

Primljen / Received: 18.2.2019.

Ispravljen / Corrected: 3.8.2019.

Prihvaćen / Accepted: 3.12.2019.

Dostupno online / Available online: 10.4.2021.

Ocjenjivanje učinkovitosti okvirnih AB konstrukcija sa zidanom ispunom pod utjecajem bočnih opterećenja

Autori:

Dr.sc. **Mebarek Khelfi**, dipl.ing.građ.

Državni istraživački centar za potresno inženjerstvo, Alžir

Odjel za potresno inženjerstvo

Sveučilište Saad Dahlab, Alžir

mkhelfi@cgs-dz.org

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Nouredine Bourahla**, dipl.ing.građ.

Državno tehničko veleučilište ENP, Alžir

Odjel za potresno inženjerstvo

nedbourahla@gmail.comIzv.prof.dr.sc. **Mustapha Remki**, dipl.ing.građ.

Državni istraživački centar za potresno inženjerstvo, Alžir

mremki@cgs-dz.org

Prethodno priopćenje

Mebarek Khelfi, Nouredine Bourahla, Mustapha Remki

Ocjenjivanje učinkovitosti okvirnih AB konstrukcija sa zidanom ispunom pod utjecajem bočnih opterećenja

Brojne studije o zidanim ispunskim panelima uvelike su doprinijele razvoju istraživanja nosivosti, krutosti i sposobnosti disipacije energije raznih građevina. Zanemarivanje utjecaja zidanih ispuna može uzrokovati oštećenosti konstrukcije u slučaju značajnijih pomaka tla, pa čak i do rušenja čitave građevine. Način sloma uvelike ovisi o međusobnom djelovanju zidane ispune i AB okvira. U ovom se radu predlaže metoda za ocjenjivanje koeficijenta učinkovitosti zidane ispune na AB okvirne konstrukcije pod utjecajem bočnih opterećenja.

Ključne riječi:

koeficijenti učinkovitosti, bočna nosivost, bočna krutost, disipacija energije, zidane ispune, AB okviri, spojevi s vutom

Research Paper

Mebarek Khelfi, Nouredine Bourahla, Mustapha Remki

Performance evaluation of masonry infilled RC frame structures under lateral loads

Numerous studies on masonry infill panels have greatly contributed to the research of strength, stiffness and energy dissipation capacity of various buildings. If the effects of masonry panels are disregarded, structural damage will occur under any significant ground motion, and even lead to collapse of the entire structure. The mode of failure is strongly dependent on the masonry and RC frame interaction. This work proposes an evaluation method for determining the participation ratio of masonry infill panels on RC frames under lateral loads.

Key words:

indices of performance, lateral strength, lateral stiffness, dissipated energy, infill panels, RC frames, tapered joints

Vorherige Mitteilung

Mebarek Khelfi, Nouredine Bourahla, Mustapha Remki

Bewertung der Effizienz von Rahmenstahlbetonkonstruktionen mit der Wandfüllung/mit der gemauerten Füllung, unter dem Einfluss von Seitenbelastungen

Die zahlreichen Studien über die gemauerten Füllungsplatten haben zum größten Teil der Entwicklung der Tragfähigkeit, Steifigkeit und Fähigkeit der Energiezerstreuung von verschiedenen Gebäuden beigetragen. Die Vernachlässigung des Einflusses von Wandfüllungen kann die Beschädigung der Konstruktion im Fall der bedeutenderen Verschiebung des Bodens verursachen und sogar zum Abbruch des gesamten Gebäudes führen. Die Art und Weise des Bruchs hängt zum großen Teil von der gegenseitigen Wirkung der Wandfüllung und des Stahlbetonrahmens ab. In dieser Arbeit wird die Methode für die Bewertung der Koeffizienten der Wirksamkeit der Wandfüllung für die Stahlbetonkonstruktionen unter dem Einfluss von Seitenbelastungen vorgeschlagen.

Schlüsselwörter:

Koeffizienten der Wirksamkeit, Seitentragfähigkeit, Seitensteifigkeit, Energiezerstreuung, Wandfüllungen, Stahlbetonrahmen, Verbindungen mit Wolle

1. Uvod

Armiranobetske konstrukcije sa zidanom ispunom često se koriste u izvođenju građevina diljem svijeta. Od nekolice mogućih postupaka koji se primjenjuju u izvođenju nižih građevina, ova tipologija je zastupljena u velikoj mjeri i to ponajviše zbog brzine i jednostavnosti izvođenja te niske cijene građenja. Zato je pravilno razumijevanje ponašanja ove vrste konstrukcija izuzetno značajno, naročito kada se radi o ponašanju pri potresnom opterećenju. Nekoliko objavljenih eksperimentalnih ispitivanja [1-8] i numeričkih proračuna [9-13] pokazuju da primjena zidanih ispuna u armiranobetskim okvirnim konstrukcijama bitno pridonosi povećanju nosivosti, bočne krutosti i sposobnosti disipiranja energije konstrukcije, ali može i negativno utjecati na opće ponašanje slabih okvirnih konstrukcija. Porast broja analiza i istraživanja koji se bilježi u protekla dva desetljeća odraz je sve veće pozornosti koja se pridaje analizi i interakciji zidane ispune i obodnih AB okvira [14]. U nekim se propisima za potres [15] navodi da bi se zidane ispune trebale uzimati u obzir, naročito u proračunu krutosti konstrukcija.

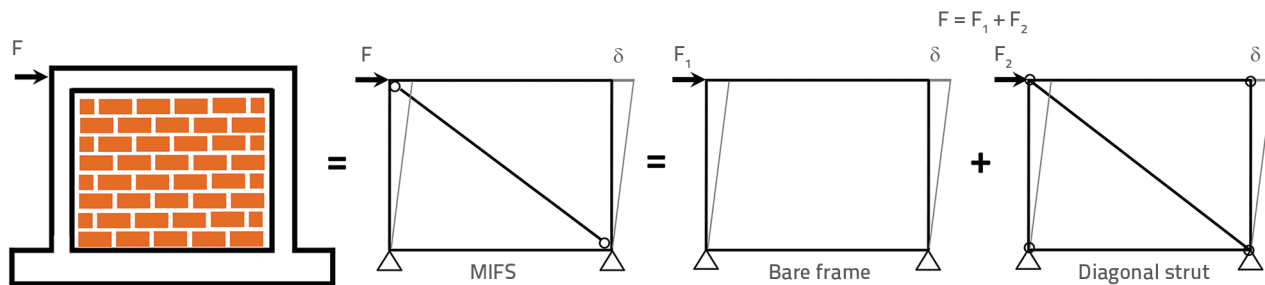
Numerički modeli konstrukcija MIFS (okvirnih AB konstrukcija sa zidanom ispunom, eng. *Masonry Infilled RC Frame Structures* - MIFS) mogu se svrstati u dvije kategorije: mikromodeli i makromodeli. Mikromodelima se može vrlo precizno predvidjeti stvarni razvoj oštećenosti komponenata MIFS-a. Pristup razmazanih pukotina [45] i metoda diskretnih elemenata [46] najpopularnije su metode koje se primjenjuju u nekim programima baziranim na metodi konačnih elemenata kao što su Ansys, Abaqus, Atena itd. Takovi se modeli ipak primjenjuju u posebnim slučajevima jer su zahtjevni u proračunu, ali i bolje upućuju na nelinearno ponašanje materijala. Zbog toga nisu prikladni u praktičnim slučajevima, naročito kada se radi o građevinama velikih dimenzija. Stoga projektanti često koriste drugu kategoriju numeričkih modela, tj. makromodele. Makromodeli su prikladniji za inženjerske potrebe jer omogućuju dovoljno točno predviđanje globalnog ponašanja MIFS-a.

Jedan od značajnih ciljeva u analizi konstrukcija MIFS jest poboljšanje njihove seizmičke učinkovitosti. Učinkovitost MIFS-a može se iskazati kvalitativnim ili kvantitativnim metodama. Kvalitativni se pristup temelji na opisu sloma, na geometriji betonskog obodnog okvira i na mehaničkim svojstvima materijala, pri čemu je cilj predvidjeti moguće načine otkazivanja MIFS-a u slučaju seizmičkog opterećenja [16-19]. Kvantitativni se pristup uglavnom temelji na numeričkim postupcima, pri čemu se seizmička učinkovitost ocjenjuje na bazi nekoliko parametara kao što su čvrstoća, duktilnost, bočna krutost itd. Bez obzira na velik broj predloženih analitičkih modela, do sada ipak nije postignut konsenzus o definiranju jedinstvenog unificiranog pristupa za sigurno projektiranje MIFS-a. Ovaj paradoks modela MIFS posljedica je nedostatnog razumijevanja interakcije zidane ispune i AB okvirnih elemenata [44]. Pri odabiru prikladnog modela MIFS-a, projektanti se

suočavaju i s nekim drugim pitanjima: Kako odabrati optimalan koncept MIFS-a (dimenzije zidnih panela, dimenzije elemenata AB okvira, te dimenzije otvora i njihovo pozicioniranje) koji će omogućiti prikladno ponašanje pri djelovanju bočnih sila? U traženju odgovora na to pitanje, do sada su provedene brojne analize na serijama uzoraka MIFS-a i pritom su korištene razne konfiguracije [21, 41, 42]. U radu [41], otpornost na posmik svakog MIFS-a iskazuje se izračunavanjem unutarnjih sila u zidanoj ispuni te uspoređivanjem s odgovarajućim zasebnim AB elementom, kako bi se ocijenio utjecaj veličine i položaja otvora. U ovom se radu predlaže nova metodologija za ocjenu učinkovitosti okvirnih konstrukcija s punom zidanom ispunom (MIFS) koja se bazira na proračunavanju koeficijenta učinkovitosti IP. Koeficijenti učinkovitosti MIFS-a prikazuju sudjelovanje zidnog panela u ukupnoj učinkovitosti MIFS-a a na temelju odabranih parametara kao što su nosivost, bočna krutost i disipacija energije. Prva primjena tipičan je primjer izračunavanja koeficijenta učinkovitosti MIFS-a pri čemu se numeričke simulacije MIFS-a i odgovarajućeg AB okvira umjeravaju na temelju eksperimentalnih ispitivanja koja su dostupna u literaturi. Druga primjena predložene metode na dva okvira s ispunom, s raznim konfiguracijama okvira, koristi se kako bi se usporedili njihovi koeficijenti učinkovitosti. U ovom dijelu rada naglasak se stavlja na neobičajeno projektiranje MIFS-a koje zaslužuje pozornost i u kojem se koriste rubni okviri sa spojevima na krajevima greda. Predložena metoda također je korisna i za ocjenjivanje stupnja oštećenosti zidane ispune u slučaju seizmičkog opterećenja, te se može primijeniti i kao osnovno sredstvo za provjeru, usporedu sa seizmičkim propisima.

2. Učinkovitost okvira sa zidanom ispunom

U slučaju bočnih opterećenja, zidni panel ima dominantan utjecaj u ponašanju MIFS-a, pa tako mnoga eksperimentalna ispitivanja pokazuju da doprinos zidnog panela u nosivosti MIFS-a može iznositi čak i do 70 % [3, 20, 21]. Utjecaj zidne ispune na ponašanje MIFS-a može varirati ovisno o načinu na koji se ispuna koristi unutar okvira. Stoga se određeni parametri trebaju uzeti u obzir pri ocjenjivanju mjere u kojoj zidana ispuna doprinosi sveukupnom ponašanju MIFS-a. Isto tako, provedena su odgovarajuća eksperimentalna i numerička ispitivanja na uzorcima MIFS-a s raznim dimenzijama otvora kako bi se ocijenila učinkovitost tih konstrukcija. U tim su ispitivanjima kao referentni uzorci korišteni potpuno ispunjeni AB okviri i ogoljeni okvirni sustav [41, 42]. Predložena metodologija temelji se na ocjeni utjecaja zidanih ispuna na okvirnu konstrukciju i to izračunavanjem njihovih koeficijenata učinkovitosti (eng. *indices of performance* - IP). Izračunavanje vrijednosti IP bazira se na činjenici da se ukupan utjecaj MIFS-a pri nekom pomaku δ dobiva superponiranjem utjecaja panela ispune i utjecaja AB okvira pri istom pomaku δ . Učinkovitost MIFS-a izračunava se kao odnos utjecaja ispune i općeg ponašanja MIFS-a. Ta pretpostavka je primjenjiva ako se pri bočnom opterećenju zidane ispune može zamijeniti dijagonalnim štapom (slika 1.).



