

Primljen / Received: 22.10.2014.

Ispravljen / Corrected: 26.3.2015.

Prihvaćen / Accepted: 15.4.2015.

Dostupno online / Available online: 10.9.2015.

# Utjecaj otvora na krutost ispunjenih okvira

## Autor:



Doc.dr.sc. **Fatih Cetisli**, dipl.ing. građ.  
Sveučilište Pamukkale, Turska  
Građevinski fakultet  
[f.cetisli@gmail.com](mailto:f.cetisli@gmail.com)

Stručni rad

## **Fatih Cetisli**

### Utjecaj otvora na krutost ispunjenih okvira

Poznata je činjenica da se krutost i nosivost okvira povećava ugradnjom zidanih ispuna bez otvora. U ovom se radu analizira ponašanje djelomično ispunjenih armiranobetonskih okvira, pri čemu se u obzir uzimaju dimenzije i lokacije otvora. Provedena je numerička parametarska analiza ispunjenih armiranobetonskih okvira, s naglaskom na dimenzije zida te na dimenzije i lokacije otvora. Za procjenu reducirane krutosti ekvivalentne tlačne dijagonale u radu je dan odgovarajući analitički izraz.

#### **Ključne riječi:**

zidana ispuna, armiranobetonski okvir, procjena reducirane krutosti, koeficijent otvora, lokacija otvora

Professional paper

## **Fatih Cetisli**

### Effect of openings on infilled frame stiffness

It is widely known that the stiffness and strength of frames increases by incorporation of masonry infill panels without openings. The behaviour of partly infilled reinforced-concrete frames is analysed, taking into account dimensions and locations of openings. A numerical parametric study of infilled reinforced-concrete frames is conducted, with an emphasis on wall dimensions, and dimensions and locations of openings. An appropriate analytical expression is presented for estimating the reduced stiffness of an equivalent diagonal compression strut.

#### **Key words:**

masonry infill wall, reinforced concrete frame, evaluation of stiffness reduction, opening ratio, opening location

Fachbericht

## **Fatih Cetisli**

### Einfluss von Öffnungen auf die Steifigkeit ausgefachter Rahmen

Es ist bekannt, dass Mauerwerksausfachungen ohne Öffnungen Steifigkeit und Tragfähigkeit von Stahlbetonrahmen erhöhen. In dieser Arbeit wird das Verhalten von teilweise ausgefachten Rahmen analysiert, wobei Dimensionen und Position der Öffnung betrachtet werden. Parametrische numerische Analysen ausgefachter Stahlbetonrahmen wurden durchgeführt, mit dem Schwerpunkt auf Mauerwerksdimensionen, sowie Dimensionen und Position der Öffnung. Eine analytische Formel zur Bewertung der reduzierten Steifigkeit des diagonalen Ersatzstabes ist dargestellt.

#### **Schlüsselwörter:**

Mauerwerksausfachung, Stahlbetonrahmen, Einschätzungen reduzierter Steifigkeit, Öffnungskoeffizient, Position der Öffnung

## 1. Uvod

Jasno je da zanemarivanje zidane ispune nije odluka koja bi pridonijela sigurnosti projektirajući seizmički otporne građevine. Razni su istraživači pokazali da se krutost okvira značajno povećava ako se oni u potpunosti ispune zidanim materijalom. Zidana ispunjena ponašanje okvira pri djelovanju horizontalnog opterećenja i prilikom numeričkog modeliranja uobičajeno se idealizira kao ekvivalentna tlačna dijagonala. Pri projektiranju konstrukcija načinjenih od okvira sa zidanom ispunom, problemi prilikom modeliranja nastaju zbog brojnih, još uvijek neshvaćenih mehanizama uzrokovanih interakcijom okvira i ispune, kao što su razni oblici sloma zidane ispune i okvira, veliki broj utjecajnih parametara, kompozitno ponašanje ispunjenog okvira itd. Brojna analitička [1-10] i eksperimentalna [11-21] istraživanja provedena su u svrhu predlaganja racionalnog postupka projektiranja konstrukcija načinjenih od okvira sa zidanom ispunom.

Iz tih su istraživanja proizišli modeli jednostrukih ili višestrukih ekvivalentnih tlačnih dijagonala koji su definirani u propisima za projektiranje [22-25] da bi se u obzir uzeo utjecaj zidane ispune na horizontalnu nosivost armiranobetonskih okvira. Iako se brojni parametri mogu primijeniti za određivanje ponašanja armiranobetonskog okvira sa zidanom ispunom pod utjecajem horizontalnog opterećenja, parametrima od ključnog značenja smatraju se zastupljenost i lokacija otvora, karakteristike materijala zidane ispune i okvira te dimenzije zidane ispune i okvira.

U ovom radu prikazano je parametarsko ispitivanje da bi se pažnja znanstvene zajednice usmjerila na pitanja koja nisu obrađena u postojećoj literaturi. Krutost zidane ispune bez otvora već je definirana u nekoliko propisa kojima se regulira područje projektiranja [22-25]. Stoga su rezultati ovog ispitivanja pojednostavljeni, tj. svedeni na izračun faktora reducirane krutosti ( $\lambda$ ), tako da se mogu koristiti u skladu s propisima za projektiranje. U literaturi se faktor reducirane krutosti ( $\lambda$ ) definira kao odnos između horizontalne krutosti zidane ispune s otvorom i horizontalne krutosti zidane ispune bez otvora. U ovom se radu izraz "otvor" koristi za definiranje šupljih prostora (prozora, vrata, ventilacijskih otvora itd.) u zidanoj ispuni. Stoga se za definiranje odnosa između šupljih prostora i pune zidane ispune primjenjuje koeficijent otvora ( $\alpha$ ). Kao rezultat ovog numeričkog parametarskog ispitivanja, predlaže se nova empirijska formula za procjenu redukcije krutosti armiranobetonskog okvira sa zidanom ispunom zbog prisutnosti otvora, pri čemu se u obzir uzimaju dimenzije okvira (omjer L/h) te lokacija i koeficijent otvora ( $\alpha$ ).

## 2. Postojeća istraživanja

Kao što je navedeno u uvodu, razni istraživači proveli su analitička, numerička i eksperimentalna istraživanja da bi tako na što bolji način razjasnili ponašanje armiranobetonskih okvira sa zidanom ispunom pod utjecajem horizontalnog opterećenja.

Utjecaj zidane ispune na nosivost armiranobetonskog okvira pri djelovanju horizontalnog opterećenja pojednostavljen je svođenjem na krutost jedne ili više ekvivalentnih tlačnih dijagonala. Detaljan pregled takvih istraživanja daju Moghaddam i Dowling [26] te Asteris i dr. [27]. Objašnjenje nekih od značajnih parametara usmjerilo je istraživače prema detaljnoj analizi ponašanja.

Mondal i Jain [28] analiziraju horizontalnu krutost okvira sa zidanom ispunom i središnjim otvorima. Parametarsko ispitivanje jednokatnog okvira s jednim rasponom obavljeno je pomoću metode MKE. Da bi se utvrdila metodologija za korištenje MKE u modeliranju okvira sa zidanom ispunom, analiziran je utjecaj savojne krutosti s pukotinama ili bez njih, odvajanja na kontaktu između okvira i ispune, te fleksibilnosti krajnjih prijepusta (eng. *end-offsets*). Predložen je linearni odnos za određivanje utjecaja koeficijenta otvora ( $\alpha$ ) na faktor redukcije krutosti ( $\lambda$ ):

$$\lambda = 1 - 2,47 \cdot \alpha \quad (1)$$

Jedan od dosadašnjih radova o utjecaju otvora u zidanoj ispuni na horizontalno opterećenje napisali su Syrmakezis i Asteris [29]. Oni su istraživali utjecaj lokacije i koeficijenta otvora kroz linearno elastičnu analizu jednokatnog okvira s jednim rasponom. Horizontalno su opterećenje nanijeli u jednom smjeru, a pritom su zanemarili utjecaj seizmičkih oscilacija. Prema rezultatima Syrmakezisa i Asterisa [29] zidana ispunjena je otpornija na horizontalno opterećenje ako otvor nije smješten na dijagonali ili u uglovima okvira (blizu čvora grede i stupa).

