



Prethodno priopćenje/Preliminary communication

Primljen/Received: 03. 10. 2019.

Prihvaćen/Accepted: 03. 12. 2019.

ANALIZA OJAČANJA ZIDANIH ZIDOVA MEHANIČKIM DAMPERIMA

Emir Buljubašić, mr. dipl. ing. građ.

Građevinski fakultet Sarajevo, Student, emir.buljubasic1@gmail.com

Goran Simonović, doc. dr. dipl. ing. građ.

Građevinski fakultet Sarajevo, goran.simonovic@gf.unsa.ba

Sažetak: U radu je dan pregled karakteristika komponenata zidanih zidova, zidnih elemenata i maltera, s osvrtom na mehaničke karakteristike zidova. Poseban naglasak je stavljen na ne armirane zidane zidove i njihovo ponašanje uslijed potresa. Korišteni su empirijski i eksperimentalni podaci. Dobiveni rezultati za pojedinačni zid, koji su dobiveni kroz upotrebu dva suvremena programska paketa, ABAQUS i SAP2000, se dosta dobro slažu s eksperimentima koji su provedeni na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Nakon verifikacije rezultata numeričkih ispitivanja analizirana su ojačanja zidanih zidova apliciranjem mehaničkih dampera bez i s okvirom.

Ključne riječi: Nearnirani zidani zidovi, potres, seizmičko djelovanje, ojačanje zidanih zidova, mehanički damperi, pasivni damperi, metalni okvir, uređaji za disipaciju energije, seizmička izolacija, eksperimentalno ispitivanje zidanih zidova, numerička analiza zidanih zidova

ANALYSIS OF MASONRY WALLS STRENGTHENED WITH MECHANICAL DAMPERS

Abstract: The paper gives an overview of the characteristics of masonry walls, bricks and mortar, with reference to the mechanical characteristics of the walls. The focus was placed on unreinforced masonry walls (URM) and their earthquake behavior. Empirical and experimental data were used. The results of the numerical analysis of a single unreinforced masonry wall, obtained through the use of two modern software packages, ABAQUS and SAP2000, are in good agreement with the experiments conducted at the Faculty of Civil Engineering, University of Sarajevo. After the verification of the results, the masonry walls strengthened by applying mechanical dampers without and with a metal frame were analyzed.

Key words: Unreinforced masonry walls (URM), earthquake, seismic loads, strengthening of masonry walls, mechanical dampers, passive dampers, metal frames, energy dissipation devices, seismic isolation, experimental testing of masonry walls, numerical analysis of masonry walls



1. Uvod

Potres je prirodna pojava čiji se utjecaj neizostavno mora uzeti u obzir prilikom projektiranja i izvedbe građevina. Odavno je poznato da jaki potresi mogu proizvesti katastrofalne posljedice, enormne štete, a posebno gubitke ljudskih života. Zbog toga je zaštita od potresa veoma važna zadaća u suvremenom urbaniziranom društvu (Hrasnica M., „Aseizmičko građenje“ [1]).

Bosna i Hercegovina smještena je u području jake seizmičke aktivnosti i prilikom potresa iz nedavne prošlosti pokazalo se da su ne armirane zidane građevine jako osjetljive i jako ugrožene pojavom jačih potresa. Pri potresnom djelovanju zide nema sposobnost disipacije – trošenja energije kroz neelastične deformacije [2].

Posljednjih decenija počela je primjena uređaja za disipaciju energije - seizmičkih dampera (prigušivača). Damperi su vremenom stalno razvijani i unapređivani, od prostih pasivnih mehaničkih dampera koji su disipirali energiju na bazi trenja ili kroz tečenje metala do aktivnih sistema disipacije energije koji uz primjenu raznih vrsta senzora mogu prepoznati vibracije sistema i reagirati na vrijeme na njih.

Damperi se primjenjuju se u raznim poljima građevinarstava gdje je potrebno poboljšati seizmičku otpornost objekata. Primjenom mehaničkih dampera možemo pridonijeti poboljšanju dinamičkih osobina konstrukcija za vrijeme potresa na način da oni modificiraju karakteristike odgovora konstrukcija. Primarni razlog za primjenu uređaja za disipaciju energije u konstrukcijama je smanjenje pomaka i štete prouzrokovane prevelikim deformiranjem konstrukcije. Redukcija pomaka se ostvaruje dodavanjem krutosti i - ili disipacije energije (prigušenja) u konstrukciju zgrade. Upotrebom sistema pasivnih disipatora energije možemo postići redukciju odgovora dva do tri puta ako oni ne dodaju krutost i više od toga u slučaju dodatne krutosti. Treba naglasiti da ovi sistemi reduciraju sile u konstrukciji dok ona radi u elastičnom području [3].

Kako bi spriječili pojavu novih oštećenja na postojećim zidanim građevinama analizirat ćemo mogućnost ojačanja postojećih zidanih zidova primjenom pasivnih - mehaničkih dampera, pri čemu je fokus rada stavljen na povećanje krutosti sistema.

2. Materijalne i geometrijske karakteristike ne armiranih zidanih zidova

Ispitivanje karakteristika komponenata zidanih zidova kao i zidanih zidova u cjelini provedeno je u laboratoriji Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Sarajevo, u Sarajevu [4, 5, 6, 7,8]. U ovom radu su ukratko navedeni postupci ispitivanja i upotrijebljeni rezultati navedenih ispitivanja cijenjenih Profesora u svrhu formiranja numeričkih modela.

2.1. Materijalne i geometrijske karakteristike zidnih elemenata

Provedena su eksperimentalna ispitivanja na uzorcima pune glinene opeke dimenzija 250/120/65mm (dužina/širina/visina).

2.1.1. Ispitivanje čvrstoće zidnog elementa na pritisak

Testiranja čvrstoća zidnih elemenata na pritisak su izvršena prema nacionalnim standardima i evropskim normama [5]. Prema nacionalnim normama dobivena srednja vrijednost čvrstoće na pritisak iznosila je $f_{b,c} = 29,9 \text{ N/mm}^2$. Na osnovu ovih propisa, opeka se može klasificirati kao M20, sa karakterističnom čvrstoćom na pritisak od 20 N/mm^2 [5].



Prema evropskim normama (EN 772-1: 2011) uzorci čije su površine obrađene brušenjem imale su srednju vrijednost čvrstoće opeke na pritisak od $f_{b,c} = 53,9 \text{ N/mm}^2$, dok su uzorci opeka na koje je nanesen površinski sloj od maltera imali srednju vrijednost čvrstoće zidnog elementa na pritisak od $f_{b,c} = 47,1 \text{ N/mm}^2$ [5].

2.1.2. Ispitivanje čvrstoće zidnog elementa na zatezanje

Kako nisu definirani standardni ispiti koji treba da se primjenjuju prilikom određivanja čvrstoće zidnog elementa na zatezanje, ispitivanje čvrstoća pune glinene opeke na zatezanje se izvršilo na dva načina [5], i to :

- a) brazilskim testom,
- b) indirektnim određivanjem čvrstoće na zatezanje pri savijanju.

Prilikom ispitivanja čvrstoće zidnog elementa na zatezanje Brazilskim testom izrađeno je 9 cilindričnih uzoraka dimenzija: baza/visina = 54mm/ 50mm, i izvršena su ispitivanja. Dobivena prosječna čvrstoća pune opeke na zatezanje iznosila je $f_{b,t} = 3,75 \text{ N/mm}^2$, s koeficijentom varijacije od 14% [5,6].

Indirektnim načinom određivanja čvrstoće na zatezanje izloženo je devet uzoraka blokova od pune opeke dimenzija: 250/120/65 (dužina/širina/visina) [5,6], i prosječna vrijednost čvrstoća pune opeke na zatezanje iznosila je $f_{b,t} = 5,2 \text{ N/mm}^2$. Koeficijent varijacije bio je veoma visok i iznosio je 40% [5].