Slika 1. Princip superpozicije utjecaja zidane ispune i ogoljene okvirne konstrukcije

Ekvivalentni dijagonalni štap najpoznatiji je praktičan model koji se koristi za simuliranje zidanih panela u okvirnoj konstrukciji. Inspiriran Palyakovim spoznajama [22], Holmes je prvi istraživač koji je predložio modeliranje zidane ispune pomoću jednostavnog dijagonalnog štapa [23]. Kasnije su tu ideju prihvatili i mnogi drugi autori [1, 9, 23-27]. Metoda dijagonalnog štapa razvijena je na razne načine. Ona još uvijek nudi rezultate koji su podudarni s eksperimentalnim ispitivanjima, što dokazuje njezinu djelotvornost i opravdava njenu primjenu u nekim programima koji se koriste kako u istraživačke svrhe tako i u inženjerskoj praksi [11, 20, 27-33]. Sada se metoda dijagonalnog štapa primjenjuje u nekim seizmičkim propisima poput onih koje je objavila Savezna agencija za upravljanje u izvanrednim okolnostima (Federal Emergency Management Agency) i Vijeće za primijenjenu tehnologiju (Applied Technology Council) [34, 35]. Predložena metoda koeficijenta učinkovitosti nije primjenjiva u slučajevima kada dolazi do ranog otkazivanja konstrukcije MIFS. To se može uočiti u zidnom panelu (u obliku gnječenja donjeg ruba panela, klizanja zidnih elemenata, otkazivanja izvan ravnine itd.) ili u elementima samog okvira (u obliku posmičnog sloma spoja grede i stupa zbog nedostatne količine poprečne armature ili zbog loše kakvoće betona, zatim gubitak prijanjanja armature zbog proklizavanja uzdužnih šipaka stupa u vlaku itd.). Osim toga, metoda IP ne može se primjenjivati kada dođe do sloma uslijed savršenog horizontalnog klizanja zidnog panela. U tom slučaju dolazi do formiranja plastičnih zglobova duž raspona a ne na krajevima AB elemenata.

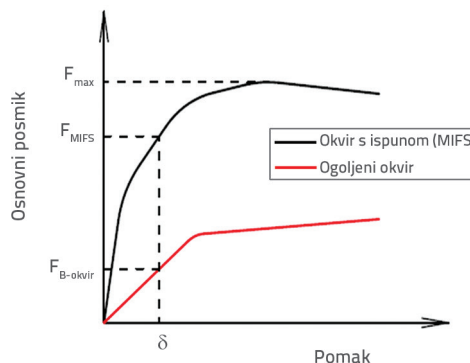
Koeficijenti učinkovitosti koji se trebaju izračunavati u okviru predložene metode jesu: koeficijent učinkovitosti za nosivost ($IP_{Strength}$), za bočnu krutost ($IP_{Stiffness}$) te za sposobnost disipacije energije ($IP_{D-Energy}$).

2.1. Koeficijent učinkovitosti za nosivost ($IP_{Strength}$)

U izračunavanju vrijednosti $IP_{Strength}$ za MIFS potrebno je predvidjeti nekoliko koraka. U prvom se koraku izračunavaju i grafički prikazuju krivulje kapaciteta i to kako za sustav MIFS tako i za njegov ogoljeni okvirni sustav (bez ispune). Pri svakom pomaku δ tih krivulja može se odrediti par sila ($F_{MIFS}(\delta)$, $F_{Bare Frame}(\delta)$), pri čemu su $F_{MIFS}(\delta)$ i $F_{Bare Frame}(\delta)$ sile odziva MIFS-a tj. ogoljenog okvirnog sustava, slika 2.

Na temelju spomenutog principa superpozicije, određuje se doprinos zidane ispune $F_{Masonry}$ u nosivosti konstrukcije i to pri pomaku δ :

$$F_{Masonry}(\delta) = F_{MIFS}(\delta) - F_{Bare frame}(\delta) \tag{1}$$



Slika 2. Parametri za ocjenjivanje IP nosivosti

Koeficijent učinkovitosti konstrukcije MIFS u pogledu nosivosti ($IP_{Strength}$) definira se kao:

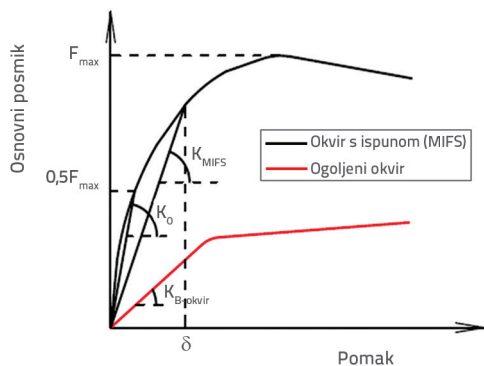
$$IP_{Strength} = \frac{F_{Masonry}(\delta)}{F_{Max}} \tag{2}$$

gdje je F_{max} maksimalna nosivost MIFS-a.

Ovaj koeficijent označava udio utjecaja zidnog panela u ukupnoj nosivosti konstrukcije MIFS pri pomaku δ . Osim toga, treba naglasiti da s porastom tog koeficijenta raste i učinkovitost zidnog panela u području ovijanja. Vrijednost $IP_{Strength}$ može se izračunati za svaki pomak δ krivulje kapaciteta, a dobiva se variranje vrijednosti $IP_{Strength}$ u odnosu na pomak na vrhu. Variranje vrijednosti $IP_{Strength}$ u funkciji pomaka posljedica je smanjenja nosivosti zidnog panela tijekom kontroliranog postupnog pomaka pri opterećivanju MIFS-a.

2.2. Koeficijent učinkovitosti za krutost ($IP_{Stiffness}$)

Krutost je drugi značajan parametar koji određuje ponašanje zidnog panela. Kako se sustav uobičajeno nalazi u nelinearnom području, ovaj se parametar određuje pomoću sekantne krutosti KO MIFS-a (slika 3.).



Slika 3. Parametri za određivanje IP krutosti

Koeficijent učinkovitosti MIFS-a u pogledu krutosti $IP_{Stiffness}$ izračunava se primjenom iste analogije kao i kod parametra nosivosti $IP_{Strength}$. U slučaju potresnog opterećenja, MIFS se pri manjim deformacijama (prije odvajanja ispune) ponaša kao monolitan element. Sustav se promatra kao zid s upetim krajem, a početna krutost jednokatnog jednobrodnog okvirnog panela s ispunom izračunava se tako da se u obzir uzmu i posmične i savojne deformacije ekvivalentnog poprečnog presjeka panela. U prvoj se fazi krutost MIFS-a izračunava kao:

$$K_{MIFS} = \left(\frac{h_{frame}}{12EI_e} + \frac{\kappa h}{GA_e} \right)^{-1} \tag{3}$$

gdje je:

- h - visina okvira tj. ispune
- E, G - modul elastičnosti, tj. modul posmika ispune
- I_e, A_e - ekvivalentni moment tromosti tj. ekvivalentna površina spregnutog horizontalnog poprečnog prejeka MIFS-a
- κ - posmični koeficijent (1,20 za pravokutni poprečni presjek).

U drugoj fazi (nakon odvajanja ispune), zidana ispuna djeluje u konstrukciji kao dijagonalni tlačni štap. Dakle, krutost MIFS-a izračunava se kao okvir s dijagonalnim pridržanim štapom. Mehanizam sloma ispune osnovni je parametar koji određuje širinu dijagonalnog štapa. U ovom slučaju se krutost MIFS-a može izračunati kao suma krutosti okvira i krutosti dijagonalnog štapa [38]. Za izračun vrijednosti $IP_{Stiffness}$ nije prikladno usvojiti krutost MIFS-a prije odvajanja zidanog panela kao početnu krutost za proračun [25]. U Eurokodu 8 pojednostavljeni se izrazi koriste za ocjenjivanje početne elastične krutosti, koja ovisi o elastičnoj krutosti ogoljene konstrukcije okvira i o mehaničkim karakteristikama zida [39]. U ovom je radu početna krutost K_0 koja se koristi za izračunavanje vrijednosti $IP_{Stiffness}$ određena nagibom linije koja spaja ishodište i 50 % maksimalne otpornosti MIFS-a [21] (slika 3.). Krutost zidane ispune izračunava se kako slijedi:

$$K_{Masonry}(\delta) = K_{MIFS}(\delta) - K_{Bare\ frame}(\delta) \tag{4}$$

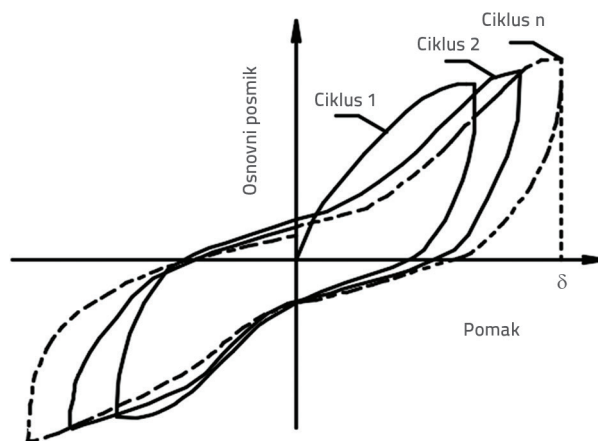
Koeficijent učinkovitosti MIFS-a za krutost $IP_{Stiffness}$ definira se na sljedeći način:

$$IP_{Stiffness}(\delta) = \frac{K_{Masonry}(\delta)}{K_0} \tag{5}$$

Vrijednost $IP_{Stiffness}$ odraz je razine oštećenosti panela pri pomaku (δ). Visoka vrijednost $IP_{Stiffness}$ znak je značajnog sudjelovanja ispune u krutosti MIFS-a, čime se smanjuje međukatni pomak ali se povećava seizmičko djelovanje na konstrukciju. Dakle, ocjena ponašanja MIFS-a u pogledu krutosti ne može se donijeti neovisno o dinamičkim karakteristikama seizmičkog opterećenja.

2.3. Koeficijent učinkovitosti za disipaciju energije ($IP_{D-Energy}$)

Okvirna AB konstrukcija sa zidanom ispunom odlikuje se kratkim elastičnim odzivom. Najveću količinu ulazne seizmičke energije preuzima zidni panel u poslijeelastičnom području, i to prije svega kroz pojavu pukotina ili gnječenje zidane ispune te trenjem na kontaktu između okvira i zida. Disipacija energije ocjenjuje se pomoću cikličnih ili dinamičkih ispitivanja, slika 4. Energija MIFS-a disipirana u svakom ciklusu predstavlja površinu unutar histerezne krivulje, slika 5. Podatak o kumulativnoj disipiranoj energiji također je koristan parametar za ocjenjivanje stupnja oštećenosti MIFS-a. U slučaju pokusa uvođenjem prisilnog pomaka, ovaj parametar ne upućuje na stvarno oštećenost konstrukcije.