Asteris i dr. [30] predložili su jednostavnu (polinomnu) formulu koja se može definirati kao "faktor redukcije krutosti" temeljenu na numeričkoj analizi (MKE), jednadžba (2). Ocjena faktora redukcije krutosti ( $\lambda$ ) dana je na osnovi varijacije koeficijenta otvora ( $\alpha$ ) u armiranobetonskom okviru s centralno smještenim otvorom. Slično kao i Asteris i dr. [30], i Nwofor [31] proučava odnos između faktora redukcije krutosti ( $\lambda$ ) i koeficijenta otvora ( $\alpha$ ) za centralno smještene otvore u zidanoj ispuni armiranobetonskog okvira. Faktor redukcije krutosti definiran je u eksponencijalnom obliku i prikazan jednadžbom (3). Utjecaj lokacije otvora na faktor redukcije krutosti proučavao je i Nwofor [31] i to za tri slučaja: otvor smješten ispod tlačne dijagonale, na toj dijagonali i iznad nje. Rathi i Pajgade [32] također su analizirali utjecaj koeficijenta i lokacije otvora u armiranobetonskom okviru sa zidanom ispunom. Kao i kod prethodnih istraživanja, Rathi i Pajgade [32] definirali su tri slučaja lokacije otvora u zidanoj ispuni, ali nisu uzeli u obzir oscilacijsko djelovanje potresa. I Nwofor [31] i Rathi i Pajgade [32] analizirali su horizontalno opterećenje nanoseno u jednom smjeru, pa su stoga zanemarili formiranje tlačne dijagonale u slučaju pomaka u suprotnom smjeru.

$$\lambda = 1 - 2 \cdot \alpha^{0,54} + \alpha^{1,14} \quad (2)$$

$$\lambda = 0,95 \cdot e^{0,03 \cdot \alpha} \quad (3)$$

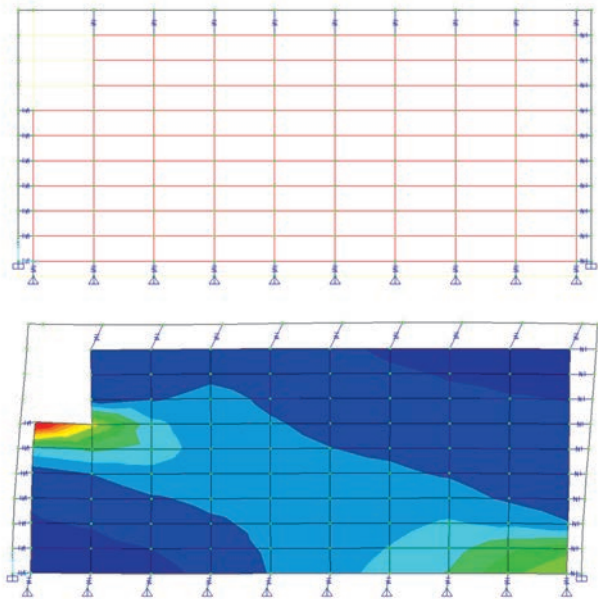
Kao što je već spomenuto, utjecaj koeficijenta otvora i lokacije otvora u armiranobetonskim okvirima sa zidanom ispunom na horizontalnu nosivost okvira razmatralo je nekoliko znanstvenika (kao što su primjerice Nwofor [31] i Rathi i Pajgade [32]). Međutim, u tim se istraživanjima prilikom definiranja lokacije otvora nije u obzir uzimalo oscilacijsko djelovanje potresa. Ti su autori razmatrali nanošenje horizontalnog opterećenja u jednom smjeru pa su tako zanemarili formiranje tlačne dijagonale kada do pomaka dolazi u suprotnom smjeru. Osim toga, nije se razmatrao ni utjecaj dimenzija okvira na faktor redukcije krutosti. Ta neobrađena pitanja prikladno se razmatraju u ovom radu.

### 3. Analiza utjecaja lokacije otvora

Utjecaj lokacije otvora i dimenzija zidane ispune na faktor redukcije krutosti analiziran je pomoću metode konačnih elemenata (MKE). Nelinearna analiza obavljena je na ravninskom jednokatnom jednorasponskom armiranobetonskom okviru sa zidanom ispunom (s otvorom ili bez otvora) primjenom računalnog programa SAP2000 [33], i to u skladu s odredbama sadržanima u propisima FEMA 356 [34]. Na osnovi analize rezultata predložena je jednostavna empirijska formula za procjenu faktora redukcije krutosti u slučajevima kada u ispuni postoji otvor. Analiziran je utjecaj dimenzija ispune ( $L/h$  – odnos duljine i visine ispune uz konstantnu visinu), lokacije otvora te koeficijenta otvora.

#### 3.1. Izrada modela

Ekvivalentna tlačna dijagonala, povezana s efektom udara armiranobetonskog okvira o zidanu ispunu, simulirana je metodom MKE kako bi se ispitala krutost zidane ispune s otvorom. U analizama je korišten ravninski (X-Z) jednokatni jednorasponski armiranobetonski okvir konstantne visine od 275 cm. Duljine raspona okvira (od težišta stupova) varirane su i iznosile su 210, 330, 390, 450, 570 i 750 cm (slika 1.).



Slika 1. Izgled modela bez deformacija (gore) i s deformacijama (dolje), slučaj 411

Okvir se sastojao od dva kvadratna stupa dimenzija 30 x 30 cm i od pravokutne grede dimenzija 25 x 50 cm. Elementi okvira definirani su kao gredni elementi. Iako je krutost praznog okvira oduzeta od ukupne krutosti ispunjenog okvira da bi se odredila krutost zidane ispune, trebalo je uzeti u obzir zahtjev za minimalnim dimenzijama poprečnih presjeka elemenata okvira. Stoga su za vertikalne elemente odabrani kvadratni stupovi dimenzija 30 x 30 cm. Za gredu je primijenjen i zahtjev u pogledu minimalne širine. Usvajena je visina u iznosu od 50 cm, što je prema [35, 36] uobičajena vrijednost koja se koristi u praksi. Kako je presjek grede obično konstantan, te kako se u analizama uzimala u obzir samo krutost zidane ispune (neubrojivši krutost praznog okvira), u matrici analize korišteni su isti presjeci i za stupove i za grede. U obzir su uzete i dvije skupine detalja armiranja elemenata okvira da bi se ispitao njihov utjecaj na faktor redukcije

Tablica 1. Karakteristike materijala

Karakteristike [MPa]	Beton	Zidana ispunna	Armatura Gr60
Modul elastičnosti	25000	1500	200000
Tlačna čvrstoća	30	5	620
Vlačna čvrstoća	3,4	0,0	620
Poissonov koeficijent	0,2	0,2	0.00
Čvrstoća na granici popuštanja	---	---	420
Očekivana čvrstoća na granici popuštanja	---	---	455
Očekivana vlačna čvrstoća	---	---	680

krutosti. U prvoj skupini (armaturna skupina 1) upotrijebljeno je ukupno osam uzdužnih šipki promjera  $\phi 20$  mm ravnomjerno raspoređenih po svim stranicama poprečnog presjeka stupa. Greda je armirana pomoću pet uzdužnih šipki  $\phi 20$  mm raspoređenih na gornjoj i donjoj strani poprečnog presjeka. Stupovi i greda armirani su poprečnom armaturom promjera  $f6$  mm položenom na razmacima od 15 cm po čitavoj duljini elemenata. Kod druge skupine (armaturna skupina 2) stupovi okvira su armirani s ukupno osam uzdužnih šipki promjera  $\phi 28$  mm, ravnomjerno raspoređenih po svim stranicama poprečnog presjeka. Za poprečnu armaturu upotrijebljene su šipke promjera  $\phi 12$  mm, postavljene na razmacima od 15 mm po čitavoj dužini elemenata.