Vizualna kontrola je potvrdila vrlo nepravilne površine loma koje se odnose na ispitivanje savijanjem, za razliku od brazilskog testa kod kojeg su uzorci imali prilično glatku površinu loma. Iz tog razloga, kao i zbog manjeg koeficijenta varijacije, kao vrijednost čvrstoće opeke na zatezanje za numeričku analizu usvojena je : $f_{b,t} = 3,75 \text{ N/mm}^2$ [5,6].

2.2. Materijalne karakteristike maltera

Prilikom eksperimentalnog istraživanja, upotrijebljen je ručno izrađeni krečno-cementni malter, s omjerom sastojaka: kreč: cement: pijesak = 1: 0,5: 4. Krečno-cementni malter koji je primijenjen za izradu uzoraka za ispitivanje je odabranog sastava kako bi se dobila čvrstoća maltera na pritisak od oko $2,5 \text{ N/mm}^2$, koja je tipična za većinu postojećih zidanih konstrukcija. Ispitivanje se vrši na prizmama dimenzija 160 mm / 40 mm / 40 mm [5].

2.2.1. Ispitivanje čvrstoće maltera na pritisak

Ispitivanje čvrstoće maltera na pritisak propisano je u normi EN 1015-11:1999 - dio 11, koja se odnosi na određivanje čvrstoće očvrstlog maltera pri savijanju i čvrstoće na pritisak. Prosječna čvrstoća maltera na pritisak prilikom ispitivanja na Institutu za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Sarajevo iznosila je $f_{m,c} = 2,3 \text{ N/mm}^2$ sa koeficijentom varijacije od 14%. Prema tome ispitani uzorci maltera spadaju u vrstu maltera M2, sa minimalnom čvrstoćom maltera na pritisak od $2,0 \text{ N/mm}^2$ [5].

2.2.2. Ispitivanje čvrstoće maltera na zatezanje

Ispitivanje čvrstoće maltera na zatezanje se mjeri indirektno, to jeste čvrstoća na zatezanje se mjeri pri savijanju uzorka. Uzorak se postavlja u presu i mjeri se najveće opterećenje dok ne dođe do loma uzorka. Prosječna čvrstoća maltera na zatezanje prilikom ispitivanja iznosila je $f_{m,t} = 1,3 \text{ N/mm}^2$ sa koeficijentom varijacije od 20% [5].



2.3. Mehaničke karakteristike ne armiranog ziđa

2.3.1. Eksperimentalno ispitivanje čvrstoće ziđa na pritisak i modula elastičnosti

Kako bi dobili što realnije karakteristike materijala za numeričku analizu, testovi su izvedeni u skladu sa evropskim standardom (CEN-EN 1052-1) na šest prizmatičnih uzoraka ziđa. Dimenzije uzoraka izrađenih od pune opeke i krečno-cementnog maltera (navedenih u prethodnim poglavljima) su: 51,4/ 64,6/ 12cm (d/š/v). Horizontalne i vertikalne spojnice su u prosjeku debljine od 1,4cm. Upotrijebljena je puna glinena opeka, s čvrstoćom na pritisak od cca. 30 N/mm² i dimenzija 250/120/65mm koje su uronjene u vodu prije ugradnje [6] (Hrasnica et al. 2014).

Čvrstoća na pritisak se definira kao odnos vertikalnog opterećenja prema početnoj površini prizme, bez obzira na činjenicu da spojevi nisu idealno ispunjeni. Prosječna čvrstoća na pritisak iznosila je 6,48 N/mm², s koeficijentom varijacije od 36%, dok je prosječna vrijednost modula elastičnosti iznosila 4024 N/mm², s koeficijentom varijacije od 46% [6].

2.3.2. Određivanje modula elastičnosti materijala empirijskim putem

Usljed nedostatka podataka ispitivanja vezanih za odnose napon-deformacija, kao i modula elastičnosti pune glinene opeke i krečno-cementnog maltera, poslužiti ćemo se empirijskim obrascima kako bi odredili i idealizirali vrijednosti potrebne za numerički proračun [9, 10, 11].

Za procjenu modula elastičnosti glinene opeke (E_b), (Kaushik, Rai, & Jain, 2007) [9] preporučuju raspon vrijednosti ovisan o čvrstoći opeke na pritisak (f_b). Dani interval modula elastičnosti za glinenu opeku dan je sljedećim izrazom

$$150 \cdot f_b \leq E_b \leq 500 \cdot f_b. \quad (1)$$

Za procjenu modula elastičnosti (E_m) krečno-cementnog maltera, (Kaushik, Rai, & Jain, 2007) preporučuju raspon vrijednosti (2) ovisno o čvrstoći maltera na pritisak (f_m). Dani interval modula elastičnosti za krečno-cementni malter iznosi

$$100 \cdot f_m \leq E_m \leq 400 \cdot f_m. \quad (2)$$

Pod pretpostavkom da se radi o jako dobrom materijalu za empirijsko određivanje modula elastičnosti upotrijebit ćemo maksimalne granične vrijednosti empirijskih obrazaca (1) i (2). Uvrštavanjem eksperimentalno dobivenih vrijednosti čvrstoća na pritisak zidnih blokova ($f_b=29,00$ N/mm²) i maltera ($f_c=2,30$ N/mm²) u navedene obrasce dobivamo empirijske vrijednosti modula elastičnosti zidnih blokova ($E_{b,EMP}=14500$ N/mm²) i maltera ($E_{m,EMP}=920$ N/mm²).

Kako bi kontrolirali eksperimentalno dobivenu vrijednost modula elastičnosti ziđa koristeći empirijski dobivene vrijednosti modula elastičnosti zidnih blokova i maltera, poslužiti ćemo se empirijskim obrascem za određivanje ekvivalentnog modula elastičnosti ziđa danog obrascima (3), (4) i (5).

Bitno je naglasiti da ekvivalentni modul elastičnosti predstavlja funkciju fizičkih i mehaničkih karakteristika opeke i maltera za linearno i elastično ponašanje zidanih zidova (Francis et al., 1971) [12], i dan je sljedećim izrazom



$$\frac{1}{E_M} = \frac{\delta_b}{E_b} + \frac{\delta_m}{E_m} + 2 \cdot \delta_m \cdot \delta_b \cdot \frac{\nu_b \cdot E_m - \nu_m \cdot E_b}{\delta_m \cdot (1 - \nu_b) \cdot E_m + \delta_b \cdot (1 - \nu_m) \cdot E_b} \cdot \left(\frac{\nu_m}{E_m^2} + \frac{\nu_b}{E_b^2} \right), \quad (3)$$

$$\delta_m = \frac{t_m}{(t_m + t_b)}, \quad (4)$$

$$\delta_b = \frac{t_b}{(t_m + t_b)}, \quad (5)$$

gdje su :

- E_M - Modul elastičnosti ziđa;
- $t_m ; t_b$ - Debljina maltera i debljina opeke (visina opeke);
- $E_m ; E_b$ - Modul elastičnosti maltera i modul elastičnosti zidnih blokova (opeke) ;
- $\nu_m ; \nu_b$ - Poissonov koeficijent maltera i Poissonov koeficijent zidnog bloka (opeke).

Vrijednost modula elastičnosti određen eksperimentalnim putem iznosi $E_M = 4024 \text{ N/mm}^2$. Uz poznate debljine materijala ($t_m = 14 \text{ mm}$; $t_b = 65 \text{ mm}$), i pretpostavljeni Poissonov koeficijent ($\nu_m = \nu_b = 0,2$) uvrštavanjem u formule (3), (4) i (5) dobivamo vrijednost modula elastičnosti ziđa koji iznosi $E_{M,EMP} = 4010 \text{ N/mm}^2$, i on je približno jednak vrijednosti koju smo dobili eksperimentalnim putem.

Na osnovu rezultata ispitivanja, može se zaključiti da je modul elastičnosti znatno manji od preporuka danih u EC6 [6]. Međutim, prema nekim autorima (Tomažević, 2009) modul elastičnosti može varirati unutar granica vrijednosti u obrascu (7) [6].

