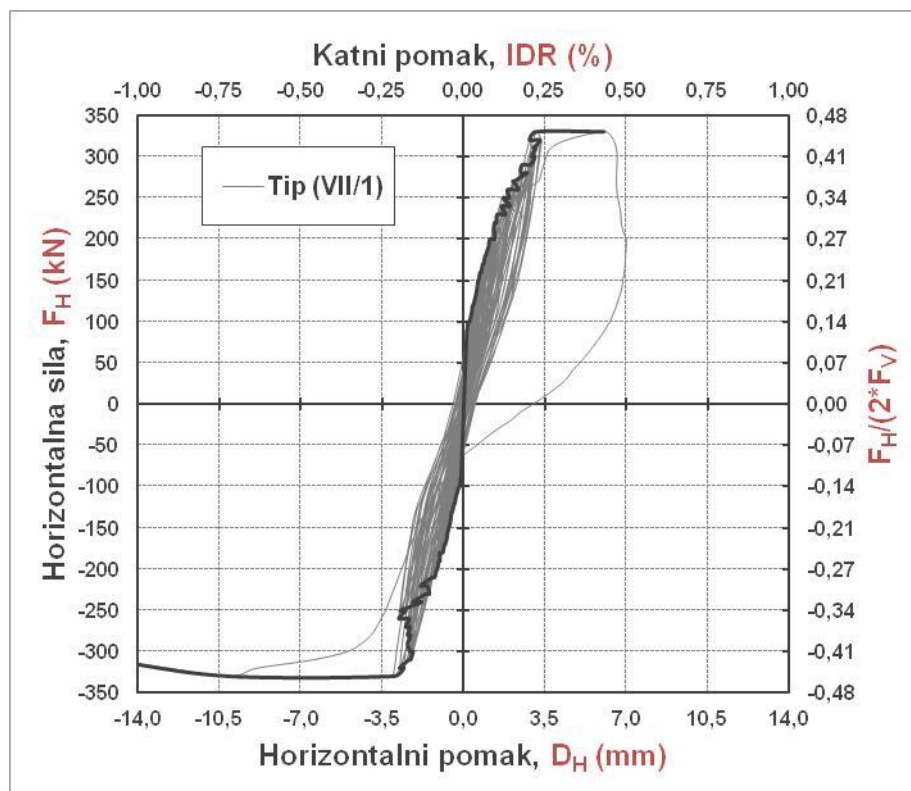


### 7.3.2. Histerezne petlje i primarne krivulje

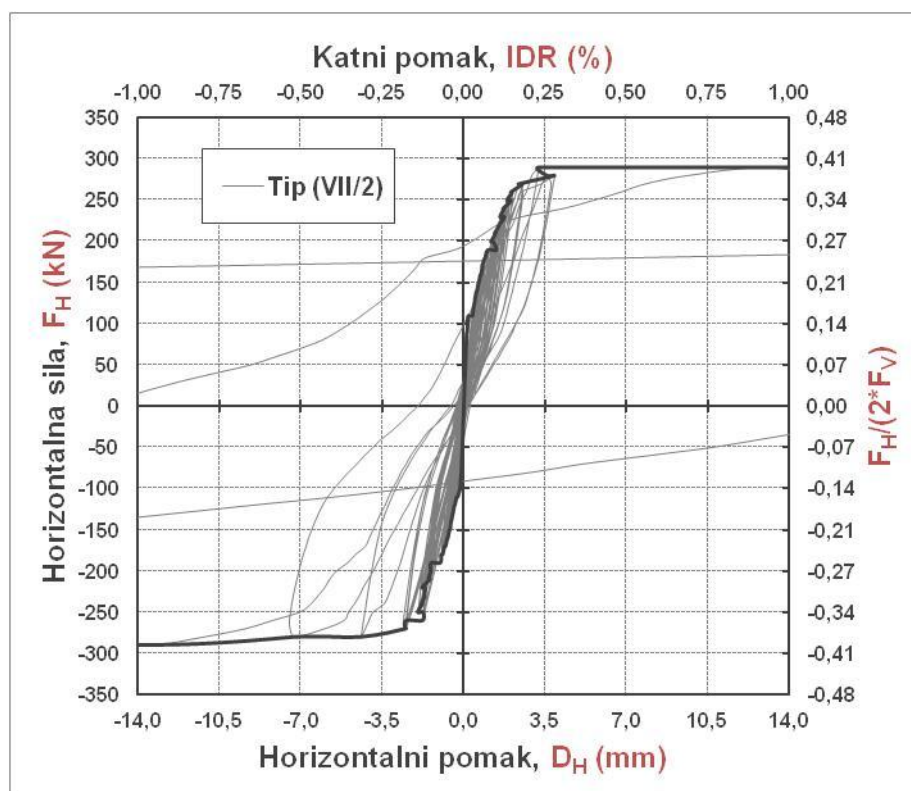
Na slikama 7.1. do 7.3. prikazane su histerezne petlje i primarne krivulje odnosa horizontalnih sile i pomaka. Dani su također slučajevi s umanjnjem količine poprečne armature radi uvida u njihovo ponašanje. Kao što je prethodno navedeno, ono nije u skladu sa stvarnošću, jer modeli ostvaruju veće nosivosti nego u slučaju s neprorijeđenom poprečnom armaturom. Uzrok ovog efekta je nemogućnost tzv. smeared-crack modela da modelira posmični slom, tj. dolazi do efekta koji se zove shear-locking, stoga ovi numerički modeli ne daju ispravnu sliku stvarnog stanja.

Usporedbom histereznih petlji, vidljivo je da svi modeli imaju izrazito velik broj ciklusa u nelinearnom području, dok je broj velikih ciklusa nakon dostizanja granice tečenja vrlo mali. Najveći broj velikih ciklusa, tj. ciklusa nakon dostizanja granice tečenja ostvario je model tip (VII/2), koji je imao niži razred čvrstoće morta (mort M5), za razliku od drugih modela. Model s mortom M10 i opekom, tip (VII/4), pokazao je veće ploštine histereznih petlji do dostizanja granice tečenja u usporedbi s modelom tip (VII/6) koji je imao isti mort, ali zidne elemente manje čvrstoće.

a) tip (VII/1)



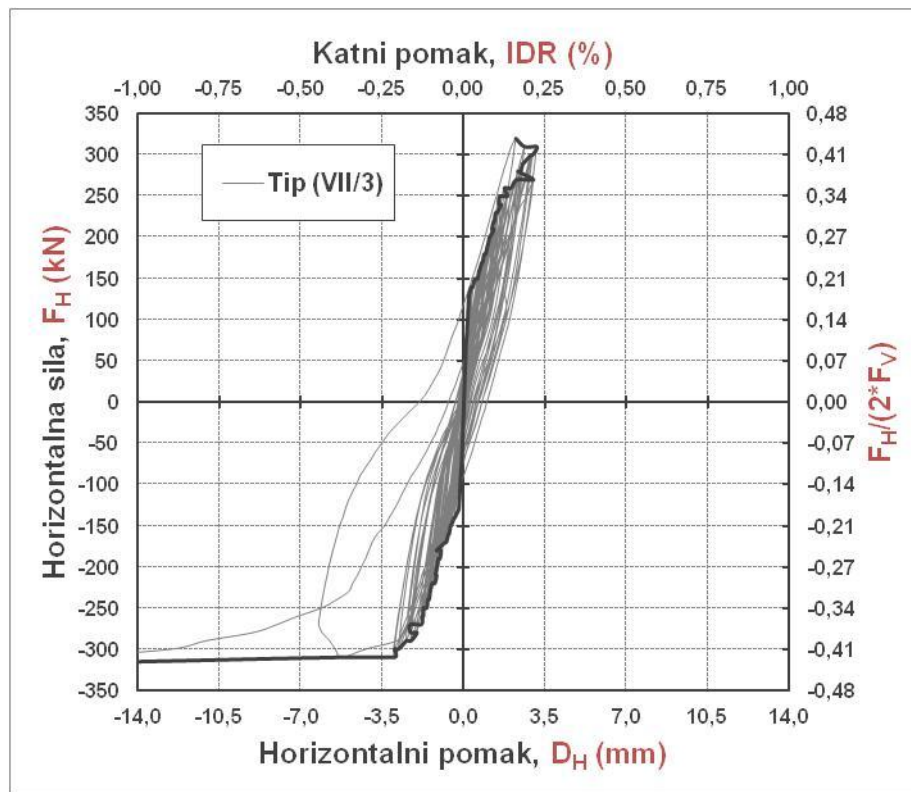
b) tip (VII/2)



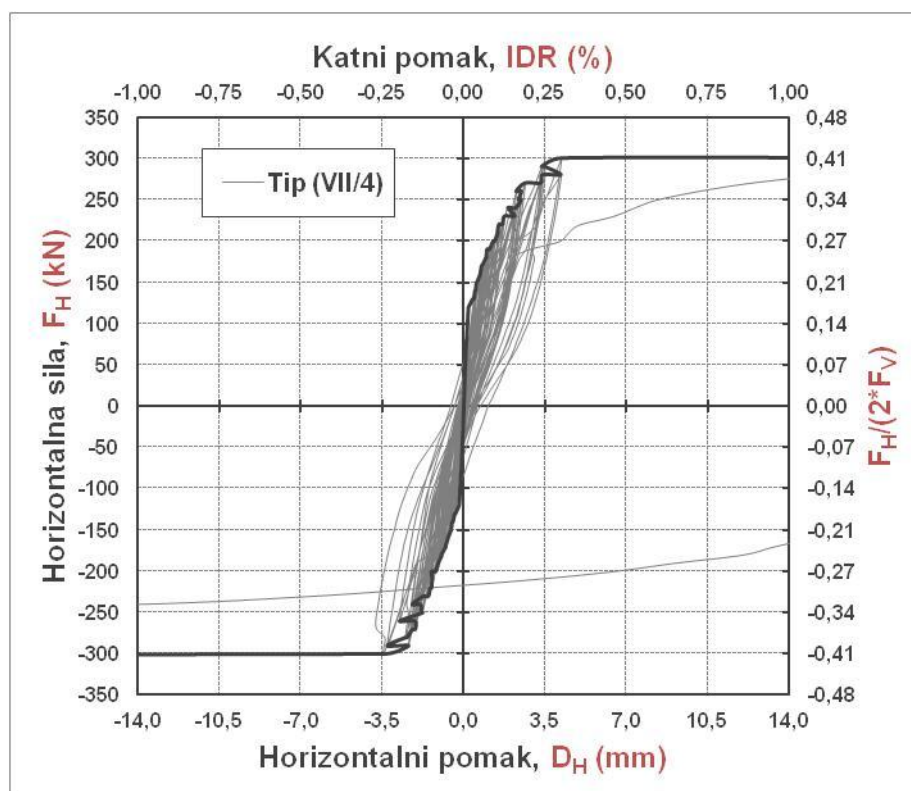
Slika 7.1. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela

a) tip (VII/1) i b) tip (VII/2)

a) tip (VII/3)



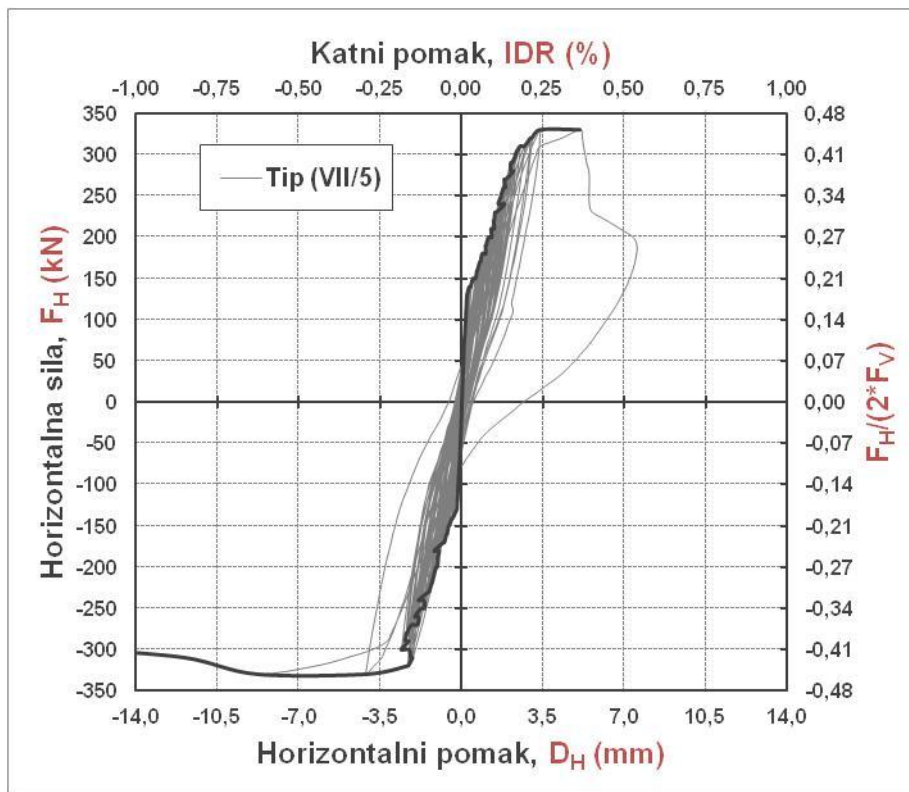
b) tip (VII/4)



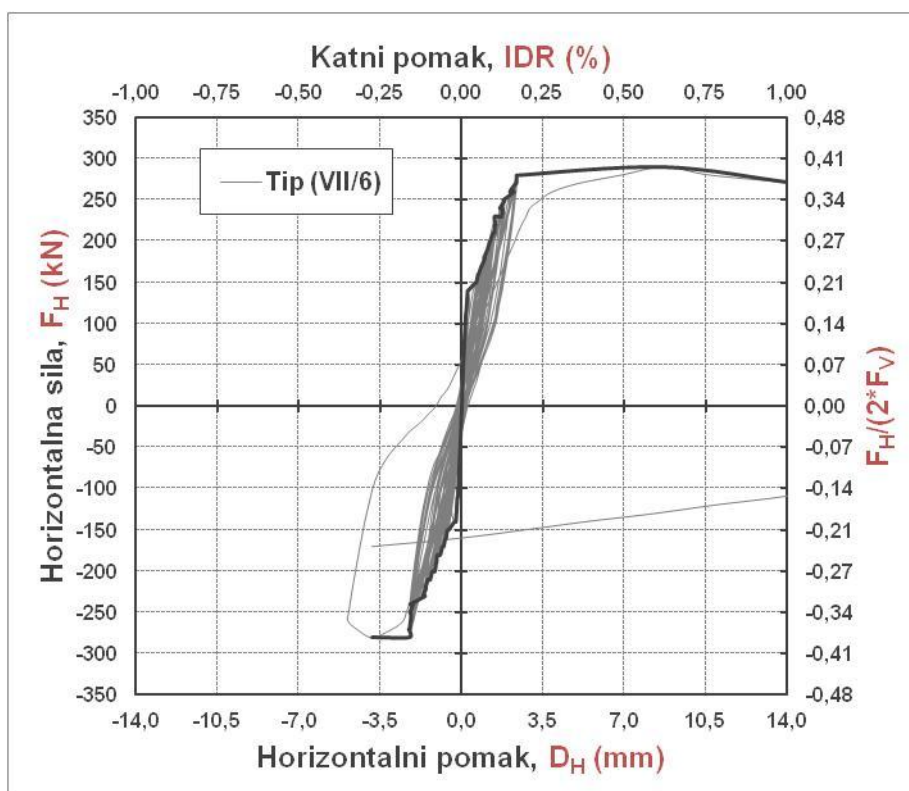
Slika 7.2. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela

a) tip (VII/3) i b) tip (VII/4)

a) tip (VII/5)



b) tip (VII/6)



Slika 7.3. Histerezna petlja i primarna krivulja odnosa horizontalnih sila i pomaka numeričkih modela

a) tip (VII/5) i b) tip (VII/6)

### 7.3.3. Nosivost u horizontalnom smjeru

U tablicama 7.4. i 7.5. i na slici 7.4. dan je prikaz nosivosti modela sa ispunom te omjera iste i nosivosti praznog okvira.

**Tablica 7.4.** Nosivost matematičkih modela grupe VII,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Matematički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (VII/2)	210	(3,46)	270	(2,72)	290	(1,81)	290	(1,67)
Tip (VII/4)	210	(3,46)	270	(2,72)	300	(1,87)	300	(1,73)
Tip (VII/6)	210	(3,46)	280	(2,82)	290	(1,81)	270	(1,55)
Tip (III/1)	61	(1,00)	99	(1,00)	161	(1,00)	174	(1,00)
Tip (III/2)	200	(3,28)	260	(2,63)	220	(1,37)	250	(1,44)

**Tablica 7.5.** Nosivost matematičkih modela grupe VII,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Matematički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)	$F_H$ (kN)	$F_H/F_{H,REF}$ (-)
Tip (VII/2)	-190	-(2,37)	-270	-(1,94)	-280	-(1,83)	-290	-(1,72)
Tip (VII/4)	-200	-(2,49)	-260	-(1,87)	-300	-(1,96)	-300	-(1,78)
Tip (VII/6)	-210	-(2,61)	-280	-(2,01)	-	-	-	-
Tip (III/1)	-80	-(1,00)	-139	-(1,00)	-153	-(1,00)	-	-
Tip (III/2)	-110	-(1,38)	-230	-(1,65)	-240	-(1,57)	-	-

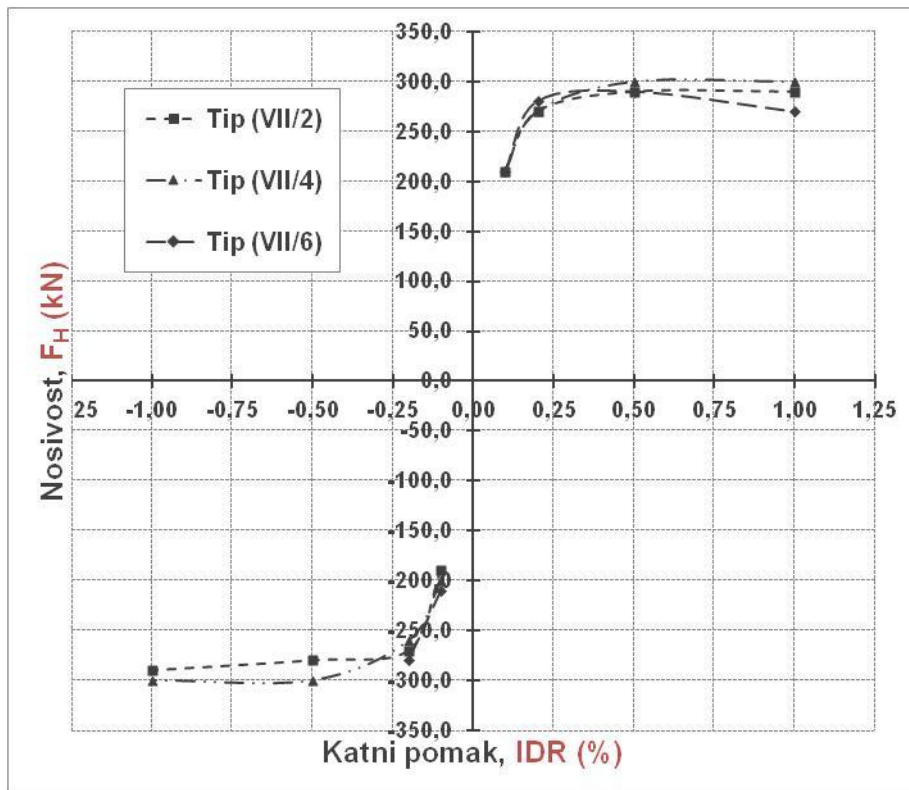
### 7.3.4. Krutost u horizontalnom smjeru

U tablicama 7.6. i 7.7. i na slici 7.5. dan je prikaz stvarnih krutosti te omjera stvarne i krutosti praznog okvira. Krutost je izražena kao nosivost odnosno vrijednost horizontalne sile podijeljena s pripadnim horizontalnim pomakom.

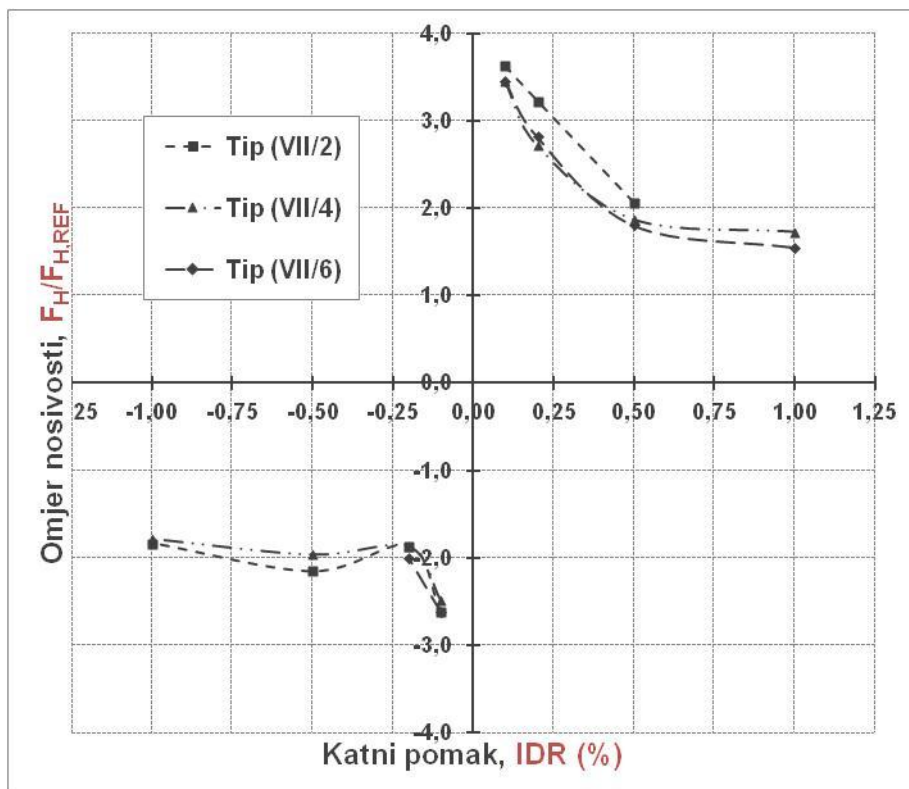
**Tablica 7.6.** Krutost numeričkih modela grupe VII,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani (otvor)

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (VII/2)	150	(3,46)	96	(2,72)	41	(1,81)	21	(1,67)
Tip (VII/4)	150	(3,46)	96	(2,72)	43	(1,87)	21	(1,73)
Tip (VII/6)	150	(3,46)	100	(2,82)	41	(1,81)	19	(1,55)
Tip (III/1)	45	(1,00)	34	(1,00)	22	(1,00)	12	(1,00)
Tip (III/2)	151	(3,32)	94	(2,80)	35	(1,55)	18	(1,48)

a) Krivulje odnosa  $F_H$  (kN) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $F_H/F_{H,REF}$  i IDR (%)



Slika 7.4. Nosivost numeričkih modela grupe VII,  $F_H$  (kN) i omjer nosivosti,  $F_H/F_{H,REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)



**Tablica 7.7.** Krutost matematičkih modela grupe VII,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)	$K$ (kN/mm)	$K/K_{REF}$ (-)
Tip (VII/2)	-136	-(2,37)	-96	-(1,94)	-40	-(1,83)	-21	-(1,72)
Tip (VII/4)	-143	-(2,49)	-93	-(1,87)	-43	-(1,96)	-21	-(1,78)
Tip (VII/6)	-150	-(2,61)	-100	-(2,01)	-	-	-	-
Tip (III/1)	-60	-(1,00)	-48	-(1,00)	-22	-(1,00)	-16	-(1,00)
Tip (III/2)	-151	-(2,53)	-94	-(1,93)	-36	-(1,63)	-17	-(1,04)

### 7.3.5. Histerezna energija

U tablicama 7.8. i 7.9. i na slici 7.6. dan je prikaz histerezne energije modela s ispunom te omjer iste i histerezne energije praznog armirano-betonskog okvira. Histerezna energija izražena je kao ploština koju zatvaraju uzlazna i povratna krivulja punog ciklusa opterećivanja, tj. zbroj ovih ploština do promatranog katnog pomaka.