Za materijal armiranobetonskog okvira korišten je beton tlačne čvrstoće 30 MPa i čelična armatura Gr60 (tablica 1.). Jednoosni model tlačne (-) i vlačne (+) čvrstoće betona, razvijen pomoću programa SAP200 i primijenjen u analizi, prikazan je na slici 2. Deformacijske vrijednosti prikazane na slici 2. reda su veličine  $10^{-3}$  mm/mm. Jednoosni model tlačne (-) i vlačne (+) čvrstoće armature, razvijen pomoću programa SAP200 i primijenjen u analizi, također je prikazan na slici 2.

Dimenzije zidnih elemenata mogu u praksi bitno varirati, i to ovisno o vrsti materijala, tehničkim uvjetima zadanim na razini države te specifikacijama proizvođača. Osim toga, profil i dimenzije mreže uvijek su se u metodi konačnih elemenata smatrale relevantnim parametrima. Dimenzije mreže odabrane su tako da predstavljaju vrstu lakih zidnih elemenata koji se u Turskoj često koriste za izvođenje vanjskih zidova. Stoga je profil mreže definiran ravninskim elementima dimenzija  $60 \times 25$  cm, debljine 20 cm, da bi se dobile dimenzije odabranih zidnih elemenata u naravnoj veličini ( $60 \times 25 \times 20$  cm). Omjeri duljine i visine zidane ispune (L/h) bili su 0.80, 1.33, 1.60, 1.87, 2.40 i 3.20. Na okviru su definirani posebni čvorovi nasuprotno svakom čvoru ravninskog elementa zidane ispune. Karakteristike materijala korištenog za zidanu ispunu prikazane su u tablici 1. i na slici 2. S obzirom na to što je pretpostavljeno da zidana ispunna ne preuzima vlačna naprezanja, materijal je modeliran kao elastično kruti materijal. U analizi nije u obzir uzeta pojava pukotina u betonu ili zidanoj ispuni, a samim time niti otvaranje i zatvaranje pukotina.

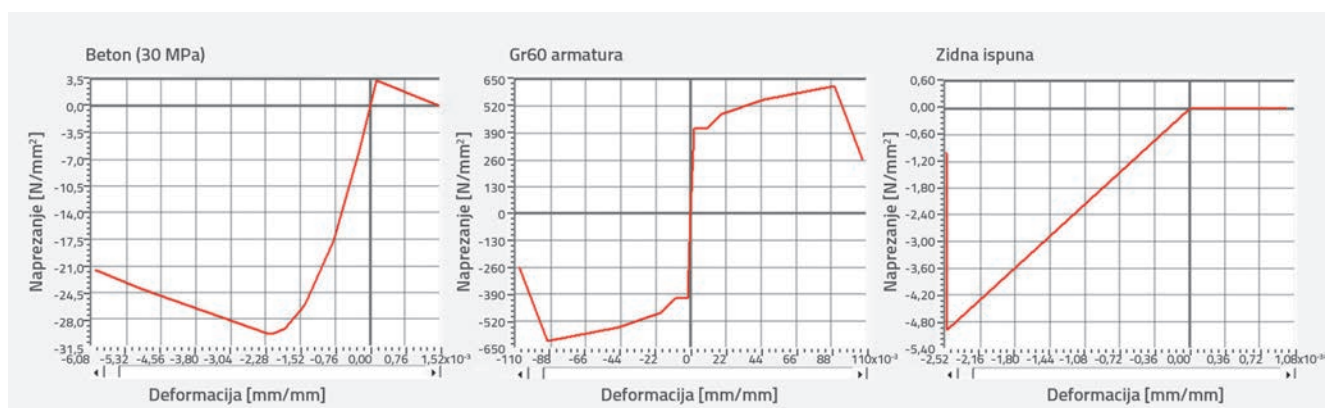
Odvajanje na kontaktu između armiranobetonskog okvira i zidane ispune modelirano je pomoću kontaktnih (eng. *gap*) elemenata.

### 3.2. Parametri analize

Interakcija između armiranobetonskog okvira i zidane ispune definirana je pomoću dvočvornih veznih (eng. *link*) elemenata. Dvočvorni vezni elementi definirani su kao kontaktni elementi s nultim zazorom i krutošću od  $\times 10^8$  N/mm<sup>2</sup>, što dopušta odvajanje armiranobetonskog okvira od zidane ispune kada se na njihovom kontaktu javljaju vlačne sile [33, 37]. Prema Analitičkom priručniku SAP2000 [33], upotreba kontaktnih elemenata izražene krutosti preporučuje se kada se modelira efekt udara (pri čemu je tlak (-) jedini slučaj). Osim toga, efektivna krutost kontaktnih elemenata trebala bi se definirati s vrijednošću jednakoj nuli, a za dani stupanj slobode treba definirati nelinearnu krutost. Stoga su jednoosni (u ovom je ispitivanju riječ o uzdužnom smjeru veznog elementa) izrazito kruti kontaktni elementi s nultim zazorom definirani između čvorova ravninskih elemenata zidane ispune i težišne osi elemenata okvira. Pretpostavljeno je da pri efektu udara ne dolazi do poprečnih deformacija elemenata okvira.

Kako se armiranobetonski okviri najčešće izvode s armiranobetonskom pločom, čvorovi okvira su povezani krutom dijafragmom. Oslonac stupova je simuliran pomoću upete veze. Pomaci na osi Y i rotacija oko osi X i Z nisu bili dopušteni da bi se omogućila ravninska analiza armiranobetonskog okvira. Definiranjem krute dijafrage spriječeno je skraćanje u uzdužnom pravcu grede, te je horizontalna krutost okvira povezana samo s horizontalnom krutošću stupova i zidane ispune (ako postoji). Tako je omogućeno simuliranje udara jednog stupa u zidanu ispunu, te odvajanje nasuprotnog stupa od zidane ispune.

Za potrebe nelinearne analize armiranobetonskog okvira sa zidanom ispunom, definiran je slučaj nelinearnog statičkog opterećenja s kontrolom pomaka (metoda postupnog guranja). Čvorovi okvira opterećeni su pomakom do 6,0 cm da bi se razmotrio razvoj plastičnih zglobova na elementima, te odredila primarna krivulja o ponašanju okvira. Šestocentimetarski



Slika 2. Radni dijagrami primjenjenih materijala

pomak čvora odabran je kao ciljani pomak da bi se moglo razmotriti sveukupno nelinearno ponašanje konstrukcije. Tako je promatrano formiranje plastičnih zglobova na elementima okvira, kapacitet grede i stupova pri graničnom stanju zanemarivog oštećenja (eng. *immediate occupancy*), te slom sustava za svaki analizirani slučaj. Maksimalni pomak čvora okvira bio je drugačiji u svakom analiziranom slučaju. Plastični zglobovi automatski su generirani u skladu s odredbama iz propisa FEMA 356 (P-M2-M3 za stupove i M3 za gredu) [34].

### 3.3. Matrica analize

S obzirom na to što su razna eksperimentalna i numerička ispitivanja pokazala da se zidana ispuna u okviru ponaša

kao tlačna dijagonala, ravnina zidane ispune podijeljena je na devet polja (slika 3.) kako bi se istražio utjecaj lokacije otvora na horizontalnu nosivost zidane ispune.