Tablica 1. Eksperimentalno i empirijski dobivene vrijednosti modula elastičnosti ziđa

Moduli elastičnosti prema	Obrasci	Vrijednosti modula elastičnosti ziđa [N/mm^2]
Eksperimentalno	-	4024
EC6	$1000 \cdot f_k$ (6)	6480
Tomažević	$100 \cdot f_k \leq E_M \leq 1000 \cdot f_k$ (7)	$648 \leq E_M \leq 6480$
Francis	(3)	4010

2.3.3. Ispitivanje čvrstoće ziđa na smicanje

Ponašanje zidanih zidova izloženih horizontalnim opterećenjima u velikoj mjeri zavise od međudjelovanja zidnih elemenata i maltera, odnosno karakteristika kontakta između njih. Ispitivanje njihovog međusobnog kontakta je od velikog značaja iz razloga što je zona kontakta zidnog elementa i maltera obično najslabiji element kompozita, tj. zato što povezuje karakteristike lomljive opeke visoke čvrstoće sa malterom koji ima znatno nižu čvrstoću ali mnogo izraženiju duktilnost [4, 5, 6, 7].

Čvrstoća na smicanje određena je prema EN 1052-3: 2001. Vrijednosti potrebnih parametara za numeričku analizu dobivenih eksperimentalnim putem iznose: kohezija, $c = 150 \text{ kPa}$, i kut unutrašnjeg trenja $\phi = 37^\circ$. Treba naglasiti da su svi uzorci otkazali uzduž spojnice [5].

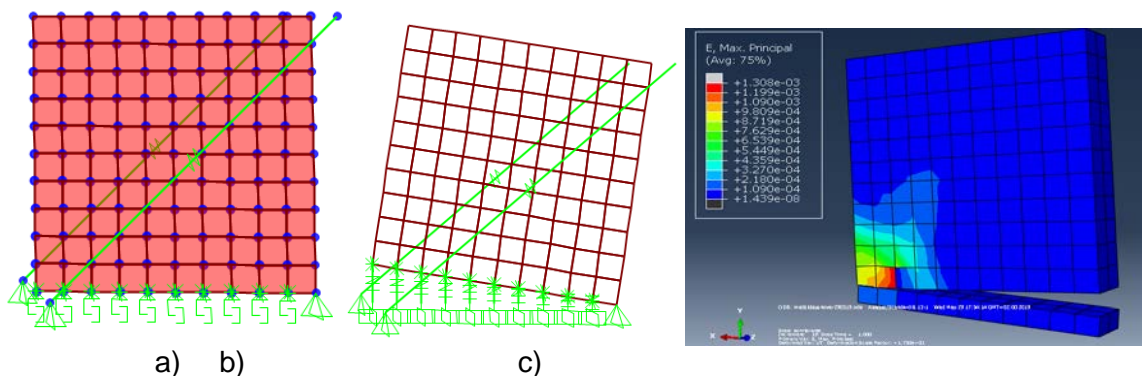
3. Numeričko modeliranje zidanih zidova ojačanih mehaničkim damperima

Napravljeni su numerički makro-modeli zidanog zida koji je ispitivan u laboratoriji za materijale i konstrukcije Građevinskog Fakulteta Sarajevo [4, 5, 6, 7, 8].

Makro modeliranjem se omogućavaju veći konačni elementi (grublja diskretizacija) jer je heterogeni zidani zid aproksimiran jednim materijalom i diskretizacija je neovisna o rasporedu opeke. Također se smanjuje broj nepoznatih veličina u sistemu, odnosno značajno ubrzava proračun konstrukcije. Ovaj model je prikladan za analizu realnih zidanih konstrukcija u praksi. Ovaj tip modeliranja je najviše poželjan kada je potreban kompromis između točnosti i efikasnosti [13].

3.1. Makro modeliranje zidanih zidova

U programskom paketu SAP2000 zidani zid modeliran je na makro nivou kao homogen i elastičan materijal koristeći „plane stress“ elemente. Dimenzije zidanog zida su 103/103/25cm, a materijalne karakteristike dane su u tablici 2. Zid je prethodno izložen vertikalnom pritisku od $\sigma_0=0,4 \text{ kN/mm}^2$. Za kontaktnu površinu zida s podlogom upotrijebljeni su link elementi, konkretno gap elementi („compression only“) [14]. Pretpostavili smo da je čvrstoća zidanog zida na zatezanje jednaka nuli ($f_{t,b}=0$), i ograničili link elemente tako da preuzimaju opterećenja samo za pravac koji je okomit na tlo. Krutost gap elemenata na pritisak zadana je izrazito velika ($k=10.000 \text{ kN/m}$) tako da mogu prihvatiti sva vertikalna opterećenja. Vrijednost otvaranja gap elementa postavljena je tako da pri najmanjoj sili zatezanja počinje sa otvaranjem, odnosno dolazi do odvajanja zida od kontaktne površine. Kako bi prihvatili horizontalna opterećenja, postavljen je nepokretni oslonac u uglu zida kako bi se omogućilo prihvatanje horizontalne sile kao i da se omogući rotacija zida kao krutog tijela oko jedne točke. Globalna veličina konačnih elemenata iznosi 100mm.



Slika 1. a) Zid ojačan mehaničkim damperom, b) Prevrtnje zida ojačanog mehaničkim damperom – SAP2000, c) Prevrtnje zidanog zida - ABAQUS




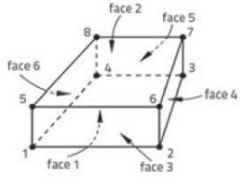
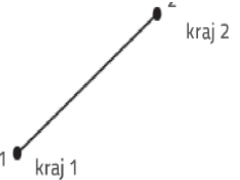
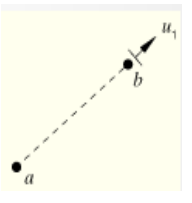
U programskom paketu ABAQUS zidani zid je također modeliran na makro nivou. Model zida se sastoji iz tri dijela i to:

- Betonske podloge (dužina/visina/širina = 103/10/25cm)
- Zidani zid (dužina/visina/širina = 103/103/25cm)
- Betonske grede (dužina/visina/širina = 103/25/45cm)

Svi navedeni elementi su modelirani kao 3D deformabilni konačni elementi. Karakteristike pojedinačnih elemenata su prikazane u tablici 2. Zidani zid je modeliran kao linearno elastičan i upotrijebljen je za simulaciju mehanizma otkazivanja zida prevrtanjem (slika 1.c).



Tablica 2. Materijalne karakteristike numeričkih modela i opis konačnih elemenata - ABAQUS

Elementi	Zidani zid	Betonska podloga	Betonska greda	Metalni okvir	Mehanički damper
Zapreminska težina [Tona/mm ³]	1,85E-9	2,50E-09	2,50E-09	7,70E-09	-
Modul elastičnosti [N/mm ²]	4024,00	31635,00	31635,00	210000	-
Poissonov koeficijent	0,2	0,2	0,2	0,25	-
Vrsta elementa	C3D8R: linearni volumni konačni element s osam čvorova (heksagonalni)			B31: linearni gredni konačni element s dva čvora u prostoru	Connector
Skupina	Trodimenzionalno naprezanje			Greda	Translatorni tip-aksijalni
Konačni element	Vrsta	 Continuum (solid and fluid) elements		 Beam elements	 Connector elements such as springs and dashpots
	Odabrani				

Prilikom prevrtanja zid će se rotirati kao kruto tijelo i odvojiti na prvj spojnici (slika 1.b), tako da je fokus rada stavljen na interakciji zid-podloga. Globalna veličina konačnih elemenata iznosi 100mm. Gornji rub zida je slobodan i izložen vertikalnom opterećenju od $\sigma_0=0,4 \text{ kN/mm}^2$. Gornja ploča je malo šira u odnosu na zid kako bi naknadno mogli instalirati mehaničke dampere. Gornjoj ploči je ograničeno kretanje okomito na pravac zida. Vrh zida i gornje ploče su preko „Interaction“ funkcije spojeni idealno „tie“ elementima metodom diskretizacije „surface to surface“. Spoj zida i podloge je modeliran tako da dođe do otvaranja spojnice prilikom povećanja poprečne sile. Pod pretpostavkom da malter u spojnici prima samo sile pritiska, dodijeljena svojstva kontakta definirana su u tangencijalnom i normalnom smjeru u odnosu na ravninu kontakta. Dani kontakt se kroz trenje, definiranom preko „tangential behaviora“, suprotstavlja poprečnoj sili. Također kako bi prenijeli normalne sile a ujedno spriječili i prodiranje elemenata jedan kroz drugi, dodijeli smo „normal behavior“ ponašanje spoju sa „Hard contact“ opcijom.