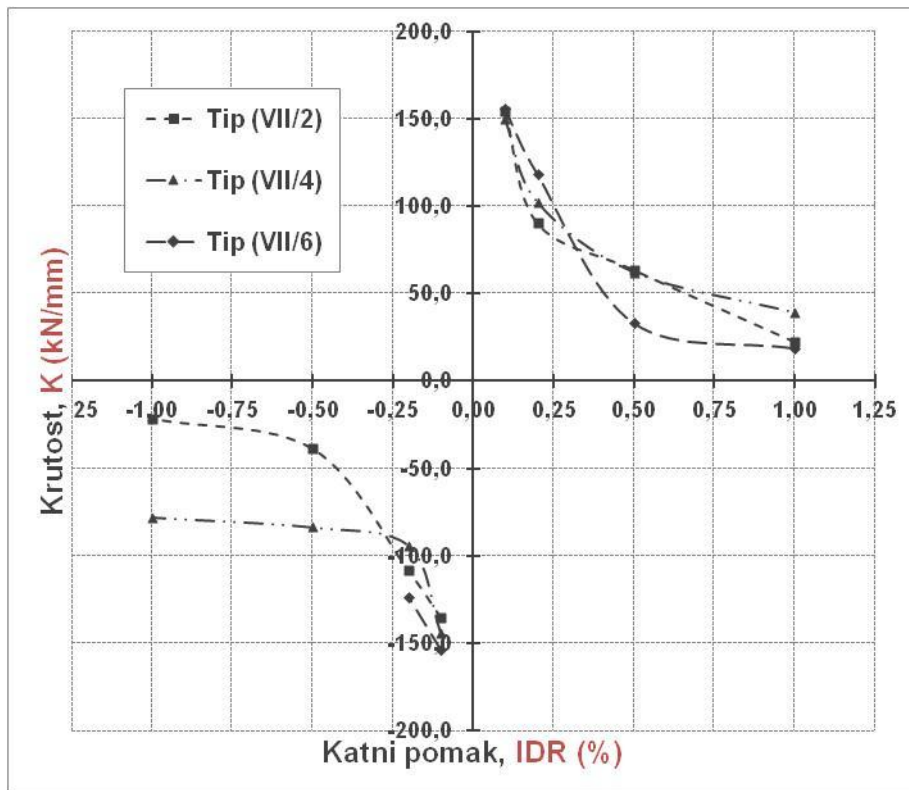
**Tablica 7.8.** Histerezna energija matematičkih modela grupe VII,  $E$  (kNmm) i omjer nosivosti,  $E/E_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na pozitivnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (VII/2)	1222	(18,63)	3753	(11,06)	13184	(7,05)	14877	(3,48)
Tip (VII/4)	1668	(25,42)	4102	(12,09)	7994	(4,27)	10064	(2,36)
Tip (VII/6)	980	(14,94)	4558	(13,43)	5602	(3,00)	7664	(1,80)
Tip (III/1)	66	(1,00)	339	(1,00)	1870	(1,00)	4269	(1,00)
Tip (III/2)	1347	(20,53)	3602	(10,62)	7712	(4,12)	9498	(2,22)

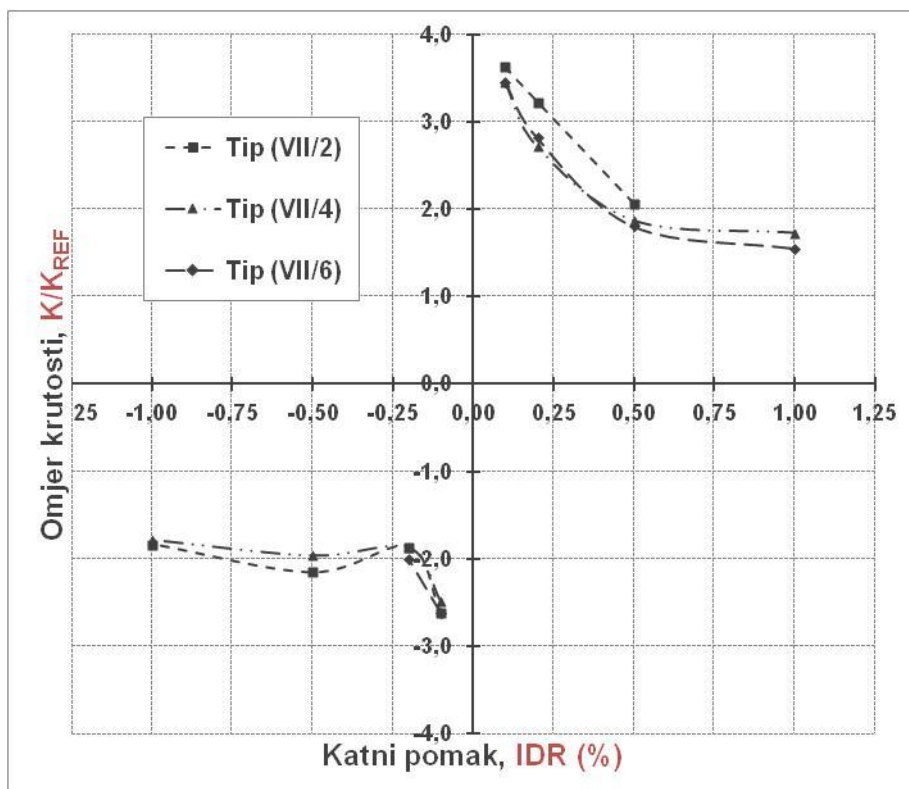
**Tablica 7.9.** Histerezna energija matematičkih modela grupe VII,  $E$  (kNmm) i omjer nosivosti,  $E/E_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%) na negativnoj strani

Numerički model	IDR=0,10%		IDR=0,20%		IDR=0,50%		IDR=1,00%	
	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)	$E$ (kNmm)	$E/E_{REF}$ (-)
Tip (VII/2)	963	(5,87)	3603	(3,24)	5780	(1,79)	8605	(1,72)
Tip (VII/4)	1132	(6,89)	5799	(5,22)	27674	(8,58)	29415	(5,89)
Tip (VII/6)	1058	(6,45)	3874	(3,49)	-	-	-	-
Tip (III/1)	-164	-(1,00)	-1111	-(1,00)	-3224	-(1,00)	-4994	-(1,00)
Tip (III/2)	-1413	-(8,61)	-4407	-(3,97)	-11043	-(3,42)	-12809	-(2,57)

a) Krivulje odnosa  $K$ (kNm/mm) i IDR (%)

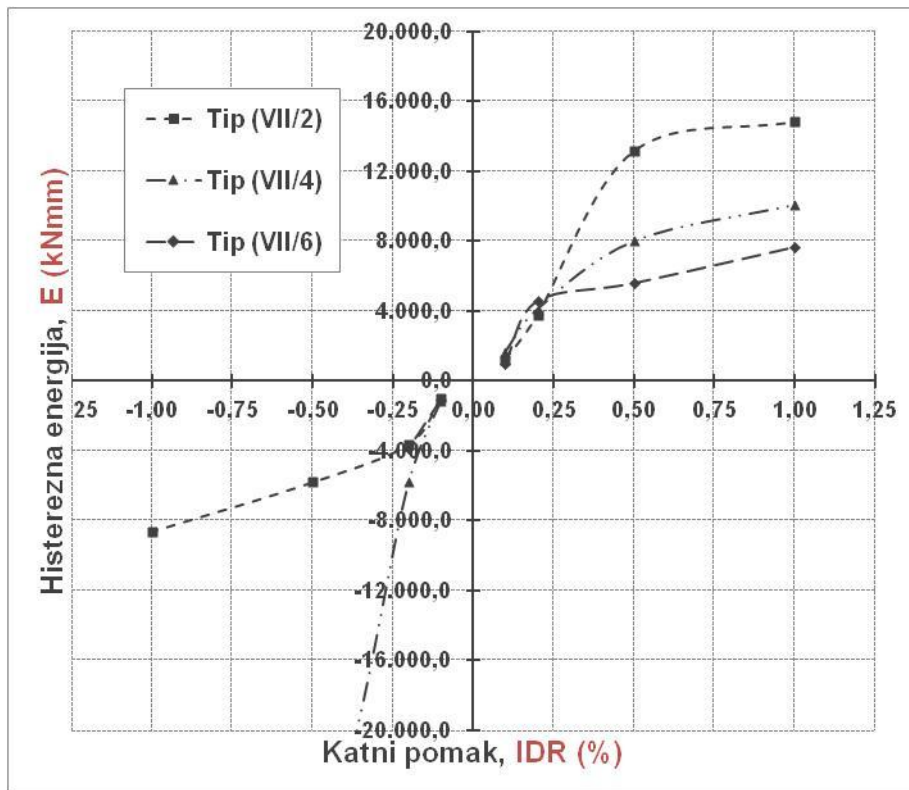


b) Krivulje odnosa  $K/K_{REF}$  i IDR (%)

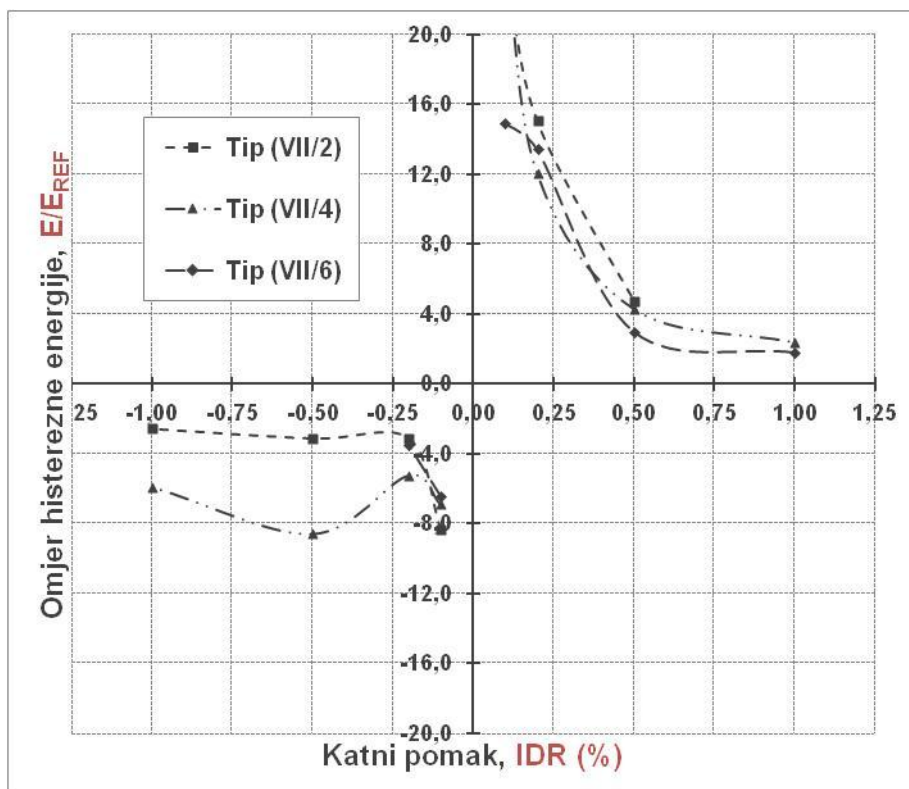


Slika 7.5. Krutost numeričkih modela grupe VII,  $K$  (kN/mm) i omjer nosivosti,  $K/K_{REF}$  u odnosu na nosivost praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

a) Krivulje odnosa  $E$  (kNmm) i IDR (%)



b) Krivulje odnosa  $E/E_{REF}$  i IDR (%)



Slika 7.6. Histerezna energija numeričkih modela grupe VII,  $E$  (kNmm) i omjer energije,  $E/E_{REF}$  u odnosu na energiju praznog okvira pri jednakom katnom pomaku, IDR (%)

#### **7.4. Sažetak i zaključak poglavlja**

U ovom poglavlju je istražen utjecaj druge vrste materijala zidanog ispuna i količine poprečne armature u stupovima okvira. Međutim, uslijed ograničenja teorijskog modela, opis utjecaja smanjenja količine poprečne armature putem primijenjenog računalnog programa nije bio moguć. Utjecaj primjene morta višeg razreda te zidnih elemenata više čvrstoće očitovao se najviše u povećanju trošenja histerezne energije i promjeni načina sloma te neznatno na povećanje nosivosti i krutosti. Kao i u prethodnim parametarskim studijama, konstruirani su dijagrami ovisnosti danih parametara o odabranim katnim pomacima.

## Poglavlje 8.0.

# PREGLED UTJECAJNIH FAKTORA NA ODGOVOR OKVIRA SA ISPUNOM

### 8.1. Uvod

U ovom poglavlju prikazan je cjelokupni pregled rezultata studije na fizikalnim i numeričkim modelima u obliku korekcijskih faktora. Korekcijski ili utjecajni faktori predstavljaju odnos vrijednosti nosivosti, krutosti i histerezne energije za okvir s punim ispunom u odnosu na prazan okvir. Vrijednosti korekcijskih faktora dani su u ovisnosti o katnom pomaku za neznatno, osrednje, teško i oštećenje pred slom. Vrijednosti su dane tablično i usporedno putem dijagrama. U obzir su uzeti: utjecaj vrste otvora, izmjera otvora, otklona otvora, omeđenosti otvora vertikalnim serklažima i izmjera zidanog ispuna. U slučaju otklonjenog otvora, kada ispun nije simetričan, posebno su dane vrijednosti korekcijskih faktora za oba smjera opterećenja. U slučaju simetričnog ispuna, usvojena je prosječna vrijednost, dok je u slučaju nesimetričnog ispuna. Dodatno su dani utjecajni faktori za slučaj drugih vrsta materijala ispuna.

### 8.2. Pregled faktora utjecaja na nosivost u horizontalnom smjeru armirano-betonskih okvira, $F_H$ (kN)

#### 8.2.1. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_I/L_I=0,72$

**Tablica 8.1.** Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_I/L_I=0,72$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_O=L_I/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_O/L_O$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_O/A_I$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
A-1	VRATA	NE	2,6	0,14	2,90	2,25	1,50	1,00
A-2	VRATA	NE	2,0	0,16	1,68	1,20	1,10	1,00
B-1	VRATA	DA	2,6	0,14	3,06	2,22	1,64	1,59
B-2	VRATA	DA	2,0	0,16	2,46	1,77	1,39	1,28
C-1	PROZOR	NE	1,0	0,05	2,98	2,25	1,57	1,38
C-2	PROZOR	NE	1,0	0,07	2,75	2,05	1,59	1,18
C-3	PROZOR	NE	1,0	0,11	2,75	2,02	1,53	1,40
C-4	PROZOR	NE	1,2	0,13	2,91	2,42	1,91	1,54
D-1	PROZOR	DA	1,0	0,05	2,73	2,07	1,60	1,34
D-2	PROZOR	DA	1,2	0,13	2,60	2,00	1,75	1,46
I-1	Puni zidani ispun				3,11	2,36	1,58	1,49

**Tablica 8.2.** Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,72$  s otvorom smještenim s otklonom,  $O_o=H_i/5+L_o/2$ , unutar zidanog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) (na strani otvora)

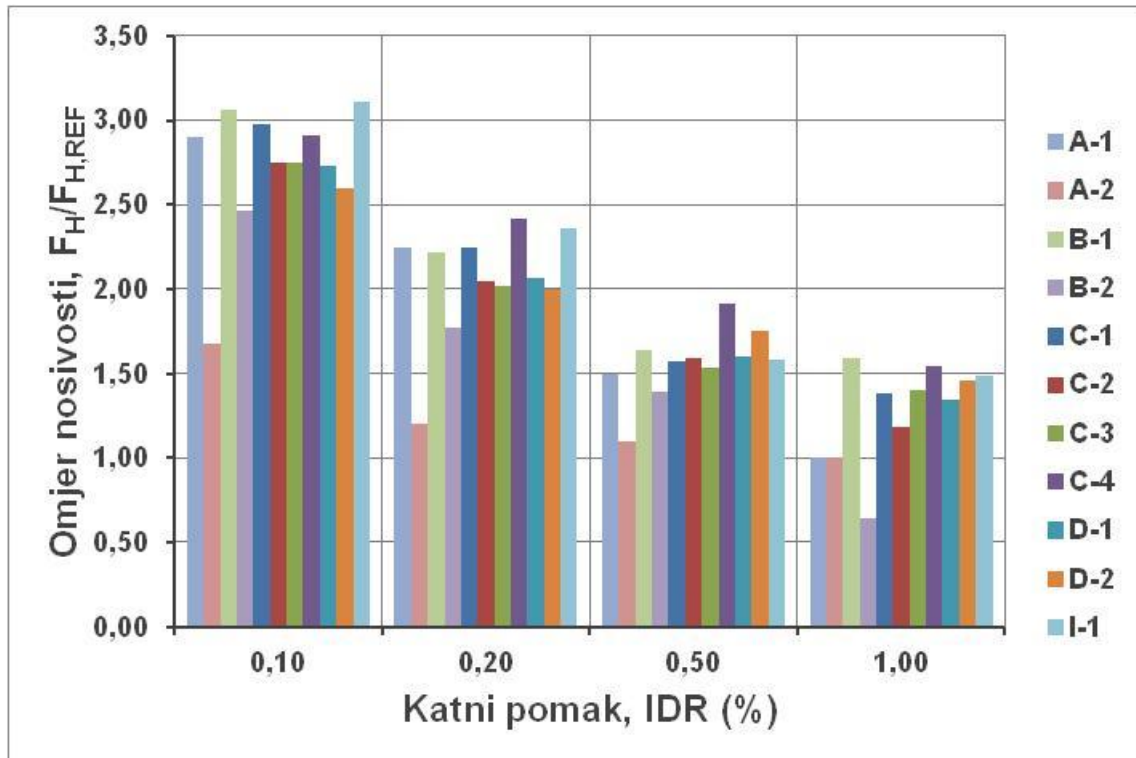
Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
E-1	VRATA	NE	2,6	0,14	2,51	1,51	1,56	1,36
E-2	VRATA	NE	2,0	0,16	1,81	1,61	1,25	1,04
F-1	VRATA	DA	2,6	0,14	2,50	1,84	1,72	1,56
F-2	VRATA	DA	2,0	0,16	1,81	1,71	1,43	1,38
G-1	PROZOR	NE	1,0	0,05	2,14	1,81	1,31	0,98
G-2	PROZOR	NE	1,0	0,07	1,81	1,61	1,25	1,04
G-3	PROZOR	NE	1,0	0,11	1,81	1,51	1,18	1,21
G-4	PROZOR	NE	1,2	0,13	2,52	1,65	1,17	1,30
H-1	PROZOR	DA	1,0	0,05	1,81	1,61	1,43	1,38
H-2	PROZOR	DA	1,2	0,13	2,18	1,94	1,83	1,66

**Tablica 8.3.** Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,72$  s otvorom smještenim s otklonom,  $O_o=L_i-(H_i/5+L_o/2)$ , unutar zidanog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%) (strana suprotno od otvora)

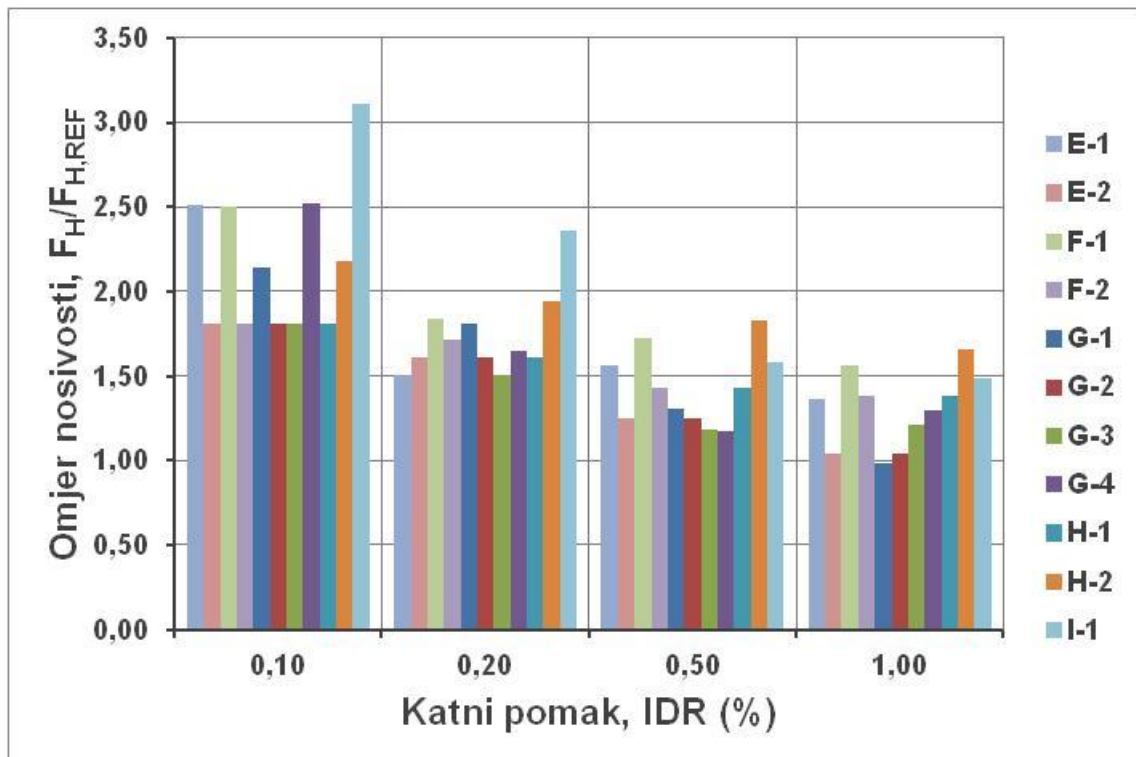
Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
J-1	VRATA	NE	2,6	0,14	3,28	2,51	1,71	1,52
J-2	VRATA	NE	2,0	0,16	1,74	1,17	1,18	1,74
K-1	VRATA	DA	2,6	0,14	3,62	2,32	1,49	1,60
K-2	VRATA	DA	2,0	0,16	2,61	1,58	1,53	-
L-1	PROZOR	NE	1,0	0,05	2,61	1,58	-	-
L-2	PROZOR	NE	1,0	0,07	2,12	-	-	-
L-3	PROZOR	NE	1,0	0,11	2,12	1,45	-	-
L-4	PROZOR	NE	1,2	0,13	3,31	2,63	1,73	1,65
M-1	PROZOR	DA	1,0	0,05	2,61	1,58	1,53	1,00
M-2	PROZOR	DA	1,2	0,13	3,32	2,51	1,25	1,17

Tablice 8.1. do 8.3 predstavljaju faktore utjecaja za nosivost okvira sa zidanim ispunom odnosa stranica  $\alpha=H_i/L_i=0,72$ . Tablica 8.1. predstavlja utjecajne faktore za simetrične modele. Za nesimetrične modele utjecajni faktori su dani u tablicama 8.2. i 8.3. u ovisnosti o smještaju otvora. Razmatrane su otvori za prozor i vrata te mogućnost izvedbe vertikalnog serklaža oko otvora. Smještaj otvora definiran je izrazom navedenim u tekstu tablice. Skupni prikaz podataka danih u tablicama 8.1. do 8.3. prikazan je na slikama 8.1. do 8.3.