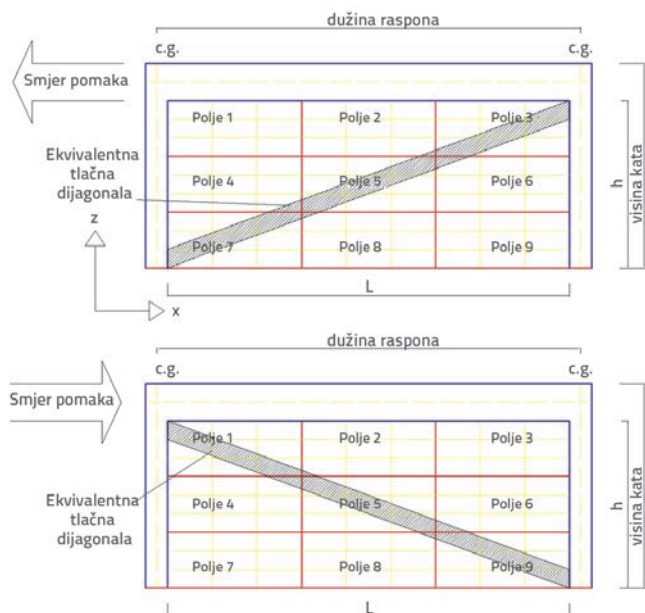
Kako potresno opterećenje ima promjenjivi smjer djelovanja na konstrukciju, formiranje tlačne dijagonale mijenja se u skladu s promjenom smjera gibanja, pri čemu se pojedina polja ispune ponašaju slično (slika 3.).

Stoga se devet polja u ravnini zidane ispune može smanjiti na četiri koja su prikazana na slici 4.1 (BCJ) područje čvora okvira (polje 1, polje 3, polje 7 i polje 9), 2 (MB) područje sredine raspona grede (polje 2 i polje 8), 3 (MC) područje polovine visine stupa (polje 4 i polje 6) te 4 (C) područje sredine ravnine ispune (polje 5).

Tablica 2. Matrica analize

ID	L/h	O,L	O,R	ID	L/h	O,L	O,R	ID	L/h	O,L	O,R			
1prazno	1,33		100,00	2prazno	1,60		100,00	3prazno	1,87		100,00			
1puno			0,00	2puno			0,00	3puno			0,00			
111		1(BCJ)		4,44		211	1(BCJ)			3,70	311	1(BCJ)		3,17
112				13,33		212				14,81	312			15,87
113				17,78		213				18,52	313			19,05
121		2 (MB)		4,44		221	2 (MB)			3,70	321	2 (MB)		3,17
122				13,33		222				14,81	322			15,87
123				17,78		223				18,52	323			19,05
131		3 (MC)		4,44		231	3 (MC)			3,70	331	3 (MC)		3,17
132				13,33		232				14,81	332			15,87
133				17,78		233				18,52	333			19,05
141		4 (C)		4,44		241	4 (C)			3,70	341	4 (C)		3,17
142				13,33		242				14,81	342			15,87
143				17,78		243				18,52	343			19,05
4prazno	2,40		100,00	5prazno	3,20		100,00	6prazno	0,80		100,00			
4puno			0,00	5puno			0,00	6puno			0,00			
411		1(BCJ)		3,70		511	1(BCJ)			3,70	611	1(BCJ)		3,70
412				14,81		512				14,81	612			14,81
413				18,52		513				18,52	613			22,22
421		2 (MB)		3,70		521	2 (MB)			3,70	621	2 (MB)		3,70
422				14,81		522				14,81	622			14,81
423				18,52		523				18,52	623			22,22
431		3 (MC)		3,70		531	3 (MC)			3,70	631	3 (MC)		3,70
432				14,81		532				14,81	632			14,81
433				18,52		533				18,52	633			22,22
441		4 (C)		3,70		541	4 (C)			3,70	641	4 (C)		3,70
442				14,81		542				14,81	642			14,81
443				18,52		543				18,52	643			22,22

O,L – lokacija otvora, O,R – koeficijent otvora (%)



Slika 3. Efekt pojave ekvivalentne tlačne dijagonale

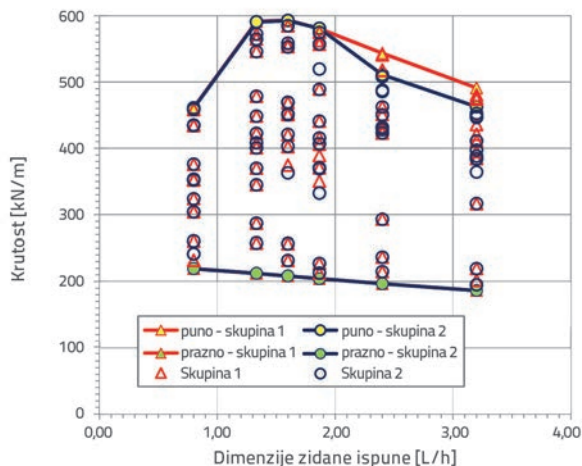


Slika 4. Model matrice analize

Poznato je da se rasponi u nekoj građevini mogu međusobno bitno razlikovati. Prema radovima koje su prikazali Hancilar i dr. [35] i Ozmen i dr. [36], rasponi mogu po duljini varirati od 3,0 metara do 8,0 metara. Stoga je za analizu metodom konačnih elemenata odabrano šest različitih ravninskih armiranobetonkih okvira, kao što je prikazano u tablici 2. Tri koeficijenta otvora analizirana su za svaki od šest odnosa  $L/h$  na svakoj od četiri lokacije otvora. Osim toga, da bi se odredila promjena horizontalne krutosti, analizirani su i slučajevi praznog i punog okvira. Kako je iz literature poznato da horizontalna krutost zidane ispune značajno ovisi o vrijednosti koeficijenta otvora, u ovom su radu usvojeni koeficijenti otvora manji od 20 %. Koeficijenti otvora usvojeni su tako da budu proporcionalni s dimenzijama zidnih elemenata ispune (60 x 25 cm). Time se analizirani koeficijenti otvora razlikuju od koeficijenata koji se uobičajeno susreću u literaturi. Detalji o matrici analize prikazani su u tablici 2.

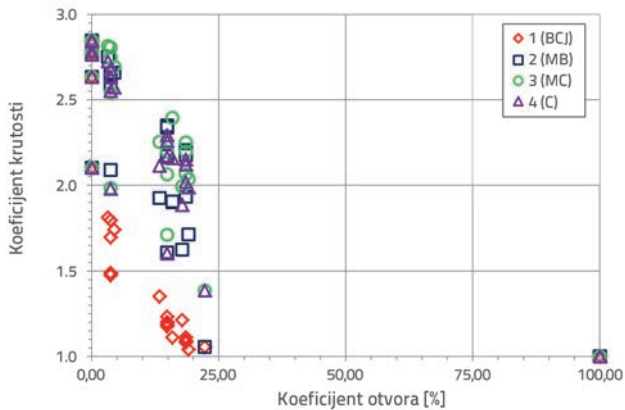
#### 4. Rezultati i izračun faktora redukcije krutosti

Još jednom je dokazano provedenom analizom ponašanja armiranobetonskog ravninskog okvira sa zidanom ispunom, s otvorom ili bez otvora, pomoću metode konačnih elemenata, da doprinos zidane ispune horizontalnoj krutosti okvira nije zanemariv. Međutim, ne može se reći da je lako odrediti ovisnost krutosti potpuno ispunjenog okvira ("puno" na slici 5.) i dimenzija zidane ispune. Uočene varijacije mogu se pripisati pojavi višestrukih tlačnih dijagonala u zidanoj ispuni (slika 5.). Osim toga, promjena ponašanja okvira od savojnog do posmičnog kod kratkih raspona (u ovom se radu koristi  $L/h < 1,60$ ) utječe na nosivost potpuno ispunjenog okvira. Kao što vidimo na slici 5., malo (zanemarivo) smanjenje krutosti može se zamijetiti kod praznog okvira ("prazno" na slici 5.) sukladno s povećanjem raspona okvira. Prema slici 5., "prazno" i "puno" predstavljaju donju i gornju granicu krutosti promatranih modela. Kako su istraživani parametri (koeficijent otvora, lokacija otvora i dimenzije ispune) povezani, nemoguće bi bilo uspostaviti odnos za ostale parametre promatranog sustava. Stoga je promjena krutosti zidane ispune s otvorom normalizirana s promjenom krutosti kod pune zidane ispune, i to za sve analizirane parametre (koeficijent otvora, lokacija otvora i dimenzije zida).