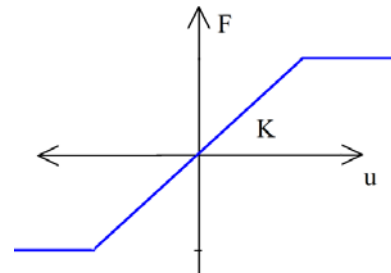
3.2. Modeliranje metalnog okvira

Za modeliranje metalnog okvira koristili smo se čelikom klase S235 s granicom tečenja $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$, dimenzije okvira iznose $h/l=103/103 \text{ cm}$. Za grede i stupove smo koristili HOP 60x60x4 šuplje profile.

U programskom paketu SAP2000 za modeliranje istih koristili smo „frame“ elemente dok su metalni okviri u ABAQUS-u modelirani upotrebom linearnih grednih konačnih elemenata sa dva čvora u prostoru „B31“. Globalna veličina konačnih elemenata u programskom paketu ABAQUS iznosi 50mm.

3.3. Modeliranje mehaničkih dampera

Mehanički damperi su modelirani link elementima s graničnim silama i graničnim pomacima, s pretpostavkom da je cijela dijagonala jedan element, premda se u stvarnosti mehanički damper instalira na dodatni element jer je relativno malih dimenzija. Mehaničke osobine dampera zavise od specifikacija proizvođača dampera. Za modeliranje u SAP2000-u upotrijebljeni su aksijalni linkovi tipa „Multi-Linear elastic“, dok su u ABAQUS-u isti modelirani „Connector“ elementima. Odabrani tip elemenata je „translational basic axial element“, koji omogućavaju vezu i kretanje u pravcu linije koja povezuje dane točke. Na slici 2. prikazano je ponašanje mehaničkog dampera.

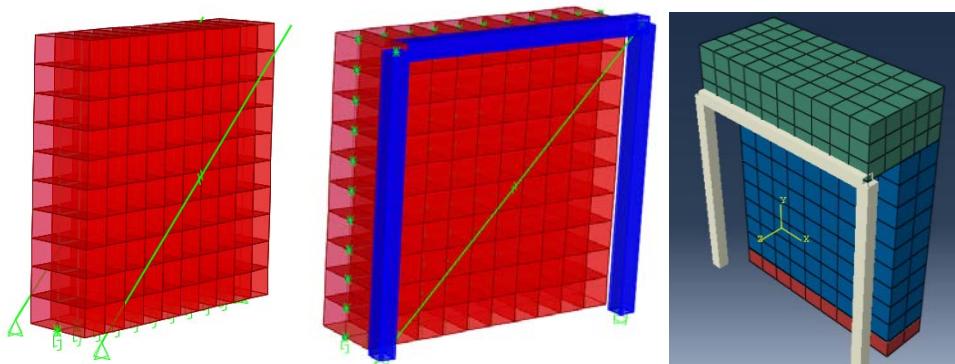


Slika 2. Ponašanje Mehaničkog dampera

U nastavku će se koristiti histerezni metalni damperi i označavati oznakama MD“X“kN“Y“mm, gdje su: „X“ granična nosivost dampera u [kN], a „Y“ granično pomjeranje u [mm], koje su definirane specifikacijama proizvođača mehaničkih dampera.

3.4. Modeliranje zidanih zidova ojačanih mehaničkim damperom sa i bez upotrebe metalnih okvira

Numerički model ojačanog zida dobiven je kombinacijom prethodno navedenih elemenata, s već definiranim karakteristikama. Dimenzije svih elemenata kao i veličina konačnih elemenata su zadržane kako prethodno navedeno. Mehanički damperi, kao i okvir nalaze se na udaljenosti 20cm od zidanog zida.



Slika 3. Numerički modeli zidanog zida ojačanog mehaničkim damperima bez metalnog okvira (a) i s metalnim okvirom u SAP2000-u (b) i ABAQUS-u (c)

U programskom paketu SAP2000 donjem kraju dampera spriječili smo pomjeranja dok je gornji kraj povezan „constrain“ elementima za gornju ravninu zida, kako bi pratio ponašanje zida. Modeli zidanog zida ojačanog mehaničkim damperom sa i bez metalnog okvira prikazani su na slici 3.

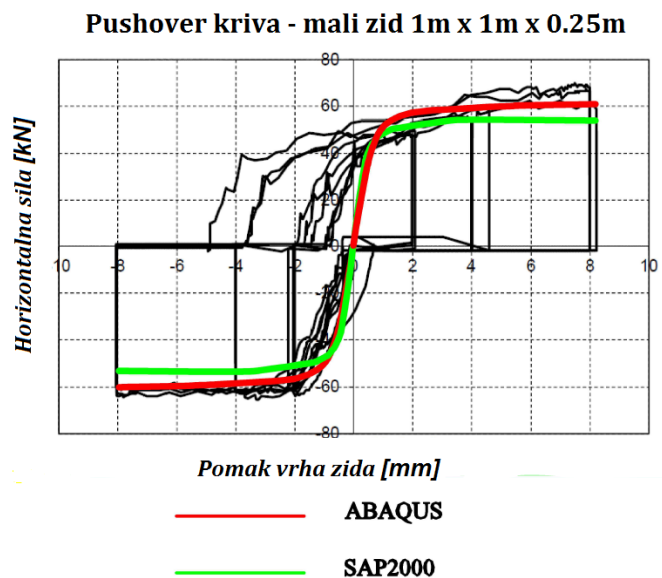


Kao ranije rečeno u programskom paketu ABAQUS spoj vrha zida i gornje ploče je izveden primjenom „tie“ elemenata koji su ta dva elementa spojili master-slave vezom kao jednu cjelinu. Kako bi spojili metalni okvir s betonskom pločom također smo koristili „tie“ elemente, ali ovaj put metoda diskretizacije bila je „Node to Surface“ kako bi spojili „beam“ element s rubom 3D deformabilnog elementa. Dno gornje ploče (master surface) spojeno je idealno za vrh grede okvira (slave surface).

4. Verifikacija numeričkog modela

Verifikaciju numeričkih rezultata ćemo vršiti na osnovu rezultata ispitivanja zidova umanjenih razmjera [8], koji su ispitivani u laboratoriju Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Sarajevo.

Napravljeni su uzorci umanjenih ne armiranih zidanih zidova dimenzija $d/\bar{s}/v = 103/103/25\text{cm}$ [8]. Zid je izveden bez ojačanja i ispitivan pod djelovanjem vertikalne sile $V = 100\text{ kN}$, odnosno pod srednjim vertikalnim naponom $\sigma = 0,4\text{ N/mm}^2$. Zid je rotirao kao kruto tijelo bez pojave dijagonalnih pukotina [8]. Krivulje kapaciteta koje su dobivene nelinearnom statičkom Pushover analizom u programskim paketima SAP2000 i ABAQUS-u pokazale su dobro slaganje sa histereznom krivom koja je dobivena eksperimentalnim putem slika 4.