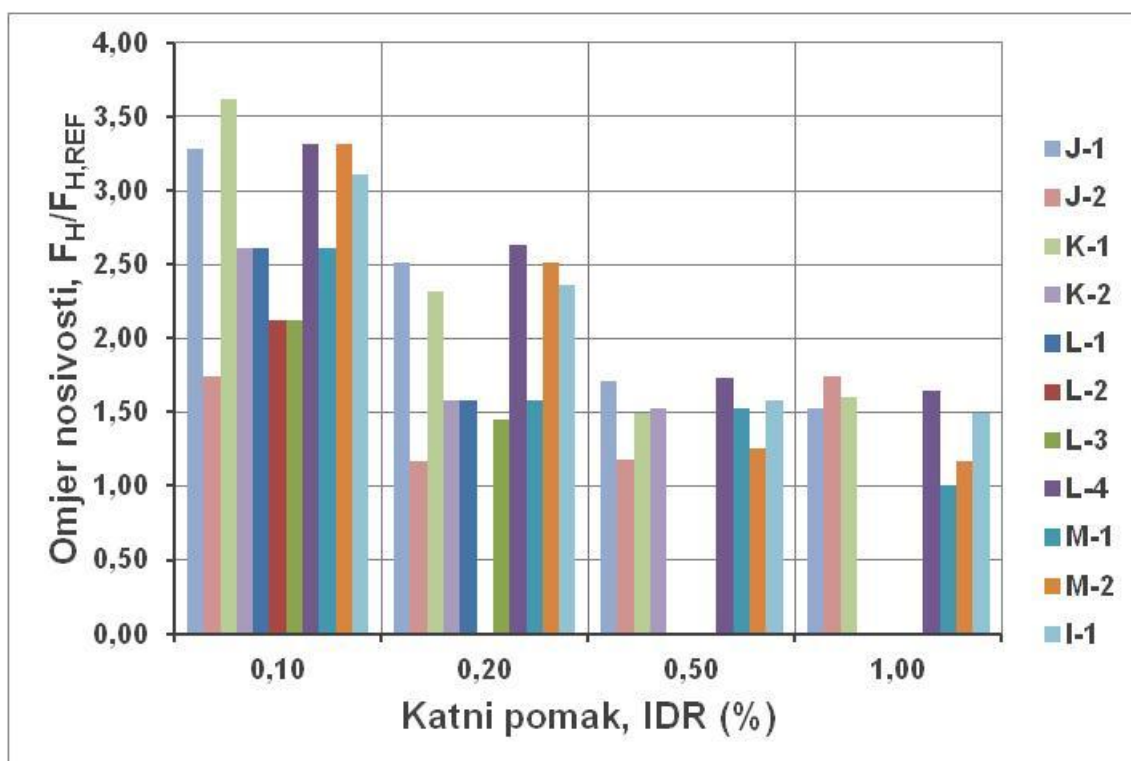




Slika 8.1. Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidane ispune odnosa stranica  $\alpha=H/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim u sredini raspona,  $O_0=L/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%)



Slika 8.2. Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidane ispune odnosa stranica  $H/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom,  $O_0=H/5+L_0/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%)



Slika 8.3. Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidane ispune odnosa stranica  $H_1/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom,  $O_0=L_1-(H_1/5+L_0/2)$ , u odnosu na katne pomake IDR (%)

### 8.2.2. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,59$

Tablica 8.4. Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_1/L_1=0,59$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_0=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_0/L_0$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_0/A_1$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
D-2	PROZOR	DA	1,2	0,10	3,25	2,42	1,93	1,88
I-2	Puni zidani ispun				3,07	2,50	2,07	1,94

Tablica 8.5. Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_1/L_1=0,59$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_0=H_1/5+L_0/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

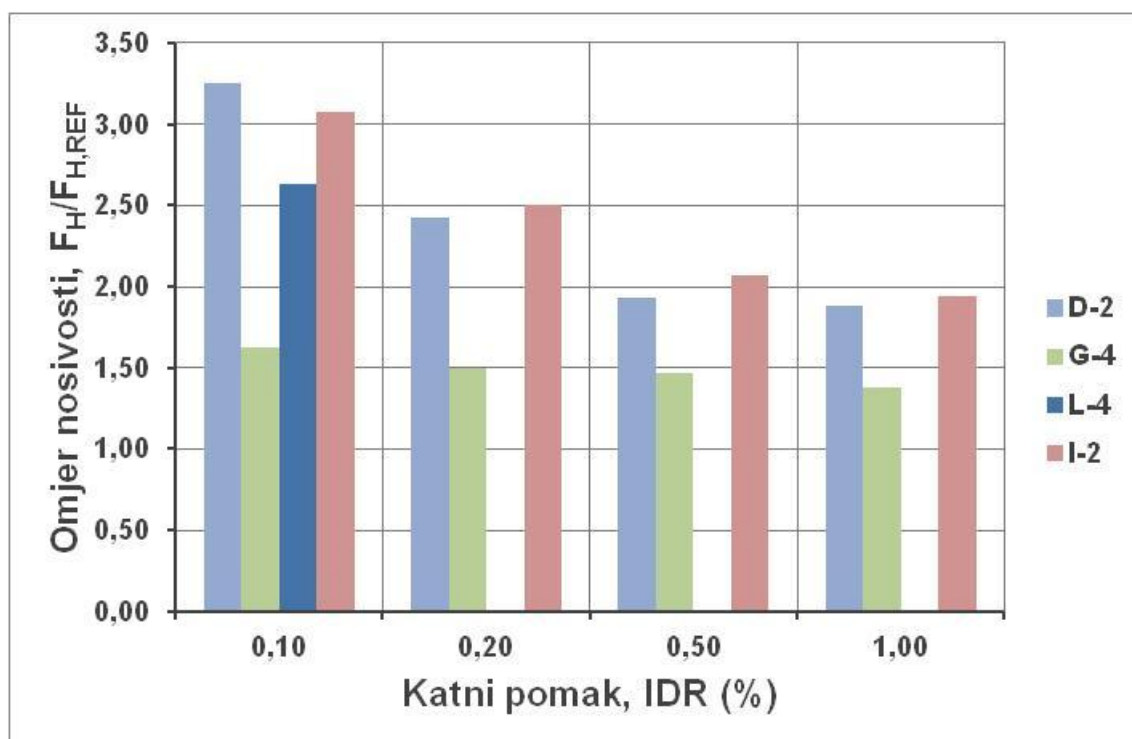
Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_0/L_0$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_0/A_1$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
G-4	PROZOR	DA	1,2	0,10	1,63	1,50	1,47	1,38

**Tablica 8.6.** Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,59$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i-(H_i/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
L-4	PROZOR	DA	1,2	0,10	2,63	-	-	-

Tablice 8.4. do 8.6. predstavljaju faktore utjecaja za nosivost okvira sa zidanim ispunom odnosa  $\alpha=H_i/L_i=0,59$ . Tablica 8.4. predstavlja utjecajne faktore za simetrične modele tj. za slučaj omeđenog otvora u sredini zidanog ispuna i puni zidani ispun. Za nesimetrični model tj. za slučaj omeđenog otvora s otklonom u zidanom ispunu, vrijednosti faktora su dani tablicama 8.5. i 8.6., u ovisnosti o smještaju otvora. Smještaj otvora definiran je izrazom navedenim u tekstu tablice.

Zbog usklađenosti s prethodno danim podacima, vrijednosti utjecajnih faktora predstavljaju odnos okvira s punim ispunom prema praznom armirano-betonskom okviru pripadnih izmjera. Skupni prikaz podataka danih u tablicama 8.4. do 8.6. prikazan je na slici 8.4.



**Slika 8.4.** Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidane ispune odnosa stranica  $H_i/L_i=0,59$  u odnosu na katne pomake IDR (%)

### 8.2.3. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_i/L_i=0,93$

**Tablica 8.7.** Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,93$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
D-2	PROZOR	DA	1,2	0,17	2,50	2,06	1,75	1,63
I-3	Puni zidani ispun				4,30	3,11	1,17	1,00

**Tablica 8.8.** Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,93$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=H_i/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

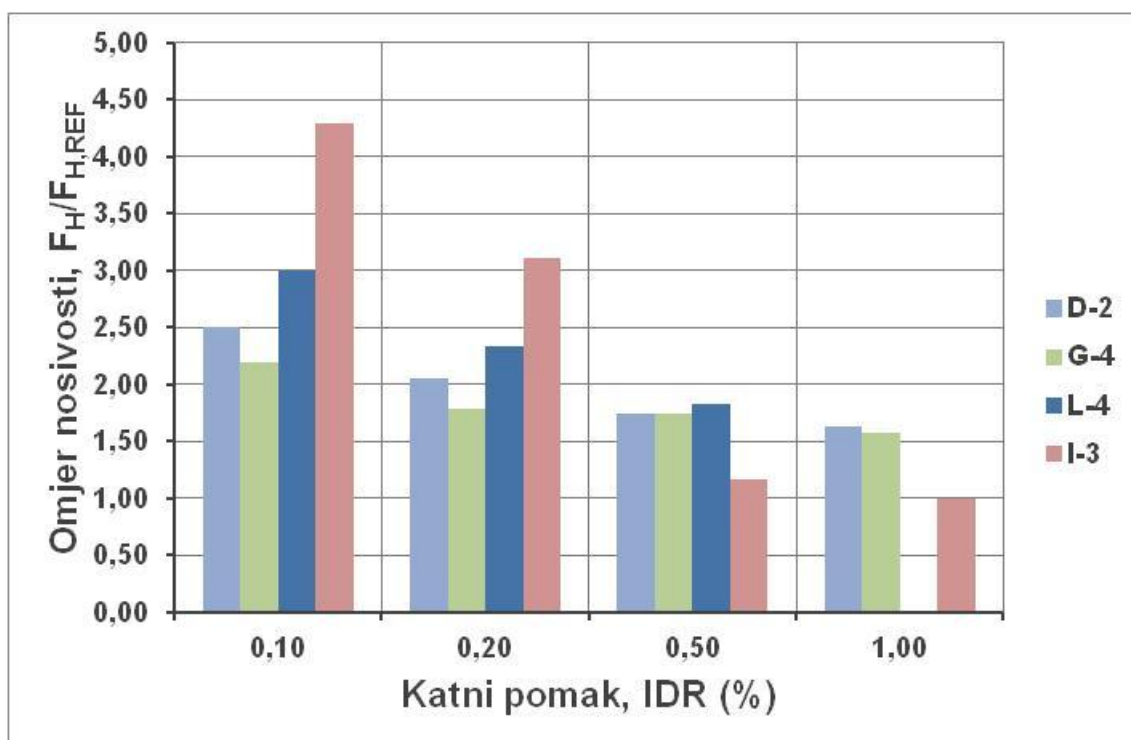
Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
G-4	PROZOR	DA	1,2	0,17	2,20	1,78	1,75	1,57

**Tablica 8.9.** Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,93$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i-(H_i/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
L-4	PROZOR	DA	1,2	0,17	3,00	2,33	1,83	-

Tablice 8.7. do 8.9. predstavljaju faktore utjecaja za nosivost okvira sa zidanim ispunom odnosa  $\alpha=H_i/L_i=0,93$ . Tablica 8.7. predstavlja utjecajne faktore za simetrične modele tj. za slučaj omeđenog otvora u sredini zidanog ispuna i puni zidani ispun. Za nesimetrični model tj. za slučaj omeđenog otvora s otklonom u zidanom ispunu, vrijednosti faktora su dani tablicama 8.8. i 8.9., u ovisnosti o smještaju otvora. Smještaj otvora definiran je izrazom navedenim u tekstu tablice.

Zbog usklađenosti s prethodno danim podacima, vrijednosti utjecajnih faktora predstavljaju odnos okvira s punim ispunom prema praznom armirano-betonskom okviru pripadnih izmjera. Skupni prikaz podataka danih u tablicama 8.7. do 8.9. prikazan je na slici 8.5.



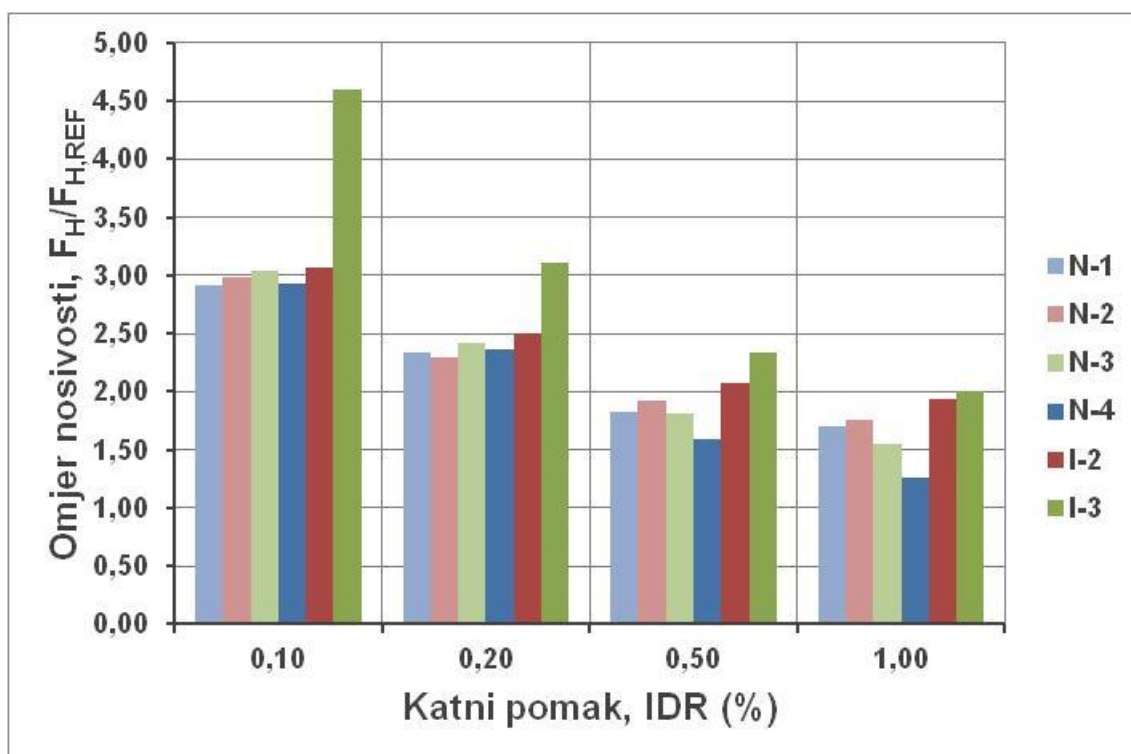
Slika 8.5. Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidane ispunne odnosa stranica  $H/L_1=0,93$  u odnosu na katne pomake IDR (%)

#### 8.2.4. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna s drugim materijalima zidanog ispuna $\alpha=H/L_1=0,72$

Tablica 8.10. Pregled faktora utjecaja na nosivost  $F_H$  (kN) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H/L_1=0,72$  s različitim materijalom zidanog ispuna, u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta zidnog elementa	Razred čvrstoće morta	Katni pomak, IDR (%)			
			0,10	0,20	0,50	1,00
N-1	Puna opeka	M5	2,91	2,33	1,82	1,69
N-2	Puna opeka	M10	2,97	2,29	1,91	1,75
N-3	Opečni blok	M5	3,11	2,36	1,58	1,49
N-4	Opečni blok	M10	3,04	2,42	1,81	1,55

Tablica 8.10. prikazuje faktore utjecaja za nosivost uslijed promjene materijala zidanog ispuna. Ova studija odnosi se na istraživanje utjecaja punih zidanih ispuna odnosa izmjera  $\alpha=H/L_1=0,72$ . Podaci iz tablice 8.10 su prikazani na dijagramu na slici 8.6. zajedno s faktorima dobivenim za druge odnose izmjera ispuna.



Slika 8.6. Usporedba faktora utjecaja na nosivost za zidane ispune različitih materijala i odnosa stranica u odnosu na katne pomake IDR (%)

### 8.3. Pregled faktora utjecaja na krutost u horizontalnom smjeru armirano-betonskih okvira, $K$ (kN/mm)

#### 8.3.1. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_i/L_i=0,72$

Tablica 8.11. Pregled faktora utjecaja na krutost  $K$  (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,72$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
A-1	VRATA	NE	2,6	0,14	2,77	2,41	1,82	1,00
A-2	VRATA	NE	2,0	0,16	1,99	1,64	1,31	1,00
B-1	VRATA	DA	2,6	0,14	3,07	2,43	1,65	1,59
B-2	VRATA	DA	2,0	0,16	2,16	1,66	1,56	1,58
C-1	PROZOR	NE	1,0	0,05	2,89	2,34	2,82	1,38
C-2	PROZOR	NE	1,0	0,07	2,68	2,29	1,28	1,34
C-3	PROZOR	NE	1,0	0,11	2,55	2,03	2,18	1,80
C-4	PROZOR	NE	1,2	0,13	2,89	2,57	1,85	1,17
D-1	PROZOR	DA	1,0	0,05	2,61	2,01	1,63	1,56
D-2	PROZOR	DA	1,2	0,13	2,44	2,13	1,76	1,29
I-1	Puni zidani ispun				2,93	2,37	1,59	1,26



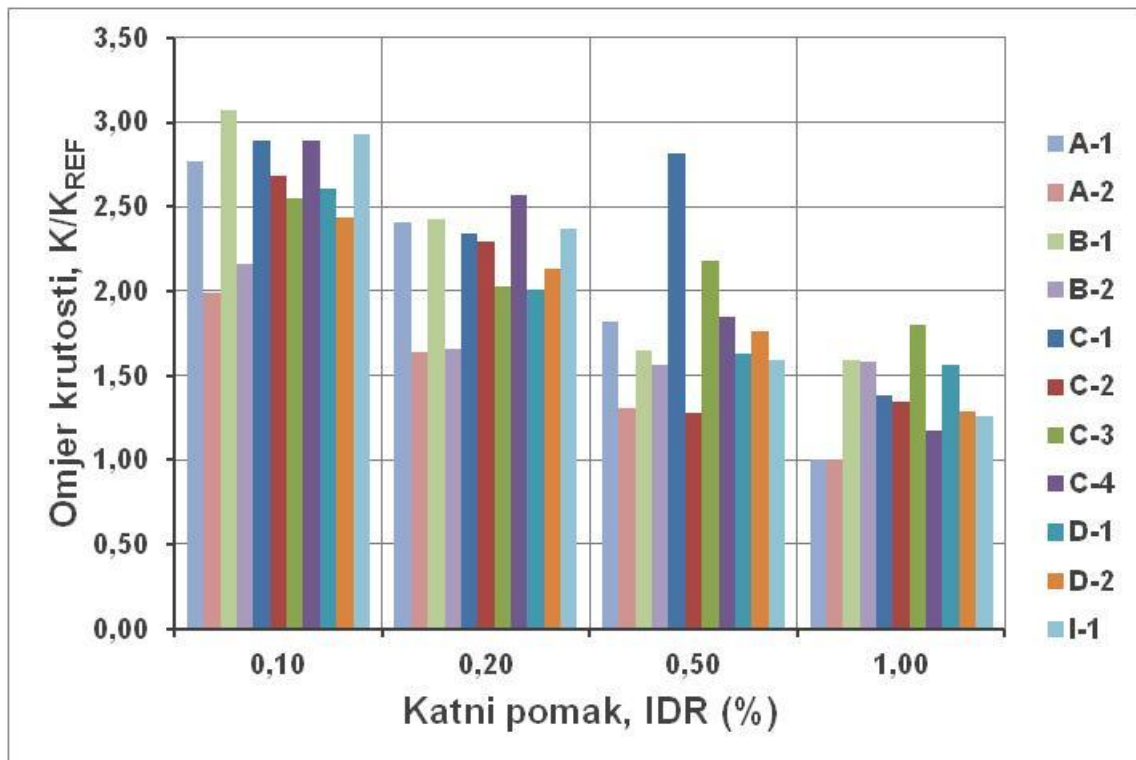
**Tablica 8.12.** Pregled faktora utjecaja na krutost **K (kN/mm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,72$  s otvorom smještenim s otklonom,  $O_o=H_i/5+L_o/2$ , unutar zidanog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)** (na strani otvora)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
E-1	VRATA	NE	2,6	0,14	2,52	1,80	1,59	1,40
E-2	VRATA	NE	2,0	0,16	1,37	1,24	1,02	1,13
F-1	VRATA	DA	2,6	0,14	2,04	1,89	1,72	1,28
F-2	VRATA	DA	2,0	0,16	1,75	1,84	1,47	1,49
G-1	PROZOR	NE	1,0	0,05	2,06	1,92	1,38	0,97
G-2	PROZOR	NE	1,0	0,07	1,73	1,83	1,30	0,96
G-3	PROZOR	NE	1,0	0,11	1,70	1,69	1,19	1,15
G-4	PROZOR	NE	1,2	0,13	3,13	2,79	1,76	1,55
H-1	PROZOR	DA	1,0	0,05	1,75	1,71	1,42	1,49
H-2	PROZOR	DA	1,2	0,13	3,08	2,64	1,31	1,26

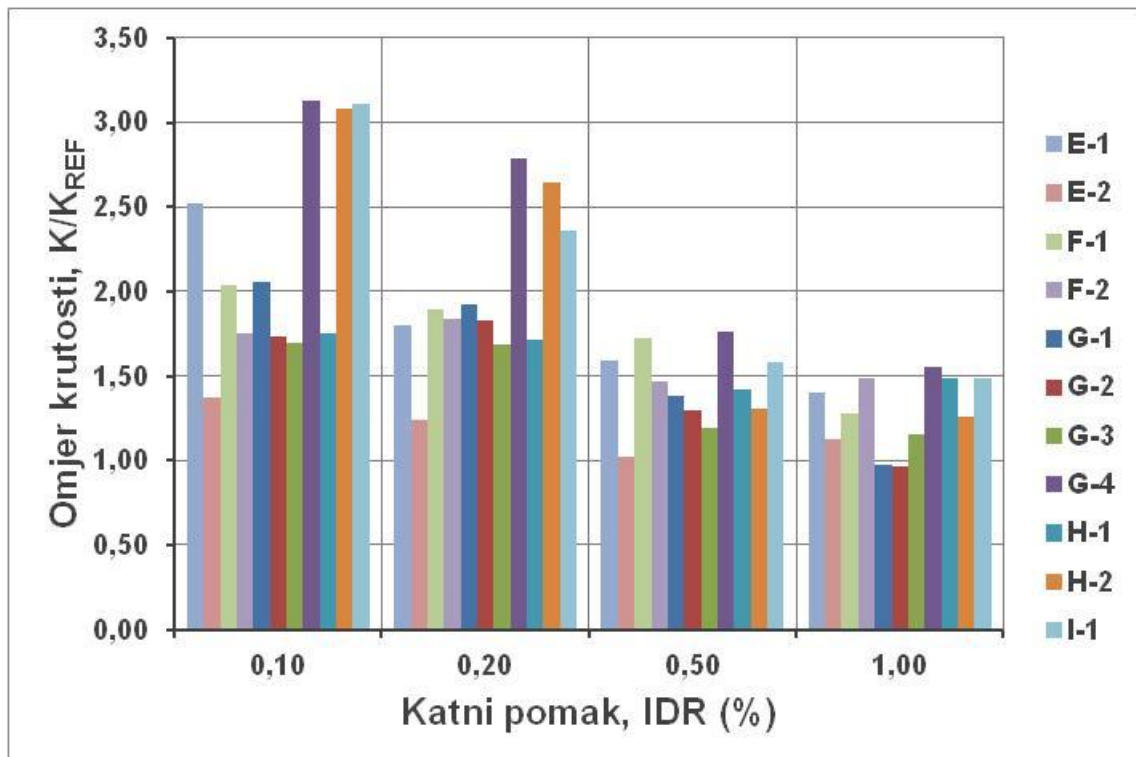
**Tablica 8.13.** Pregled faktora utjecaja na krutost **K (kN/mm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,72$  s otvorom smještenim s otklonom,  $O_o=L_i-(H_i/5+L_o/2)$ , unutar zidanog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)** (strana suprotno od otvora)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
J-1	VRATA	NE	2,6	0,14	3,53	2,79	1,64	1,63
J-2	VRATA	NE	2,0	0,16	1,84	1,24	1,31	0,91
K-1	VRATA	DA	2,6	0,14	3,82	2,48	1,53	1,62
K-2	VRATA	DA	2,0	0,16	2,57	1,60	1,69	1,66
L-1	PROZOR	NE	1,0	0,05	2,83	1,64	-	-
L-2	PROZOR	NE	1,0	0,07	2,77	-	-	-
L-3	PROZOR	NE	1,0	0,11	2,51	1,60	-	-
L-4	PROZOR	NE	1,2	0,13	2,43	1,82	1,17	1,05
M-1	PROZOR	DA	1,0	0,05	2,57	1,60	1,69	1,66
M-2	PROZOR	DA	1,2	0,13	2,04	1,95	1,83	1,28

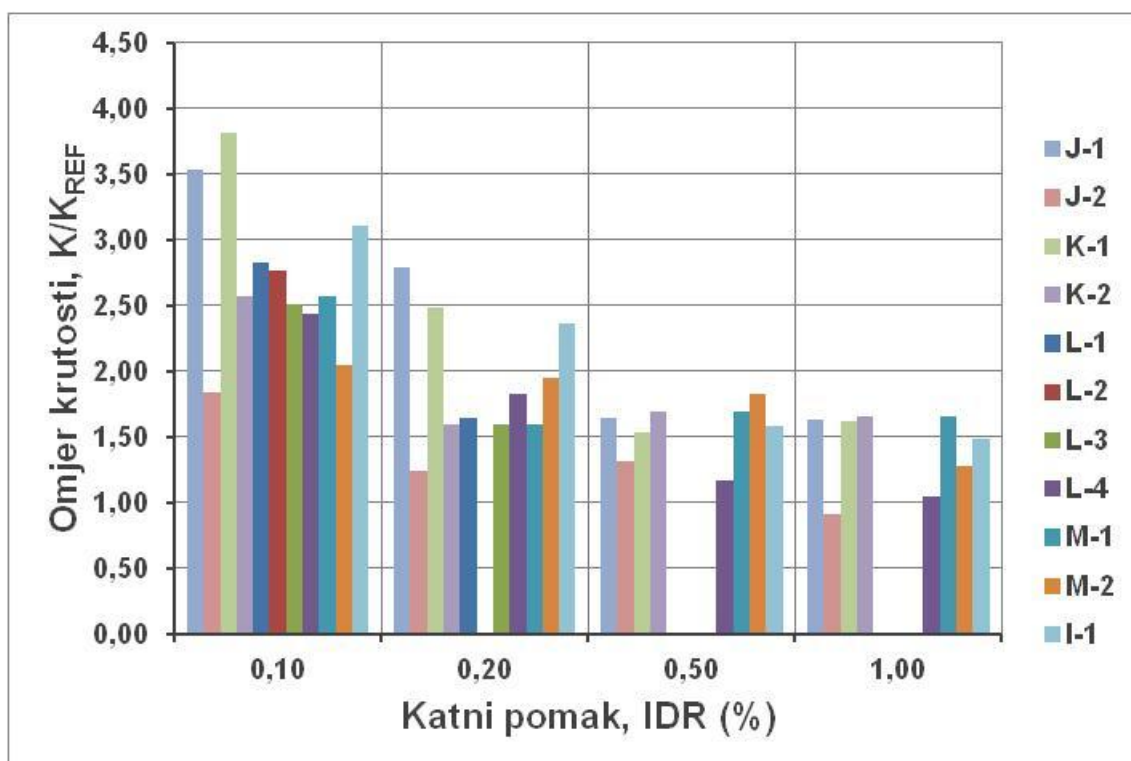
Tablice 8.11. do 8.13 predstavljaju faktore utjecaja za krutost okvira sa zidanim ispunom odnosa stranica  $\alpha=H_i/L_i=0,72$ . Tablica 8.11. predstavlja utjecajne faktore za simetrične modele. Za nesimetrične modele utjecajni faktori su dani u tablicama 8.12. i 8.13. u ovisnosti o smještaju otvora. Razmatrane su otvori za prozor i vrata te mogućnost izvedbe vertikalnog serklaža oko otvora. Smještaj otvora definiran je izrazom navedenim u tekstu tablice. Skupni prikaz podataka danih u tablicama 8.11. do 8.13. prikazan je na slikama 8.7. do 8.9.