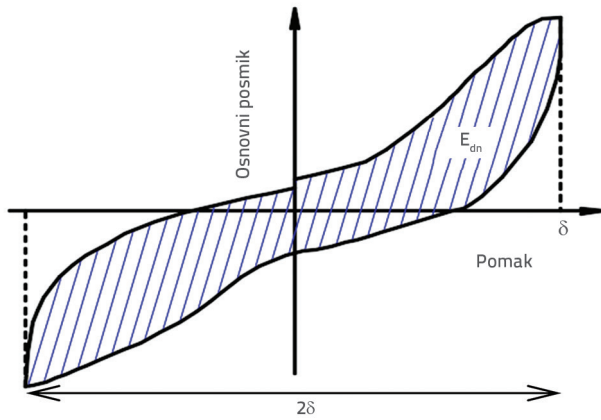


Slika 4. Tipična krivulja cikličnog ispitivanja MIFS-a

Kako bi se dobio reprezentativan prikaz oštećenosti konstrukcije, predlažemo da se energija disipirana u svakom ciklusu podijeli s ukupnim pomakom [38] (slika 5.).

Korigirana vrijednost kumulativne disipacije energije MIFS-a i odgovarajućeg ogoljenog okvira određuje se kako slijedi:

$$\bar{E}_{d(MIFS)}(\delta_i) = \sum_{i=1}^n \frac{E_{di(MIFS)}}{2\delta_i} \tag{6}$$



Slika 5. Parametri za ocjenjivanje koeficijenta učinkovitosti za disipiranje energije (IPD-Energy)

$$\bar{E}_d (Bare frame)(\delta_i) = \sum_{i=1}^n \frac{E_{di} (Bare frame)}{2\delta_i} \quad (7)$$

Dakle, koeficijent učinkovitosti za disipaciju energije $IP_{D-Energy}$ izračunava se ovako:

$$IP_{D-Energy}(\delta_i) = \frac{\bar{E}_d (MIFS)(\delta_i) - \bar{E}_d (Bare frame)(\delta_i)}{\bar{E}_d (MIFS)(\delta_i)} \quad (8)$$

Vrijednost IPD-Energy smatra se dodatnim pokazateljem učinkovitosti ispune. Visoka vrijednost IPD-Energy upućuje na visok stupanj oštećenosti zidanog panela. Preostali dio energije prenosi se na obodne AB okvire. Kako se smatraju sekundarnim konstrukcijskim elementom, zidane ispune mogu se popraviti ili zamijeniti novim panelima, za razliku of AB okvira kod kojih se trebaju primijeniti složeni postupci sanacije.

3. Numerička primjena

U ovom se poglavlju predložena metoda primjenjuje za ocjenjivanje i uspoređivanje učinkovitosti sustava MIFS. U tu svrhu korišteni rezultati eksperimentalnih ispitivanja prikazanih u odgovarajućoj literaturi. Takva eksperimentalna ispitivanja obuhvaćaju:

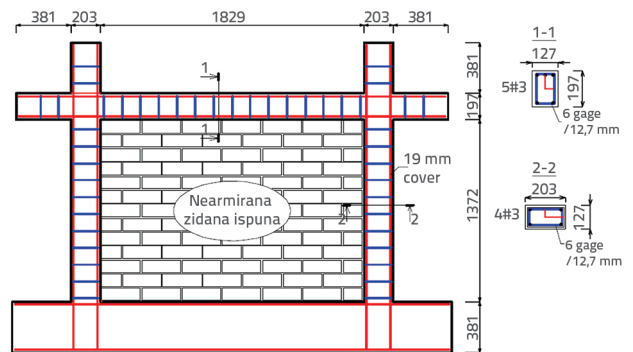
- istraživački program proveden u Laboratorijima za građevinska istraživanja (USA) s naglaskom na analizu seizmičke oštjetljivosti MIFS-a [43]
- istraživački program proveden u Građevinskom laboratoriju Sveučilišta u Canterburyju kao dio doktorske radnje [20].

Tablica 3. Mehaničke karakteristike armature

Granica popuštanja f_y [MPa]	Modul elastičnosti E_m [GPa]	Deformacija pri popušanju ϵ_y	Čvrstoća f_{su} [MPa]	Deformacija pri slomu ϵ_{su}
341,3	200	0,0017	544,7	0,10

3.1. Simulacija eksperimentalnog ispitivanja za ocjenu koeficijenta učinkovitosti

Prva numerička primjena provedena je kako bi se provjerio numerički model uspoređivanjem s eksperimentalnim rezultatima, te definirao tipičan primjer za proračun vrijednosti IP za MIFS. Provedena su statička nelinearna ispitivanja. Razmatrani su rezultati ispitivanja jednobrodnih jednokatnih uzoraka u mjerilu 1 : 2. Uzorci odgovaraju modelu br. (1) (uzorak ogoljenog okvira bez ispune) i modelu br. (2) (s nearmiranom zidanom ispunom s betonskim blokovima, eng. *Concrete Masonry Unreinforced - CMU*) iz eksperimentalnog programa [43]. Geometrijske karakteristike i raspored armature na uzorku prikazani su na slici 6. Analizirani eksperimentalni podaci prikazani su u tablicama 1., 2. i 3.



Slika 6. Geometrija i raspored armature prema [43]

Tablica 1. Mehaničke karakteristike zidane ispune

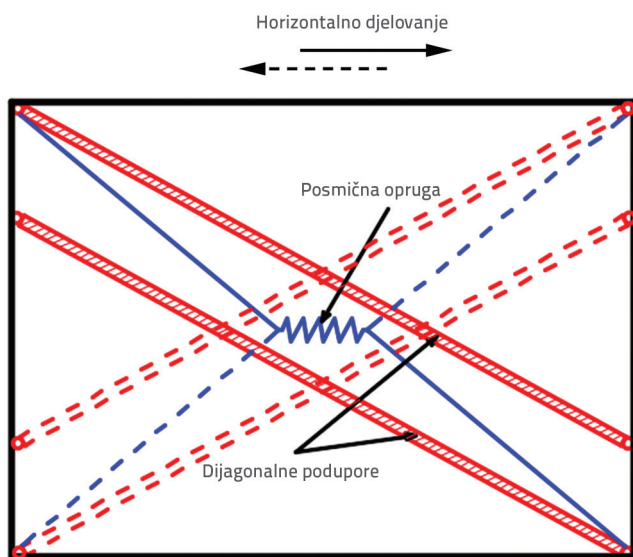
Srednja tlačna čvrstoća f'_m [MPa]	Posmična čvrstoća f'_v [MPa]
18,154	1,551

Tablica 2. Mehaničke karakteristike betona

Srednja tlačna čvrstoća f'_m [MPa]	Modul elastičnosti E_m [GPa]
38,438	29,992

Uzorci su ispitani nanošenjem monotonog opterećenja u ravni zida. Korištena je bočna razupora kako bi se onemogućili pomaci izvan ravnine. Ocjenjivanje varijabilnosti koeficijenta IP uzoraka provedeno je pomoću numeričkih modela baziranih na uspoređivanju s eksperimentalnim rezultatima. Numerički rezultati dobiveni su pomoću programa za analizu konačnih elemenata SeismoStruct 2016 [40]. Elementi stupova i greda

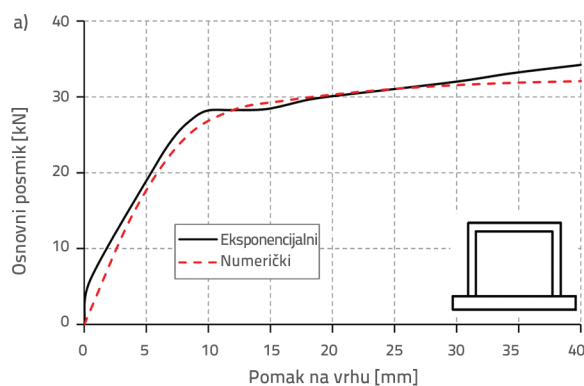
modelirani su kao nelinearni okvirni elementi, a njihovi poprečni presjeci diskretizirani su u vlakna. Ova metoda omogućuje automatsko i prihvatljivo točno izračunavanje mehaničkih svojstava elemenata. Broj vlakana svakog presjeka odabran je proizvoljno. Projektiranje počinje s brojem vlakana koji iznosi A/A_s , gdje je A poprečni presjek AB elementa dok je A_s površina armaturne šipke. Konačan broj vlakana definiran je iteracijama i kalibracijom s eksperimentalnim rezultatima. Panel zidane ispune uveden je u program pomoću elementa makromodela. Taj element sastoji se od dva paralelna štapa i posmične opruge u svakom smjeru [8], slika 7.



Slika 7. Detalji makromodela korištenog za predstavljanje zidanog ispunskog panela

Pravilo savršenog elastično-plastičnog ponašanja primijenjeno je za definiranje ponašanja posmične opruge. Elastična krutost K_s posmične opruge određena je izrazom (9):

$$K_s = \gamma_s \frac{A_m E_m}{d_m} \cos^2 \theta \tag{9}$$



gdje su: A_m i d_m površina ekvivalentnog dijagonalnog štapa i dijagonalna dužina panela. E_m je modul elastičnosti zidane ispune, θ je kut nagiba dijagonalnog štapa, a γ_s je koeficijent udjela posmične opruge u ukupnoj krutosti zidanog panela [8]. Površina ekvivalentne dijagonale usvojena je kao varijabilna funkcija koja ovisi o osnom pomaku štapa. Početna vrijednost A_m izračunava se kao:

$$A_0 = t b_w \tag{10}$$

gdje je: t debljina zidnog panela, a b_w je širina ekvivalentnog dijagonalnog štapa definirana pomoću izraza koji predlaže Mainstone [26].

Posmična je čvrstoća predstavljena pomoću Mohr-Coulombovog kriterija prema kojem se tlačno naprezanje izračunava automatski na temelju dijagonalnih elemenata. Karakteristike posmične čvrstoće ocijenjene su prema teoriji Manna i Mullera [40]. Modificirana početna vrijednost posmične čvrstoće iznosi 0,42 MPa, a koeficijent trenja je 0,30. Posmična čvrstoća ograničena je vrijednošću τ_m koja se izračunava prema izrazu (11):

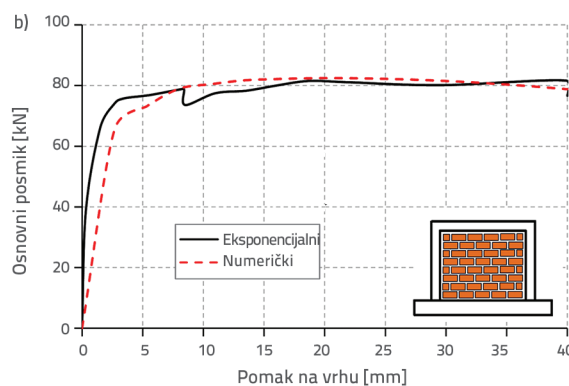
$$\tau_m = \frac{f'_{tb}}{2.3} \sqrt{1 + \frac{f_n}{f'_{tb}}} \tag{11}$$

gdje je: f_n normalno naprezanje koje djeluje na zidu dok je f_{tb} vlačna čvrstoća zida [40].