Slika 4. Usporedba krivulja kapaciteta eksperimentalnih rezultata[8] i numeričkih modela

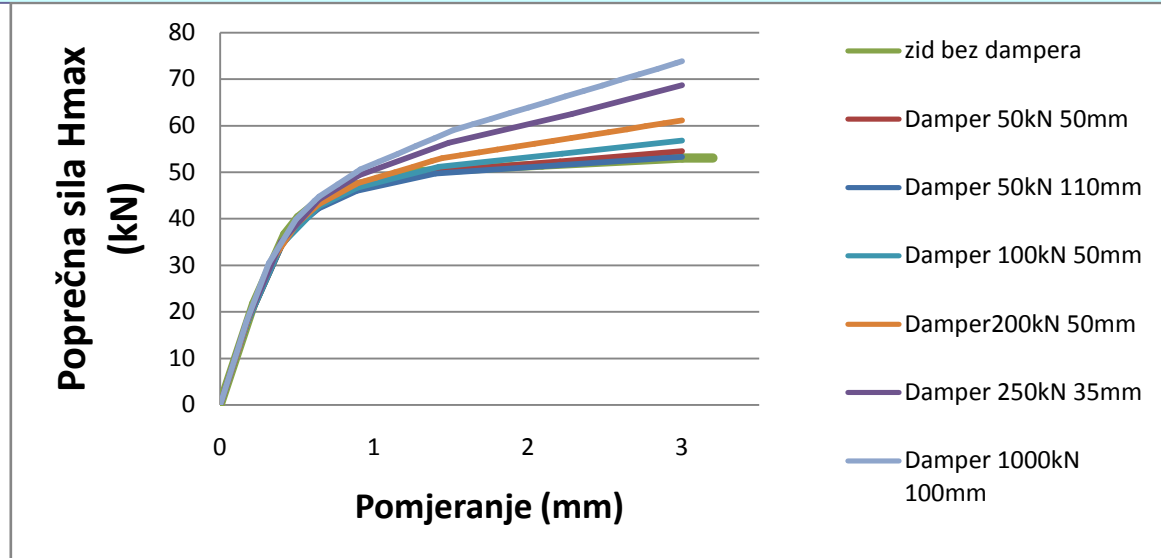
5. Pushover analiza zidanih zidova ojačanih mehaničkim damperima

Na ranijim modelima umanjenih zidanih zidova (103x103x25cm), s već poznatim karakteristikama, dodani su mehanički damperi s obje strane uz određen razmak od 20cm od zida. Krivulje kapaciteta dobivene pushover analizom prikazane su na slici 5.

Promatrajući rezultate pushover analize može se uočiti da direktna upotreba mehaničkih dampera na zidanom zidu nije donijela značajniju promjenu u poprečnoj otpornosti zida. Damperi nisu spriječili prevrtanje zida (slika 1.b). Također uslijed prevrtanja zida dolazi i do pomjeranja mehaničkog dampera iz svoje početne osi, prilikom čega je njegova efikasnost upitna. Upotrebom dampera većih krutosti možemo primijetiti blagi prirast krive kapaciteta.

6. Ojačanje zidanih zidova kombinacijom metalnog okvira i mehaničkih dampera

Kao što smo vidjeli ranije utjecaj mehaničkih dampera, kao ojačanja zidanih zidova u slučaju direktne odnosno instalacije bez dodatnih elemenata za ugradnju je jako mali.



Slika 5. Krivulje kapaciteta zidanog zida ojačanog mehaničkim damperima bez okvira

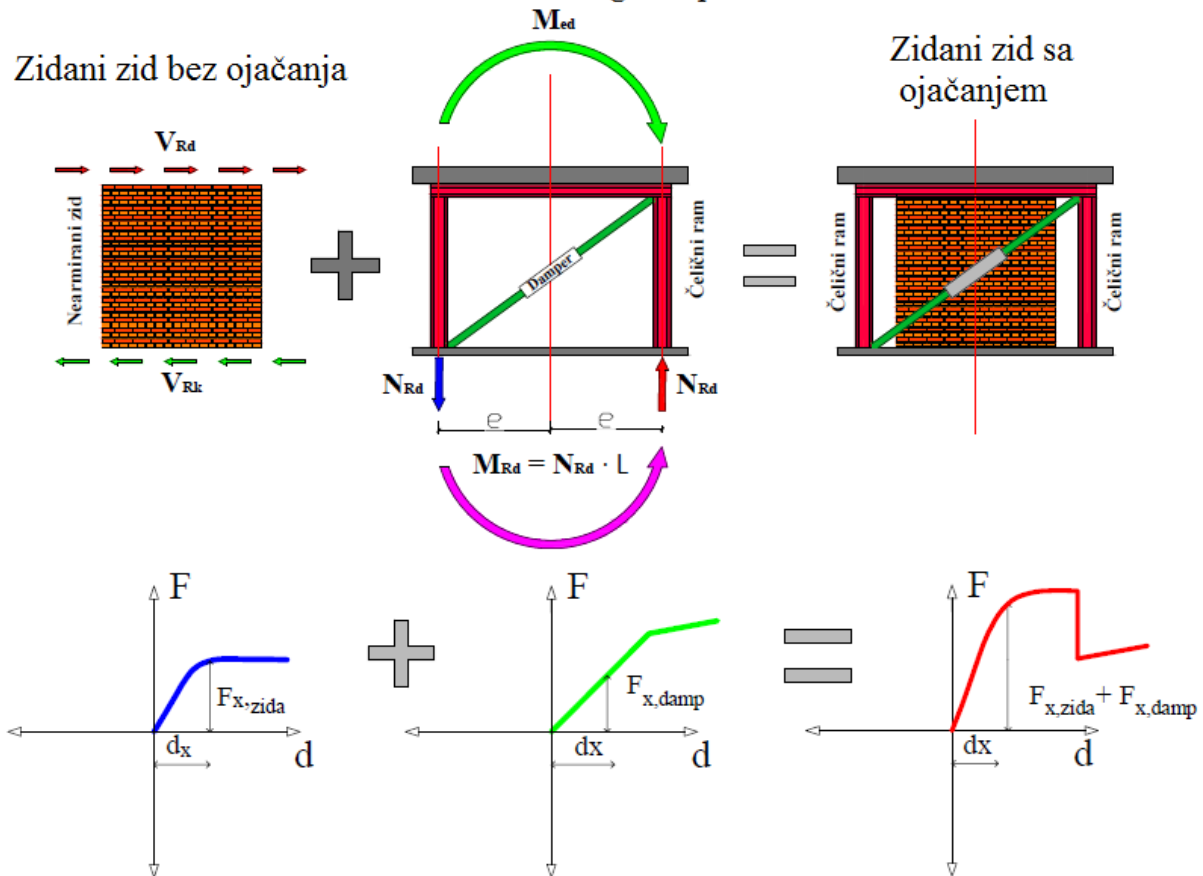
Kako bi povećali efektivnost mehaničkih dampera pri ojačanju zidanih zidova, kao prethodno opisano upotrijebili smo dodatni metalni okvir. Njegova funkcija je da primi poprečne sile koje su nastale kao posljedica seizmičkih djelovanja i da prihvati moment savijanja zida tako što ga rastavlja na spreg sila koji će prihvatiti stupovi metalnog okvira.

Kako su zidani zidovi jako slabi na seizmičke utjecaje, ideja je u tome da taj utjecaj prebacimo na drugi element, u ovom slučaju na metalni okvir (slika 6.). Premda je totalni prijenos utjecaja prilikom ojačanja postojećeg zida nemoguće potpuno prenijeti na drugi element, moguće je umanjiti ga i rasteretiti postojeći element. Ojačani zidani zidovi će djelovati kao jedna cjelina. Metalni okvir će biti neposredno u blizini zida i sudjelovati u preuzimanju opterećenja. Poprečna sila koja se javlja će se preko grede okvira koja je pričvršćena ankerima za plafon prenijeti preko stupova i mehaničkog dampera na oslonac. Moment savijanja će se prenijeti kroz spreg sila na stupove okvira tako da će se u jednom stupu javiti pritisak a u drugom zatezanje. Također bitno je naglasiti da ponašanje cjelokupnog sistema, u ovom slučaju metalnog okvira ojačanog mehaničkim damperima, zavisi od ponašanja pojedinačnih komponenata okvira i mehaničkog dampera. Ponašanje ojačanog sistema trebalo bi biti približno jednako zbiru nelinearnih odgovora metalnog okvira i dampera pri istom pomjeranju [15].