Slika 8.7. Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidane ispune odnosa stranica  $\alpha=H/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim u sredini raspona,  $O_0=L/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%)



Slika 8.8. Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidane ispune odnosa stranica  $H/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom,  $O_0=H/5+L_0/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%)



Slika 8.9. Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidane ispune odnosa stranica  $H_1/L_1=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom,  $O_0=L_1-(H_1/5+L_0/2)$ , u odnosu na katne pomake IDR (%)

### 8.3.2. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,59$

Tablica 8.14. Pregled faktora utjecaja na krutost  $K$  (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_1/L_1=0,59$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_0=L_1/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_0/L_0$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_0/A_1$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
D-2	PROZOR	DA	1,2	0,10	3,25	2,42	1,93	1,88
I-2	Puni zidani ispun				3,13	2,50	2,07	1,94

Tablica 8.15. Pregled faktora utjecaja na krutost  $K$  (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_1/L_1=0,59$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_0=H_1/5+L_0/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

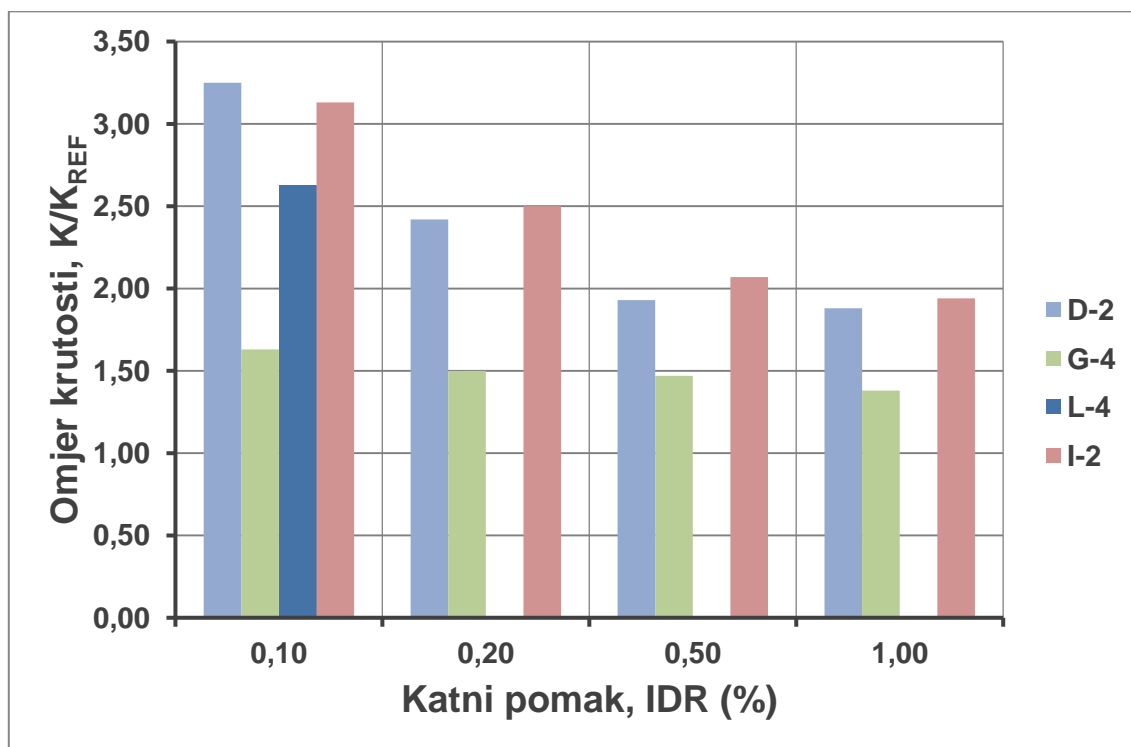
Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_0/L_0$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_0/A_1$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
G-4	PROZOR	DA	1,2	0,10	1,63	1,50	1,47	1,38

**Tablica 8.16.** Pregled faktora utjecaja na krutost **K (kN/mm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,59$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i-(H_i/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)**

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
L-4	PROZOR	DA	1,2	0,10	2,63	-	-	-

Tablice 8.14. do 8.16. predstavljaju faktore utjecaja za krutost okvira sa zidanim ispunom odnosa  $\alpha=H_i/L_i=0,59$ . Tablica 8.14. predstavlja utjecajne faktore za simetrične modele tj. za slučaj omeđenog otvora u sredini zidanog ispuna i puni zidani ispun. Za nesimetrični model tj. za slučaj omeđenog otvora s otklonom u zidanom ispunu, vrijednosti faktora su dani tablicama 8.15. i 8.16., u ovisnosti o smještaju otvora. Smještaj otvora definiran je izrazom navedenim u tekstu tablice.

Zbog usklađenosti s prethodno danim podacima, vrijednosti utjecajnih faktora predstavljaju odnos okvira s punim ispunom prema praznom armirano-betonskom okviru pripadnih izmjera. Skupni prikaz podataka danih u tablicama 8.14. do 8.16. prikazan je na slici 8.8.



**Slika 8.8.** Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidane ispune odnosa stranica  $H_i/L_i=0,59$  u odnosu na katne pomake **IDR (%)**

### 8.3.3. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_i/L_i=0,93$

**Tablica 8.17.** Pregled faktora utjecaja na krutost **K (kN/mm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,93$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)**

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
D-2	PROZOR	DA	1,2	0,17	2,40	2,00	1,75	1,57
I-3	Puni zidani ispun				4,60	3,11	2,33	2,00

**Tablica 8.18.** Pregled faktora utjecaja na krutost **K (kN/mm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,93$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=H_i/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)**

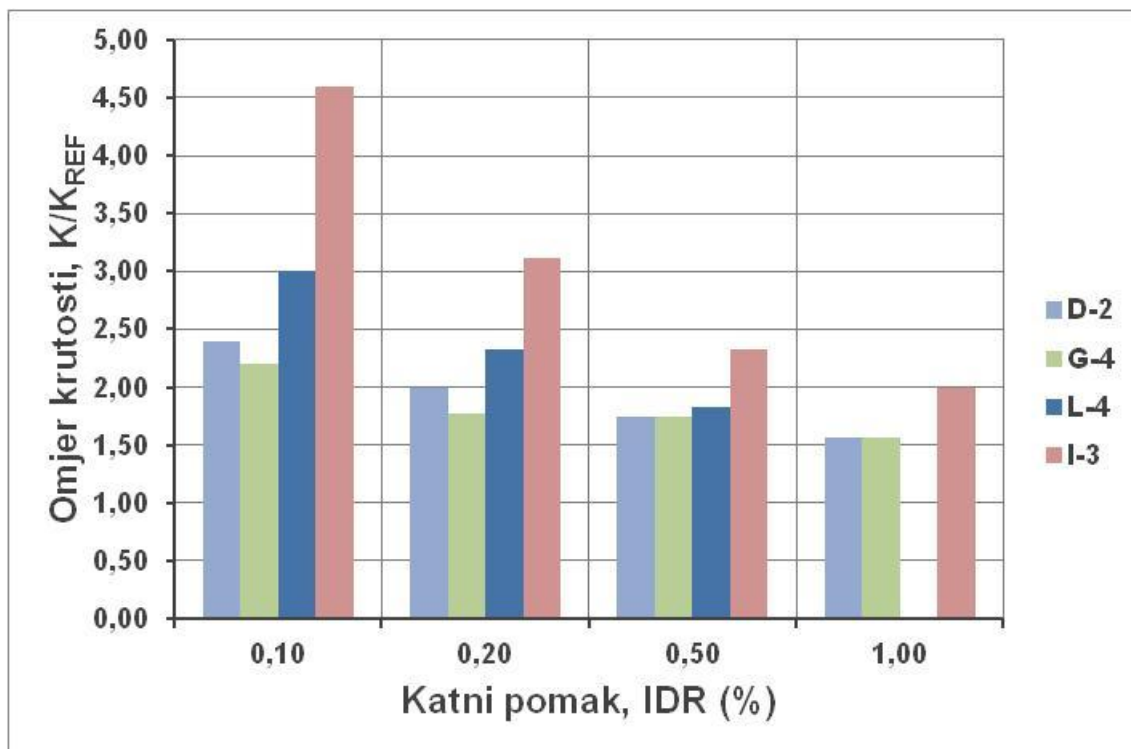
Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
G-4	PROZOR	DA	1,2	0,17	2,20	1,78	1,75	1,57

**Tablica 8.19.** Pregled faktora utjecaja na krutost **K (kN/mm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,93$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i-(H_i/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)**

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
L-4	PROZOR	DA	1,2	0,17	3,00	2,33	1,83	-

Tablice 8.17. do 8.19. predstavljaju faktore utjecaja za krutost okvira sa zidanim ispunom odnosa  $\alpha=H_i/L_i=0,93$ . Tablica 8.17. predstavlja utjecajne faktore za simetrične modele tj. za slučaj omeđenog otvora u sredini zidanog ispuna i puni zidani ispun. Za nesimetrični model tj. za slučaj omeđenog otvora s otklonom u zidanom ispunu, vrijednosti faktora su dani tablicama 8.18. i 8.19., u ovisnosti o smještaju otvora. Smještaj otvora definiran je izrazom navedenim u tekstu tablice.

Zbog usklađenosti s prethodno danim podacima, vrijednosti utjecajnih faktora predstavljaju odnos okvira s punim ispunom prema praznom armirano-betonskom okviru pripadnih izmjera. Skupni prikaz podataka danih u tablicama 8.17. do 8.19. prikazan je na slici 8.11.



Slika 8.11. Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidane ispune odnosa stranica  $H_i/L_i=0,93$  u odnosu na katne pomake IDR (%)

#### 8.3.4. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna s drugim materijalima zidanog ispuna $\alpha=H_i/L_i=0,72$

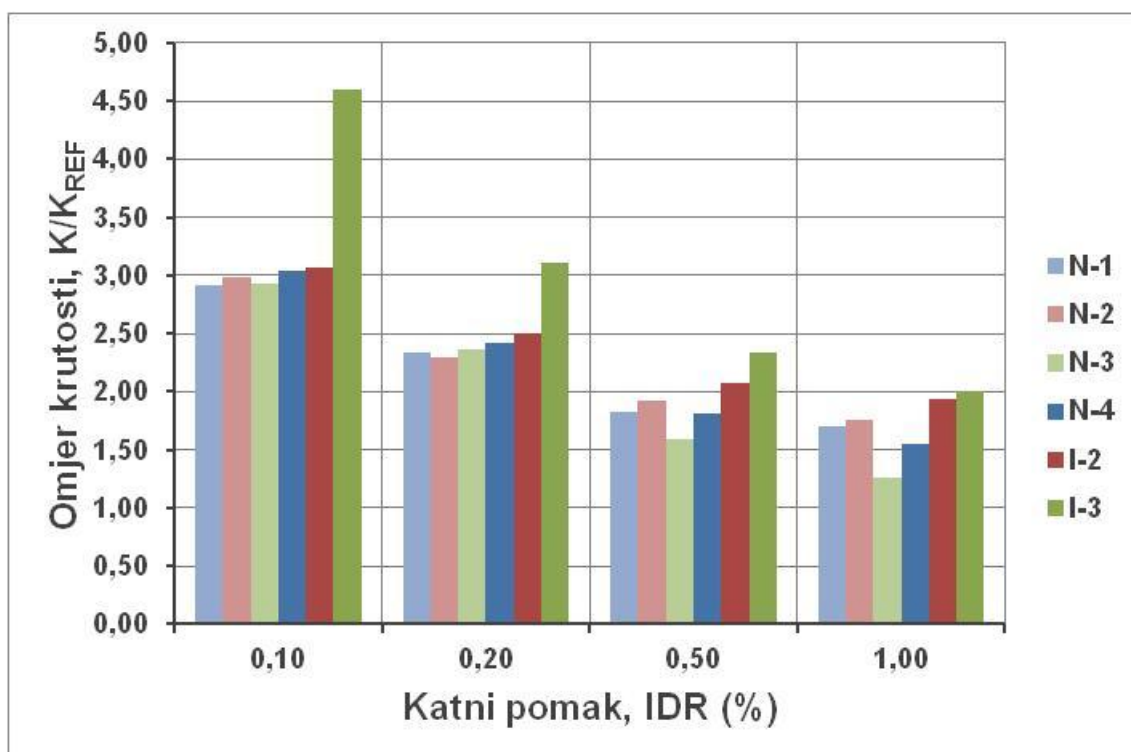
Tablica 8.20. Pregled faktora utjecaja na krutost  $K$  (kN/mm) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,72$  s različitim materijalom zidanog ispuna, u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta zidnog elementa	Razred čvrstoće morta	Katni pomak, IDR (%)			
			0,10	0,20	0,50	1,00
N-1	Puna opeka	M5	2,92	2,33	1,82	1,70
N-2	Puna opeka	M10	2,98	2,30	1,92	1,76
N-3	Opečni blok	M5	2,93	2,37	1,59	1,26
N-4	Opečni blok	M10	3,04	2,42	1,81	1,55

Tablica 8.20. prikazuje faktore utjecaja za krutost uslijed promjene materijala zidanog ispuna. Ova studija odnosi se na istraživanje utjecaja punih zidanih ispuna odnosa izmjera  $\alpha=H_i/L_i=0,72$ .

Podaci iz tablice 8.10 su prikazani na dijagramu na slici 8.12. zajedno s faktorima dobivenim za druge odnose izmjera ispuna.





Slika 8.12. Usporedba faktora utjecaja na krutost za zidane ispune različitih materijala i odnosa stranica u odnosu na katne pomake IDR (%)

## 8.4. Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju u horizontalnom smjeru armirano-betonskih okvira, E (kNmm)

### 8.4.1. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_i/L_i=0,72$

Tablica 8.21. Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju E (kNmm) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,72$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
A-1	VRATA	NE	2,6	0,14	4,17	7,39	2,68	-
A-2	VRATA	NE	2,0	0,16	6,63	3,14	2,65	1,69
B-1	VRATA	DA	2,6	0,14	16,75	10,56	3,79	2,12
B-2	VRATA	DA	2,0	0,16	14,26	5,12	2,00	1,45
C-1	PROZOR	NE	1,0	0,05	11,56	5,78	2,69	1,60
C-2	PROZOR	NE	1,0	0,07	9,14	10,00	1,41	1,37
C-3	PROZOR	NE	1,0	0,11	8,70	5,98	2,63	2,88
C-4	PROZOR	NE	1,2	0,13	23,20	10,08	3,99	-
D-1	PROZOR	DA	1,0	0,05	14,00	6,00	2,19	2,13
D-2	PROZOR	DA	1,2	0,13	6,69	17,74	3,74	2,02
I-1	Puni zidani ispun				14,57	7,30	3,77	2,40

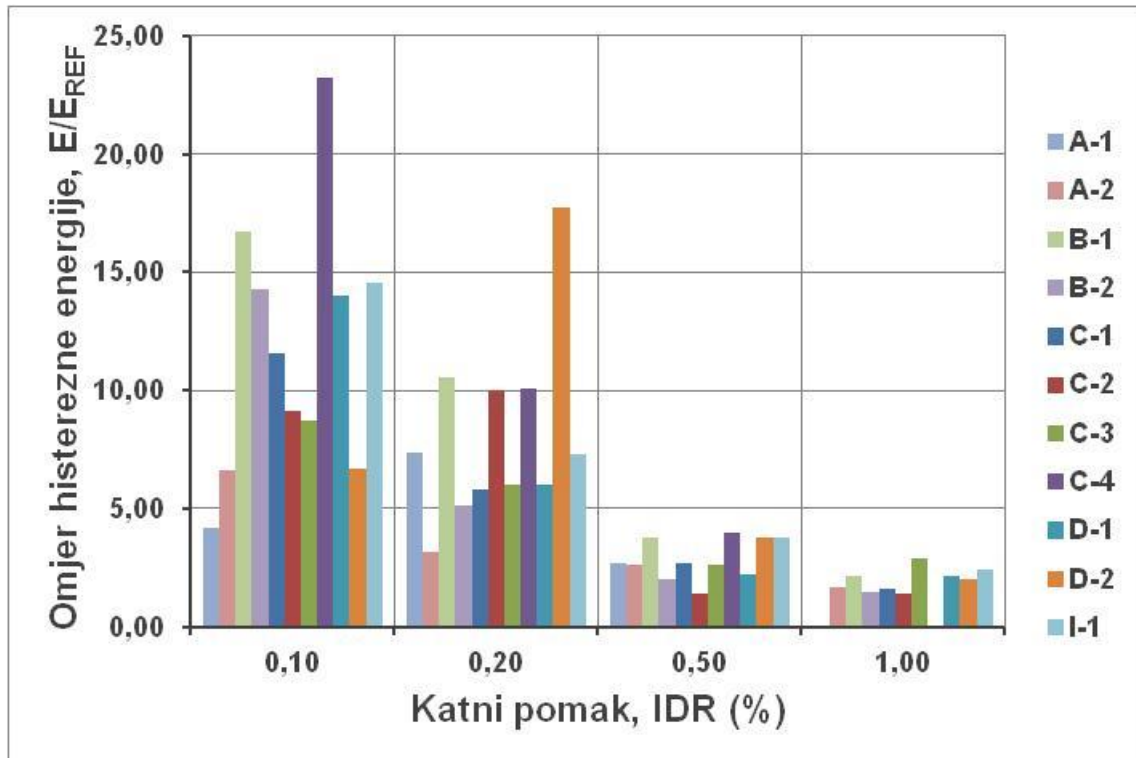
**Tablica 8.22.** Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju **E (kNmm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_1/L_1=0,72$  s otvorom smještenim s otklonom,  $O_0=H_1/5+L_0/2$ , unutar zidanog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)** (na strani otvora)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_0/L_0$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_0/A_1$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
E-1	VRATA	NE	2,6	0,14	4,63	6,04	2,37	1,66
E-2	VRATA	NE	2,0	0,16	3,94	2,04	1,28	1,36
F-1	VRATA	DA	2,6	0,14	5,33	3,10	1,41	1,24
F-2	VRATA	DA	2,0	0,16	6,15	5,19	3,03	2,33
G-1	PROZOR	NE	1,0	0,05	9,54	4,31	1,86	1,34
G-2	PROZOR	NE	1,0	0,07	5,99	3,14	1,75	1,49
G-3	PROZOR	NE	1,0	0,11	5,06	2,8	1,57	1,35
G-4	PROZOR	NE	1,2	0,13	9,81	2,50	2,89	2,11
H-1	PROZOR	DA	1,0	0,05	5,41	3,08	2,69	2,33
H-2	PROZOR	DA	1,2	0,13	2,75	3,73	1,65	1,46

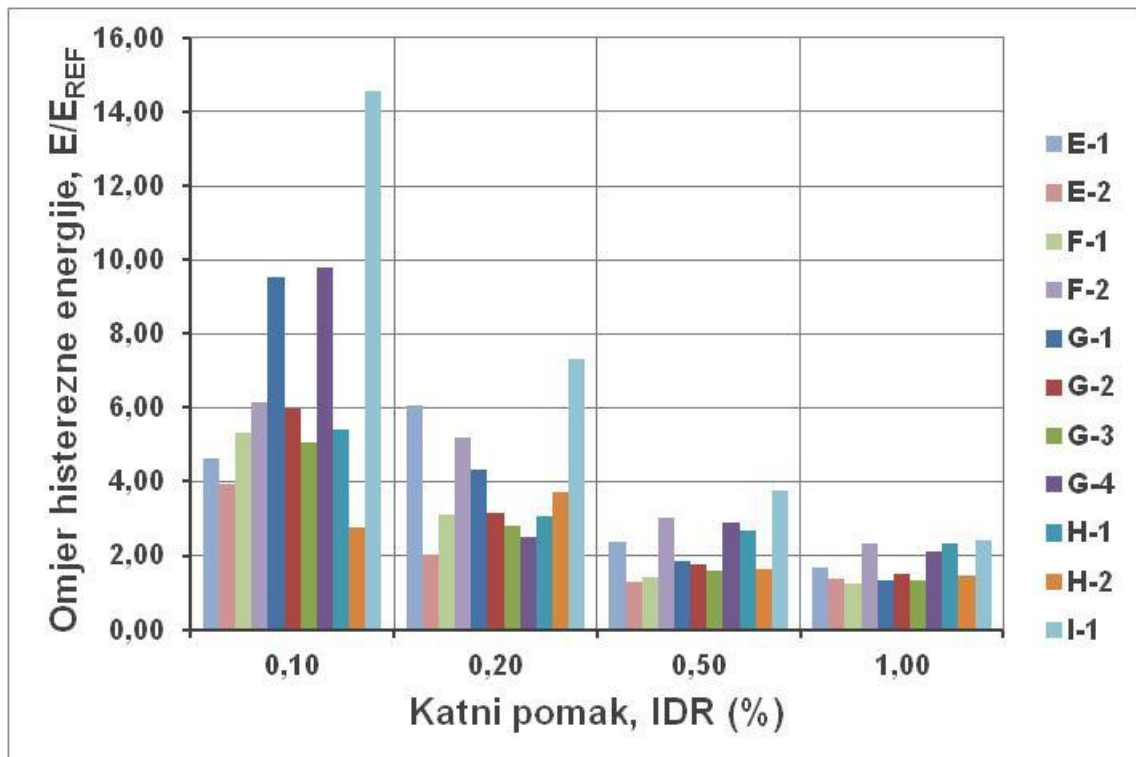
**Tablica 8.23.** Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju **E (kNmm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_1/L_1=0,72$  s otvorom smještenim s otklonom,  $O_0=L_1-(H_1/5+L_0/2)$ , unutar zidanog ispuna u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)** (strana suprotno od otvora)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_0/L_0$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_0/A_1$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
J-1	VRATA	NE	2,6	0,14	13,57	8,79	2,14	1,33
J-2	VRATA	NE	2,0	0,16	14,47	4,95	4,11	2,83
K-1	VRATA	DA	2,6	0,14	30,47	8,54	3,56	1,99
K-2	VRATA	DA	2,0	0,16	18,1	3,42	2,52	-
L-1	PROZOR	NE	1,0	0,05	17,5	3,91	-	-
L-2	PROZOR	NE	1,0	0,07	9,33	-	-	-
L-3	PROZOR	NE	1,0	0,11	8,72	5,55	-	-
L-4	PROZOR	NE	1,2	0,13	23,20	10,08	3,99	-
M-1	PROZOR	DA	1,0	0,05	18,10	3,43	2,52	-
M-2	PROZOR	DA	1,2	0,13	23,69	11,37	2,67	1,63