Elastična osna krutost dijagonalnih štapova K_a definirana je kako slijedi:

$$K_a = \frac{(\gamma_s - 1) A_m E_m}{2 d_m} \tag{12}$$

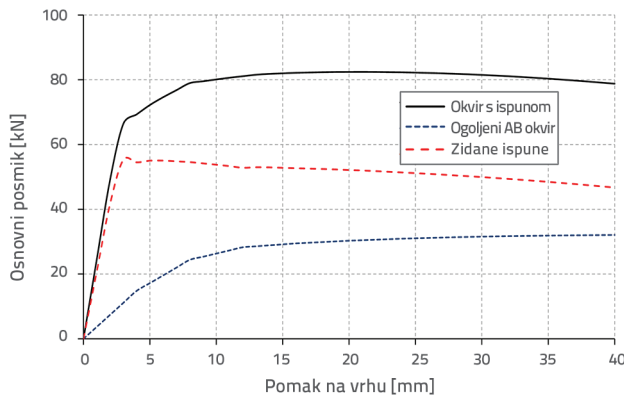
Oсно naprezanje ograničeno je tlačnom čvrstoćom ispune koja se izračunava pomoću $\theta = 36,87^\circ$, a ta vrijednost označava dijagonalni kut zidanog panela. Usvojeno je da tlačna čvrstoća iznosi $f'_{m\theta} = 2,00$ MPa. Ostali bitni parametri numeričkog modela zidane ispune su:



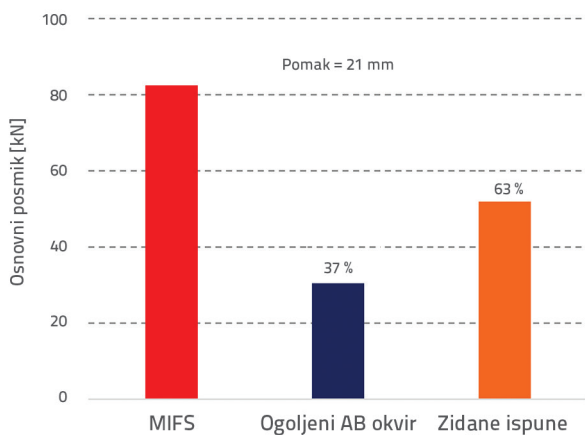
Slika 8. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata: a) ogoljeli okvir, b) MIFS

- granična deformacija pri slomu, $\epsilon_u = 0,03$
- smanjenje deformacije u zoni dijagonalnog štapa, $\epsilon_1 = 0,0005$
- zaostala deformacija u zoni dijagonalnog štapa, $\epsilon_2 = 0,01$
- udio krutosti koji se pripisuje posmiku, 50 %.

Provedene su statičke nelinearne analize, a usporedbe eksperimentalnih i numeričkih rezultata iskazane su na slici 8. Krivulje prikazane na toj slici pokazuju odnos posmika pri dnu (base shear) u odnosu na pomak vrha svakog uzorka. Iskazani numerički rezultati podudarni su s eksperimentalnim, i to naročito u pogledu parametra koji se odnosi na kapacitet. U slučaju MIFS-a, uočava se manja razlika za pomake vrha manje od 2,00 mm (što odgovara 0,15 % visine uzorka). Nakon tog stupnja pomaka, numeričke i eksperimentalne krivulje su gotovo podudarne. Superpozicijom se može izračunati sudjelovanje zidane ispune u preuzimanju ukupnog posmika pri svakom stupnju pomaka i to pomoću formule (1). Sudjelovanje pojedinačnih komponenata MIFS-a u ukupnom preuzimanju posmika prikazano je na slici 9.



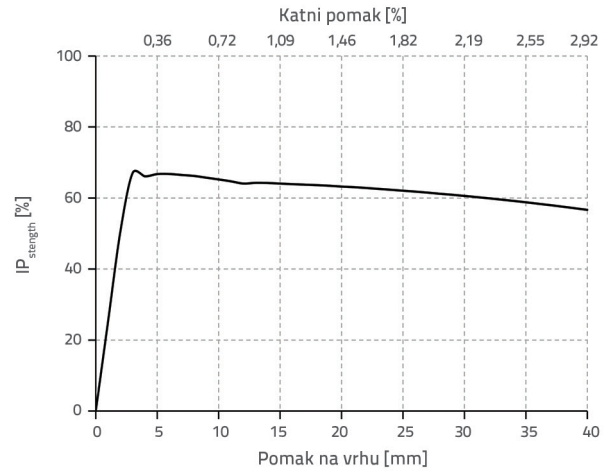
Slika 9. Promjena sudjelovanja komponenata u nosivosti MIFS-a



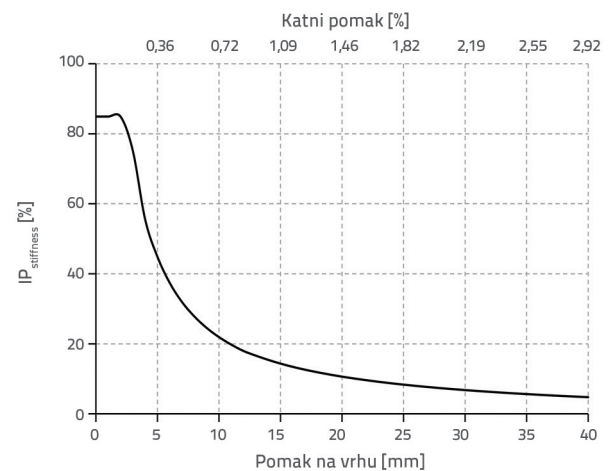
Slika 10. Sudjelovanje komponenata MIFS-a pri maksimalnoj sili MIFS-a

Na slici 10. može se vidjeti da je sudjelovanje zidane ispune bitno te da prelazi 63 % nosivosti MIFS-a kada pomak na vrhu iznosi 21,00 mm. To potvrđuje da se panel zidane ispune treba

uzeti u obzir kao konstrukcijski element u seizmičkoj ocjeni MIFS-a. Primjenom izraza (2), na slici 11. prikazana je varijacija vrijednosti $IP_{Strength}$ u odnosu na vršni pomak.



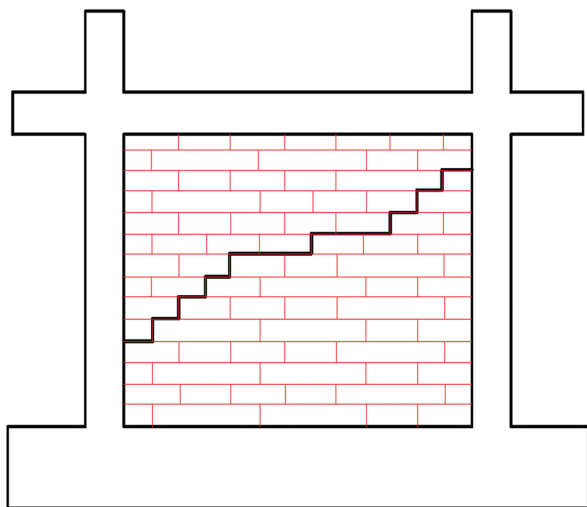
Slika 11. Varijacija vrijednosti $IP_{Strength}$ za MIFS



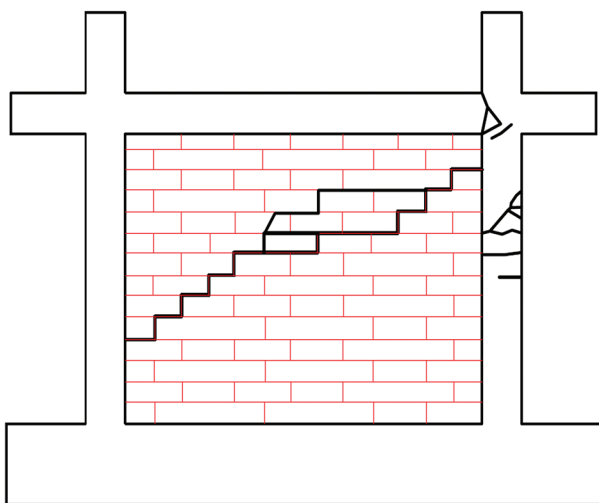
Slika 12. Varijacija vrijednosti $IP_{Stiffness}$ za MIFS

Rezultati na slici 11. pokazuju da vrijednost $IP_{Strength}$ za MIFS raste pri vrlo malim vrijednostima pomaka, te da maksimalnu vrijednost (od otprilike 67 %) postiže pri pomaku vrha uzorka od 3,00 mm. Ovaj pomak odgovara 0,22 % visine uzorka, što praktički predstavlja gornju granicu stanja manjeg oštećenosti te početak stanja srednjeg oštećenosti. Notting pokazuje da se granica svakog stanja oštećenosti MIFS-a može iskazati odgovarajućim intervalom pomaka [44]. S druge strane, vrijednost $IP_{Stiffness}$ ostaje nepromijenjena (otprilike 85 %) u stanju manjeg oštećenosti, što objašnjava formiranje dijagonalnog štapa u zidu bez znatnih pukotina u ispuni (slika 12). Nakon pomaka vrha od 3,00 mm, vrijednost $IP_{Stiffness}$ bitno se smanjuje u odnosu na vrijednost $IP_{Strength}$ koja i dalje postupno raste do kraja ispitivanja. Ovdje je značajno napomenuti da nakon pomaka vrha od 3,00 mm (0,22 % visine uzorka) te unatoč malom smanjenju vrijednosti $IP_{Strength}$, krivulja kapaciteta MIFS-a i dalje raste do 20

mm pomaka na vrhu (1,46 % visine uzorka). U rasponu od 0,22 % i 1,46 % visine uzorka, višak naprezanja koje se nanosi na ispunu, prenosi se na AB okvir. Na slici 13. vidi se pojava dijagonalnih pukotina u zidnom panelu bez vidljivih pukotina na elementima okvira. Pri pomaku od 1,46 % visine uzorka, numerički rezultati upućuju na početak pada posmične nosivosti MIFS-a. To je u skladu s eksperimentalnim rezultatima (slika 14.) koji upućuju na pojavu pukotina u AB elementu stupa.



Slika 13. Analiza pukotina na MIFS-u (pri pomaku vrha od 0,73 % visine uzorka)

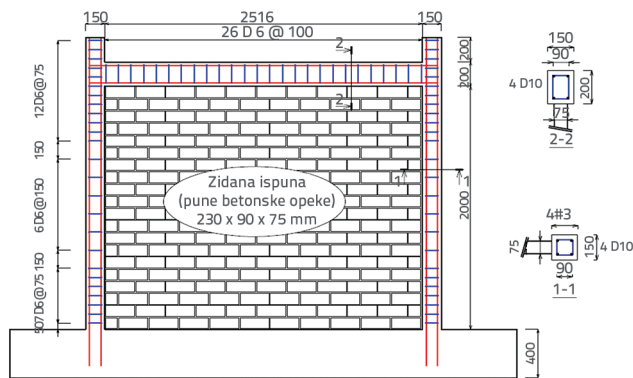


Slika 14. Analiza pukotina na MIFS-u (pri pomaku vrha od 1,38 % visine uzorka)

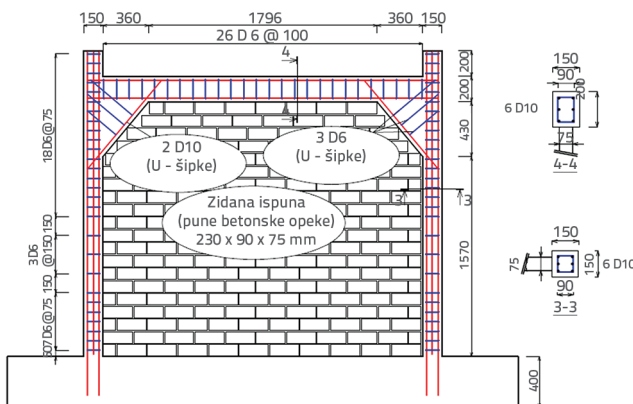
3.2. Koeficijenti učinkovitosti MIFS-a s vutama

U ovom se dijelu obrađuje ponašanje MIFS-a s vutama primjenom odgovarajućih koeficijenata učinkovitosti. U ovoj se analizi koriste dva različita uzorka u mjerilu 3:4. U eksperimentu

su oba uzorka/elementa izvedena s punom ispunom. Prvi je element duktilna konstrukcija s jednobrodnom jednokatnim AB okvirima s ispunom. Geometrijske karakteristike i odgovarajući raspored armature prvog elementa prikazani su na slici 15. Ukupne dimenzije drugog elementa iste su kao i kod prvog uzorka ali se elementi razlikuju po armaturi (slika 16.).