Krutost ojačanog sistema, k_o , trebala bi biti jednaka zbiru krutosti metalnog okvira, k_s , i mehaničkog dampera k_{damp} za istu vrijednost pomjeranja d_x (slika 7.). Povećanjem pomjeranja rasti će i intenziteti sila u stupovima. Kao ranije opisano ponašanje okvira će zavisiti od ponašanja mehaničkog dampera. Ponašanje ojačanog zidanog zida trebalo bi biti približno jednako zbiru nelinearnih dijagrama ponašanja pojedinih elemenata ojačanog zida pri istom pomjeranju (slika 7.) [15].



Ojačanje kombinacijom metalnog okvira i mehaničkog dampera

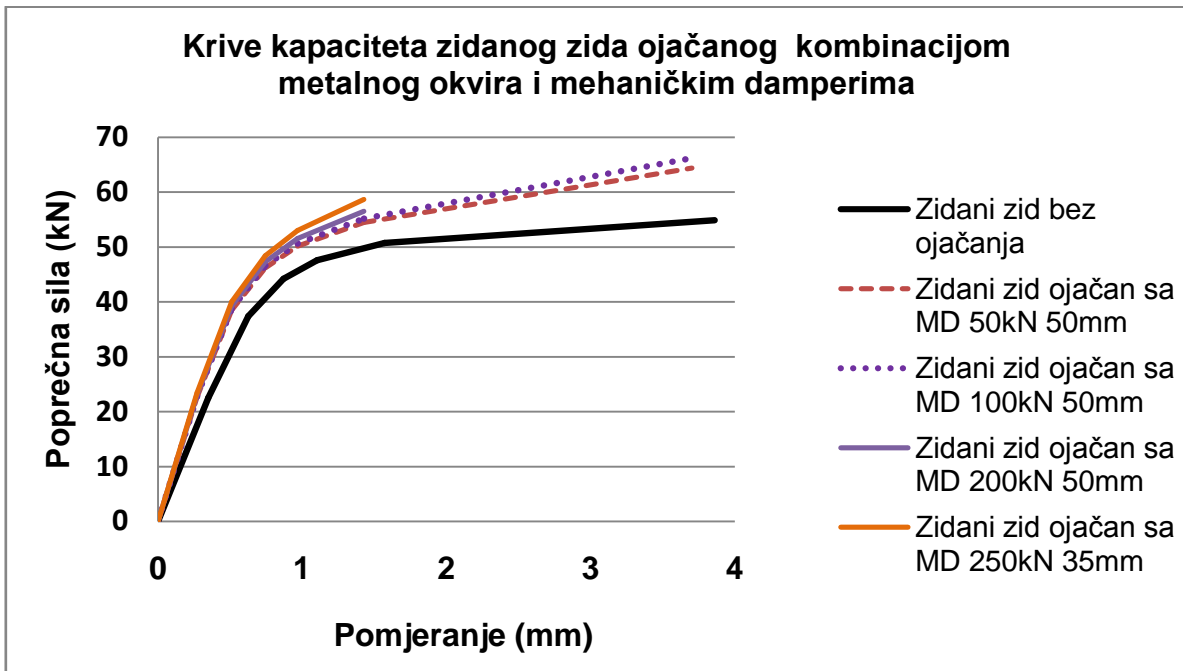


Slika 7. Ponašanje modela prikazanog kao zbir poprečnih sila zida i metalnog okvira ojačanog mehaničkim damperom pri istom pomjeranju

7. Pushover analiza zidanih zidova ojačanih kombinacijom metalnog okvira i mehaničkih dampera

Rezultati pushover analize na modelu zidanog zida ojačanog mehaničkim damperima i metalnim okvirom prikazani su na slici 8.

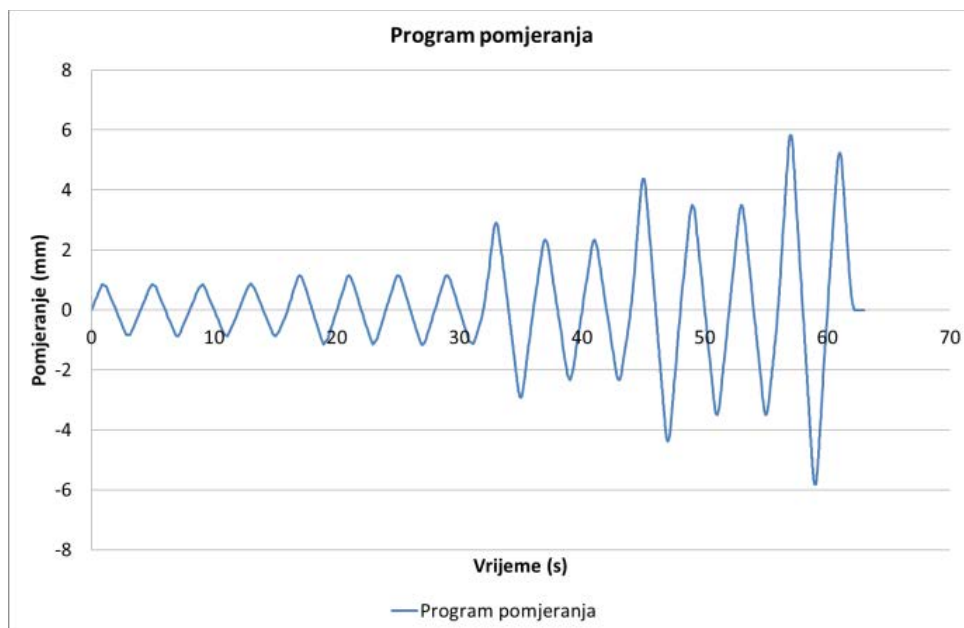
Ako promatramo krivulje kapaciteta (slika 8.) vidljiv je porast otpornosti na poprečnu silu u usporedbi s rezultatima pushover analize za slučaj zidanog zida ojačanog direktno damperom (slika 5.). Prirast poprečne sile objašnjava se dodatkom metalnog okvira. Taj prirast za različite specifikacije mehaničkih dampera ostaje približno isti tako da se postavlja pitanje efekta mehaničkog dampera u cjelokupnom sistemu. Prilikom ispitivanja mogli smo uočiti da pravilnim izborom krutosti dampera i njegovim dijagonalnim postavljanjem u neojačani metalni okvir, otpornost metalnog okvira na poprečne sile možemo povećati i do cca 70%. Ukoliko je razlika krutosti mehaničkih dampera i metalnog okvira bila mnogo veća došlo je do plastifikacije stupa pri manjim silama dok se globalno pomjeranje vrha okvira umanjilo za cca 20%.