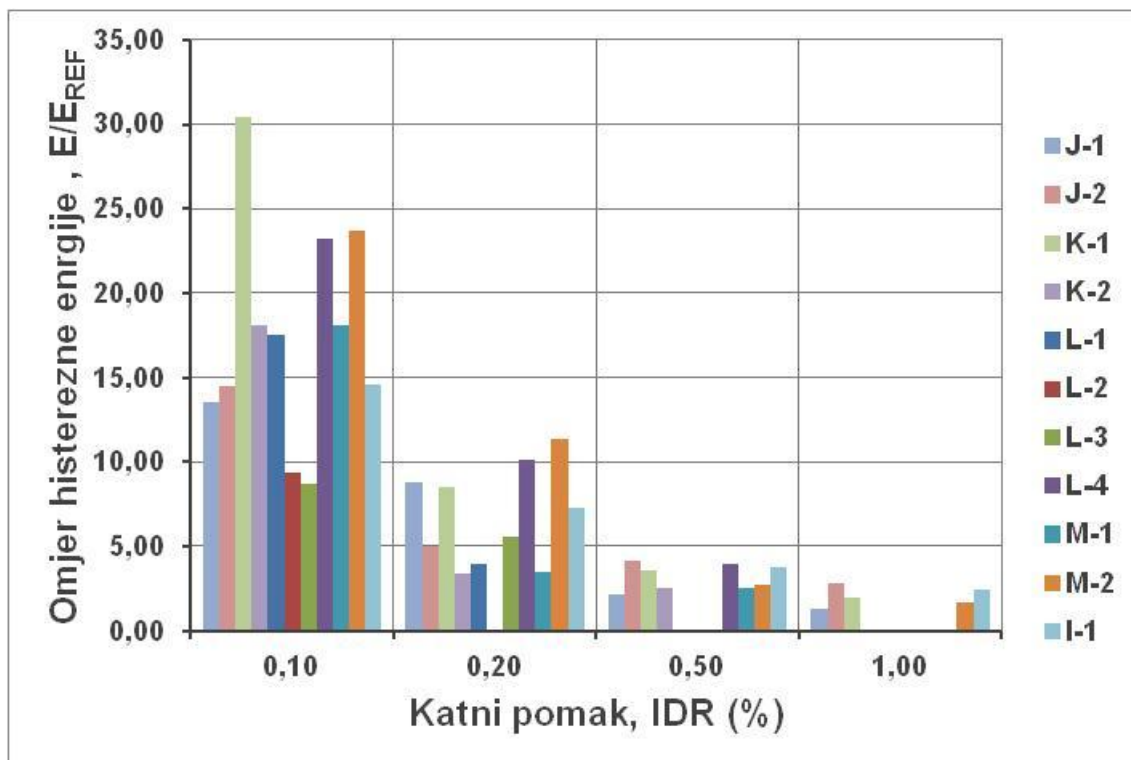
Tablice 8.21. do 8.23 predstavljaju faktore utjecaja za histereznu energiju okvira sa zidanim ispunom odnosa stranica  $\alpha=H_1/L_1=0,72$ . Tablica 8.21. predstavlja utjecajne faktore za simetrične modele. Za nesimetrične modele utjecajni faktori su dani u tablicama 8.21. i 8.23. u ovisnosti o smještaju otvora. Razmatrane su otvori za prozor i vrata te mogućnost izvedbe vertikalnog serklaža oko otvora. Smještaj otvora definiran je izrazom navedenim u tekstu tablice. Skupni prikaz podataka danih u tablicama 8.1. do 8.3. prikazan je na slikama 8.13. do 8.15.



Slika 8.13. Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidane ispune odnosa stranica  $\alpha=H_i/L_i=0,72$ , s otvorom smještenim u sredini raspona,  $O_o=L_i/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%)



Slika 8.14. Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidane ispune odnosa stranica  $H_i/L_i=0,72$ , s otvorom smještenim s otklonom,  $O_o=H_i/5+L_o/2$ , u odnosu na katne pomake IDR (%)



Slika 8.15. Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidane ispune odnosa stranica  $H_i/L_i=0,72$ , s otvorom smještenim s odklonom,  $O_o=L_i-(H_i/5+L_o/2)$ , u odnosu na katne pomake  $IDR$  (%)

#### 8.4.2. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_i/L_i=0,59$

Tablica 8.24. Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju  $E$  (kNmm) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,59$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake  $IDR$  (%)

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, $IDR$ (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
D-2	PROZOR	DA	1,2	0,10	21,10	9,22	2,60	0,88
I-2	Puni zidani ispun				29,33	13,41	2,90	0,86

Tablica 8.25. Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju  $E$  (kNmm) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,59$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=H_i/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake  $IDR$  (%)

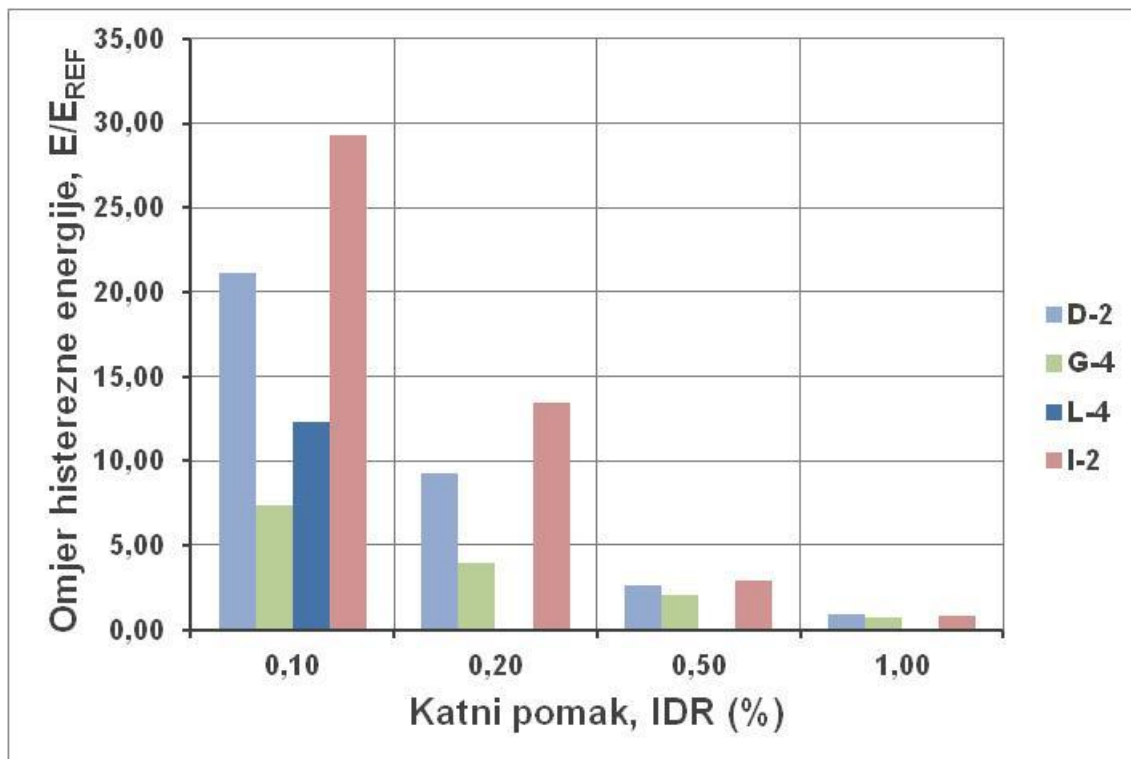
Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, $IDR$ (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
G-4	PROZOR	DA	1,2	0,10	7,39	3,98	2,01	0,71

**Tablica 8.26.** Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju **E (kNmm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_1/L_1=0,59$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_0=L_1-(H_1/5+L_0/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)**

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_0/L_0$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_0/A_1$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
L-4	PROZOR	DA	1,2	0,10	12,35	-	-	-

Tablice 8.24. do 8.26. predstavljaju faktore utjecaja za histereznu energiju okvira sa zidanim ispunom odnosa  $\alpha=H_1/L_1=0,59$ . Tablica 8.24. predstavlja utjecajne faktore za simetrične modele tj. za slučaj omeđenog otvora u sredini zidanog ispuna i puni zidani ispun. Za nesimetrični model tj. za slučaj omeđenog otvora s otklonom u zidanom ispunu, vrijednosti faktora su dani tablicama 8.25. i 8.26., u ovisnosti o smještaju otvora. Smještaj otvora definiran je izrazom navedenim u tekstu tablice.

Zbog usklađenosti s prethodno danim podacima, vrijednosti utjecajnih faktora predstavljaju odnos okvira s punim ispunom prema praznom armirano-betonskom okviru pripadnih izmjera. Skupni prikaz podataka danih u tablicama 8.24. do 8.26. prikazan je na slici 8.16.



**Slika 8.16.** Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidane ispune odnosa stranica  $H_1/L_1=0,59$  u odnosu na katne pomake **IDR (%)**

### 8.4.3. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna $\alpha=H_i/L_i=0,93$

**Tablica 8.27.** Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju **E (kNmm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,93$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)**

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
D-2	PROZOR	DA	1,2	0,17	9,29	6,34	3,64	2,65
I-3	Puni zidani ispun				32,80	15,85	4,45	2,05

**Tablica 8.28.** Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju **E (kNmm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,93$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=H_i/5+L_o/2$ , u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)**

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
G-4	PROZOR	DA	1,2	0,17	5,61	4,53	3,04	2,56

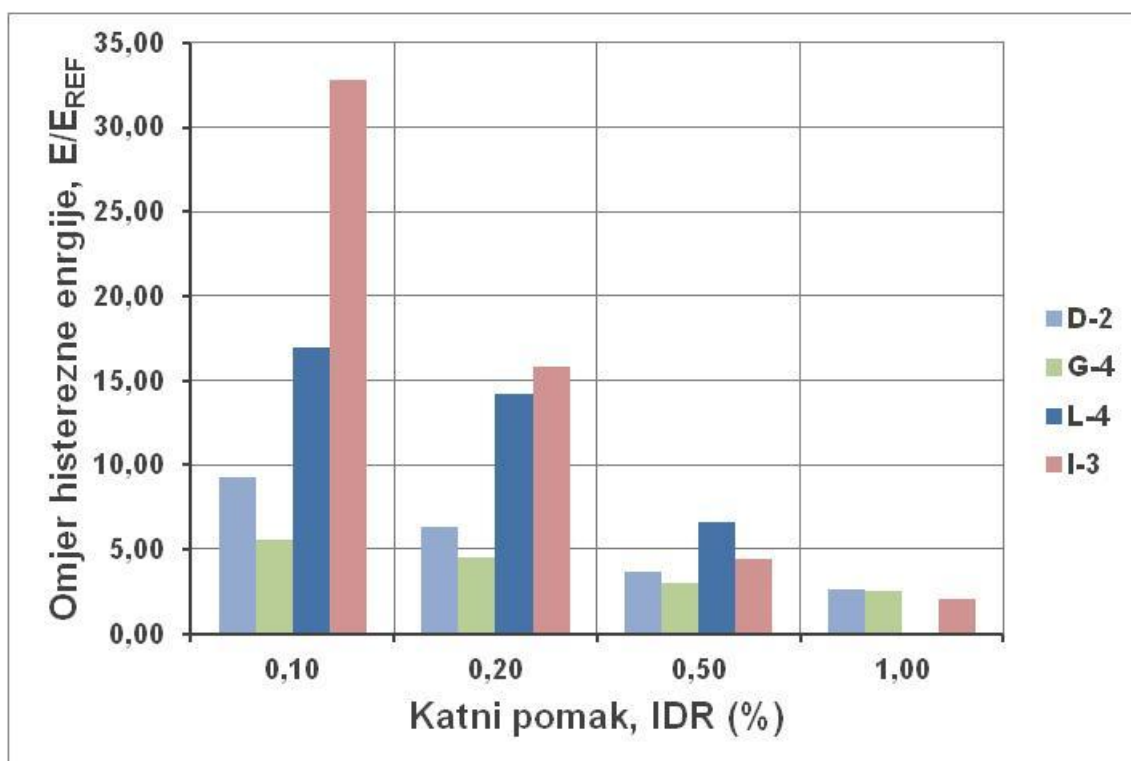
**Tablica 8.29.** Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju **E (kNmm)** za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_i/L_i=0,93$  s otvorom smještenim u sredini zidanog ispuna,  $O_o=L_i-(H_i/5+L_o/2)$ , u odnosu na odabrane katne pomake **IDR (%)**

Oznaka slučaja	Vrsta otvora	Omeđenost otvora	Odnos izmjera otvora $\beta=H_o/L_o$	Odnos ploštine otvora i ispuna $\gamma=A_o/A_i$	Katni pomak, IDR (%)			
					0,10	0,20	0,50	1,00
L-4	PROZOR	DA	1,2	0,17	16,95	14,18	6,63	-

Tablice 8.27. do 8.29. predstavljaju faktore utjecaja za histereznu energiju okvira sa zidanim ispunom odnosa  $\alpha=H_i/L_i=0,93$ . Tablica 8.27. predstavlja utjecajne faktore za simetrične modele tj. za slučaj omeđenog otvora u sredini zidanog ispuna i puni zidani ispun. Za nesimetrični model tj. za slučaj omeđenog otvora s otklonom u zidanom ispunu, vrijednosti faktora su dani tablicama 8.28. i 8.29., u ovisnosti o smještaju otvora. Smještaj otvora definiran je izrazom navedenim u tekstu tablice.

Zbog usklađenosti s prethodno danim podacima, vrijednosti utjecajnih faktora predstavljaju odnos okvira s punim ispunom prema praznom armirano-betonskom okviru pripadnih izmjera. Skupni prikaz podataka danih u tablicama 8.27. do 8.29. prikazan je na slici 8.17.





Slika 8.17. Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidane ispune odnosa stranica  $H_1/L_1=0,93$  u odnosu na katne pomake IDR (%)

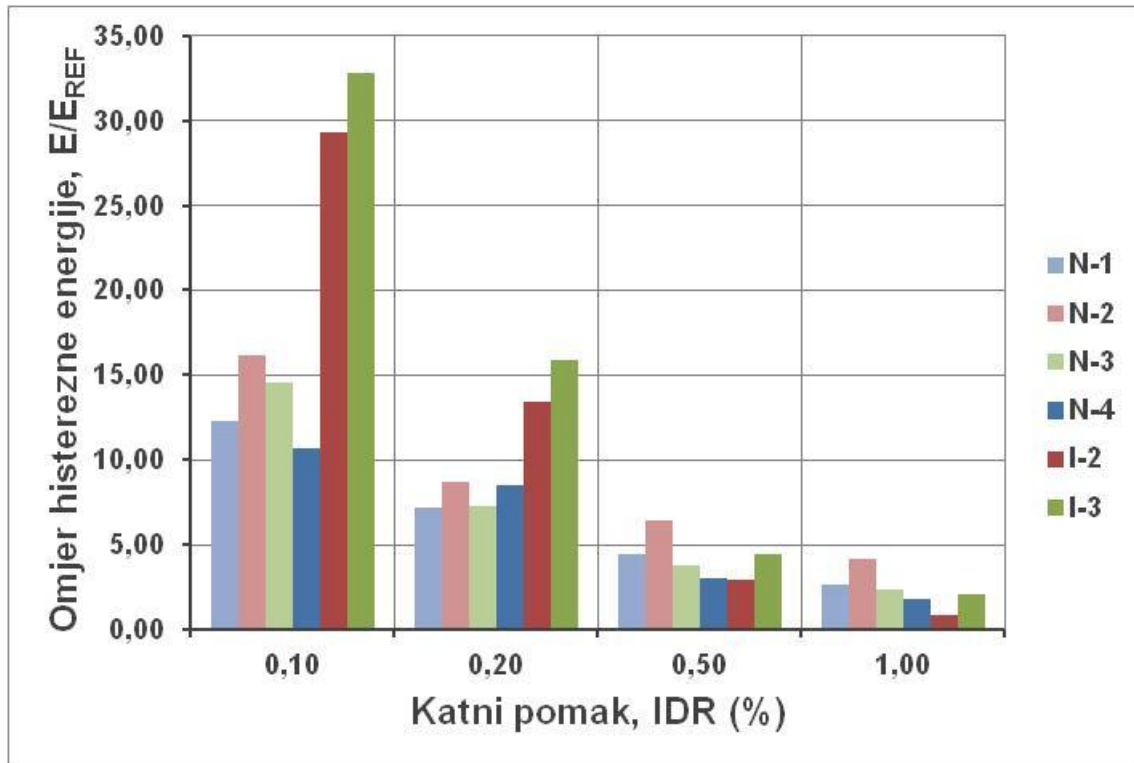
#### 8.4.4. Odnos izmjera stranica punog zidanog ispuna s drugim materijalima zidanog ispuna $\alpha=H_1/L_1=0,72$

Tablica 8.30. Pregled faktora utjecaja na histereznu energiju  $E$  (kNmm) za odnos izmjera „punog“ zidanog ispuna armirano-betonskog okvira  $\alpha=H_1/L_1=0,72$  s različitim materijalom zidanog ispuna, u odnosu na odabrane katne pomake IDR (%)

Oznaka slučaja	Vrsta zidnog elementa	Razred čvrstoće morta	Katni pomak, IDR (%)			
			0,10	0,20	0,50	1,00
N-1	Puna opeka	M5	12,25	7,15	4,42	2,60
N-2	Puna opeka	M10	16,16	8,66	6,43	4,13
N-3	Opečni blok	M5	14,57	7,30	3,77	2,40
N-4	Opečni blok	M10	10,70	8,46	3,00	1,80

Tablica 8.30. prikazuje faktore utjecaja za histereznu energiju uslijed promjene materijala zidanog ispuna. Ova studija odnosi se na istraživanje utjecaja punih zidanih ispuna odnosa izmjera  $\alpha=H_1/L_1=0,72$ .

Podaci iz tablice 8.30. su prikazani na dijagramu na slici 8.18. zajedno s faktorima dobivenim za druge odnose izmjera ispuna.



Slika 8.18. Usporedba faktora utjecaja na histereznu energiju za zidane ispune različitih materijala i odnosa stranica u odnosu na katne pomake IDR (%)

## 8.5. Sažetak i zaključak poglavlja

U ovome su poglavlju tablično prikazani i sabrani rezultati eksperimentalnih istraživanja i parametarske studije. Pri tome su za nesimetrične uzorke usvojeni korekcijski faktori za pozitivne i negativne cikluse, dok su za simetrične uzorke usvojene prosječne vrijednosti. Iz ovog su opsežnog prikaza doneseni generalni zaključci o doprinosu pojedinih parametara i utjecaju serklaža oko otvora. Također je obrazložen i pregledan utjecaj otvora kroz promjene ponašanja modela sa i bez otvora.

## Poglavlje 9.0.

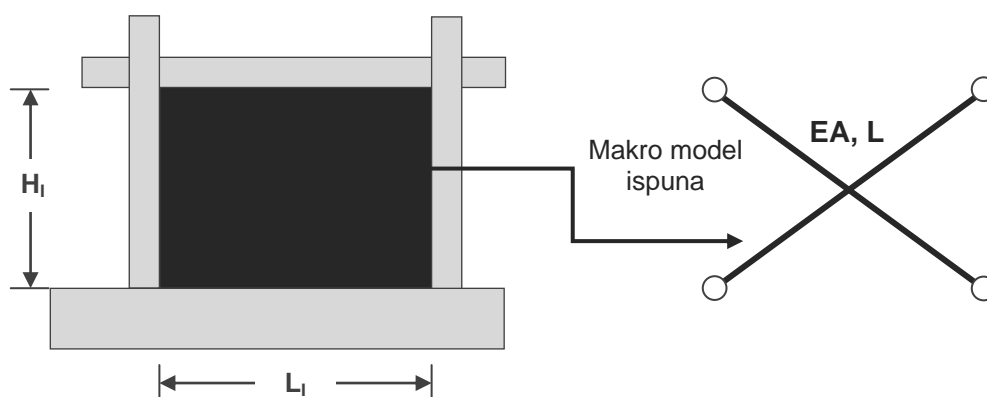
# UZIMANJE U OBZIR OTVORA U ISPUNU

### 9.1. Uvod

U ovom poglavlju prikazan je način na koji je moguće uzeti u obzir otvore pri proračunu. On se zasniva na temelju prethodno istraženih korekcijskih faktora i primjeni metode zamjenske tlačne dijagonale. U svrhu toga prvo je opisan pristup proračunu u slučaju punog zidanog ispuna. Zatim su predloženi bitni parametri za utjecaj otvora te kriteriji kojima se otvori kategoriziraju na male, srednje i velike. Putem izraza za proračun tlačne dijagonale punog ispuna uvedeni su faktori kojima se u obzir uzima otvor sa i bez vertikalnih serklaža. Dane su smjernice za izvedbu vertikalnih serklaža. Također, putem proširene studije na više povezanih okvira s ispunom, istražena je mogućnost može li takav sustav promatrati uvećanjem doprinosa pojedinih polja.

### 9.2. Pojednostavljeni proračun okvira s punim ispunom

Uobičajeni proračun okvira s ispunom je uz primjenu zamjenske tlačne dijagonale. Ona se pokazala dosta dobrom u slučajevima punih zidanih ispuna. Metoda se sastoji u tome da se putem dijagonalno (ukršteno) postavljenih štapova unutar okvira zamijeni ispun. Uvjet je da štapovi ne prenose vlačne sile. Ova metoda predstavlja brz i intuitivan inženjerski pristup za razliku od pristupa putem mikro-modela, koji zahtijevaju vrlo velik broj ulaznih parametara. Problem u primjeni metode zamjenske tlačne dijagonale predstavlja određivanje njene širine, dok se debljina dijagonale usvaja jednaka debljini ispuna.



