

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

Emir Buljubašić, mag. ing. aedif.

emir.buljubasic1@gmail.com

Goran Simonović

Univerzitet u Sarajevu, Građevinski fakultet, prof. dr. sc.

goran.simonovic@gf.unsa.ba

Sažetak: Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja na ojačanju zidanih zidova uporabom kombinacije metalnih okvira i mehaničkih dampera. U ovom radu izvršena je analiza samostalnog metalnog okvira sa i bez ojačanja mehaničkim damperima kako bi imali jasniji uvid u ponašanje pojedinačnih komponenti ojačanja. Prikazan je pregled osnovnih karakteristika mehaničkih dampera, njihove konfiguracije i kombinacije sa metalnim okvirom, te je poseban naglasak stavljen na njihovo ponašanje uslijed zemljotresa. Rezultati numeričke analize za pojedinačni metalni okvir dobiveni su upotrebom dva suvremena programska paketa, ABAQUS-a i SAP2000-a. Nakon dobivenih rezultata pojedinačnog metalnog okvira, izvršeno je ojačanje metalnog okvira apliciranjem mehaničkih dampera te izvršena njihova analiza.

Ključne riječi: metalni okvir, zemljotres, seizmičko djelovanje, ojačanje metalnih okvira, mehanički damperi, pasivni damperi, uređaji za disipaciju energije, seizmička izolacija, numerička analiza metalnih okvira, pushover analiza, dinamička analiza, ciklično opterećenje metalnih okvira

Analysis of steel frames strenghtened with diagonally installed mechanical dampers

Abstract: This paper is a continuation of the research on reinforcement of masonry walls using a combination of metal frames and mechanical dampers. This paper analyzes a single metal frame with and without reinforcement with mechanical dampers in order to have a clearer insight into the behavior of individual reinforcement components. It presents an overview of the basic characteristics of mechanical dampers, their configuration and combinations with metal frame, and special emphasis is placed on their earthquake behavior. The results of the numerical analysis for a single metal frame were obtained using two modern software packages, ABAQUS and SAP2000. After the results of the individual metal frame were obtained, the metal frame was strengthened by applying mechanical dampers and analyzed.

Key words: metal frame, earthquake, seismic action, strengthening of metal frames, mechanical dampers, passive dampers, energy dissipation devices, seismic isolation, numerical analysis of metal frames, pushover analysis, dynamic analysis, cyclic loading of metal frames

1. UVOD

Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja na ojačanju zidanih zidova uporabom metalnih okvira ojačanim mehaničkim damperima [1]. Prethodna analiza je pokazala da su zidovi dosta kruti konstruktivni elementi, bez izražene duktilnosti, te je upitno njihovo sprezanje sa damperima koji su izrazito duktilni jer se lom dešavao u zidu prije aktivacije dampera.

Kako bi imali jasniji uvid u rad pojedinačnih komponenti ojačanja, ovim radom izvršili smo numeričku analizu samostalnog metalnog okvira koji je opterećen istim uvjetima kao i zidani zidovi ispitivani u laboratoriju Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Sarajevu [2, 3, 4, 5, 6].

Treba naglasiti da se damperi primjenjuju 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 pomjeranja i štete prouzrokovane prevelikim deformiranjem konstrukcije. Redukcija pomjeranja se ostvaruje dodavanjem krutosti i/ili disipacije energije (prigušenja) u konstrukciju zgrade ili pojedinog elementa konstrukcije [7].

Nakon dobivenih rezultata numeričke analize metalnog okvira, izvršili smo dijagonalno apliciranje mehaničkih dampera te provjerili kakve efekte ima primjena istih.

2. MATERIJALNE I GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE METALNOG OKVIRA

Dimenzije metalnog okvira za potrebe numeričke analize odabrane su na osnovu dimenzija umanjnih zidanih zidova ($d/v/š = 103/103/25$ cm) koji su ispitivani u laboratoriju Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Sarajevu [2, 3, 4, 5, 6].