Slika 5. Utjecaj dimenzija zidane ispune ( $L/h$ ) na horizontalnu krutost

Horizontalna krutost analiziranih modela određena je tako da je horizontalna sila podijeljena s horizontalnim pomakom (jednadžba 4). Horizontalna krutost određena je prilikom formiranja prvog plastičnog zgloba na bilo kojem elementu armiranobetonskog okvira (slika 5.). Koeficijent krutosti predstavlja odnos horizontalne krutosti analizirane konstrukcije i horizontalne krutosti praznog okvira. Utjecaj postotka otvora na koeficijent krutosti prikazan je na slici 6. za sve analizirane slučajeve (prikazano samo za armaturu iz skupine 1). Kao što se moglo i očekivati, postojanje otvora u zidanoj ispuni bitno utječe na horizontalnu nosivost. Utjecaj lokacije

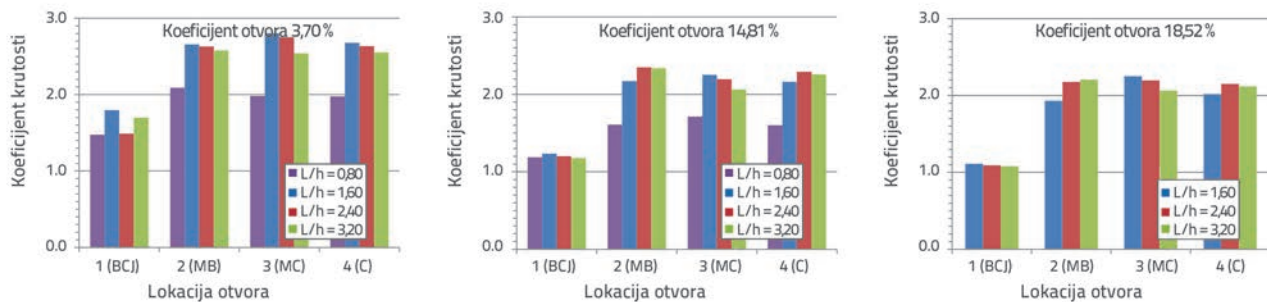


Slika 6. Utjecaj koeficijenta otvora na koeficijent krutosti

otvora na koeficijent krutosti (odnos krutosti ispunjenog okvira i krutosti praznog okvira) prikazan je na slici 7. za neke koeficijente otvora uz promjenu dimenzija okvira (odnosa L/h). Slika 7. jasno pokazuje da otvor u području čvora okvira (1(BCJ)) ima izražen utjecaj na koeficijent krutosti. Osim toga, ako je omjer dimenzija okvira (L/h) manji od 1,60, utjecaj otvora na krutost okvira sa zidanom ispunom je izraženiji.

Da bi se prikazao faktor redukcije krutosti prema izrazu (5), povećanje horizontalne krutosti zbog zidane ispune bez otvora najprije je normalizirano na "1" (jedan) nakon oduzimanja krutosti praznog okvira. Zatim je analiziran utjecaj koeficijenta otvora, lokacije otvora i dimenzija zidane ispune, izraz (6).

$$\text{krutost} = \frac{\text{ukupne horizontalne reakcije ležaja}}{\text{izmjereni pomak}} \quad (4)$$



Slika 7. Utjecaj lokacije i koeficijenta otvora na koeficijent krutosti

Tablica 3. Rezultati regresijske analize faktora redukcije krutosti

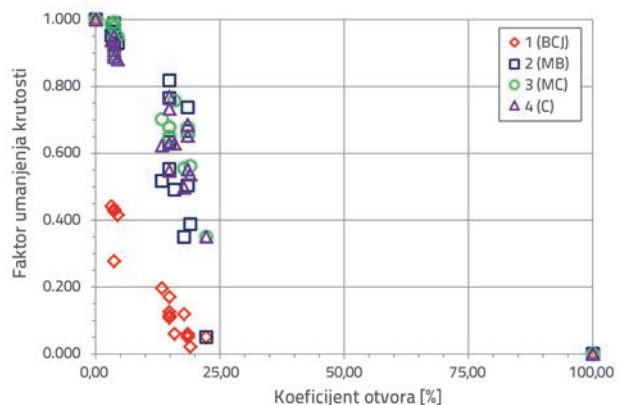
Parametar	Lokacija otvora	Rezultat regresijske analize	Predloženo
$k_1$		$k_1 = 1,0084 + 0,3973 \cdot (L/h)$	$k_1 = 1,0 + 0,4 \cdot (L/h)$
$k_2$	1 (BCJ)	0,2	0,2
	2 (MB)	0,9	1,0
	3 (MC)	1,1	1,0
	4 (C)	1,0	1,0

$$\lambda = \frac{\text{krutost okvira sa zidanom ispunom s otvorom}}{\text{krutost potpuno ispunjenog okvira - krutost praznog okvira}} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\text{površina otvora}}{\text{površina ispune}} \quad (6)$$

Rezultati analiza (slike 7. do 10.) pokazuju da koeficijent otvora ( $\alpha$ ) nije jedini parametar koji utječe na krutost armiranobetonskog okvira sa zidanom ispunom. Prikazani rezultati pokazuju da je u postupku određivanja faktora redukcije krutosti značajan ne samo koeficijent otvora već i lokacija otvora (slike 7. i 8.) te dimenzija zidane ispune (odnos L/h).

Nelinearno ponašanje ispunjenog okvira određeno je da bi se uočila prva pojava plastičnog zgloba na bilo kojem od elemenata

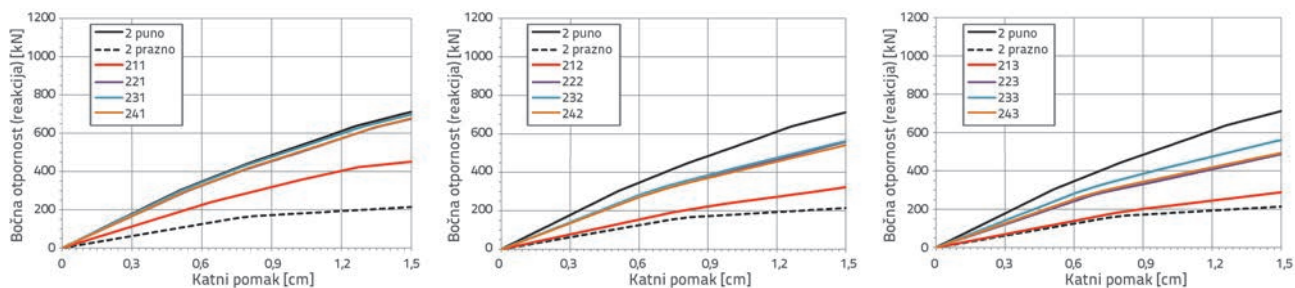


Slika 8. Redukcija faktora krutosti u odnosu na koeficijent otvora i lokaciju otvora