Slika 15. Geometrija i raspored armature prvog elementa (jednostavna konstrukcija MIFS)

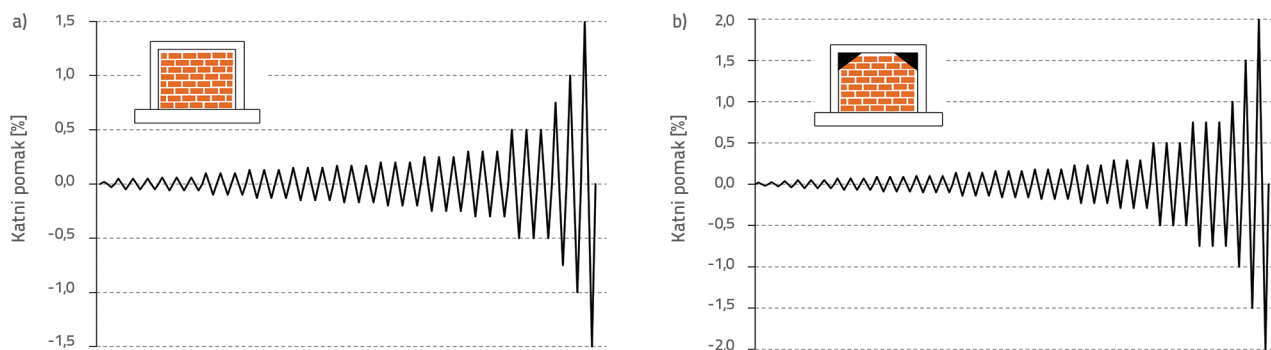


Slika 16. Geometrija i raspored armature drugog elementa (MIFS s vutama)

Drugi je element projektiran s vutama na spojevima grede i stupa. Odabrani je nagib vuta drugog elementa tako da su okomite u odnosu na dijagonalu zidnog panela [20]. Zidni paneli oba uzorka nisu projektirani za preuzimanje gravitacijskog opterećenja, koje se izravno prenosi na stupove. U simulaciji je vertikalno konstantno opterećenje od 20 kN nanoseno na vrh svakog stupa tih uzoraka. Bočno su na svaki uzorak nanosena kvazistatička opterećenja kako bi se odredila njihova nosivost i pad njihove krutosti.

Na slici 17. prikazan je odnos kontroliranog pomaka i opterećenja prvog elementa i drugog elementa s maksimalnim pomakom vrha uzorka od 1,5 % tj. 2,0 % visine uzorka.

U tablicama 4., 5. i 6. prikazane su materijalne karakteristike uzoraka dobivene na temelju laboratorijskih ispitivanja [20].



Slika 17. Tipični ciklični bočni pomak uzoraka: a) Prvi element, b) Drugi element

Tablica 4. Mehaničke karakteristike zidane ispune

Tlačna čvrstoća f'_m [MPa]	Modul elastičnosti E_m [MPa]	Početna posmična čvrstoća τ_0 [MPa]	Koeficijent trenja μ
19,30	11550	0,41	0,7

Tablica 5. Mehaničke karakteristike betona

Elementi	Parametri	Tlačna čvrstoća f'_m [MPa]	Vlačna čvrstoća f'_t [MPa]	Modul elastičnosti E_m [GPa]
Prvi element		22,5	2,4	22,1
Drugi element		31,2	2,9	25,2

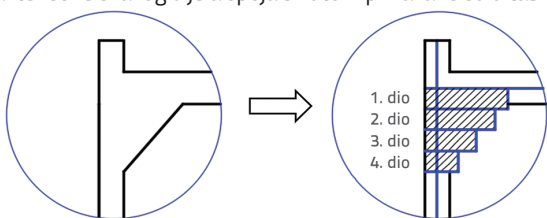
Tablica 6. Mehaničke karakteristike armature

Armatura	Parametri	Granica popuštanja f_y [MPa]	Modul elastičnosti E_m [GPa]	Deformacija pri popuštanju ϵ_y	Granična čvrstoća f_{su} [MPa]	Granična deformacija pri slomu ϵ_{su}
Φ 6 mm		353	207,6	0,0017	466	0,151
Φ 10 mm		323	201,9	0,0016	441	0,253

Tablica 7. Geometrijske karakteristike dijelova spoja s vutom

Vuta	Karakteristike	EA [kN]	EI (os-2) [kN/m ²]	EI (os-2) [kN/m ²]	GJ [kN/m ²]
Prvi dio		$1,83 \cdot 10^6$	$1,47 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^6$	$7,68 \cdot 10^5$
Drugi dio		$3,30 \cdot 10^4$	$1,73 \cdot 10^4$	$7,59 \cdot 10^3$	$2,43 \cdot 10^3$
Treći dio		$3,43 \cdot 10^3$	$2,77 \cdot 10^3$	$2,10 \cdot 10^3$	$1,44 \cdot 10^3$
Četvrti dio		$4,54 \cdot 10^3$	$3,44 \cdot 10^3$	$2,34 \cdot 10^3$	$1,25 \cdot 10^3$

Numerička simulacija provedena je pomoću programa SeismoStruct 2016 [40]. U drugom elementu, spoj s vutom je modeliran kao niz jednostavnih kratkih ogoljenih elemenata različitih geometrijskih karakteristika, kako je to prikazano na slici 18. Geometrijske karakteristike svakog dijela spoja s vutom prikazane su u tablici 7.

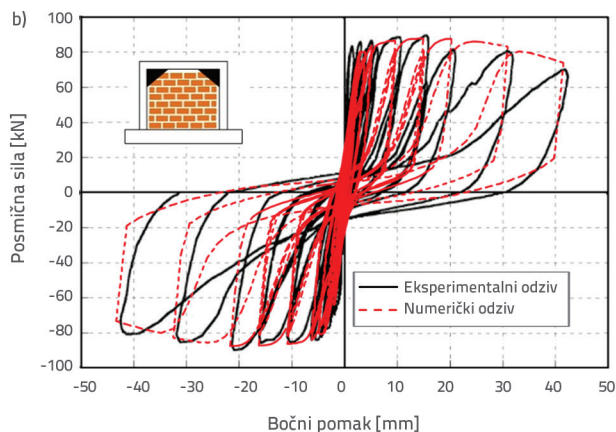
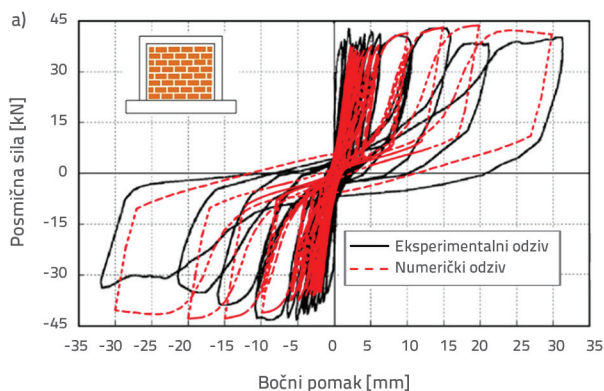


Slika 18. Jednostavna diskretizacija spoja s vutom grede i stupa

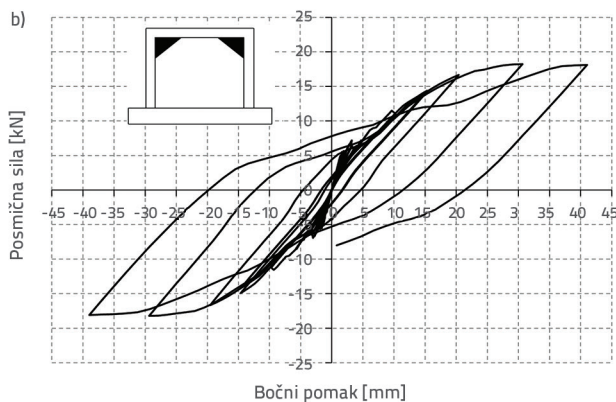
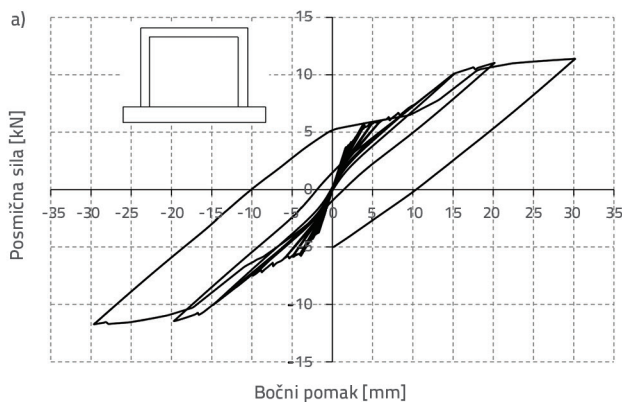
Numerički je model detaljnije prikazan u poglavlju 3.2. Usvojeno je da tlačna čvrstoća iznosi $f'_{m\theta} = 1,05$ MPa. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata prvog elementa i drugog elementa prikazana je na slici 19. Na toj se slici vidi dobra podudarnost između numeričkih simulacija i eksperimentalnih rezultata, ponajprije u pogledu parametara čvrstoće i disipacije energije. Međutim, kod oba elementa je uočena značajna razlika između numeričkih i eksperimentalnih rezultata u pogledu parametra krutosti u prvom ciklusu. U prvim stadijima malih pomaka takva je razlika očekivana jer eksperimentalna krivulja odražava ponašanje MIFS-a prije odvajanja zidnog panela od obodnog okvira. Međutim, numerička je simulacija bazirana na pretpostavci dijagonalne podupore, što odgovara ponašanju MIFS-a nakon odvajanja zidnog panela. Ova

razlika ne utječe značajno na projektiranje MIFS-a jer se tu radi o vrlo niskoj razini bočnog pomaka. Drugi zadatak za ocjenu koeficijenta učinkovitosti uzoraka bio je određivanje kvazistatičkog odziva ogoljenih AB okvira sa spojevima ili bez spojeva s vutom, za prvi element i za drugi element. Odgovarajući ogoljeni AB okviri opterećeni su za isti bočni pomak, kako je to prikazano na slici 17. Kako nije bilo eksperimentalnih ispitivanja, odziv odgovarajućih ogoljenih AB

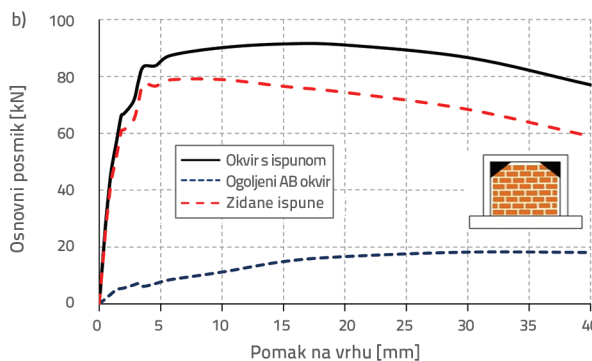
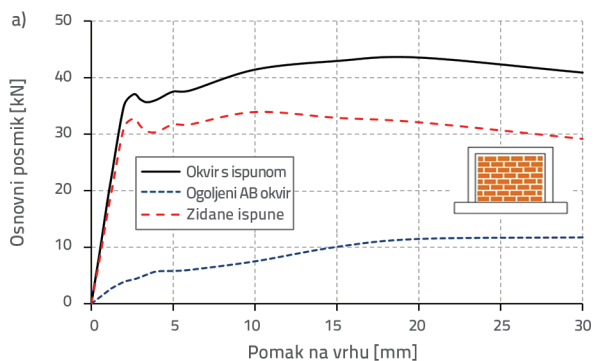
okvira izračunan je numerički. Na slikama 20.a i 20.b prikazan je numerički kvazistatički odziv ogoljenih AB okvirnih sustava za Element 1 i za Element 2. Određen prema načelu superpozicije, udio zidnog panela u nosivosti uzorka može se ocijeniti prema izrazu (1). Rezultati su grafički prikazani na slici 21. Numerički rezultati prikazani na slikama 22.a i 22.b ukazuju na bitan porast bočne nosivosti MIFS-a sa spojevima s vutama. Taj porast iznosi 110 % čvrstoće MIFS-a jednostavne konstrukcije.