Slika 8. Krivulje kapaciteta zidanog zida ojačanog kombinacijom mehaničkih dampera i metalnog okvira-SAP2000

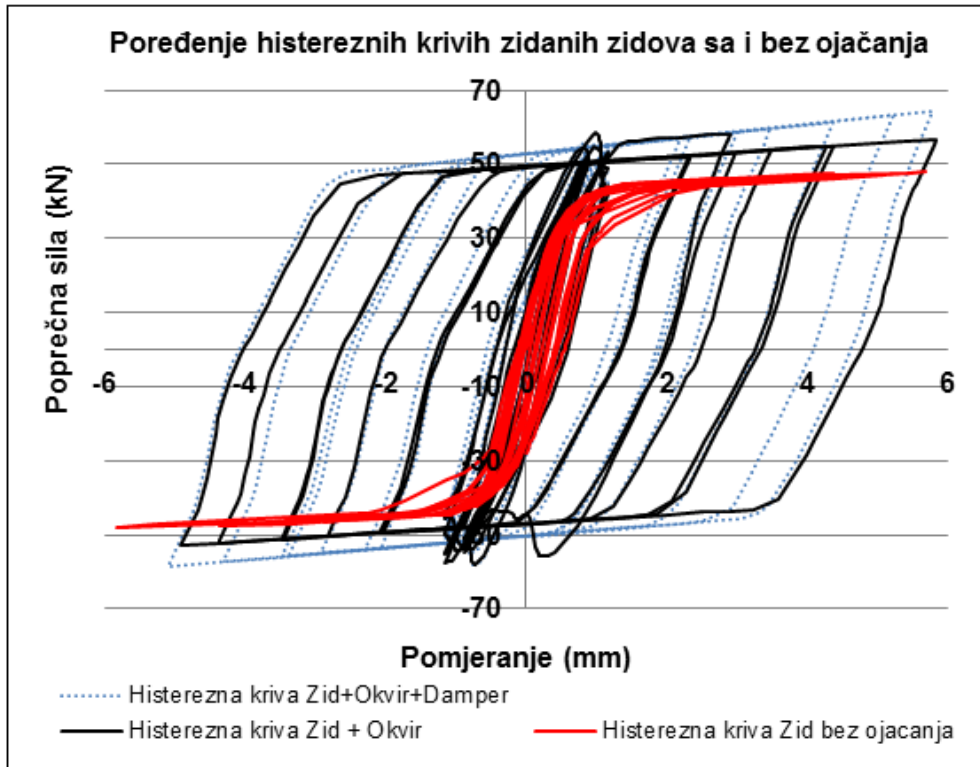
8. Dinamička analiza zidanih zidova s i bez ojačanja

Kao dodatnu kontrolu izvršili smo dinamičku nelinearnu analizu zidanih zidova bez ojačanja kako bi provjerili da li zaista dolazi do prevrtanja zidanog zida i nakon toga smo izvršili istu analizu za zidane zidove ojačane mehaničkim damperima sa i bez okvira. Dinamička analiza je urađena u programskom paketu ABAQUS, nametnuta su pomjeranja vrha zida u određenim vremenskim intervalima. Navedeni program opterećenja prikazan je na slici 9.



Slika 9. Program opterećenja - ABAQUS

Dobivene histerezne krivulje pojedinih slučajeva ojačanja zidanog zida prikazane su na slici 10. Oblik histerezne krivulje zidanog zida bez ojačanja tipičan je za slučaj otkazivanja zida uslijed savijanja odnosno prevrtanja (Rockinga).



Slika 10. Histerezne krivulje zidanog zida sa i bez ojačanja

Ovom analizom ponovo je utvrđen mali utjecaj mehaničkih dampera odnosno prirast otpornosti sistema na poprečnu silu dolazi uglavnom od utjecaja metalnog okvira. Navedenom analizom su potvrđeni prethodni iskazi o upitnosti upotrebe mehaničkih dampera pri ojačanju zidanih zidova.

9. Rekapitulacija

Prilikom analize ojačanja zidanog zida mehaničkim damperima ustanovili smo da je efekt direktne instalacije dampera jako mali. Kako bi povećali efikasnost ojačanja upotrebom mehaničkih dampera dodali smo metalni okvir čiji je zadatak prihvatiti poprečnu silu i moment savijanja koji su posljedica seizmičkih djelovanja i tako rasteretiti zidani zid koji ima slabu otpornost na navedena djelovanja. U tabeli 3. prikazan je pregled dobivenih rezultata analize ojačanja.

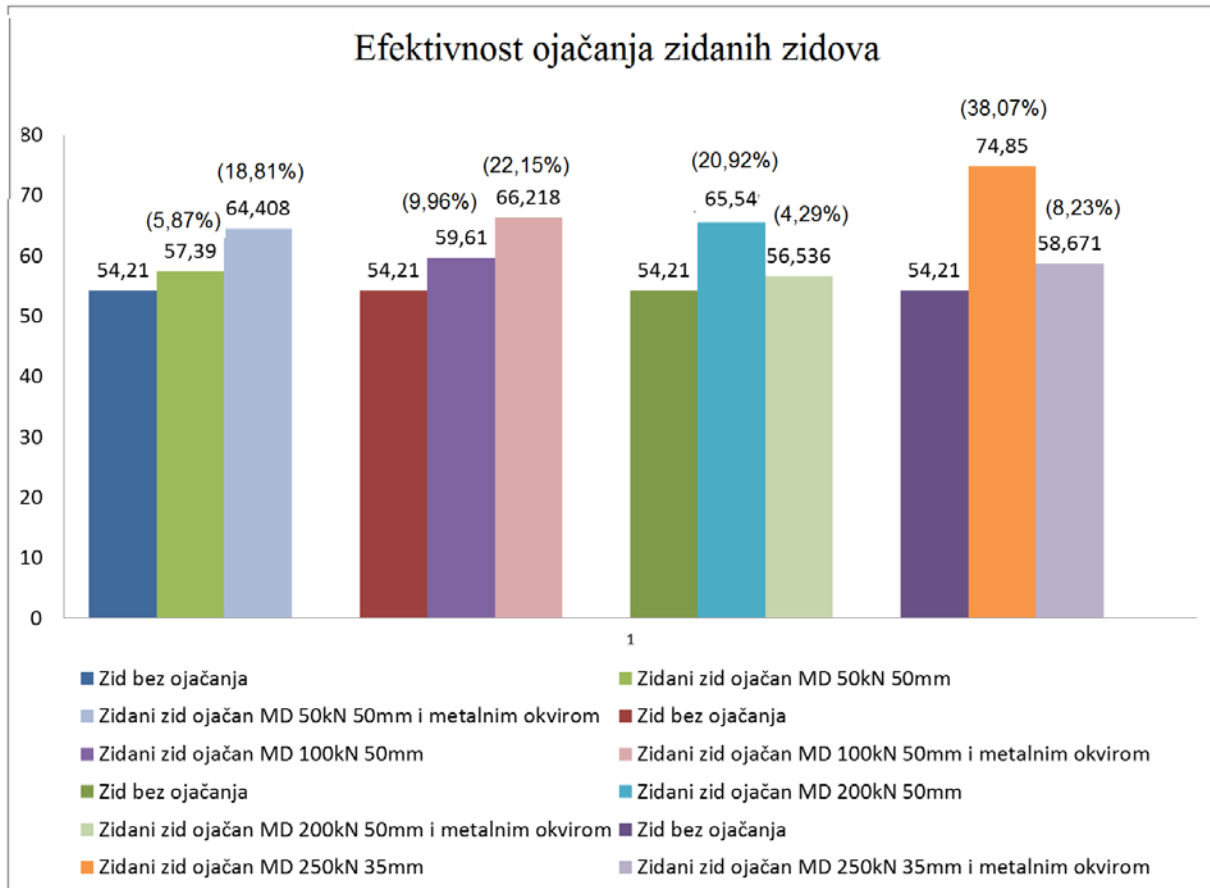
Efektivnost ojačanja zidanih zidova mehaničkim damperima, s akcentom na povećanje krutosti elementa prikazani su na slici 11. Pomjeranja pri otkazivanju kod direktnog ojačanja zidanog zida damperima su skoro identična, što nam govori da i uz upotrebu ojačanja u slučaju graničnog pomjeranja dolazi do otkazivanja. Također možemo vidjeti efekte različitih specifikacija dampera. Porastom krutosti dampera, proporcionalno raste globalna otpornost sistema na poprečne sile ali isto tako opada i iskorištenost dampera kako se pomjeranja globalnog sistema umanjuju. Primjenom dodatnog metalnog okvira efekti ojačanja rastu u prosjeku za 10% u odnosu na direktno ojačanje damperima.