Potrebne vrijednosti aksijalnih sila pritiska i zatezanja u stupovima okvira za dimenzioniranje dobivaju se na osnovu poznatih geometrijskih i materijalnih karakteristika zida i metalnog okvira, kao i razine prekompresije zida. Navedene vrijednosti su dobivene iz uvjeta ravnoteže zidanog zida, vodeći računa da je materijal linearno elastičan jer uslijed velikog aksijalnog opterećenja korištene jednadžbe ravnoteže ne bi bile primjenjive kako bi zid prešao u nelinearno stanje.

Za modeliranje metalnog okvira koristili smo se čelikom klase S235 s granicom tečenja $f_y = 235$ N/mm², dimenzije okvira iznose $h/l = 103/103$ cm. Za grede i stupove smo koristili HOP 60x60x4 šuplje profile.

3. MEHANIČKI DAMPERI (SEIZMIČKI PRIGUŠIVAČI) – PASIVNI SUSTAVI DISIPACIJE ENERGIJE

Primjenom mehaničkih dampera možemo pridonijeti poboljšanju dinamičkih svojstava konstrukcija za vrijeme potresa na način da modificiraju karakteristike odgovora konstrukcije. Uporabom sustava pasivnih disipatora energije možemo postići redukciju odgovora dva do tri puta ako ne dodaju krutost i više od toga u slučaju dodatne krutosti [7].



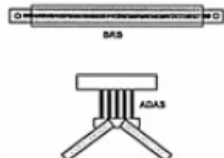
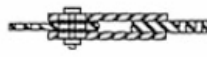
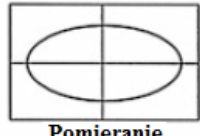
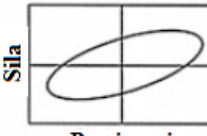
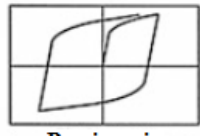
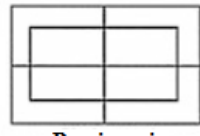
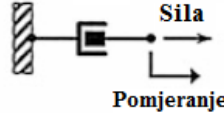
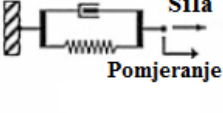
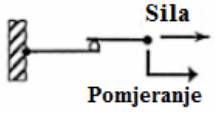
Pasivni sustavi disipacije energije dodaju prigušenje (ponekad i krutost) zgradi, i tako reduciraju odgovor konstrukcije na seizmička djelovanja. Ovi sustavi reduciraju sile u konstrukciji dok ona radi u elastičnom području. Primarni razlog za primjenu uređaja za disipaciju energije u konstrukcijama je smanjenje pomjeranja i štete uzrokovane prevelikim

Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

deformiranjem konstrukcije. Redukcija pomjeranja se ostvaruje dodavanjem krutosti i/ili disipacije energije (prigušenja) u konstrukciju zgrade [7].

Uređaji za disipaciju energije na bazi tečenja metala, trenja i viskoelastičnog prigušenja dodaju konstrukciji i krutost i prigušenje, dok viskozni prigušivači općenito samo povećavaju prigušenje u okvirnoj konstrukciji zgrade. Fokusirat ćemo se na prvu grupu dampera koja pridonosi povećanju krutosti konstrukcije. Na Slici 1 je prikazano histerežno ponašanje i fizički modeli pojedinih vrsta mehaničkih dampera.

	Viskozni damper	Viskoelastični damper	Histerezni metalni damper	Histerezni damper na bazi trenja
Osnovna konstrukcija				
Idealizirano histerežno ponašanje				
Idealizirani fizički model			Idealizovani model nije dostupan	

Slika 1. Idealizirano histerežno ponašanje i fizički modeli dampera [8]

3.1 Izbor mehaničkih dampera za potrebe ojačanja i njihova konfiguracija

Potrebno je naglasiti da se poboljšanje seizmičke otpornosti uporabom mehaničkih dampera svodi u suštini na prigušenje vibracija, ali njihovom instalacijom također povećavamo krutost elementa kojeg ojačavamo. Tako da će fokus ovog rada biti više orijentiran na efekte povećanja krutosti uslijed ojačanja elementa mehaničkim damperima.