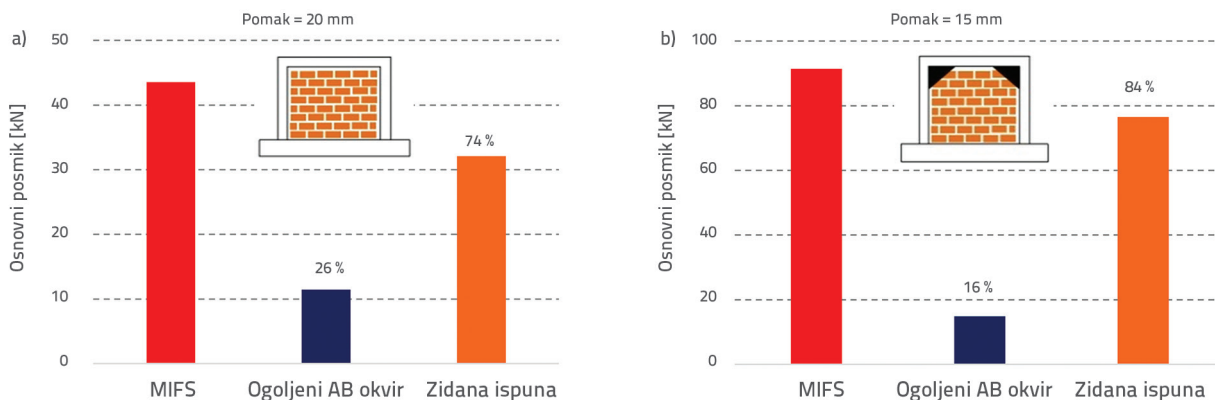
Slika 19. Usporedba numeričke simulacije i eksperimentalnih rezultata: a) Prvi element - jednostavni MIFS; b) Drugi element - MIFS sa spojevima s vutama



Slika 20. Numerički kvaziciklični odziv ogoljenog AB okvirnog sustava za: a) Prvi element - jednostavni MIFS; b) Drugi element - MIFS sa spojevima s vutama

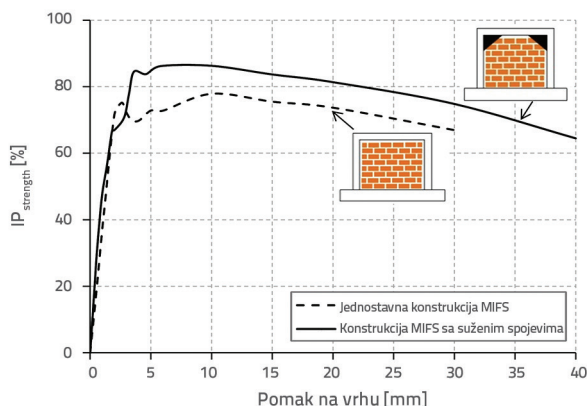


Slika 21. Numerički rezultati: variranje udjela u nosivosti komponenta MIFS: a) Prvi element - jednostavni MIFS; b) Drugi element - MIFS sa spojevima s vutama



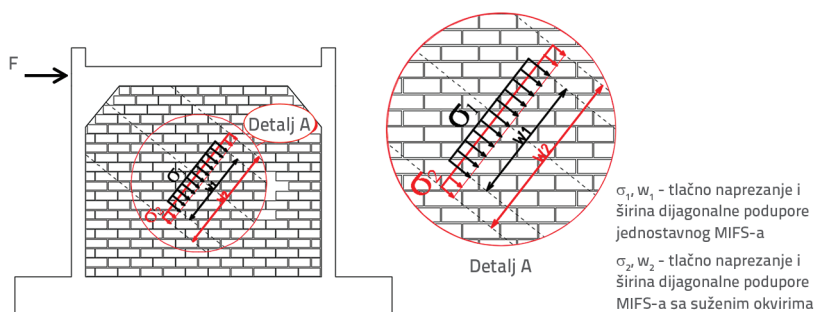
Slika 22. Numerički rezultati: maksimalni udio u nosivosti komponenta MIFS: a) Prvi element - jednostavni MIFS; b) Drugi element - MIFS sa spojevima s vutama

Prema izrazu (2), variranje veličine $IP_{Strength}$ može se za oba uzorka ocijeniti u funkciji pomaka na vrhu. Rezultati su regrupirani i grafički prikazani na slici 23.



Slika 23. Usporedba variranja vrijednosti $IP_{Strength}$ za: prvi element - jednostavni MIFS, i drugi element - MIFS sa spojevima s vutama

Pri malom pomaku, oba sustava imaju iste vrijednosti $IP_{Strength}$ zbog monolitnog ponašanja zidane ispunne i obodnog okvira (prva faza). Nakon odvajanja zidane ispunne (druga faza) maksimalna vrijednost $IP_{Strength}$ postiže se rano (pri pomaku od 5,8 mm) za MIFS sa spojevima s vutama, tj. ranije nego kod $IP_{Strength}$ za jednostavni MIFS, gdje se maksimalna vrijednost



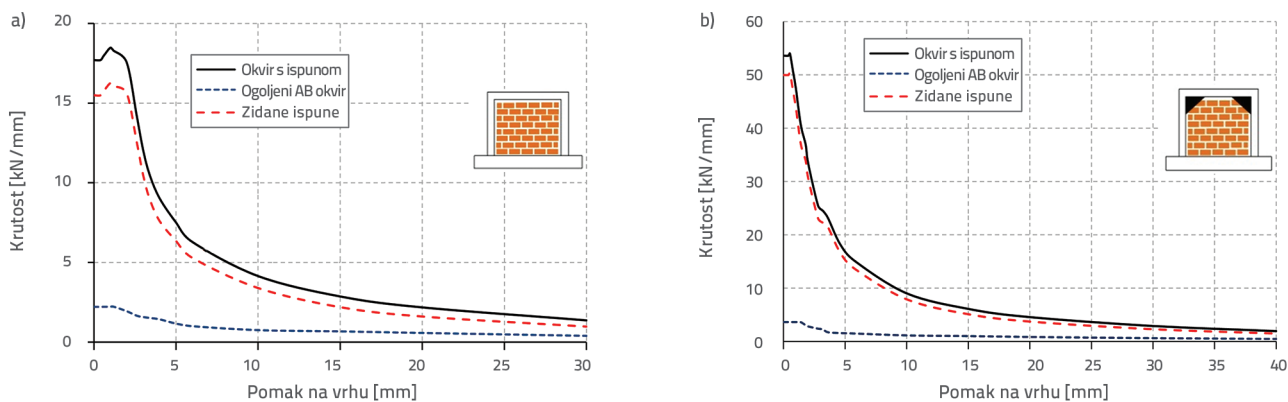
Slika 24. Dijagonalno tlačno naprezanje zidane ispunne sa spojevima s vutama

(78 %) postiže pri pomaku od 10 mm. To znači da konstrukcija sa suženim spojem bitno poboljšava ponašanje zidane ispunne u smislu nosivosti, dok s druge strane duktilnost MIFS-a opada. Poboljšanje vrijednosti $IP_{Strength}$ kod MIFS-a sa spojevima s vutama posljedica je povećanja širine ekvivalentnog tlačnog štapa razvijenog u ispunskom panelu. Povećanje širine dijagonalnog štapa dovodi do smanjenja tlačnog naprezanja te do boljšeg prijenosa bočnih opterećenja s AB okvira na zidanu ispunu, kako je to prikazano na slici 24. U tablici 8. vidimo da je širina ekvivalentnog dijagonalnog štapa MIFS-a sa spojevima s vutama otprilike tri puta veća nego u slučaju jednostavnog MIFS-a.

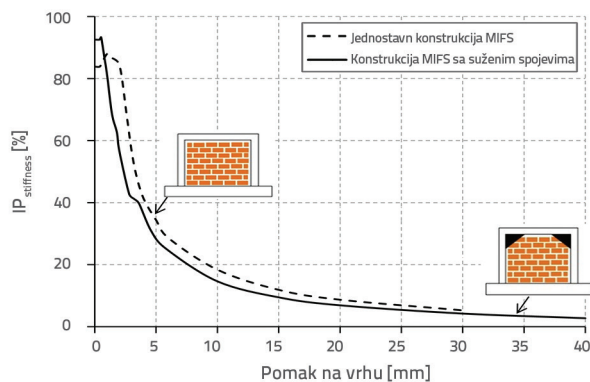
Tablica 8. Geometrijske karakteristike ekvivalentnog dijagonalnog štapa

MIFS	Štap	Širina ekvivalentnog dijagonalnog štapa [m]
	Obični MIFS	0,40
	MIFS sa spojevima s vutama	1,33

Na slikama 25.a i 25.b prikazan je udio ogoljenog okvira i zidane ispunne u krutosti jednostavnog MIFS-a i MIFS-a sa okvirom s vutama. U oba slučaja, krivulja krutosti zidane ispunne bliska je krivulji krutosti MIFS-a što ponovno potvrđuje dominaciju ispunskog panela u globalnom ponašanju MIFS-a. Dijagrami prikazani na slici 25. također pokazuju da spojevi s vutama povećavaju krutost za otprilike tri puta u odnosu na krutost jednostavnog MIFS-a. Taj je rezultat očekivan jer je širina ekvivalentnog dijagonalnog štapa kod MIFS-a sa spojevima s vutama također za tri puta veća u odnosu na jednostavan MIFS (tablica 8.). Primjenom izraza (5) izračunava se variranje vrijednosti $IP_{Stiffness}$ za svaki element ovisno o pomaku na vrhu, što je ponovno grupirano na slici 26.



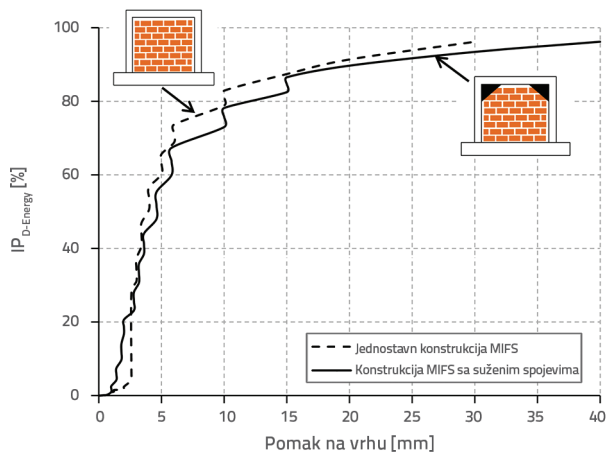
Slika 25. Numerički rezultati: variranje udjela u krutosti komponentata MIFS: a) Prvi element - jednostavni MIFS, b) Drugi element - MIFS sa spojevima s vutama



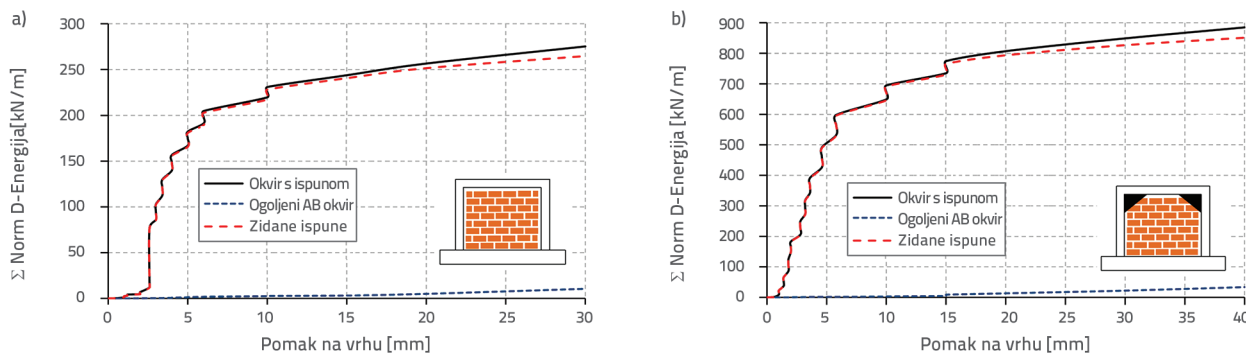
Slika 26. Usporedba variranja vrijednosti IPstiffness za: prvi element - jednostavni MIFS, i drugi element - MIFS sa spojevima s vutama