Tablica 3. Pregled rezultata analize zidanih zidova sa i bez ojačanja

Tip ojačanja	Elementi	Mehanički damper			Granične vrijednosti pri otkazivanju elementa		Procentualni prirast poprečne nosivosti prilikom ojačanja	Procentualna iskorištenost mehaničkih dampera pri otkazivanju
		Naziv (MD)	Specifikacije		Poprečna sila	Pomjeranje		
			Granična sila	Granično pomjeranje				
			[kN]	[mm]				
Bez ojačanja	Zidani zid	-	-	54,21	3,87	-	-	
	Metalni okvir	-	-	18,71	8,92	-	-	
Element ojačan mehaničkim damperima	Zidani zid	50kN50mm	50	50	57,39	4,07	5,87	5,76
		100kN50mm	100	50	59,61	3,82	9,96	2,70
		200kN50mm	200	50	65,55	3,87	20,92	1,37
		250kN35mm	250	35	74,85	3,89	38,07	1,10
	Metalni okvir	50kN50mm	50	50	22,96	8,86	22,72	12,50
		100kN50mm	100	50	27,11	8,80	44,91	6,21
		200kN50mm	200	50	31,42	7,75	67,91	2,73
		250kN35mm	250	35	29,01	5,22	55,04	1,47
Kombinacija zidanog zida, metalnog okvira i mehaničkog dampera	50kN50mm	50	50	64,41	3,70	18,81	5,23	
	100kN50mm	100	50	66,22	3,70	22,15	2,62	
	200kN50mm	200	50	56,54	1,43	4,29	0,50	
	250kN35mm	250	35	58,67	1,43	8,23	0,40	

Upotrebom mehaničkih dampera većih krutosti poprečna otpornost globalnog sistema raste a pomjeranja sistema se smanjuju, ali također raste i aksijalna sila u ojačanoj dijagonali koja može dovesti do tečenja metala, odnosno otkazivanje stupova u uglovima ukoliko su oni loše dimenzionirani. Na slici 11. također se može uočiti negativan efekt kombinacije dampera velikih krutosti i okvira male otpornosti na poprečne sile. Pomjeranja sistema će se umanjiti skoro za polovinu, ali pri pojavi plastifikacije nožice stuba cijeli će sistem otkazati, tako da na to treba obratiti pažnju pri dimenzioniranju elemenata okvira.



Slika 11. Efektivnost ojačanja zidanih zidova mehaničkim damperima sa i bez okvira

10. Zaključak

U predstavljenom radu prikazana je analiza ojačanja zidanih zidova primjenom mehaničkih dampera. Fokus rada je stavljen na utjecaj povećanja krutosti sistema pri ojačanju zidanih zidova mehaničkim damperima. Mehaničke karakteristike materijala su dobivene eksperimentalnim putem u laboratoriji Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Sarajevo [4, 5, 6, 7] i korištene su pri formiranju numeričkog modela zidanih zidova.

Numerički model zidanog zida predstavljen u ovom radu je na nivou makro modeliranja, to jest zidni elementi i malter modelirani su kao homogenizirani materijal tako da smo u samom početku idealizirali stvarno ponašanje konstrukcije ali rezultati su dovoljno dobri da bi se mogla izvršiti analiza. Otkazivanje zida odnosno bilo kojeg elementa rijetko nastupa iz samo jednog razloga, već je to složen proces koji nastaje djelovanjem više faktora koji u konačnici dovode do loma. Odabrani zidani zid poznatih materijalnih i geometrijskih karakteristika, s odnosom dimenzija $h:l = 1:1$ modeliran je na otkazivanje kontakta između zida i podloge nakon čega će doći do prevrtanja (rockinga) zida. Nakon verifikacije rezultata numeričkog modela pristupili smo ojačanju zidanog zida.

Zidanom zidu, ojačanom dijagonalnom instalacijom mehaničkog dampera, doprinijet ćemo povećanju nosivosti na poprečnu silu tako što ćemo prihvatiti dio sile zatezanja damperom koja će se formirati okomito na pritisnutu dijagonalu zida nastala kao posljedica seizmičkog djelovanja. Numerička analiza je pokazala da direktno ojačanje zidanih zidova primjenom mehaničkih dampera nije imala značajan utjecaj ukoliko nisu primijenjeni damperi s velikim krutostima.



Kako bi povećali efektivnost mehaničkih dampera primijenili smo kombinirani način ojačanja gdje smo pored dampera instalirali i metalni okvir. Ideja leži u tome da moment savijanja, koji je nastao uslijed seizmičkih djelovanja, rastavimo na spreg sila kojeg će primiti stupovi okvira. Također metalnim okvirom želimo prihvatiti dio poprečne sile tako da zidanom zidu omogućimo njegovu primarnu namjenu a to je primanje vertikalnog opterećenja u svojoj ravnini. Navedeni način ojačanja je pokazao veću efektivnost u odnosu na samostalno ojačanje mehaničkim damperima. Međutim detaljnom analizom pokazalo se da su pozitivni efekti tog načina ojačanja uglavnom vezani za dodatak metalnog okvira dok su mehanički damperi manje doprinijeli rasterećenju zida od navedenih utjecaja.

U konačnici analize su pokazale da su zidovi dosta kruti konstruktivni elementi, bez izražene duktilnosti, pa je upitno njihovo sprezanje s damperima koji su izrazito duktilni jer se lom dešava u zidu prije aktivacije dampera. Analize bi kroz buduće radove bilo potrebno proširiti i na druge tipove zidova i dampera prije generalnog zaključka.

11. Literatura

1. Hrasnica M.: *Aseizmičko građenje*, Građevinski fakultet Univerzitet Sarajevo, Sarajevo, 2012.
2. Zbornik radova - 3. Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2017.
3. Sučević P.: *Protupotresna izolacija građevina*, Magistarski rad, Građevinski fakultet Zagreb, nepoznata godina izdavanja.
4. Hrasnica M., Biberkić F., Medić S.: *In-Plane Behavior of Plain and Strengthened Solid Brick Masonry Walls*, Key Engineering Materials, Juli 2017.
5. Hrasnica M., Medić S., Ademović N.: *Cyclic shear tests on URM and strengthened masonry walls and its modelling*, Conference Paper, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, August 2014.
6. Hrasnica M., Medić S., Biberkić F.: *Experimental testing of Solid Brick Masonry Walls*, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Juni 2018.
7. Hrasnica M., Medić S.: *Finite element modeling of experimentally tested solid brick masonry walls*, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Juni 2018.
8. Medić S.: *Eksperimentalna i numerička analiza zidova od pune opeke izloženih utjecaju potresa*, Doktorski rad, Građevinski fakultet Univerzitet Sarajevo, 2018.
9. Kaushik H.B., Rai D.C., Jain S.K., Asce M.: *Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression*, Journal of materials in Civil Engineering © ASCE, September 2007.
10. Nwofor T.: *Experimental determination of the Mechanical properties of Clay Brick Masonry*, Canadian Journal on Environmental, Construction and Civil Engineering Vol.3, No. 3, 2012.
11. Barraza J.A.C.: *Numerical Model for Nonlinear Analysis of Masonry Walls*, doktorski rad, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen Aachen, 2012.
12. Arash S.: *Mechanical properties of masonry samples for theoretical modeling*, 15th International Brick and BlockMasonry Conference, Florianópolis – Brazil, 2012.
13. Hrasnica M., Medić S.: *Modeling Strategies for Masonry Structures*, Advanced Technologies, Systems, and Applications II, str. 633-644, 2018.
14. Sap2000, CSI Analysis Reference Manual, Computers and Structures, Inc., Berkley, California, USA, 2003.
15. Simonović V., Šahinagic-Isović M., Selimotic M., Simonović G.: *Numerical analysis of seismic resistance of masonry buildings using passive dampers*, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Juni 2018.