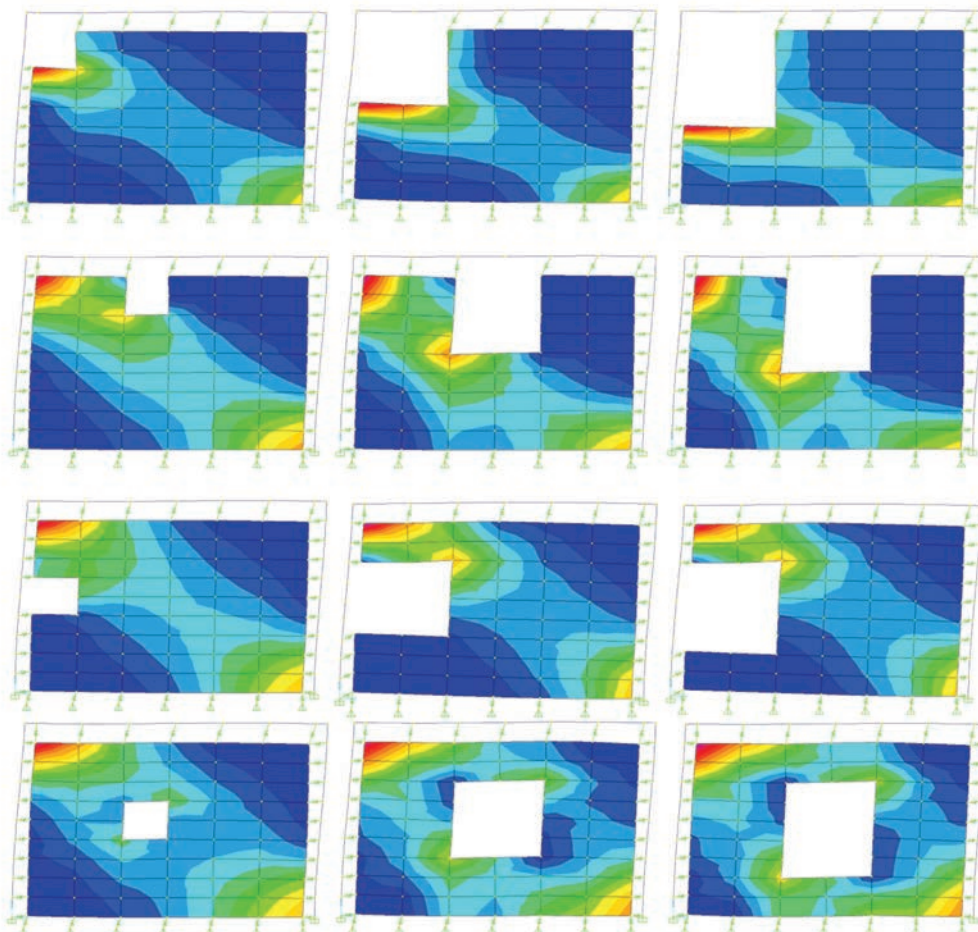
armiranobetonskog okvira s detaljem armiranja prema skupini 1 (slika 9.). Kao što se vidi na slici 9. (samo se  $L/h = 1,60$  daje kao primjer), i koeficijent otvora, izraz (6), i lokacija otvora imaju značajnu ulogu u nelinearnom ponašanju armiranobetonskog okvira sa zidanom ispunom. Kako koeficijent otvora raste, tako raste i utjecaj lokacije otvora na sveukupnu nosivost armiranobetonskog okvira s ispunom. Od četiri istraživane lokacije, uočeno je da otvor u području čvora (1 (BC)) ima najizraženiji utjecaj na nosivost promatranog sustava. Kako raste koeficijent otvora, tako se smanjuje sudjelovanje zidane ispune u horizontalnoj nosivosti, a ako se otvor nalazi u području čvora okvira, doprinos ispune gotovo iščezava. Regresijska analiza obavljena je u skladu s rezultatima

analize metode konačnih elemenata za armiranobetonski okvir sa zidanom ispunom. Regresijskom analizom dobivena je empirijska formula, izraz (7) za procjenu faktora redukcije krutosti. Predložena empirijska formula u obzir uzima ne samo koeficijent otvora već i dimenzije zidane ispune (odnos  $L/h$ ) te lokaciju otvora.

Utjecaj dimenzija zidane ispune (odnosa  $L/h$ ) na faktor redukcije krutosti izražen je pomoću konstante  $k_1$ . Regresijska analiza pokazala je da se utjecaj dimenzija zidane ispune može pojednostavniti kao linearni odnos ( $k_1$ , izraz (8)) koji se može upotrijebiti kao potencija koeficijenta otvora. Rezultati regresijske analize i preporučene vrijednosti parametra  $k_1$  prikazani su u tablici 3.



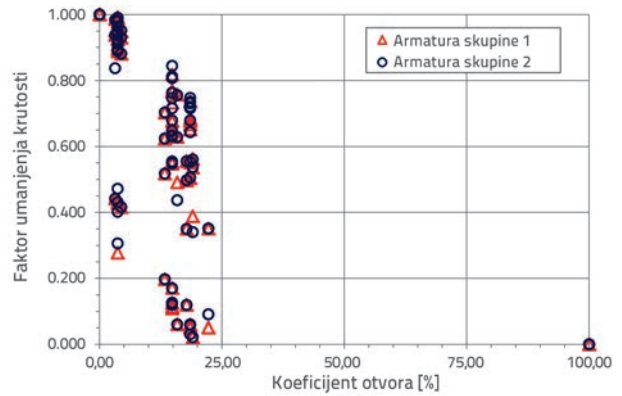
Slika 9. Utjecaj lokacije i koeficijenta otvora na nelinearno ponašanje modela ( $L/h = 1,60$ )



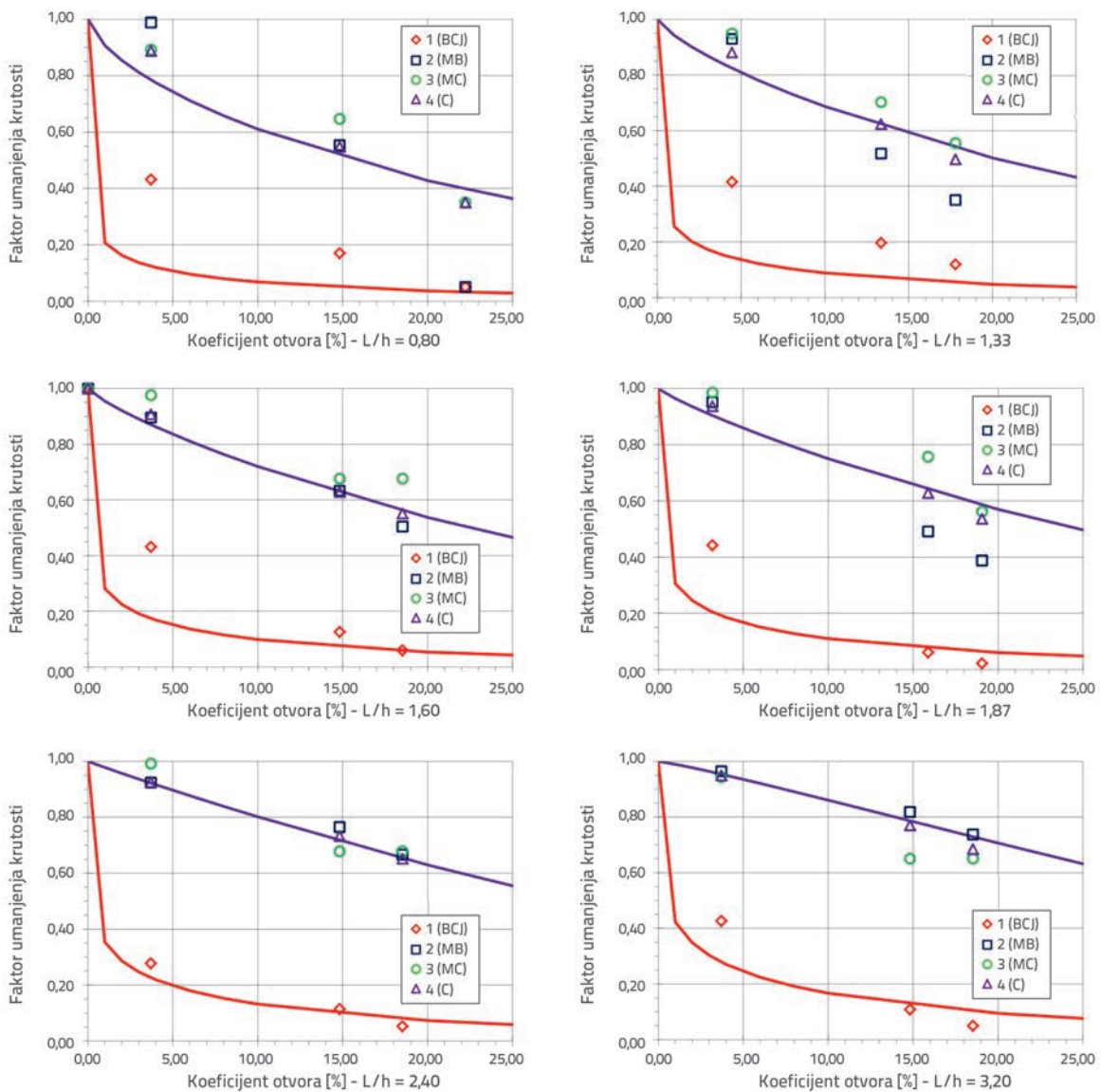
Slika 10. Raspodjela naprezanja u zidanoj ispuni s otvorom ( $L/h = 1,60$ )