Krivulje IPstiffness za oba su sustava vrlo bliske kod svih vrijednosti pomaka. Dakle, vrijednosti IPstiffness ne mijenjaju se bitno bez obzira na značajno povećanje krutosti u slučaju spojeva s vutom. Drugim riječima, kada se koristi spoj s vutom, krutost ispunskog panela i MIFS-a povećava se u istoj mjeri. To dovodi do važne spoznaje: odnos između relativnih dinamičkih karakteristika (uglavnom se tu radi o prirodnoj frekvenciji vibriranja) MIFS-a i ispunskog panela praktički je jednak kada se koristi konstrukcija sa spojem s vutama. Potpun opis bočnog ponašanja MIFS-a dobiva se ocjenjivanjem normalizirane

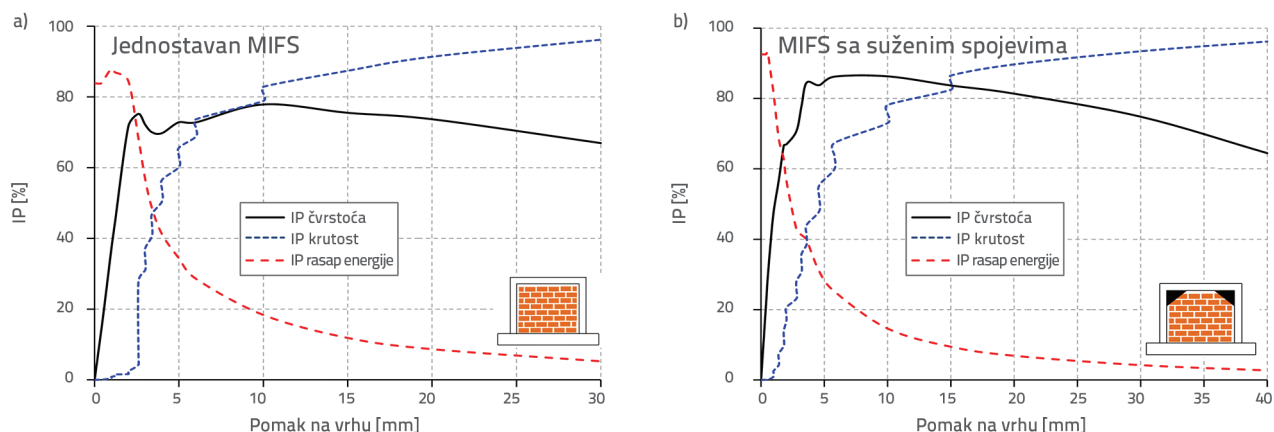
disipirane energije MIFS-a. Iako normalizirana disipirana energija nije odlučujući parametar za ocjenjivanje učinkovitosti MIFS-a, ona se ipak smatra dodatnim elementom koji ekspresivno upućuje na stanje oštećenosti konstrukcije. Na temelju prije opisanih rezultata nosivosti i krutosti, također se može očekivati bolje disipiranje energije nanosene bočnim silama kod MIFS-a sa spojevima s vutama. Variranje normalizirane disipirane energije uzorka prikazano je na slikama 27.a i 27.b.



Slika 28. Usporedba variranja vrijednosti IPD-Energy za: Prvi element - jednostavni MIFS, i Drugi element - MIFS sa spojevima s vutama



Slika 27. Numerički rezultati: variranje udjela IP u krutosti svake komponente MIFS-a: a) Prvi element - jednostavni MIFS; b) Drugi element - MIFS sa spojevima s vutama



Slika 29. Numerički rezultati: variranje udjela IP u MIFS-u: a) jednostavni MIFS, b) MIFS s okvirima s vutama

Tablica 9. Osnovni IP rezultati za prvi element - jednostavni MIFS i drugi element - MIFS sa spojevima s vutama

Koeficijent učinkovitosti (IP)	MIFS	Jednostavni MIFS	MIFS sa spojevima s vutama
Maksimalna vrijednost $IP_{Strength}$ [%]		77,88	86,20
Ciljani pomak pri maksimalnoj vrijednosti $IP_{Strength}$ [mm]		10,00	5,80
Vrijednost $IP_{Stiffness}$ pri ciljanom pomaku [%]		18,36	25,16
Vrijednost $IP_{D-Energy}$ pri ciljanom pomaku [%]		82,88	67,35

Tablica 10. Pregled stupnjeva oštećenosti s odgovarajućim katnim pomacima

Stupanj oštećenosti	Mala oštećenost	Srednja oštećenost	Znatna oštećenost	Rušenje
Katni pomak [%]	0,05-0,10	0,20-0,30	0,50 – 0,75	> 1,00

I prvi element i drugi element upućuju na dominantan udio ispunskog panela u disipiranju energije. Sposobnost disipiranja energije MIFS-a sa spojevima s vutama otprilike je tri puta veća od one zabilježene kod jednostavnog MIFS-a. Variranje parametra IPD-energy, koje se vidi na slici 28. pokazuje da su vrijednosti IPD-energy jednostavnog MIFS-a i MIFS-a sa spojevima s vutama uglavnom podudarne pri malom pomaku. To je u skladu sa spomenutom konvergencijom za IPStiffness. Karakterizacija ponašanja prikazana je u obliku grafikona na slici 29., gdje su za svaki uzorak zasebno iskazane vrijednosti variranja $IP_{Strength}$, $IP_{Stiffness}$ i $IP_{D-Energy}$.

Prema koeficijentu IP, parametar relativne nosivosti bitno se poboljšao za jednostavni MIFS i za MIFS sa spojem s vutama, ako ga usporedimo s ostalim parametrima kao što su krutost i trošenje energije. To se može objasniti činjenicom da je utjecaj AB okvira znatan kada se radi o nosivosti. Međutim, utjecaj zidane ispune dominantan je za krutost i trošenje energije. Osnovne vrijednosti koeficijenta IP za MIFS za spojeve s vutom i bez vute prikazane su u tablici 9.

Vrijednosti prikazane u tablici 9. pokazuju da konstrukcija sa spojem s vutama povećava udio zidane ispune u nosivosti sa 77,88 % na 86,20 %. Takav maksimalni doprinos zidane ispune zabilježen je na različitim vrijednostima bočnog pomaka za svaki uzorak: 10,00 mm za jednostavni MIFS tj. 5,80 mm za MIFS sa spojevima s vutama. Za svaki od tih ciljanih pomaka

poboljšana je udio ispunskog panela u krutosti za 18,36 % kod jednostavnog MIFS-a, tj. za 25,16 % kod MIFS-a sa spojevima s vutama. To znači da konstrukcija sa spojevima s vutama umanjuje oštećenost zidnog panela povećavanjem bočne krutosti i ograničavanjem bočnog pomaka MIFS-a. To potvrđuje i parametar trošenja energije koji također upućuje na smanjenje oštećenosti zidane ispune za 82,88 % kod jednostavnog MIFS-a, tj. za 67,35 % kod MIFS-a sa spojevima s vutama.

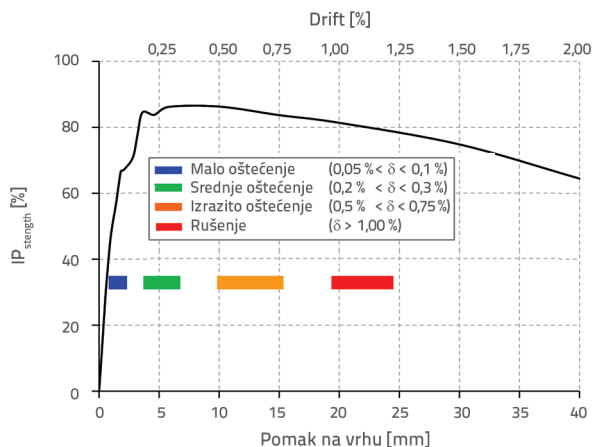
4. Seizmička provjera MIFS-a za $IP_{Strength}$

Uzimajući u obzir eksperimentalne pokazatelje, stanja oštećenosti MIFS-a mogu se iskazati pomoću intervala katnog pomaka kako je to navedeno u [44], vidi tablicu 10.

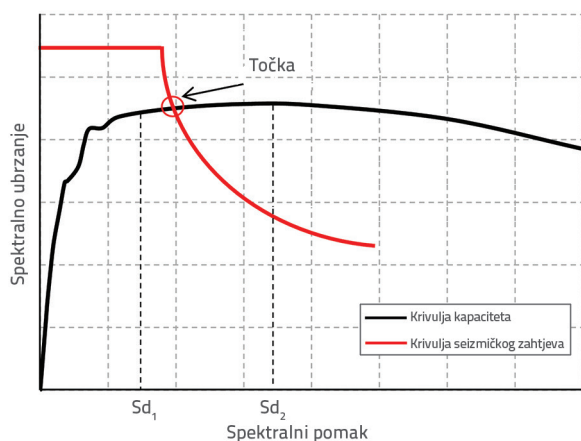
Odnos između variranja vrijednosti $IP_{Strength}$ i stupnja oštećenosti MIFS-a prikazan je u poglavlju 3.1 ovog rada. Na slici 30. prikazano je variranje vrijednosti $IP_{Strength}$ u odnosu na stupanj oštećenosti Drugog elementa (sa suženim spojem). Važna spoznaja utemeljena na ovoj krivulji je ta da su mala i srednja oštećenosti limitirana maksimalnim vrijednostima $IP_{Strength}$. Kada se postigne maksimalna vrijednost $IP_{Strength}$ dolazi do teškog oštećenosti MIFS, a to oštećenost postupno raste sve do sloma nakon katnog pomaka od 1,00 %.

Dakle, koeficijent učinkovitosti (IP) za nosivost može se koristiti za seizmičku verifikaciju MIFS-a i to tako da se provjeri nalazi li

se točka učinkovitosti (a to je sjecište krivulje kapaciteta i krivulje seizmičkog zahtjeva) u intervalu između Sd_1 i Sd_2 (slika 31.).



Slika 30. Stupnjevi oštećenosti MIFS-a VS $IP_{Strength}$



Slika 31. Seizmička verifikacija MIFS-a za $IP_{Strength}$

Na slici 31. sljedeće oznake iskazuju:

Sd_1 - spektralni pomak koji odgovara maksimalnoj vrijednosti $IP_{Strength}$

Sd_2 - spektralni pomak koji odgovara maksimalnoj vrijednosti posmika na dnu uzorka.

Početak oštećenja ispunskog panela prva je granica područja srednjeg oštećenosti. Usljed gubitka nosivosti zbog oštećenja sila se sa zidane ispune prenosi na AB okvirne elemente. Stoga, bez obzira na pad vrijednosti $IP_{Strength}$, nosivost na posmik konstrukcije MIFS raste sve do maksimalne nosivosti kod spektralnog pomaka od Sd_2 . Nakon toga dolazi do oštećenosti i ispune i okvira zbog povećanja bočnog pomaka na vrhu, a taj pomak raste sve do sloma MIFS-a.