Slika 9.1. Model s punim ispunom (lijevo) i sa zamjenskim tlačnim dijagonalama prema (6) (desno)

Danas su dostupna brojna rješenja kao primjerice (101, 102, 103, 104, 105). U skladu s (25) preporučuje se se usvajanje širine tlačne dijagonale kao manju vrijednost od  $D_1/4$  ili  $4T_1$ , gdje  $D_1$  predstavlja duljinu dijagonale, a  $T_1$  debljinu ispuna. Također, u (25) se preporuča uzimanje otvora u obzir, ali nije opisano na koji način. Nedostatak u primjeni metode tlačne dijagonale je taj što nije moguće predstaviti složene načine sloma. Ovo je posebno značajno ukoliko ispun sadržava otvore (82). Osim toga, povećanjem katnog pomaka raste oštećenost zidanog ispuna, čime se smanjuje njihova krutost. To znači da su svojstva tlačne dijagonale ovisne o katnom pomaku. Metoda predstavljena ovdje teži ka tome da na temelju prethodno iznijetih utjecajnih faktora dobivenih istraživanjem, predstavi utjecaj otvora u ispunu na odnos horizontalne sile i pomaka okvira s ispunom, ali bez opisa načina sloma.

### 9.3. Pojednostavljeni proračun okvira s otvorima u ispunu

#### 9.3.1. Bitni parametri

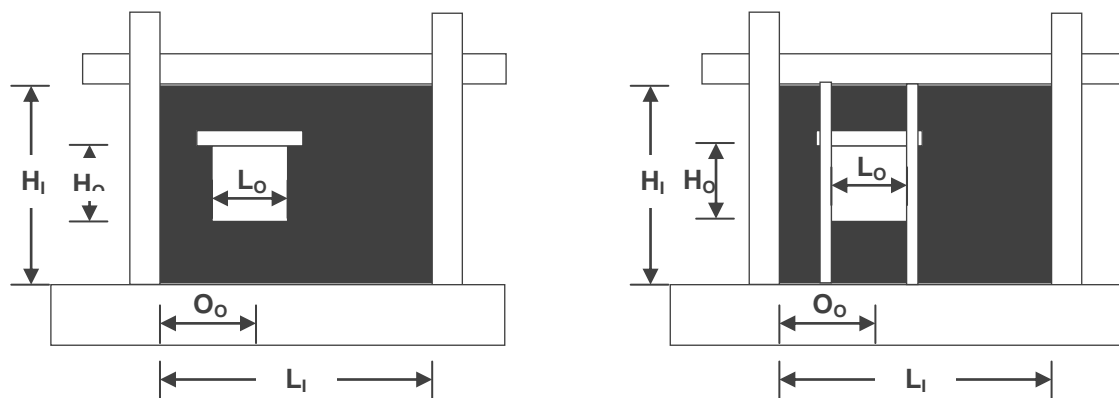
Ukoliko ispun znatno utječe na nosivost i krutost okvirne konstrukcije, potrebno ga je uzeti u obzir prema (25). Također, ukoliko se razmatra kao nosivi element, potrebno je na njega primijeniti pravila kao za omeđeno zidče. U tom slučaju, oko otvora je potrebno izvesti vertikalne serklaže kada im je ploština  $A_O > 1,5\text{m}^2$ . Prethodnim istraživanjem pokazano je kako je utjecaj otvora jednake ploština različit ukoliko se promijene izmjere zidnog ispuna  $L_1$  i  $H_1$ , a time i njegova ploština  $A_1$ . Stoga u obzir treba uzeti odnos ploštine otvora spram ploštine punog zidanog ispuna  $\gamma = A_O/A_1$  pri odluci o izvedbi serklaža. U ovome radu otvori su stoga kategorizirani kao mali, srednji i veliki prema uvjetima u tablici 9.1.

Tablica 9.1. Kategorizacija otvora

Parametar otvora	Mali otvor	Srednji otvor	Veliki otvor
$\gamma = A_O/A_1$	$A_O/A_1 \leq 0,075$	$0,075 < A_O/A_1 \leq 0,15$	$A_O/A_1 > 0,15$

Za male otvore nije potrebna izvedba serklaža u slučaju otvora smještenih u sredini. Vrlo važne su izmjere otvora  $H_O$  i  $L_O$  u usporedbi s izmjerama ispuna  $H_1$  i  $L_1$  (slika 9.2.). Utjecaj visine otvora je vidljiv kod usporedbe načina sloma ispuna s otvorom za vrata i prozor smještenih bez otklona. Parapet ispod prozora je omogućio oblikovanje dijagonale pod kutom od **45° stupnjeva**, dok je u slučaju otvora za vrata kut dijagonale bio 65°. Dakle, iako nije omogućeno oblikovanje dijagonale pod kutom od 45° ona je nastala pod drugim kutom. Kod otvora veće visine izražen je bio gubitak stabilnosti dijela zidanog ispuna, osobito kod otvora za vrata. stoga je ovdje usvojen uvjet da se primjenjuju vertikalni serklaži ukoliko je  **$H_O/H_1 \geq 0,5$** . Duljina otvora  $L_O$  utječe na smanjenje horizontalne nosivosti ispuna te ju je potrebno uzeti u obzir smanjenjem duljine otpora mogućem slomu tj.  **$L_H = L_1 - L_O$** . Ovdje se neće posebno razmatrati, jer je ova metoda neovisna o načinu sloma.

Osobit problem otvora u zidanom ispunu je ometanje oblikovanja tlačne dijagonale, jer vodi do značajnog utjecaja na pad nosivosti i krutosti za pripadni smjer opterećivanja. To je pokazano u slučaju otklona otvora  $O_o$  kad je ugao otvora bio u blizini začetka tlačne dijagonale tj. ugla ispuna. Kada je otvor u sredini, ukoliko je male ili srednje veličine, on je dovoljno daleko od stupa okvira čime omogućava oblikovanje tlačne dijagonale. Stoga je smještaj otvora u sredini ispuna povoljniji. Prema tome, otklon otvora je potrebno uzeti u obzir kada ima vrijednost  $O_o \leq H_i/2 + L_o/2$ . To podrazumijeva drukčija svojstva međusobno ukrštenih dijagonala uz primjenu metode tlačne dijagonale. Za male otvore u slučaju otklonjenog otvora je gubitak u najvećoj nosivosti je bio 1/5 od one za slučaj otvora u sredini ili punog ispuna, dok je za otvore za vrata bio 2/5, jer su imali veću visinu. Problem se može riješiti primjenom vertikalnih serklaža.



Slika 9.2. Otklonjeni otvor za prozor u ispunu okvira s pripadnim oznakama

Vertikalni serklaži umanjuju utjecaj vrste i smještaja otvora, tj. čine ga jednakim kao i u slučaju punog ispuna. Ovo vrijedi za srednje i male otvore. U slučaju velikih otvora  $A_o/A_f > 0,15$  oni doprinose, ali im je odgovor slabiji u odnosu na slučaj s punim ispunom. Pomažu spriječiti prerani raspad ispuna te ispadanje pojedinih njegovih dijelova. Oni također sprječavaju horizontalni slom reški morta oslabljenih prisutnošću otvora. Potrebno im je stoga osigurati dovoljnu čvrstoću na posmik. U protivnome, ispun je podložan višestrukom tj. složenom i manje predvidljivom načinu sloma.

Dana su ukupno tri kriterija za procjenu potrebe izvedbe vertikalnih serklaža. Oni glase:

1.  $A_o/A_f > 0,075$  ili  $A_o > 1,5 \text{ m}^2$  (9.1.)

2.  $H_o/H_i \geq 0,5$  (9.2.)

3.  $O_o \leq H_i/2 + L_o/2$  (9.3.)

Ukoliko jedan od ovih uvjeta nije zadovoljen, zbog prethodno navedenih razloga, potrebno je izvoditi vertikalne serklaže.

### 9.3.2. Pristup putem tlačne dijagonale

#### a) Proračun krutosti

Jednostavan način da se utjecaj otvora uzme u obzir je putem krutosti u smjeru zamjenske tlačne dijagonale,

$$K_D = E_D A_D / L_D \quad (9.4.)$$

gdje je  $E_D$  modul elastičnosti ziđa, a  $A_D$  ploština poprečnog presjeka dijagonale. Za modul elastičnosti ziđa preporuča se usvojiti modul u vertikalnom smjeru tj. okomito na horizontalne reške morta iz praktičnih razloga. On se da izračunati putem pojednostavljenih izraza prema (24), i usvaja se s jednakom vrijednošću pri svim katnim pomacima.

Ploština poprečnog presjeka zamjenske tlačne dijagonale je jednaka

$$A_D = T_D \times H_D \quad (9.5.)$$

gdje je  $T_D = T_1$  debljina tlačne dijagonale jednaka debljini ispuna, a  $H_D$  širina tlačne dijagonale. Putem izraza 9.4. i 9.5. dobije se izraz za određivanje širine zamjenske tlačne dijagonale za katni pomak  $IDR = 0,10\%$ ,

$$H_D = L_D K_D / (T_1 \times E_D) \quad (9.6.)$$

Krutost  $K_D$  tlačne dijagonale ovisi o katnom pomaku. Dobiva se kao razlika krutosti okvira s punim ispunom i praznoga okvira (ovdje za katni pomak  $IDR = 0,10\%$ ). Krutost okvira s punim ispunom dobiva se množenjem poznate krutosti praznoga okvira s korekcijskim faktorima, za ključne katne pomake, prema izrazu

$$K_{0,1} = K_{REF;0,1} k_{H;0,1} \quad (9.7.)$$

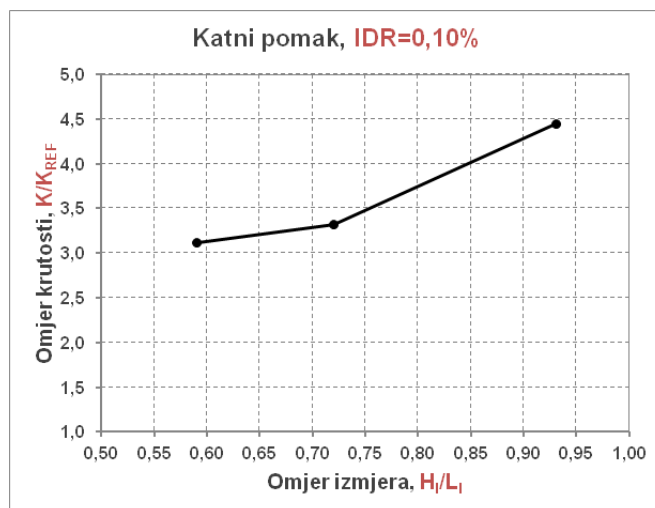
Uzimajući u obzir nagib, krutost tlačne dijagonale određuje se prema izrazu

$$K_{D;0,1} = K_{REF}(x y^{\kappa_{0,1}} k_H^{-\nu_{0,1}}) / \cos^2 \theta \quad (9.8.)$$

gdje je  $\theta$  kut nagiba tlačne dijagonale,  $\kappa_{0,1}$  i  $\nu_{0,1}$  faktori redukcije krutosti okvira s punim ispunom i bez ispuna,  $k_H$  korekcijski faktor ili faktor utjecaja na krutost. U izrazu 9.8., podebljani izrazi se ne mijenjaju kroz proračun za preostale katne pomake. Njihove vrijednosti se odnose na katni pomak  $IDR = 0,10\%$ , dakle  $K_{REF} = K_{REF;0,1}$  i  $k_H = k_{H;0,1}$ .

Korekcijski faktor  $k_H$ , ovisi o odnosu duljina stranica ispuna  $\alpha = H_i / L_i$  (vidjeti sliku 9.3.). Faktori redukcije krutosti okvira s punim ispunom su  $\kappa_{0,1} = 1,0$ ,  $\kappa_{0,2} = 0,7$ ,  $\kappa_{0,5} = 0,4$  i  $\kappa_{1,0} = 1,0$ . Oni su neovisni o izmjerama ispuna. Početna krutost  $K_{0,0}$  ili krutost pri katnom pomaku  $IDR = 0,0\%$ , dvostruko je veća od krutosti pri  $IDR = 0,10\%$ . Ovo se ne odnosi na početne krutosti dobivene idealizacijom primarnih krivulja. Stoga, s poznatom jednom od navedenih krutosti, moguće je odrediti preostale.





Slika 9.3. Odnos omjera krutosti okvira s punim ispunom spram praznog okvira za IDR=0,10%

Putem poznatog odnosa izmjera stranica punog zidanog ispuna, linearnom interpolacijom moguće je utvrditi pripadni korekcijski faktor, prema dijagramu na slici 9.3., za katni pomak IDR=0,10%.

Ploština tlačne dijagonale  $A_D$  se stoga, u skladu s izrazom 9.6., umanjuje sukladno padu krutosti.

b) Uzimanje otvora u obzir

Ukoliko ispun sadrži otvore, a prethodno je određena krutost okvira s punim zidanim ispunom, množenjem izraza 9.8. faktorima danim u tablicama 9.2. i 9.3. moguće je uzeti otvore u obzir. Dani izrazi odnose se na jedan okvir.

Tablica 9.2. Prikaz faktora otklona otvora,  $x$ , kojim se umanjuju nosivost i krutost okvira s punim ispunom

Kategorija otvora prema $A_0/A_I$	Vertikalni serklaž	
	DA	NE
$A_0/A_I < 0,075$	1,0	0,8
$0,075 < A_0/A_I < 0,015$	1,0	0,8
$A_0/A_I > 0,015$	0,9	-

Tablica 9.3. Prikaz faktora vrste otvora,  $y$ , kojim se umanjuju nosivost i krutost okvira s punim ispunom

Kategorija otvora prema $A_0/A_I$	Vrsta otvora	Vertikalni serklaž	
		DA	NE
$A_0/A_I < 0,075$	Prozor	1,0	1,0
$0,075 < A_0/A_I < 0,015$	Prozor	1,0	1,0
	Vrata	1,0	0,9
$A_0/A_I > 0,015$	Prozor	0,9	-

Za slučaj otklonjenih otvora bez izvedbe vertikalnih serklaža potrebno je proračun širine dijagonale uraditi za oba smjera opterećenja. Za stranu s otklonjenim otvorom gubitak u krutosti se može izraziti putem faktora utjecaja otklona otvora  $x$ , koji je jednak 1,0 za slučaj otvora u sredini te 0,8 za slučaj otklona otvora. Ovo vrijedi u slučaju kada nisu prisutni vertikalni serklaži. Faktor  $y$  se odnosi na opadanje krutosti ovisno o vrsti otvora. On iznosi 1,0 u slučaju prozora te 0,9 u slučaju otvora za vrata.

Izraz 9.8. postaje dakle:

$$K_{D;0,1} = K_{REF}(xy^{k_{0,1}}k_H^{-v_{0,1}})/\cos^2\theta \quad (9.9.)$$

Ovime se, s obzirom na smještaj, vrstu i izmjere otvora te prisutnosti vertikalnih serklaža, određuje pripadna krutost, a time i ploština tlačne dijagonale. Kada je poznata krutost, nosivost tlačne dijagonale  $F_D$  se može odrediti prema izrazu

$$F_D = K_D \cdot IDR \cdot (H_I + b_G/2) \quad (9.10.)$$

Uz bezdimenzionalne korekcijske faktore, moguće je putem poznavanja krutosti praznog okvira odrediti pripadnu krutost okvira s ispunom. Cilj je putem dobivenih svojstava tlačne dijagonale postići primarnu krivulju za jedan okvir s ispunom, na temelju poznavanja nelinearne statičke „pushover“ primarne krivulje punog okvira. Primjenom vertikalnih serklaža, osim u slučaju velikih otvora  $A_O/A_L > 0,15$ , ispun s otvorom se može razmatrati kao puni ispun.

Dijagonalni pomak se proračunava prema izrazu

$$D_D = D_H \cos\theta \quad (9.11.)$$

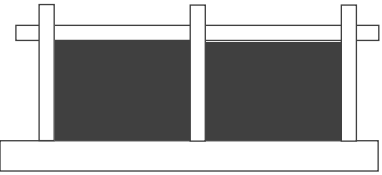
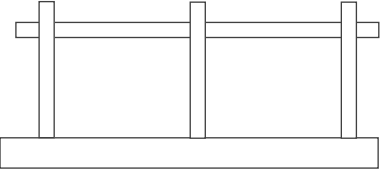
U skladu s danim izrazima, dobiva se primarna krivulja tlačne dijagonale prema nosivosti, krutosti ili ploštini dijagonale spram dijagonalnog ili katnog pomaka. Modul elastičnosti dijagonale se usvaja konstantnim i jednak modulu elastičnosti zidanog ispuna u vertikalnom smjeru.

## 9.4. Više povezanih okvira s ispunom

### 9.4.1. Pregled modela

Numerička studija proširena je s modelima dva međusobno povezana okvira sa zidanim ispunom i bez njih, u svrhu utvrđivanja nosivosti (krutosti) istih. Cilj je bio utvrditi razliku u usporedbi s nosivosti (krutosti) jednog okvira tj. kako dodatak pojedinog polja utječe na nosivost (krutost) sustava. Modeli su prikazani u tablici 9.4. i izvedeni su prema prethodno usvojenim parametrima u poglavlju 5.0.

**Tablica 9.4.** Numerički modeli međusobno povezanih okvira

Grupa	Broj	Oznaka	Izgled	Materijal zidanog ispuna	Izmjere zidanog isupna
VIII	1	Tip (VIII/1)		Mort M5 Glineni blok	$H_p/L_p=1,3/1,8$ m
	2	Tip (VIII/2)		-	-

### 9.4.2. Rezultati numeričkog proračuna

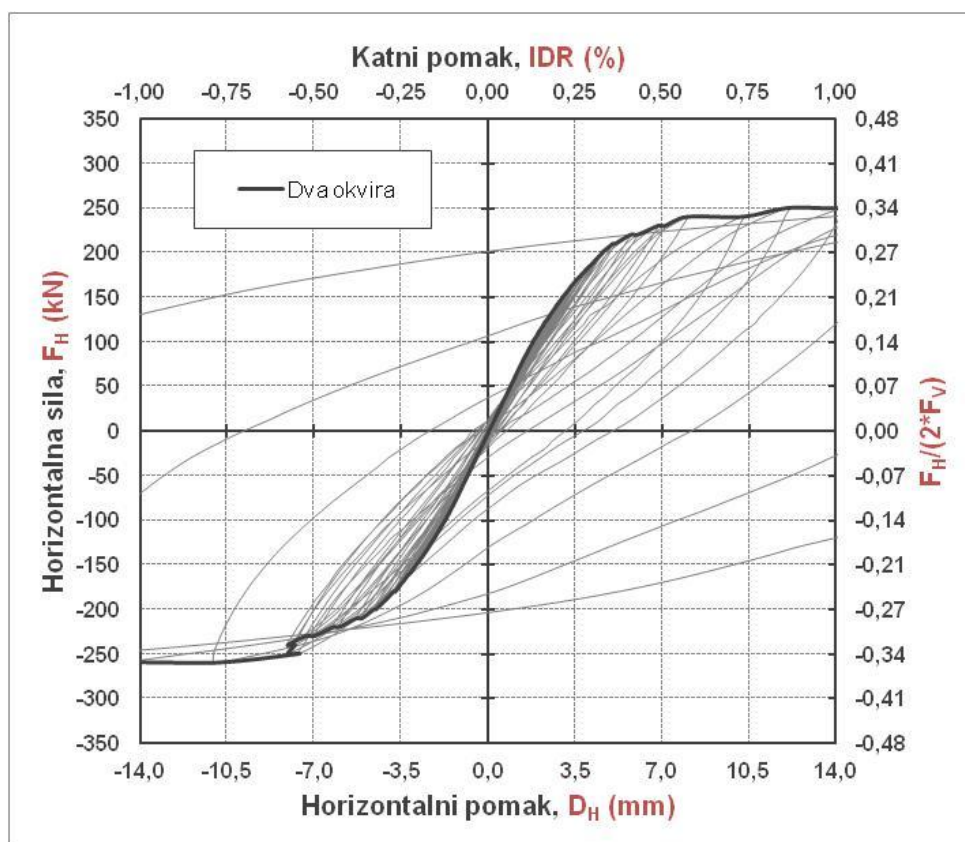
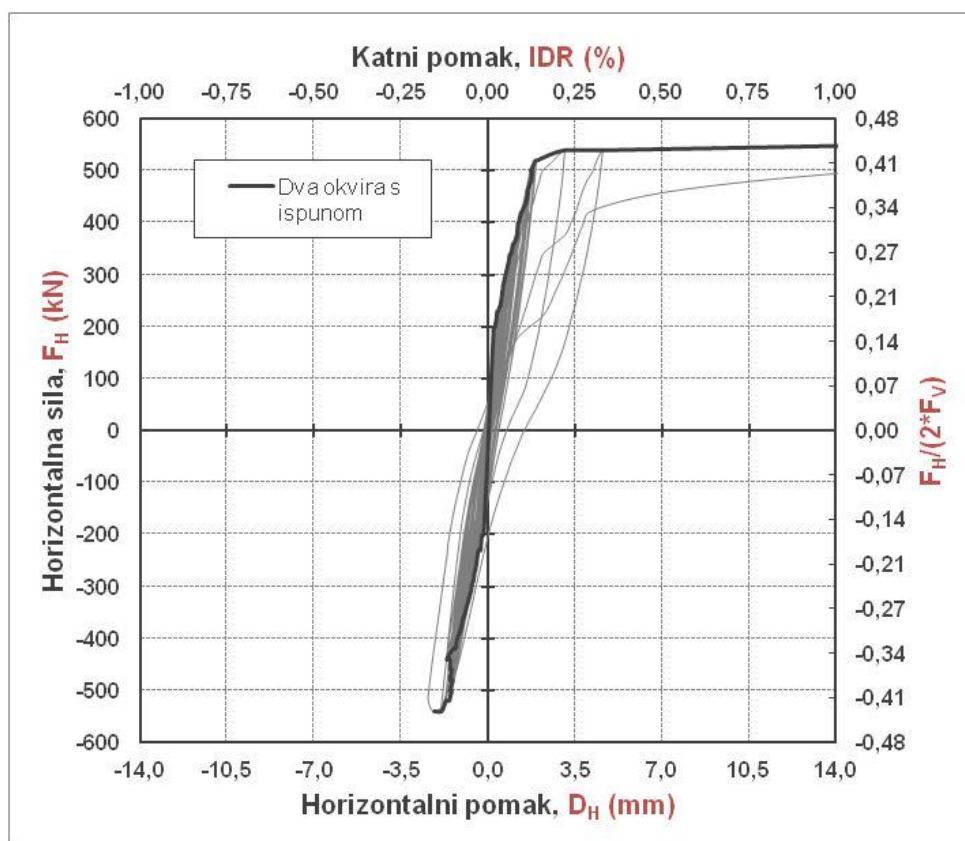
Karakteristične vrijednosti za odabrane katne pomake dobivene putem histereznih i pripadnih primarnih krivulja su dane u tablicama 9.5. i 9.6.