Također je značajna i uloga lokacije otvora jer bi ona mogla onemogućiti formiranje ekvivalentne tlačne dijagonale (slika 10.). Kao što se može vidjeti na slici 10., svaki otvor na lokaciji 1 (BCJ) (polja 1, 3, 7 i 9) iznimno negativno utječe na formiranje ekvivalentne tlačne dijagonale. Stoga se može reći da je doprinos zidane ispune horizontalnoj krutosti gotovo zanemariv. Iako će otvor na lokaciji 4 (C) (polje 5) također biti na ekvivalentnoj tlačnoj dijagonali, zidana ispuna će se ponašati – zbog svoje prirode – kao da se zapravo radi o više tlačnih dijagonala. Ako usporedimo lokacije otvora 2 (MB) (polja 2 i 8) i 3 (MC) (polja 4 i 6), vidimo da je krutost armiranobetonskog okvira sa zidanom ispunom osjetljivija na otvor na lokacijama 2 (MB). U skladu s dobivenim rezultatima, utjecaj lokacije otvora na faktor redukcije krutosti ( $\lambda$ ) uzima se u obzir kao konstanta  $k_2$  koja se koristi kao potencija



Slika 11. Utjecaj detalja armiranja na faktor redukcije krutosti

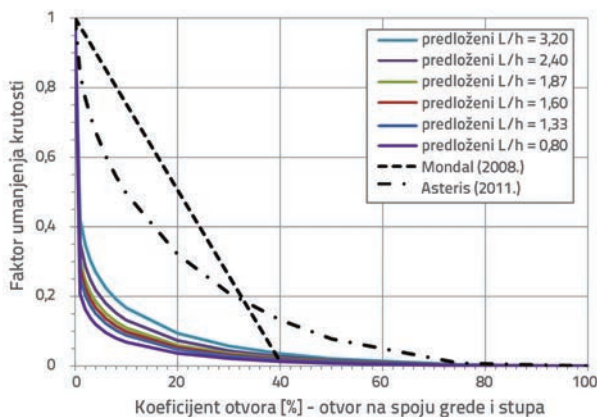
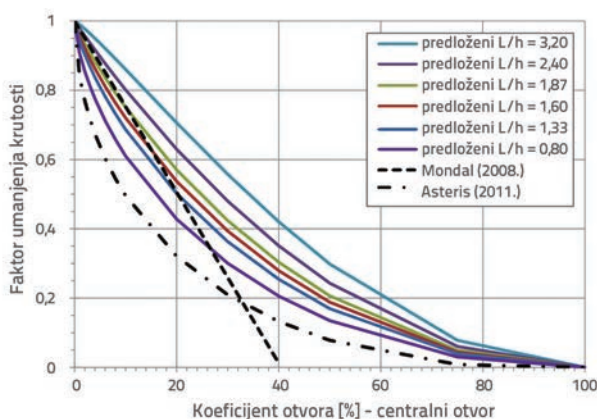


Slika 12. Predloženi faktor redukcije krutosti ( $\lambda$ )

koeficijenta otvora. Rezultati regresijske analize i vrijednosti predložene za parametar  $k_2$  također su prikazani u tablici 3. Iako na faktor redukcije krutosti ( $\lambda$ ) utječe koeficijent otvora ( $\alpha$ ), lokacija otvora i dimenzije zida ( $L/h$ ), ustanovljeno je da detalji armiranja stupa i grede ne utječu značajno na faktor redukcije krutosti (slika 11.). Jednadžba predložena za "faktor redukcije krutosti", dobivena pomoću višestruke regresije u obliku jednadžbe (7) da bi se dobila najbolja usklađenost rezultata, uspoređena je s analizama metode konačnih elemenata (slika 12. za armaturu iz skupine 1) te s izrazima koje su ranije predložili razni istraživači [28, 30] (slika 13.):

$$\lambda = 1 - 2 \cdot \alpha^{0,5k_1 \cdot k_2} + \alpha^{k_1 \cdot k_2} \quad (7)$$

$$k_1 = 1,0 + 0,4 \cdot (L/h) \quad (8)$$



Slika 13. Usporedba predloženog modela ( $\lambda$ ) s modelima iz literature

Prema preporukama nekih propisa kao što je primjerice turski seizmički propis [22], utjecaj otvora (ako se ne nalazi u području

čvora okvira) može se zanemariti ako je koeficijent otvora manji od 5 %. Predloženi faktor redukcije može se primijeniti za okvire sa zidanom ispunom s normalnim otvorima. Ekstremni slučajevi, tj. slučajevi u kojima otvori zauzimaju punu visinu ili punu širinu zidane ispune nisu uključeni predloženom jednadžbom faktora redukcije krutosti. Osim toga, dimenzije otvora mogu biti različite pa tako uski ili niski otvori nisu obrađeni u ovom radu. Stoga predložena jednadžba nije prikladna za uske ili niske otvore. Prema ovim rezultatima i preporukama, krutost ekvivalentne dijagonalne tlačne dijagonale ( $k_{iw}$ ) može se izračunati pomoću jednadžbe (9) u koju je uključen i predloženi faktor redukcije krutosti ( $\lambda$  - jednadžba (7)):

$$k_{iw} = \lambda \frac{a_{iw} \cdot t_{iw} \cdot E_{iw}}{r_{iw}} \quad (9)$$

gdje je

$$a_{iw} = 0,175 (\rho_{iw} \cdot h_c)^{-0,4} \cdot r_{iw} \quad (10)$$

$$\rho_{iw} = \left[ \frac{E_{iw} \cdot t_{iw} \cdot \sin 2\theta}{4 \cdot E_{fr} \cdot I_c \cdot h} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

Prikazani parametri u jednadžbama od (9) do (11) iz turskog seizmičkog propisa [22] su:  $a_{iw}$  širina ekvivalentne tlačne dijagonale,  $E_{iw}$  modul elastičnosti zidane ispune,  $E_{fr}$  modul elastičnosti betona,  $h$  visina zidane ispune,  $h_c$  visina stupa,  $I_c$  moment tromosti stupa,  $r_{iw}$  duljina ekvivalentne tlačne dijagonale,  $\theta$  nagib ekvivalentne tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu, i  $t_{iw}$  debljina zidane ispune.