4. Zaključak

Okvirne AB konstrukcije sa zidanom ispunom (MIFS) često se koriste u izvođenju nižih građevina kako u Alžiru tako i

u drugim državama diljem svijeta. Ako se u područjima visoke seizmičnosti takve građevine izvode bez ispunskih panela, to može dovesti do neželjenih posljedica te do preranog otkazivanja građevine. Primjena numeričkih simulacija u ocjenjivanju seizmičke učinkovitosti okvirnih AB konstrukcija sa zidanom ispunom još uvijek se smatra stvarnim izazovom i to zbog složenog ponašanja elemenata takvih konstrukcija. U ovom se radu za ocjenu učinkovitosti zidane ispune provodi simulacija s makromodelom zidanog panela koji je obrađen u programu baziranom na konačnim elementima.

Predložena je nova metoda za ocjenjivanje učinkovitosti ispunskih panela u okvirnim konstrukcijama, a zasniva se na definiranju koeficijenta učinkovitosti. Koeficijent učinkovitosti (IP) predstavlja udio zidanog panela u općem ponašanju okvirne AB konstrukcije sa zidanom ispunom. Indeksi učinkovitosti iskazuju se pomoću tri parametra, a to su: nosivost na bočna djelovanja, bočna krutost i sposobnost disipacije energije. Koeficijenti učinkovitosti se koriste za kontrolu fluktuacije sudjelovanja ispune u bočnom pomaku na vrhu građevine. Ta je metoda moćno sredstvo za odabiranje optimalnog projekta okvirne AB konstrukcije sa zidanom ispunom, i to u smislu postizanja boljeg odziva na seizmička opterećenja. Spomenuta se metoda ne primjenjuje kada se kod MIFS-a bilježi prerano otkazivanje njegovih komponenta ili kada kod panela postoji posmični mehanizam klizanja. U okviru tog mehanizma dolazi do formiranja plastičnih zglobova duž AB elementa, a ne na njegovim krajevima.

Ova se metoda koristi u analizi seizmičke učinkovitosti okvirnih AB konstrukcija s ispunom i sa spojem s vutama između stupa i grede, a ujedno se provodi i usporedba sa sličnim uobičajenim AB konstrukcijama s ispunom. Usporedba je pokazala da indeksi učinkovitosti konstrukcija sa spojem s vutama pokazuju bitno poboljšanje, posebice u pogledu nosivosti. Indeksi učinkovitosti naročito pokazuju da okvirne AB konstrukcije sa spojem s vutama (što nije općeprihvaćeno rješenje) zaslužuju primjenu u svojstvu prikladnog alternativnog rješenja koje omogućuje izbjegavanje preranog otkazivanja AB okvira s ispunom.

Indeksi učinkovitosti također se mogu koristiti za opravdavanje primjene okvirnih AB konstrukcija s ispunom u seizmičkim propisima, i to definiranjem zone srednjeg oštećenosti, ograničene spektralnim pomakom koji odgovara maksimalnoj vrijednosti $IP_{Strength}$ i maksimalnom posmiku na dnu konstrukcije. U budućim istraživanjima analizirat će se primjena metode IP u konstrukcijama MIFS za različite veličine i pozicije otvora, a ispitat će se i mogućnosti primjene sofisticiranijih modela.

Zahvala

Ovaj rad proveden je uz potporu Državnog istraživačkog centra za potresno inženjerstvo (CGS) u Alžiru.

LITERATURA

- [1] Smith, S.B.: Behavior of square infilled frames, *Journal of the Structural Division ASCE*, 92 (1966) 1, pp.381- 404.
- [2] Mehrabi, A.B, Shing, P.B.: Finite Element Modeling of Masonry-Infilled RC Frames, *Journal of Structural engineering*, 123 (1997) 5, pp. 604-613, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:5\(604\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:5(604))
- [3] Al-Chaar, G., Issa, M., Sweeney, S.: Behavior of masonry-infilled non-ductile reinforced concrete frames, *Journal of Structural engineering*, 128 (2002) 8. pp.1055-1063, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:8\(1055\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:8(1055))
- [4] Mosalam, K.H., Hashemi, A.: Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(2006) 14, pp. 1827-1852, <https://doi.org/10.1002/eqe.612>
- [5] Schwarz, S., Hanaor, A., Yankelevsky, D.Z.: Experimental Response of Reinforced Concrete Frames with AAC Masonry Infill Walls to In-plane Cyclic Loading, *Structures*, 3 (2015), pp. 306-319, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.06.005>
- [6] Liauw, T.C., Kwan, K.H.: Plastic Theory of Infilled Frames with finite interface shear strength. *Proceedings of the Institution of Civil Engineering*. 75 (1983) 4, pp. 707-723, <https://doi.org/10.1680/iicep.1983.1384>
- [7] Serkan, M.I., Ozgur, O., Sadik, C.G., Serap, K.: Experimental work on seismic behavior of various types of masonry infilled RC frames, *Structural Engineering and Mechanics*, 44 (2012) 6, pp.763-774, <https://doi.org/10.12989/sem.2012.44.6.763>
- [8] Liborio, C., Fabio, D.T.: Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modelling, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65 (2014), pp.224-242, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.016>
- [9] Liauw, T.C., Kwan, K.H.: Nonlinear behaviour of non-integral infilled frames, *Computers and Structures*, 18 (1984) 3, pp.551-560, [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(84\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0045-7949(84)90070-1)
- [10] Crisafulli, F.J., Carr, A.J.: Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 40 (2007) 2, pp. 69-77.
- [11] Asteris, P.G.: Finite element micro-modeling of infilled frames, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 8 (2008), pp. 1-11.
- [12] Ivo, C., Bartolomeo, P.: A macro-element modelling approach of Infilled Frame Structures, *Computers and Structures*, 143 (2014), pp. 91-107, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.07.008>
- [13] Chrysostomou, C.Z., Asteris, P.G.: On the in-plane properties and capacities of infilled frames, *Engineering Structures*, 41 (2012), pp.385-402, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.057>
- [14] Asteris, P.G. et al.: Mathematical micro modeling of infilled frames: State of the art, *Engineering Structures*, 56 (2013), pp.1905-1921, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.010>
- [15] ASCE. FEMA: Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers: FEMA-356, Washington, 2000.
- [16] Andreaus, U.: Failure criteria for masonry panels under in-plane loading, *Journal of structural engineering*, 122 (1996) 1, pp. 37-46, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:1\(37\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:1(37))
- [17] Wood, R.H.: Plasticity, composite action and collapse design of unreinforced shear wall panels in frames, *Proceedings of the institution of civil engineers*, Part 2, 65 (1978) 2, pp. 381-411, <https://doi.org/10.1680/iicep.1978.2952>
- [18] Saneinejad, A., Hobbs, B.: Inelastic design of infilled frames, *Journal of structural engineering*, 121 (1995) 4, pp. 634-650, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:4\(634\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:4(634))
- [19] Liauw, T.C., Kwan, K.H.: Plastic theory of non-integral infilled frames. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Part 2, 75 (1983) 3, pp. 379-396, <https://doi.org/10.1680/iicep.1983.1437>
- [20] Crisafulli, F.J.: Seismic Behavior of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills, PhD Thesis- Department of Civil Engineering- University of Canterbury, (1997), pp. 219-244.
- [21] Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M.P., Noland, J.L.: Performance of masonry-infilled R/C frames under in-plane lateral loads, *Structural Engineering and Structural Mechanics*, Research Series, Report CD/SR-94/6, 1994.
- [22] Polyakov, S.V.: On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall, *Translations in Earthquake Engineering*, (1960), pp. 36-42.
- [23] Holmes, M.: Steel frames with brickwork and concrete infilling, *Proceeding of the institution of civil engineering*, 19 (1961) 4, pp. 473-478, <https://doi.org/10.1680/iicep.1961.11305>
- [24] Smith, B.S.: Lateral stiffness of infilled frames, *Journal of Structural Division*, 88 (1962) 6, pp. 183-226.
- [25] Paulay, T., Priestley, M.J.N.: Seismic design of reinforced concrete masonry buildings, John Wiley & Sons, Inc, 1992, <https://doi.org/10.1002/9780470172841>
- [26] Mainstone, R.J.: On the stiffness and strengths of infilled frames, *Proceedings of the institution of civil engineers*, 8 (1971), pp. 57-90.
- [27] Smith, B.S., Carter, C.: A method of analysis for infilled frames, *Proceedings of the institution of civil engineers*, 44 (1969) 1, pp. 31-48, <https://doi.org/10.1680/iicep.1969.7290>
- [28] Tomazevic, M.: Masonry infilled reinforced concrete frames, *Earthquake-resistant design of masonry buildings*, Imperial College Press, London, pp. 163-178, 1999.
- [29] El-Dakhakhni, W.W., Elgaaly, M., Hamid, A.A.: Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel frames, *Journal of structural engineering*, 129 (2003) 2, pp. 177-185, [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:2\(177\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:2(177))
- [30] Shing, P.B., Stavridis, A.: Analysis of seismic response of masonry infilled RC Frames through Collapse, *ACI Structural Journal*, 297 (2014) 7.pp.1-20.
- [31] Di Trapani, F., Shing, P.B., Cavaleri, L.: Modelling in-plane and out-of-plane response of infilled frames through a fiber macro-model, *Proceedings of the european opensees association 1st European Conference on OpenSees*, Portugal, (2017), pp. 113-116.
- [32] Rodrigues, H., Varum, H., Costa, A.: Simplified macro-model for infill masonry panels. *Journal of Earthquake Engineering*, 14 (2010), pp. 390-416, <https://doi.org/10.1080/13632460903086044>
- [33] Uva, G., Raffaele, D., Porco, F., Fiore, A.: On the role of equivalent strut models in seismic assessment of infilled RC buildings, *Engineering Structures*, 42 (2012), pp. 83-94, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.005>
- [34] Federal Emergency Management Agency (FEMA): NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA-273, Washington, DC, USA. 1997.
- [35] Applied Technology Council (ATC): Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Volumes 1 and 2 , ATC-40, Redwood City, CA, USA, 1996.

- [36] Asteris, P.G. et al.: A macro-modelling approach for the analysis of infilled frame structures considering the effects of openings and vertical loads, *Structure and Infrastructure Engineering*, 12 (2015) 5, pp. 551-566, <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1030761>
- [37] Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures, Part 1-3: General rules - specific rules for various materials and elements, ENV 1998-1-3, CEN, Brussels, 1995.
- [38] Cavaleri, L., Papia, M.: A new dynamic identification technique: application to the evaluation of the equivalent strut for infilled frames, *Engineering structures*, 25 (2003), pp. 889-901, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00023-3)
- [39] Seismosoft [2016]: "SeismoStruct 2016 - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures," available from <http://www.seismosoft.com>.
- [40] Mann, W., Müller, H.: Failure of Shear-Stressed Masonry-an Enlarged Theory, Tests and Application to Shear Walls, *Proceedings of the British Ceramic Society*, 30 (1982) 1, pp. 223-235.
- [41] Penava, D., Sarhosis, V., Kožar, I., Guljaš, I.: Contribution of RC columns and masonry wall to the shear resistance of masonry infilled RC frames containing different in size window and door openings, *Engineering Structures*, 172 (2018), pp. 105-130, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.007>
- [42] Kakaletsis, D. Karayannis, C.: Experimental investigation of infilled r/c frames with eccentric openings, *Structural Engineering and Mechanics*, 26(2007), pp. 231-250, <https://doi.org/10.12989/sem.2007.26.3.231>
- [43] Al Chaar, G.: Non-ductile behavior of reinforced concrete frames with masonry infill panels subjected to in-plane loading. Construction Engineering Research Laboratories. USA. 1998.
- [44] Applied Technology Council (ATC). Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings: basic procedures manual (FEMA 306). California: Redwood City; 1998.
- [45] Chen, W.F.: Plasticity in reinforced concrete. J. Ross Publishing, (2007), ISBN-10: 1932159746.
- [46] Mohebkhah, A., Tasnimi, A.A.: Distinct element modeling of masonry infilled steel frames with openings. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 6 (2012), pp.42-49.