**Tablica 9.5.** Nosivost i krutost dvaju okvira u usporedbi s istima jednog okvira na pozitivnoj strani

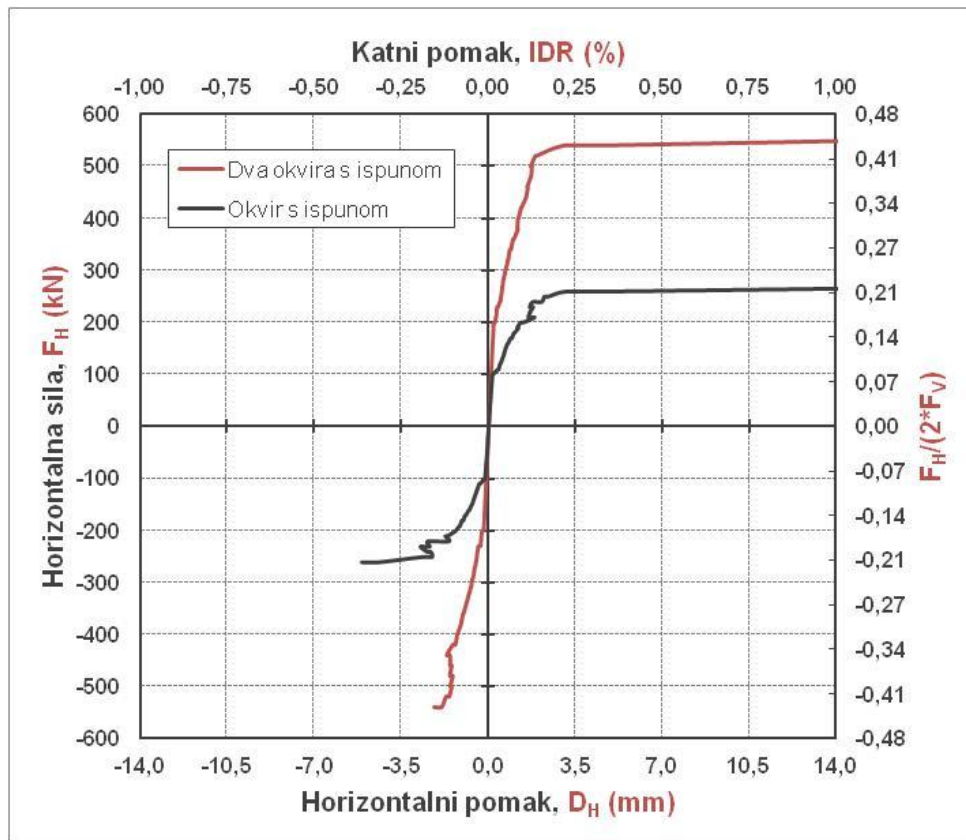
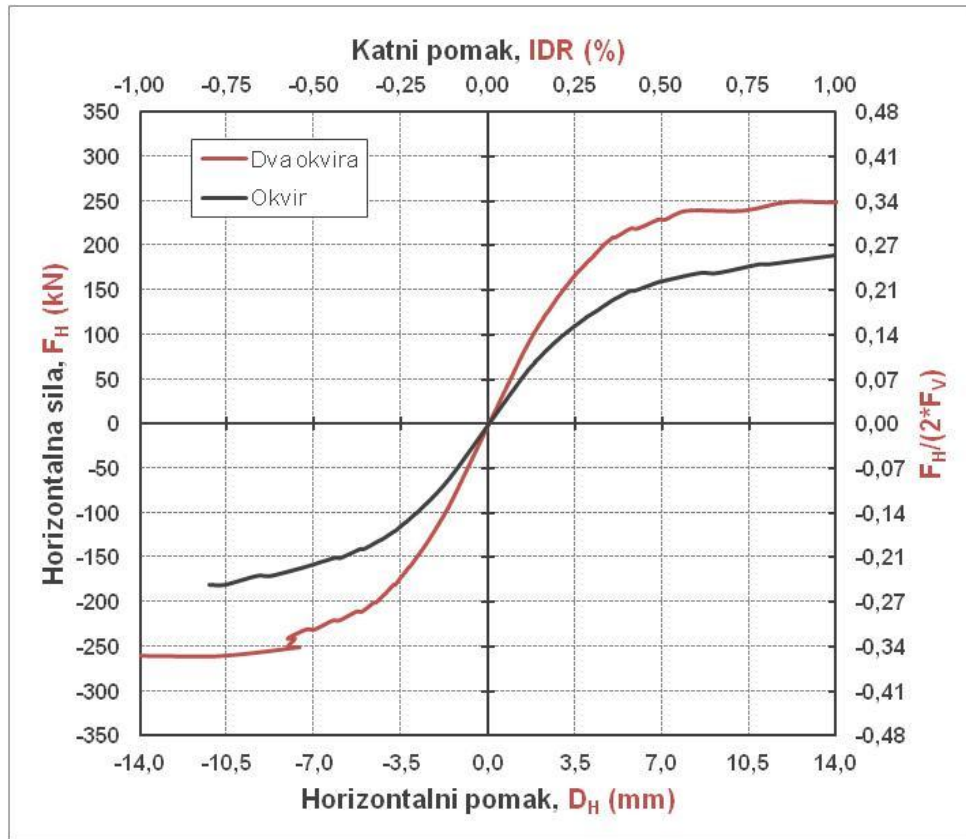
Katni pomak IDR (%)	Model tip (VIII/1)			Model tip (III/2)			Odnos tip (VIII/1)/tip(III/2)
	$F_H$ (kN)	$K$ (kN/mm)	$F_H/F_{H,REF}$ $K/K_{REF}$	$F_H$ (kN)	$K$ (kN/mm)	$F_H/F_{H,REF}$ $K/K_{REF}$	
0,10	420	321	5,55	211	151	3,36	2,13
0,20	540	178	3,43	263	94	2,76	1,89
0,50	540	118	3,63	245	35	1,59	3,37
1,00	560	40	2,29	252	18	1,50	2,22

**Tablica 9.6.** Nosivost i krutost dvaju okvira u usporedbi s istima jednog okvira na negativnoj strani

Katni pomak IDR (%)	Model tip (VIII/1)			Model tip (III/2)			Odnos tip (VIII/1)/tip(III/2)
	$F_H$ (kN)	$K$ (kN/mm)	$F_H/F_{H,REF}$ $K/K_{REF}$	$F_H$ (kN)	$K$ (kN/mm)	$F_H/F_{H,REF}$ $K/K_{REF}$	
0,10	-420	-314	-5,41	-211	-151	-2,52	2,08
0,20	-540	-193	-3,75	-263	-94	-1,96	2,05
0,50				-252	-36	-1,64	
1,00				-238	-17	-1,06	



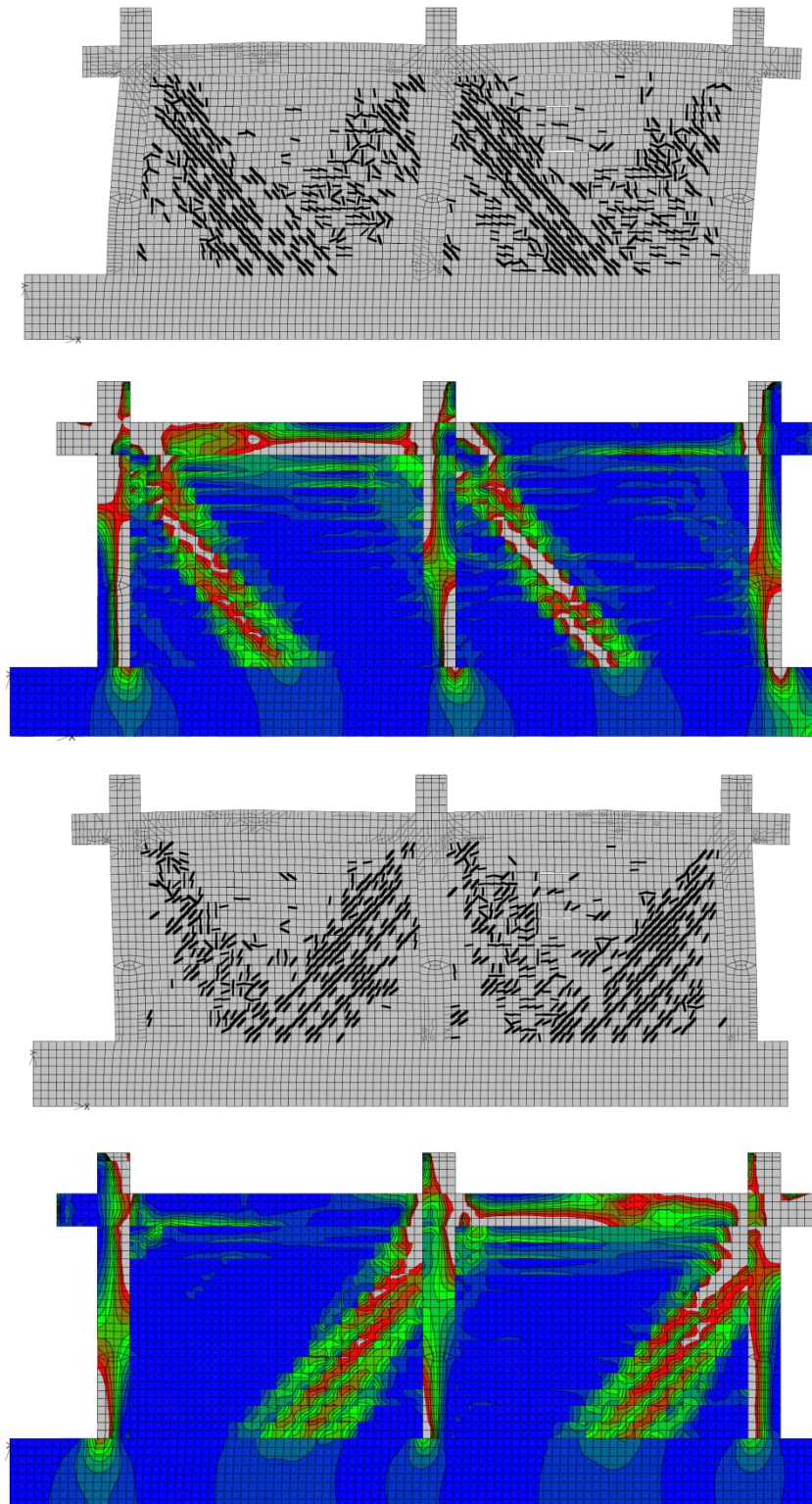
Slika 9.4. Histerezne i primarne krivulje uzoraka tip (VIII/1) i tip (VIII/2)



Slika 9.5. Primarne krivulje modela jednog okvira, sa i bez ispunom, u usporedbi s modelom s dva okvira, sa i bez ispunom



Na osnovu podataka danih u tablicama 9.4. i 9.5. vidljivo je da su krutost i nosivost dvaju okvira s ispunom zapravo zbroj istih iz pojedinih polja. Na slikama 9.4. I 9.5. dane su histerzne petlje i primarne krivulje, a na slici 9.6. dan je prikaz oštećenja i glavnih tlačnih napreznja modela. Način sloma zidanog ispuna je kao i za slučaj jednog polja.



Slika 9.7. Oštećenost i pripadna glavna tlačna napreznja modela tip (VIII/2) za IDR=1,0%



## 9.5. Sažetak i zaključak poglavlja

Na temelju izloženih rezultata istraživanja u prethodnom poglavlju analizirana je mogućnost primjene korekcije uobičajene metode proračuna okvira s ispunom na način da se uzme u obzir postojanje otvora u ispunu. Uobičajena metoda proračuna okvira s ispunom je uz primjenu zamjenske tlačne dijagonale. Ona se pokazala dosta dobrom u slučajevima punih zidnih ispuna. Primjenom korekcijskih faktora dobivenih prethodnim istraživanjima se predlaže uzimanje u obzir otvora. Također je prikazano i proširenje analize na slučaj kada se radi o više međusobno povezanih okvira s ispunom. Ovo je bilo neophodno jer je dosadašnja analiza obuhvaćala samo okvire s jednim poljem. Prema rezultatima ispada da se slučaj više međusobno povezanih okvira s ispunom može promatrati kroz uvećanje doprinosa pojedinih polja. Ovo je vrlo važno, jer je danom mogućnošću pojednostavljenog modeliranja otvoren prostor za modeliranje čitave konstrukcije.

## Poglavlje 10.0.

# OSVRT, ZAKLJUČAK I PRIJEDLOZI

### 10.1. Osvrt

Okviri s ispunom su kompozitne konstrukcije koje se sastoje od okvira (a-b ili čelični) i ispune za koju se u Hrvatskoj uobičajeno rabe blok opeke ili čak i betonski blokovi. Sličan konstruktivni sistem čine i zidovi s vertikalnim i horizontalnim serklažima uz razliku, što se kod zidova s serklažima prvo sazidaju zidovi, a onda se izvode serklaži (okviri).

Ispun bitno mijenja odgovor konstrukcije na potres i njen se utjecaj mora na odgovarajući način uzeti u proračun. Dosadašnji propisi ne sadrže pojašnjenja o tome kako se i na koji način to čini, osobito ako su prisutni otvori. Uz vrlo detaljan prikaz proračuna okvira i drugih uobičajenih armirano-betonskih konstrukcija i suvremene metode proračuna na raspolaganju projektantima, nedostatak pojašnjenja za okvire s ispunom se može pripisati nedovoljnom razumijevanju njihova utjecaja kao i velikom broju nejasnoća uključenih u modeliranje djelovanja ispune. Iskustva iz prijašnjih potresa su pokazala i povoljna i nepovoljna ponašanja konstrukcija okvira s ispunom. Međutim suvremeni propisi su uglavnom orijentirani na nepovoljna djelovanja odakle rezultiraju predimenzionirane i neekonomične konstrukcije. Interakcija između nearmirane ispune i okvira može dovesti do neuobičajenih ponašanja okvira bilo lokalno (efekt kratkog stupa, posmični slom čvora) ili globalno (nastanak meke etaže). Zbog svoje složenosti pozitivna i negativna djelovanja ispune još uvijek predstavljaju kontraverznu temu na kojoj treba poraditi, a poseban su problem okviri s ispunom s otvorima.

U okviru ovoga rada, koji je dio većeg istraživačkog projekta, provedeno je eksperimentalno istraživanje utjecaja otvora na seizmički odgovor armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom. Deset uzoraka jednokatnih- jedno-rasponskih okvira sa zidanim ispunom, sa i bez otvora u zidanom ispunu izvedeno je u mjerilu 1:2,5 i ispitano uslijed stalnog vertikalnog i horizontalnog cikličkog opterećenja u ravni. Armirano-betonski okviri su dimenzionirani bez uzimanja ispuna u obzir u skladu s europskim normama. Nakon njihova betoniranja oni su bili ispunjeni s zidanim ispunom jednakih materijalnih svojstava, ali različitog smještaja, vrste i izmjera otvora te sa ili bez izvedbe vertikalnog serklaža oko otvora. Zidni elementi su bili šuplji glineni blokovi visoke vertikalne i niske horizontalne čvrstoće te su povezivani mortom opće namjene. Istražen je utjecaj vrste i smještaja otvora te doprinos vertikalnih serklaža oko otvora. Zidani ispun je sa okvirom bio povezan isključivo adhezijom. Ispitivanja su provedena s glavnim ciljem istraživanja ponašanja sustava pri malim katnim pomacima do sloma ispuna.

S obzirom na nužnu ograničenost eksperimentalnog ispitivanja te neophodnost generalizacije zaključaka eksperimentalni rezultati su nadopunjeni s numeričkima primjenom nelinearne metode konačnih elemenata primijenjene u programu ATENA ver. 4.3. Radi pouzdanosti numeričkih rezultata, isti su prvo kalibrirani na izmjerenim vrijednostima, a zatim su ti kalibrirani modeli iskorišteni za proširivanje opsega istraživanja. Razmatrani su drugi materijali ispuna i druge izmjere okvira i otvora u svrhu poopćavanja i promaknuća zidanih ispuna, sa i bez otvora, u (pouzdanu) konstruktivne elemente.

Na osnovi predočene proširene slike ponašanja dobiveni su parametri utjecaja zidanog ispuna s otvorima i bez njih na armirano-betonski okvir. Rezultat su utjecajni (korekcijski) faktori kojima se predlaže uzimanje u obzir otvora, pri uobičajenom proračunu uz primjenu zamjenske tlačne dijagonale. Razumijevanje mehanizma i slijeda gubitka nosivosti će pomoći i u praktičnom uzimanju u obzir utjecaja zidanog ispuna s otvorima.

Provedena je i analiza više međusobno povezanih okvira te je pokazano kako se ispun može promatrati kroz uvećanje doprinosa pojedinih polja. Danom mogućnošću pojednostavljenog modeliranja otvoren je prostor za modeliranje čitave konstrukcije. To u konačnici omogućava primjenu okvira sa zidanim ispunom s i bez otvora, kao konstruktivnog elementa, što će rezultirati u većoj ekonomičnosti i pouzdanosti u procjeni ponašanja armirano-betonskih okvira s ispunom na djelovanje potresa.



**Slika 10.1.** Postavljanje mjernih uređaja tijekom pripreme ispitivanja

## 10.2. Zaključak

Prisutnost zidanog ispuna poboljšala je ponašanje sustava u pogledu nosivosti, krutosti i histereznoj energiji do katnog pomaka od 1%. Vrijednosti ovih parametara bile su povezane s oštećenošću zidanog ispuna koje je postajalo znatnije povećanjem katnog pomaka.

Neznatno oštećenje zidanog ispuna može se pripisati katnom pomaku od 0,1%, osrednje katnom pomaku od 0,2%, teško katnom pomaku od 0,5% i oštećenje pred slom katnom pomaku od 1%. Eksperimentalni rezultati su pokazali da je okvirna konstrukcija sa zidanim ispunom imala tri puta veću krutost neovisno o smještaju i vrsti otvora. Krutost je opadala s rastom katnog pomaka te je pri katnom pomaku od 0,75% bila zanemariva za ispun bez serklaža i pri 1% za ispun sa serklažima. Prisustvo vertikalnih serklaža oko otvora utjecalo je na produljenje doprinosa ispuna. U pogledu nosivosti i krutosti ispuna djelovalo je bolje kada je jedan veliki zidni stup (otklonjeni otvor) nego dva mala (otvor u sredini). Također, otvor za vrata je manje povoljan nego otvor za prozor.

Numerički modeli podliježu problemu nemogućnosti modeliranja ortotropnih zidnih elemenata te se stoga oni modeliraju kao puni. Ovime je zidani ispun postao podložniji slomu po horizontalnim reškama morta, ali je uslijed prisutnosti vertikalnih serklaža ovaj utjecaj bio umanjen. Rezultati proračuna upućuju na to da je numeričkim modelom moguće opisati nelinearno ponašanje uzoraka te predvidjeti njihov način sloma. Rezultati numeričke studije su pokazali da je otklon otvora uzrokovao 20%-tni pad nosivosti i krutosti u smjeru opterećenja sa strane otvora. Uočen je dakle nesimetričan odgovor ispuna s otklonjenim otvorom bez vertikalnih serklaža. Otvor za vrata smješten u sredini u odnosu na otvor za prozor, također je uzrokovao 20%-tni pad nosivosti i krutosti, ali u oba smjera opterećivanja. Vertikalni serklaži oko malih i srednjih otvora izjednačili su odgovor sustava sa odgovorom okvira s punim ispunom. Kod velikih otvora, razlika u odnosu na okvir s punim ispunom je bila 10%.

Prisustvo otvora utjecalo je na način sloma. Uzorci bez vertikalnih serklaža iskusili su slijed više načina sloma, predodređenih izmjerama otvora (osobito visinom), dok su uzorci sa serklažima imali sličan, ali kontroliran način sloma. Otvor je utjecao na mjesto sloma. Uzorci s otvorima imali su drugačiju raspodjelu kosih pukotina koje predstavljaju stvarne tlačne dijagonale. Kose pukotine su bile dominantne na zidnim stupovima, bile su direktno povezane s načinom sloma i s dodatnim drobljenjem uglova u blizini uglova otvora. Kod uzoraka s vertikalnim serklažima oko otvora, način sloma je bio pod njihovim utjecajem, a ne utjecajem otvora. Otvori su utjecali na smanjenje histerezne energije sustava. Kada su bili prisutni vertikalni serklaži histerezna energija je bila slična onoj okvira s punim ispunom.

Usporedbom načina sloma, oštećenja zidanih ispuna i ponašanja uzoraka kod svih uzoraka utvrđen je posmični slom. Svi uzorci su pokazali doprinos ispuna do relativnog katnog pomaka od 1 %, što je povećanje u odnosu na dosadašnja istraživanja. Također, na okvirima nisu uočene posmične pukotine. Oblikovanje zidnog stupa u ispunu kod uzoraka bez vertikalnih serklaža bilo je začeto klizanjem po reškama morta iznad i ispod otvora. Prisutnošću vertikalnih serklaža, oni su bili konstruktivno predodređeni. Njihovom prisutnošću je također spriječeno ispadanje dijelova ispuna van ravni, pri većim katnim pomacima. U svim slučajevima nisu opaženi štetni utjecaji ispuna na elemente okvira. Bez provedbe eksperimenta ili numeričkih proračuna nije moguće predvidjeti stvarni mehanizam sloma. Također je naglašeno da dosadašnje spoznaje o zamjenskim dijagonalama nisu sasvim prikladne naročito za razmatranje okvira s ispunom s otvorima.

Osobit je naglasak dan utjecaju vertikalnih serklaža oko otvora. Zaključno, vertikalni serklaži oko otvora učinili su način sloma predvidljivijim time što su umanjili utjecaj otvora i povećali stabilnost ispuna u ravni, što omogućava pouzdaniju procjenu načina sloma. Spriječili su mogućnost sloma oslabljene horizontalne reške morta u ravni otvora. Predložen je način poboljšanja pojednostavljenog proračuna armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom s otvorima koji uzima u obzir okvir s ispunom kao jednakovrijedan konstruktivni element. Model se zasniva na principu tlačne dijagonale, a neovisan je o načinu sloma, jer se temelji na istraženim korekcijskim faktorima.



Slika 10.2. Otvor u ispunu s osnovnim izmjerama

### 10.3. Prijedlozi

#### 10.3.1. Prijedlog metodologije promatranja okvira s ispunom s otvorima

Danas dostupni pojednostavljeni modeli za simulaciju ponašanja okvira s ispunom, sa ili bez otvora, uglavnom se temelje na pristupu putem jedne ili više zamjenskih tlačnih dijagonala. Ovi modeli međutim ne mogu jasno predstaviti ponašanje ovih sustava, osobito ako je riječ o složenim načinima sloma. To je najviše izraženo kada su prisutni otvori. Na temelju istraženog utjecaja otvora na seizmički odgovor okvira sa zidanim ispunom, predlaže se sljedeća metodologija promatranja okvira s ispunom s otvorima kao konstruktivnog elementa, a što je u dostupnoj literaturi nepostojeće. **Ova metodologija je neovisna o načinu sloma zidanog ispuna, a zasniva se na primjeni metode zamjenske tlačne dijagonale.** U sklopu prijedloga metodologije, dane su i preporuke za proračun, primjenu i izvedbu vertikalnih serklaža oko otvora koji su se pokazali značajnima u osiguranju duktilnog ponašanja ispuna te da doprinose poboljšanju deformacijskog ponašanja okvira s ispunom s otvorima. Svrha ove metodologije je promatrati jedno-katni i jedno-rasponski okvir sa zidanim ispunom s otvorima, kao konstruktivni element do katnog pomaka okvira od  $IDR=1,0\%$ . Metodologija se temelji na iznalaženju primarne krivulje okvira s punim ispunom, koja se može dobiti putem pojednostavljenog pristupa kao npr. zamjenskom tlačnom dijagonalom. Primarna krivulja se zatim množi korekcijskim faktorima dobivenim prethodnim istraživanjima, kako bi utjecaj otvora uzeo u obzir te se tlačna dijagonala kalibrira. Njena svojstva se tada usvajaju za čitavu konstrukciju. Predložena metodologija se sastoji od sljedećih koraka:

a) Određivanje krutosti okvira s punim ispunom

Prvo se odrede krutosti za pripadne katne pomake jedno-katnog i jedno-rasponskog okvira s punim ispunom, koji ne ovise o načinu sloma već o razini oštećenosti. **Važno je dobiti podatke za neznatno, osrednje, teško i oštećenje pred slom koji su povezani s katnim pomacima.** Ukoliko traženi slučaj nije obuhvaćen prethodnim istraživanjima, to se može postići primjenom pojednostavljenog pristupa uz pomoć metode zamjenske tlačne dijagonale za slučaj punog ispuna. Ukoliko je krutost poznata samo za katni pomak pri pojavi neznatnog oštećenja odnosno pojavi prvih pukotina, vrijednost krutosti pri drugim katnim pomacima moguće je dobiti množenjem s danim faktorima za opadanje krutosti s porastom katnog pomaka. Ovi faktori također predstavljaju faktore za korekciju proračuna putem tlačne dijagonale. U svakom slučaju primjena tlačne dijagonale je nužna zbog proširenja analize na čitavu okvirnu konstrukciju.

b) Utvrđivanje utjecaja otvora

Provjeriti kategoriju otvora u zidanom ispunu, a pod tim se podrazumijeva svrstati ga u male, srednje ili velike otvore. Utvrditi otklon otvora te provjeriti odnos visine otvora spram



visine ispuna. Na osnovu dana tri uvjeta, utvrditi postoji li potreba za izvedbom vertikalnih serklaža. Ukoliko jedan uvjet nije zadovoljen potrebna je izvedba vertikalnih serklaža. Primjenom vertikalnih serklaža za male i srednje otvore, zidani ispun se može promatrati kao puni, do u slučaju velikih otvora treba usvojiti korekcijski faktor.

c) Određivanje nosivosti i krutosti okvira s punim ispunom s otvorima

Na temelju poznatih vrijednosti krutosti za okvir s punim ispunom te uvjeta koji ovise o otvoru, potrebno je primijeniti korekcijske faktore na ove parametre. Time se dobivaju krutosti i nosivosti za pripadne katne pomake za okvir s otvorom u ispunu.

d) Određivanje svojstava tlačne dijagonale

Zidani se ispun zamijeni s dva ukrštena štapa. Štapovi se spoje dijagonalno s nasuprotnim uglovima okvira. Na kraju štapova se postavi zglob i uvjet da ne prenose vlačne sile. Putem poznate krutosti, a time i nosivosti okvira s punim ispunom s otvorima, odredi se ploština tlačne dijagonale ili njena širina ukoliko je debljina jednaka debljini ispuna. Ploština dijagonale je promjenjiva i u ovisnosti je u padu krutosti. Dobivena ovisnost krutosti ili nosivosti tlačne dijagonale u ovisnosti o katnom pomaku i predstavlja zakon ponašanja iste. Primjena dobivenog zakona ponašanja na tlačne dijagonale modela u računalnom programu treba rezultirati jednakom primarnom krivuljom okvira s ispunom s otvorima kao u prethodnom odjeljku.

e) Primjena na model čitave konstrukcije

Nakon što su utvrđena svojstva tlačne dijagonale za jedno-katnu i jedno-rasponsku konstrukciju na temelju korekcijskih faktora iz prethodnih istraživanja, pristupa se modeliranju čitave prostore ili ravninske konstrukcije čiji su zidani ispuni s otvorima ili bez njih zamijenjeni tlačnim dijagonalama. Ovim putem moguće je istražiti sve moguće nepravilnosti na pojedinim etažama i po visini, kako to nalažu suvremene norme.