#### 4. Zaključak

Karakteristike idealizirane tlačne dijagonale već su definirane u odgovarajućim odredbama nekih propisa o projektiranju [22-25]. Stoga se u ovom radu daje sažetak rezultata procjene "faktora redukcije krutosti ( $\lambda$ )" kako bi se idealizirao utjecaj otvora u zidanoj ispuni. Iako su "faktor redukcije krutosti" već razmatrali razni istraživači, utjecaj lokacije otvora i dimenzija zidane ispune na faktor redukcije krutosti još uvijek nije dovoljno istražen. Ovo istraživanje pokazuje da je utjecaj detalja armiranja elemenata armiranobetonskog okvira na faktor redukcije krutosti zapravo zanemariv. Međutim, na faktor redukcije krutosti utječe ne samo koeficijent otvora već i lokacija otvora i dimenzije zidane ispune. Iako vrijednost faktora redukcije krutosti varira za svaku pojedinu lokaciju, lokacija otvora može se pojednostavniti usvajanjem dva od devet polja: otvor u području čvora okvira ili otvor na bilo kojem drugom mjestu.

## LITERATURA

- [1] Smith, B.S.: Behavior of square infilled frames, *Journal of Structural Engineering- ASCE*, ST1, pp. 381-403, 1966.
- [2] Smith, B.S., Carter, C.: A method of analysis for infilled frames, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 44, pp. 31-48, 1969., <http://dx.doi.org/10.1680/iicep.1969.7290>
- [3] Page, A.W., Kleeman, P.W., Dhanasekar, M.: An in-plane finite element analysis model for brick masonry, *Structures Congress'85*, Chicago, Ill, pp. 1-18, 1985.
- [4] Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M., Noland, J.: Experimental evaluation of masonry infilled RC frames, *Journal of Structural Engineering- ASCE*, 122(3), pp. 228-237, 1996., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:3\(228\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(228))
- [5] Buonopane, S.G., White, R.N.: Pseudodynamic testing of masonry infilled reinforced concrete frame, *Journal of Structural Engineering- ASCE*, 125(6), pp. 578-589, 1999., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:6\(578\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:6(578))
- [6] Santhi, M.H., Knight, G.M.S., Muthumani, K.: Evaluation of seismic response of soft storey infilled frames, *Computers and Concrete*, 2 (6), pp. 423-437, 2005., <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2005.2.6.423>
- [7] Santhi, M.H., Knight, G.M.S., Muthumani, K.: Evaluation of seismic performance of gravity load designed reinforced concrete frames, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 19(4), pp. 277-282, 2005., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2005\)19:4\(277\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2005)19:4(277))
- [8] Liauw, T.C., Kwan, K.H.: Nonlinear behavior of non-integral infilled frames, *Computers and Structures*, 18, pp. 551-560, 1984., [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949\(84\)90070-1](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949(84)90070-1)
- [9] Dhanasekar, M., Page, A.W.: Influence of brick masonry infill properties on the behavior of infilled frames, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Part 2, 81, pp. 593-605, 1986., <http://dx.doi.org/10.1680/iicep.1986.463>
- [10] Chrysostomou, C.Z.: Effects of degrading infill walls on the nonlinear seismic response of two-dimensional steel frames, PhD thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y, 1991.
- [11] Saneinejad, A., Hobbs, B.: Inelastic design of infilled frames, *Journal of Structural Engineering- ASCE*, 121(4), pp. 634-650, 1995., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:4\(634\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:4(634))
- [12] Chrysostomou, C.Z., Gergely, P., Abel, J.F.: A six-strut model for nonlinear dynamic analysis of steel infilled frames, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2(3), pp. 335-353, 2002., <http://dx.doi.org/10.1142/S0219455402000567>
- [13] Asteris, P.G.: Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames, *Journal of Structural Engineering- ASCE*, 129(8), pp. 1071-1079, 2003., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:8\(1071\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:8(1071))
- [14] Moghaddam, H.A.: Lateral load behavior of masonry infilled steel frames with repair and retrofit, *Journal of Structural Engineering- ASCE*, 130(1), pp. 56-63, 2004., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:1\(56\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:1(56))
- [15] Asteris, P.G.: Closure to lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames by P. G. Asteris, *Journal of Structural Engineering- ASCE*, 131(3), pp. 523-524, 2005., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:3\(523.2\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:3(523.2))
- [16] Asteris, P.G.: Finite element micro-modeling of infilled frames, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 8, pp. 1-11, 2008.
- [17] Kakaletsis, D.J., Karayannis, C.G.: Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings, *ACI Structural Journal*, 106(2), pp. 132-141, 2009.
- [18] Dorji, J.: Seismic performance of brick infilled RC frame structures in low and medium rise buildings in Bhutan, M.E. Thesis, Queensland University of Technology (Australia), pp.141, June 2009.
- [19] Pradhan, P.M.: Equivalent strut width for partial infilled frames, *Journal of Civil Engineering Research, Scientific and Academic Publishing*, 2(5), pp. 42-48, 2012.
- [20] Uva, G., Porco, F., Fiore, A.: Appraisal of masonry infill walls effect in the seismic response of RC framed buildings: A case study, *Engineering Structures*, Elsevier, 34, pp. 514-526, 2012., <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.043>
- [21] Tabeshpour, M.R., Azad, A., Golafshani, A.A.: Seismic behavior and retrofit of infilled frames (Chapter 11), *Earthquake-Resistant Structures – Design, Assessment, and Rehabilitation* (ISBN 978-953-51-0123-9), Intech, 279-306, 2012.
- [22] Ministry of Public Works and Settlement / Government of Republic of Turkey: Specification for buildings to be built in seismic zones, 2007.
- [23] Applied Technology Council (ATC): Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Federal Emergency Management Agency - FEMA-440, Washington D.C, 2005.
- [24] European Committee for Standardization: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Assessment and retrofitting of buildings (EC8-Part 3), 2005.
- [25] American Society of Civil Engineers (ASCE): Seismic rehabilitation of existing structures (41-06), Virginia, USA, 2007.
- [26] Moghaddam, H.A., Dowling, P.J.: The state of the art in infilled frames (ESEE Research Report No. 87-2), Imperial College of Science and Technology, Civil Eng. Department, London, U.K, 1987.
- [27] Asteris, P.G., Antoniou, S.T., Sophianopoulos, D.S., Chrysostomou, C.Z.: Mathematical macro- modeling of infilled frames: State-of-the-art, *Journal of Structural Engineering- ASCE*, 137 (12), pp. 1508-1517, 2011., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000384](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000384)
- [28] Mondal, G., Jain S.K.: Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central openings, *Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute (EERI)*, 24 (3), pp. 701-723, 2008.
- [29] Syrmakizis, C.A., Asteris, P.G.: Influence of infilled walls with openings to the seismic response of plane frames, 9<sup>th</sup> Canadian Masonry Symposium, June 2001.
- [30] Asteris, P.G., Chrysostomou, C.Z., Giannopoulos, I.P., Smyrou, E.: Masonry infilled reinforced concrete frames with openings, COMPDYN 2011 III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, May 2011.
- [31] Nwofor, T.C.: Shear resistance of reinforced concrete infilled frames, *International Journal of Applied Science and Technology*, 2 (5), pp. 148-163, 2012.
- [32] Rathi, R.P., Pajgade, P.S.: Study of masonry infilled R.C. frame with & without opening, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 3 (6), pp. 1-7, 2012.
- [33] Computers and Structures Inc., SAP2000, 2009.
- [34] Building Seismic Safety Council (BSSC): A Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency - FEMA 356, Washington, DC, 2000.
- [35] Hancilar, U., Cakti, E., Erdik, M., Franco, G.E., Deodatis, G.: Earthquake vulnerability of school buildings: Probabilistic structural fragility analyses, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, pp. 169-178, 2014., <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.09.005>
- [36] Ozmen, H.B., Inel, M., Meral, E.: Evaluation of the main parameters affecting seismic performance of RC buildings, *Sadhana*, 39 (2), pp. 437-450, 2014., <http://dx.doi.org/10.1007/s12046-014-0235-8>
- [37] Computers and Structures Inc, <http://wiki.csiamerica.com>, 15.10.2014.