Postoje razni načini instalacije dampera u konstrukciju, konfiguracija dampera predstavlja njihovo pozicioniranje prilikom instalacije. Neki od najčešćih metoda instalacije dampera prikazani su na Slici 2.

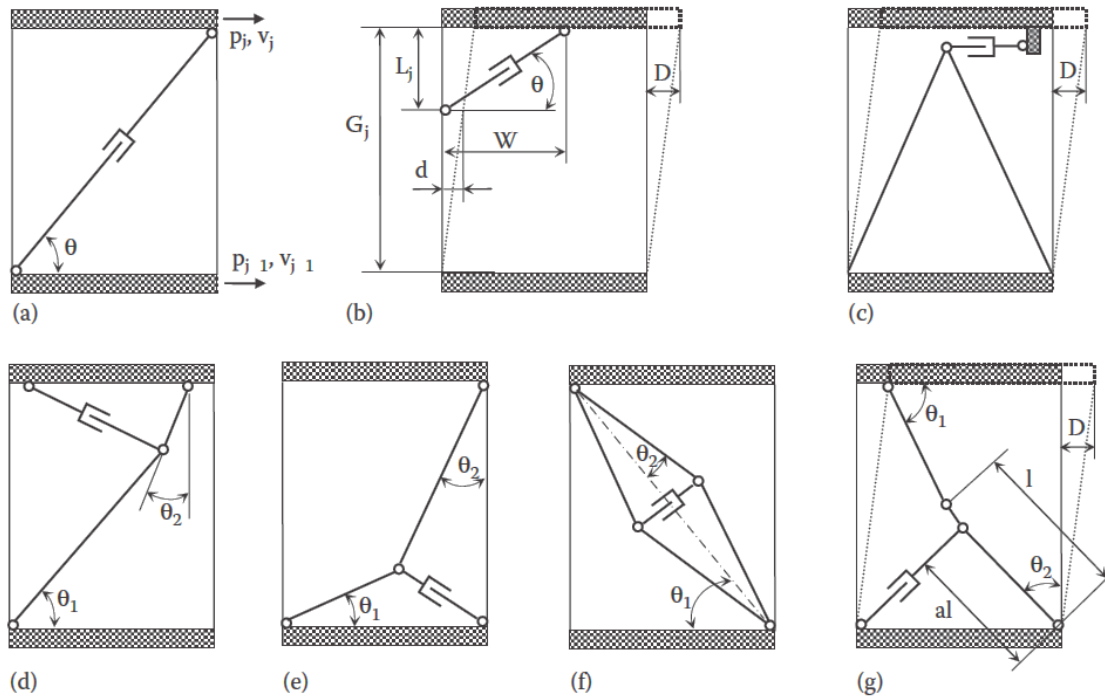
Mehanički damperi se obično instaliraju tako da su sastavni dio drugih elemenata, većinom metalnih profila na neki od navedenih načina (Slika 2). Razlog tomu su relativno male dimenzije dampera u odnosu na element koji se ojačava, ali što opet ovisi o vrsti dampera i o stupnju opterećenja.

U ovom radu ćemo se koristiti samo prostim dijagonalnim ojačanjem (Slika 2a). Uslijed seizmičkog djelovanja, rezultanta sila vertikalnog tlaka i poprečnog opterećenja koja je posljedica potresa će se prenijeti dijagonalno kroz zid. Uslijed slabe čvrstoće žida na zatezanje, okomito na formiranu pritisnutu dijagonalu će se javiti zatezanje koje će dovesti do odvajanja spojnica ili do loma opeke. Ideja leži u tome da mehaničkim damperom primimo dio sile zatezanja i umanjimo njen efekt na zidani zid, odnosno da isti prenesemo na dodani metalni okvir.