### 10.3.2. Prijedlog konstruktivnih smjernica za izvedbu vertikalnih serklaža

Kako bi se osiguralo da će usvojena svojstva vrijediti, potrebno je osigurati dovoljnu nosivost vertikalnih serklaža na posmik, zbog sprječavanja horizontalnog sloma zidanog ispuna u ravni iznad i ispod otvora. Primjenom vertikalnih serklaža, osobito pri velikim katnim pomacima, čuva se cjelovitost zidanog ispuna, a pod tim se podrazumijeva sprječavanje ispadanja pojedinih njegovih dijelova. Oni stoga osiguravaju duktilno ponašanje ispuna te doprinose poboljšanju deformacijskog ponašanja okvira s ispunom s otvorima.

Vertikalni serklaž se izvodi čitavom visinom ispuna da osigura preuzimanje vlačnih sila oko otvora. Pri izvedbi vertikalnih serklaža preporuka je armiranje s 4 ili 2 šipke uzdužne armature i vilicama te ih sidriti u grede armirano-betonskog okvira, čime se ostvaruje njihova zglobna veza. To se izvodi na način da se kraći dijelovi šipke usidre u gredu, a zatim se glavne šipke armature povežu s njima. Šipka se proračunava kao trn i prenosi poprečne sile, odnosno sprječava ispadanje ispuna. Dužina sidrenja ovisi o promjeru i sili. U serklaž se šipka sidri min. 15 cm, dok se u gredi izbuši manji otvor npr. 10 mm za šipku od 12 mm te se ona zabija čekićem.

Potrebno je osigurati dobru povezanost sa zidanim ispunom, što se može ostvariti putem vilica poprečne armature sidrenih u reške morta na visini svakih dva zidna elementa. Duljina sidrenja bi trebala biti najmanje  $60\phi$ . Pri izvedbi nadvoja potrebno je osigurati da šipke armature idu za dužinu sidrenja u beton serklaža. U slučaju predgotovljenih nadvoja ne treba donja oplata. Oni trebaju nalijegati u vertikalne serklaže min. 2cm. Donji horizontalni serklaž je nepotreban.

### 10.3.3. Prijedlozi za daljnji rad

Pri provedbi istraživanja, uočena su slabo istražena područja koja traže dodatno istraživanje. Preporuke za daljnje istraživanje su:

- Utjecaj drugih veličina zidnih elemenata, vrsta materijala zidanog ispuna i armirano-betonskog okvira.
- Utjecaj velikih i vrlo velikih otvora u zidanom ispunu.
- Razvoj teorijskog nelinearnog modela ortotropnog materijala kojim bi se mogli izravno mogla uzeti u obzir svojstva šupljih zidnih elemenata koji imaju visoku vertikalnu i nisku horizontalnu čvrstoću.
- Utjecaj drugih vrijednosti uzdužnih tlačnih sila u stupovima.
- Poboljšavanje predložene metodologije za promatranje okvira s ispunom s otvorima kao konstruktivnog elementa uvođenjem dodatnih korekcijskih faktora te primjenom na više-katnim i više-rasponskim konstrukcijama.

## LITERATURA

1. The Izmit Earthquake. Science. Findings of the air post-disaster field investigation team [Internet]. 1999 August 17. [Dostupno: June 21, 2012]. Dostupno na: [http://www.air-worldwide.com/\\_public/NewsData/000136/Izmit\\_part1.pdf](http://www.air-worldwide.com/_public/NewsData/000136/Izmit_part1.pdf)
2. Kaplan H., Bilgin H., Yilmaz S., Binici H., A. Oztas. Structural damages of L'Aquila (Italy) earthquake. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2010 March 16; 10:499–507.
3. Friedman D.A., Kenneth J.E. Wenchuan Earthquake May 12<sup>th</sup>, 2008. EERI/GEER Reconnaissance Team Field Report 8/3/08 to 8/11/08 [Internet]. [Dostupno 21. lipnja 2012]. Dostupno na: [http://www.seabc.ca/documents/technical/EERI\\_Report\\_Wenchuan\\_Earthquake.pdf](http://www.seabc.ca/documents/technical/EERI_Report_Wenchuan_Earthquake.pdf)
4. Preliminary Observations on the Bam, Iran, Earthquake. EERI Special Earthquake Report. [Internet]. 2004 [Dostupno 21. lipnja 2012]. Dostupno na: [http://www.eeri.org/lfe/pdf/iran\\_bam\\_eeri\\_preliminary\\_report.pdf](http://www.eeri.org/lfe/pdf/iran_bam_eeri_preliminary_report.pdf)
5. Polyakov, S.V.. Gosudarstvennoe Izdatelstvo po Stroitelstvu i Arkhitekture. (Translation Masonry in framed buildings into English by G.L.Cairns). 1956.
6. Stafford-Smith, B.S. Behavior of square infilled frames. ASCE. 1966;1(92): 381-403.
7. Stafford-Smith, B., Carter, C. A method of analysis for infilled frames. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. 1969; 44:31-48.
8. Benjamin, J. R., Williams, H. A. The behavior of one-story shear walls. Proceedings of ASCE ST. 4. 1958;1723:1-30.
9. Mallick, D.V., Garg, R.P. Effect of openings on the lateral stiffness of infilled frames. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. 1971; 49:193–209.
10. Liauw, T.C., Lee, S.W. On the behavior and the analysis of multi-story infilled frames subjected to lateral loading. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. 1977; 63: 641-656.
11. Dawe, J. L., Young, T. C. An investigation of factors influencing the behavior of masonry infill in steel frames subjected to in-plane shear. Proceedings of 7<sup>th</sup> International Brick Masonry Conference; 1985; Melbourne, Australia.
12. Mallick, D.V., Severn, RT,. The Behavior of Infilled Frames under Static Loading. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. 1967;38:639-56.
13. Klingner, R.E., Bertero, V.V. Infilled frames in earthquake resistant construction, Earthquake Engineering Research Centre. University of California at Berkeley. 1976. Report No. EERC 76-32.
14. Klingner, R.E., Bertero, V.V. Earthquake resistance of infilled frames. Journal of the Structural Division. Proc. ASCE. 1976;6(104).
15. Asteris P.G. Lateral Stiffness of Brick Masonry Infilled Plane Frames. Journal of structural engineering. 2003; 129(8):1071-1079.
16. Kakaletsis D. J., Karayannis C. G. Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading. Journal of Earthquake Engineering. 2008;12:197–221.

17. Kakaletsis D. J., Karayannis C. G. Experimental Investigation of Infilled Reinforced Concrete Frames with Openings. *ACI structural journal*. 2009;106(2):1-10.
18. Kakaletsis D. J., Karayannis C. G. Experimental investigation of infilled r/c frames with eccentric openings. *Structural Engineering and Mechanics*. 2007;26(3).
19. FEMA 306 (1998). "Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings: basic procedures manual." Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
20. FEMA 356 (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, prepared by the American Society of Civil Engineers, Reston, VI.
21. FEMA P440A (2008). *Effects of Strength and Stiffness Degradation on Seismic Response*, prepared by Applied Technology Council, Redwood City, CA.
22. FEMA P695 (2009). *NEHRP Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Federal Emergency Agency, Washington, DC.
23. EN 1992-1-1:2004. *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium; 2004.
24. EN 1996-1-1:2005. *Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*. Brussels, Belgium; 2005.
25. EN 1998-1:2004. *Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels, Belgium; 2004.
26. ATENA - nonlinear analysis software [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: <http://www.cervenka.cz/products>
27. Neufert E. *Elementi arhitektonskog projektiranja*. Golden marketing;2002.
28. HRN EN 12390-3:2009. *Ispitivanje očvrtnuloga betona -- 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka (EN 12390-3:2009)*. Hrvatski zavod za norme. 2009.
29. HRN EN 12504-1:2009. *Ispitivanje betona u konstrukcijama -- 1. dio: Izvađeni ispitni uzorci -- Uzimanje, pregled i ispitivanje tlačne čvrstoće (EN 12504-1:2009)*. Hrvatski zavod za norme. 2009.
30. Tomičić I. *Betonske konstrukcije*. DHGK, Zagreb, 1996.
31. HRN EN 771-1:2005. *Specifikacije za zidne elemente -- 1. dio: Opečni zidni elementi (EN 771-1:2003+A1:2005)*. Hrvatski zavod za norme. 2009.
32. HRN EN 772-16/A1:2006. *Metode ispitivanja zidnih elemenata -- 16. dio: Određivanje izmjera (EN 772-16:2000/A1:2004)*. Hrvatski zavod za norme. 2006.
33. HRN EN 772-3:2003. *Metode ispitivanja zidnih elemenata -- 3. dio: Određivanje neto obujma i postotka šupljina opečnih zidnih elemenata (EN 772-3:1998)*. Hrvatski zavod za norme. 2003.
34. HRN EN 772-13:2004. *Metode ispitivanja zidnih elemenata -- 13. dio: Određivanje neto i bruto obujamske mase suhih zidnih elemenata (osim zidnih elemenata od prirodnog kamena) (EN 772-13:2000)*. Hrvatski zavod za norme. 2004.
35. HRN EN 772-1:2003. *Metode ispitivanja zidnih elemenata -- 1. dio: Određivanje tlačne čvrstoće (EN 772-1:2000)*. Hrvatski zavod za norme. 2003.

36. HRN EN 1015-3:2000/A1:2005. Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje) (EN 1015-3:1999/A1:2004). Hrvatski zavod za norme. 2005.
37. HRN EN 1015-6:2000. Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 6. dio: Određivanje gustoće svježeg morta (EN 1015-6:1998). Hrvatski zavod za norme. 2000.
38. HRN EN 1015-7:2000. Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 7. dio: Određivanje udjela pora u svježemu mortu (EN 1015-7:1998). Hrvatski zavod za norme. 2000.
39. HRN EN 1015-10:2000/A1:2008. Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 10. dio: Određivanje gustoće suhog očvrstnalog morta (EN 1015-10:1999/A1:2006). Hrvatski zavod za norme. 2008.
40. HRN EN 1015-11:2000/A1:2008. Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrstnalog morta (EN 1015-11:1999/A1:2006). Hrvatski zavod za norme. 2008.
41. HRN EN 1052-1:2004. Metode ispitivanja ziđa – 1. dio: Određivanje tlačne čvrstoće (EN 1052-1:1998). Hrvatski zavod za norme. 2004.
42. HRN EN 1052-3:2004. Metode ispitivanja ziđa – 3. dio: Određivanje početne posmične čvrstoće (prEN 1052-3:2001). Hrvatski zavod za norme. 2004.
43. Sorić, Z. Zidane konstrukcije I. 2.izd. vlast. nakl. Zagreb; 2004.
44. Kranzler T. Tragfähigkeit überwiegend horizontal beanspruchter Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk [disertacija]. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Massivbau; 2008.
45. PLANITOP [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: <http://www.mapei.com>
46. TC Load cell for tension/compression applications. [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: <http://www.gefran.com>
47. DCTH Series DC to DC LVDT Displacement Transducer. [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: <http://www.rdpe.com/uk/dcth.htm>
48. Lourenço P.B. Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry. Structural analysis of historical constructions II. CIMNE. Barcelona; 1998.
49. Metalni materijali -- Vlačno ispitivanje -- 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi (EN 10002-1:2001). Hrvatski zavod za norme. 2004.
50. Červenka V, Jendele L, Červenka V. ATENA Program Documentation – Part 1. Prag;2011.
51. Kupfer H., Hilsdorf H.K. and Rüsck H. Behavior of Concrete under Biaxial Stresses. ACI Journal. 1969;66(66-62):656-666.
52. Hordijk D. A. Local approach to fatigue of concrete [PhD thesis]. Delft University of Technology; 1991.
53. Van Mier J. G. M. Multiaxial strain-softening of concrete. Part I: Fracture. Mater. Struct. 1986;19:179–190.

54. Sigmund V., Guljaš I., Matošević Đ. "CAMUS 3" International Benchmark: After test comparison of numerical and experimental results. ICONS - European program seismic tests on r/c bearing walls-Camus III specimen. Saclay; Paris : CEA, Commissariat a L'Energie Atomique; 2001.;215-230.
55. Sigmund V., Guljaš I., Matošević Đ. "CAMUS 3" International Benchmark : Report on numerical modeling. CAMUS 3 International Benchmark. Saclay, Paris : CEA, Commissariat a L'Energie Atomique; 2000. 200-214.
56. Sigmund V. A SDOF Model to Analyze Earthquake Response of a Common R/C Structure. Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Volume 21. Tsukuba, Japan : International Institute of Seismology and Earthquake Engineering;1985.;195-217.
57. Penava D., Radić I., Gazić G., Sigmund V. Mechanical Properties of Masonry as Required for the Seismic Resistance Verification. // Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku. 18 (2011) , 2; 273-280.
58. Markulak D., Sigmund V., Radić I. Modeliranje čeličnih okvira sa zidanim ispunom. Građevinar. 60 (2008) , 4; 317-326.
59. Sigmund V. Guljaš I., Brana P., Zovkić J. Numerical modeling of the rc wall seismic response. Tehnički vjesnik, Znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku. 9 (2002), 1-2; 3-13.
60. Sigmund V., Guljaš I., Stanić A. Nelinearni odgovor konstrukcija dimenzioniranih prema HRP i EC8. Građevinar. 54 (2002) , 1; 1-14.
61. Sigmund V., Bošnjak-Klečina, M., Guljaš, I., Stanić, A. Usporedba primjene hrvatskih propisa i Eurokoda 8. Građevinar. 52 (2000) , 7; 379-389.
62. Sigmund V. Procjena pomaka armirano/betonskih konstrukcija tijekom potresa. Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku. 5 (1998) , 1-2; 23-29.
63. Sigmund V., Zlatović S. Nedavni veliki potresi i njihov značaj. Građevinar. 52 (2000) , 11; 695-703 (članak, stručni).
64. Kalman-Šipoš. T., Sigmund, V. Earthquake performance of infilled frames using neural networks and experimental database. Engineering Structures. (2011).
65. Penava D., Sigmund V. Influence of openings with and without confinement on cyclic response of infilled r/c frames. Journal of earthquake engineering. (2011).
66. Guljaš I., Sigmund, Vladimir; Netinger, Ivanka. A Critical Evaluation of the Existing Performance Based Design Methods // Proceedings of the Slovenia-Japan Workshops on PBSM Methodologies / Fajfar, P. ; Otani, S. (ur.). Ljubljana : FGG, Univeristy of Ljubljana ; Department of Architecture, University of Ljubljana, 2002-2003. 145-154
67. Grubišić M., Sigmund V. Seismic Vulnerability of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames 7th ICCSM. International Congress of Croatian Society of Mechanics. Zagreb, Croatia: CROATIAN SOCIETY OF MECHANICS, Studio HRG, Zagreb, Croatia, 2012.



68. Kalman T., Sigmund V., Žarnić R. Evaluation of masonry panel models for nonlinear analysis of infilled r/c frames. Fourteenth european conference on earthquake engineering. Ohrid, Makedonija : MAEE, Macedonian Association for Earthquake Engineering, 2010. 309-1-309-8
69. Penava D., Butenweg C., Sigmund V. Osvrt na nelinearnu analizu horizontalno opterećenog okvira s ispunom primjenom metode konačnih elemenata. Zbornik radova Trećeg susreta Hrvatskog društva za mehaniku. Osijek : Hrvatsko društvo za mehaniku, 2010. 53-58
70. Sigmund V., Matošević Đ., Bošnjak-Klečina M. Experimental tests of confined masonry walls. Fourteenth european conference on earthquake engineering. Ohrid, Makedonija: MAEE, Macedonian Association for Earthquake Engineering, 2010. 346-1-346-8
71. Sigmund V., Zovkić J., Matošević Đ. Eksperimentalno ispitivanje omeđenog zida i a-b okvira sa zidanom ispunom. GNP 2010-Građevinarstvo-nauka i praksa, Zbornik radova, Knjiga 1. Podgorica, Crna Gora : Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, 2010. 153-158
72. Sigmund V., Zovkić J., Sigmund Z. Experimental tests of r/c frames with masonry infill. Fourteenth european conference on earthquake engineering. Ohrid, Makedonija : MAEE, Macedonia Association for Earthquake Engineering, 2010. 338-1-338-7.
73. Sigmund Z., Mlinaric, V., Sigmund, V. Retrofit technologies for r/c and masonry structures. TECHSTA 2010. Prag : Česke vysoké učení technické v Praze, 2010. 20-20.
74. Kalman, T., Sigmund, V., Seismic capacity of infilled frames using neural networks // 6th ICCSM. Zagreb : Croatian Society of Mechanics, 2009. 1-7.
75. Matošević, Đ., Sigmund, V., Zovkić, J. Experimental Testing of Masonry and Masonry Piers. 6th ICCSM. Zagreb : Croatian Society of Mechanics, 2009. 1-8.
76. Kalman, T., Sigmund, V. Prediction of behavior of the infilled r/c frames under lateral loads. Modeling of Structures. Mostar, BH : University of Mostar, 2008. 237-250.
77. Sigmund, Z., Sigmund, V. A possibility of simple modeling of frame with infill. Modeling of Structures. Mostar : University of Mostar, 2008. 639-651.
78. Sigmund, V., Kalman, T., Guljaš, I. Nonlinear Wall Models : a Practical Engineer Standpoint. Proceedings on CD-ROM of the 8th National Conference on Earthquake Engineering. San Francisco : EERI, 2006.
79. Gazić, G., Kalman, T., Sigmund, V. Određivanje ponašanja i granične nosivosti okvira s ispunom. Zbornik radova Četvrtog susreta hrvatskog društva za mehaniku. Slavonski Brod: Hrvatsko društvo za mehaniku, 2011. 149-154.
80. Penava, D., Sigmund, V. Nelinearna analiza horizontalno opterećenog armirano-betonskog okvira s ispunom, primjenom metode konačnih elemenata. Građevinski fakultet Osijek; 2010.
81. Kranzler T. Tragfähigkeit überwiegend horizontal beanspruchter Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk [disertacija]. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Massivbau; 2008.
82. Stavridis A. Analytical and Experimental Study of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames Infilled with Masonry Walls [disertacija]. University of California, San Diego; 2009.

83. Koutromanos I. Numerical Analysis of Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames Subjected to Seismic Loads and Experimental Evaluation of Retrofit Techniques. University of California, San Diego; 2011.
84. Forschungsbericht T2233. Untersuchungen zum Tragverhalten Ausgefachter Stahlbetonrahmen mit Mauerwerk. Technische Hochschule Darmstadt. IRB Verlag; 1990.
85. Forschungsbericht T2477. Untersuchungen zum Tragverhalten Ausgefachter Stahlbetonrahmen mit Mauerwerk unter Zyklischer Belastung. Technische Hochschule Darmstadt. IRB Verlag; 1992.
86. Seim W., Schweizerhof K., Nichtlineare FE-Analyse Eben Beanspruchter Mauerwerk - Scheiben mit Einfachen Werkstoff-Gesetzen. Beton- und Stahlbetonbau. 1997; 92(9): 239-244.
87. Rob van der Pluijm. Non-linear behaviour of masonry under tension. HERON. 1997;42(1):25-54.
88. Mohebkhah A., Tasnimi A.A., Moghadam H.A. A modified three-strut (MTS) model for masonry-infilled steel frames with openings. JSEE. 2007;9(1&2).
89. Smyrou E. i suradnici. Implementation and verification of a masonry panel model for nonlinear pseudo-dynamic analysis of infilled RC frames. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology; Geneva, Switzerland; 3-8 September 2006; Paper Number: 355.
90. Akin L.A. Behaviour of reinforced concrete frames with masonry infills in seismic regions [disertacija]. Purdue University. West Lafayette, Indiana; 2006.4
91. ATENA - nonlinear analysis software [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: <http://www.cervenka.cz/products>
92. Bauhaus – Universität Weimar. Eartquake Damage Analysis Center [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: [http://www.edac.biz/lehre/projekt\\_orange.html](http://www.edac.biz/lehre/projekt_orange.html)
93. H.G. Harris., G.M. Sabnis, Structural Modeling and Experimental Techniques. Second Edition. CRC Press LLC. 1999. United States of America.
94. WayCon - Positionmesstechnik [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: [http://www.waycon.de/fileadmin/pdf/Inductive\\_Transducer\\_SM.pdf](http://www.waycon.de/fileadmin/pdf/Inductive_Transducer_SM.pdf)
95. DEWETRON – worldwide [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: <http://www.dewetron.nl/book/index.htm>
96. DEWESoft 6.6.7. [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: <http://www.dewesoft.com/download>
97. Yale Hydraulics Tools And Equipment [Internet]. 2012 [dostupno 30. svibnja 2012]. Dostupno sa: [http://www.yale.co.za/p\\_toolsequip.htm](http://www.yale.co.za/p_toolsequip.htm)
98. Žarnić R. Neelastični odziv armiranobetonskih okvirov z zidanimi polnili na potresno obtežbo [disertacija]. Ljubljana: Univerza v Ljubljani. Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo; 1992.
99. Zovkić, J., Sigmund, V., Guljaš, I. An effect of the masonry strength on behavior of infilled-frames - an experimental study. Earthquake engineering & structural dynamics. 2011. [poslan]

100. Magenes G., Morandi P., Penna A. Experimental In-Plane Cyclic Response of Masonry Walls with Clay Units. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008, Beijing, China
101. Zarnic, R., Tomazevic M. Study on the behavior of masonry infilled reinforced concrete frames subjected to seismic loading. Proceedings of the seventh International Brick Masonry Conference. 1985, Melbourne, Australia. Vol. 2, pp. 13315-1325.
102. Syrmakezis, C.A., Vratsanou, V.Y., Influence of infill walls to R.C frames response. Proceedings of the eighth European conference on Earthquake Engineering. 1986, Lisbon, Portugal. Vol 3, pp. 6.5/47-53.
103. Al-Chaar, G. Evaluating Strength and Stiffness of Unreinforced Masonry Infill Structures. 2002. Report No. ERDC/CERL TR-02-1, US Army Corps of Engineers.
104. Crisafulli, F.J. Seismic behavior of reinforced concrete structures with masonry infills. Doctoral Dissertation. 1997, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
105. Crisafulli, F.J., A.J. Carr. Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2007, 40 (2), 69-77.