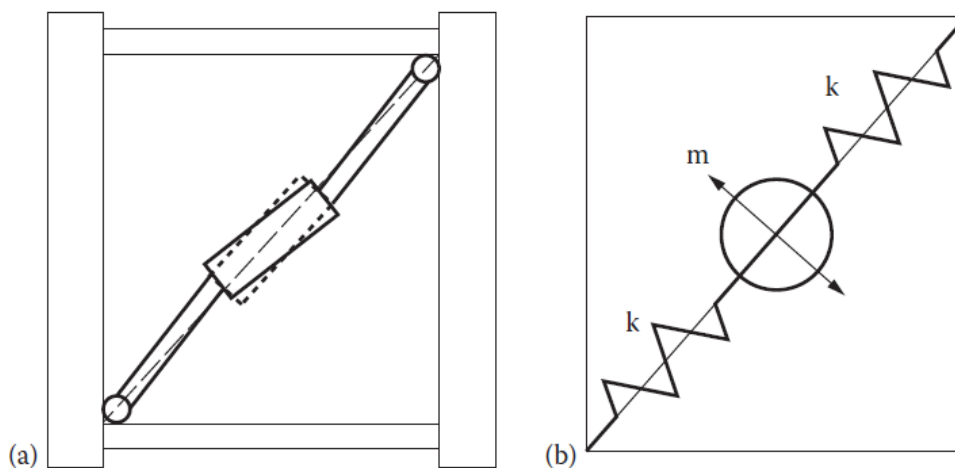
Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

Tijekom seizmičkih aktivnosti dolazi do rada konstrukcije tako da će se i damper ukoliko nije dobro ukrućen pomjerati izvan svoje prvobitne ose. Ukoliko je sastavni dio drugih elemenata (metalnih profila) koji se mogu lokalno izbočavati onda njegova efektivnost može biti umanjena ukoliko se ne odaberu profili otporniji na navedeni utjecaj (Slika 3).



Slika 2. Neki primjeri instalacije dampera [9]



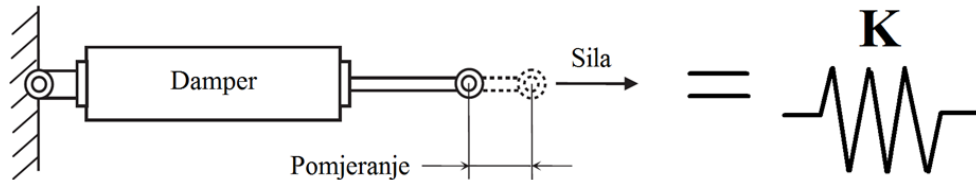
Slika 3. Pomjeranje dampera uslijed bočnog opterećenja [9]

U nastavku rada kako bi izbjegli navedenu grešku ali i kako bi mogli obuhvatiti razne vrste mehaničkih dampera jednim modelom izvršit ćemo pojednostavljenje tako što ćemo damper zamijeniti oprugom sa definisanom krutošću (Slika 4). Proizvođač u ovisnosti o vrsti dampera definira granične sile i pomjeranja koji damper može da primi kao i njegov stupanj

Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

prigušenja, tako da će neovisno o stupnju prigušenja damper zasigurno doprinijeti povećanju krutosti elementa koji se ojačava.



Slika 4. Mehanički damper i upotrijebljeni zamjenski model dampera

4. NUMERIČKO MODELIRANJE METALNIH OKVIRA OJAČANIH MEHANIČKIM DAMPERIMA

4.1 Modeliranje metalnog okvira

Prilikom modeliranja 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. Kako je zid koji je potrebno ojačati metalnim okvirom prethodno izložen vertikalnom pritisku od $\sigma_o=0,4 \text{ N/mm}^2$, isto opterećenje je nanoseno i na metalni okvir. Stupovi okvira su ukliješteni za dno dok su gredi okvira dopuštena pomjeranja u svojoj ravni.

4.1.1 Modeliranje metalnog okvira upotrebom programskog paketa SAP2000

Za modeliranje metalnog okvira koristili smo se čelikom klase S235 sa karakteristikama prikazanih na Slici 5. Dimenzije okvira iznose $h/l=103/103 \text{ cm}$. Za grede i stupove smo koristili HOP 60x60x4 šuplje profile. Za modeliranje istih koristili smo frame elemente, pri čemu smo povećali aksijalnu krutost grede okvira kako bi simulirali realnije uslove jer se greda okvira planira fiksirati za plafon zbog boljeg prijenosa utjecaja na stupove okvira.

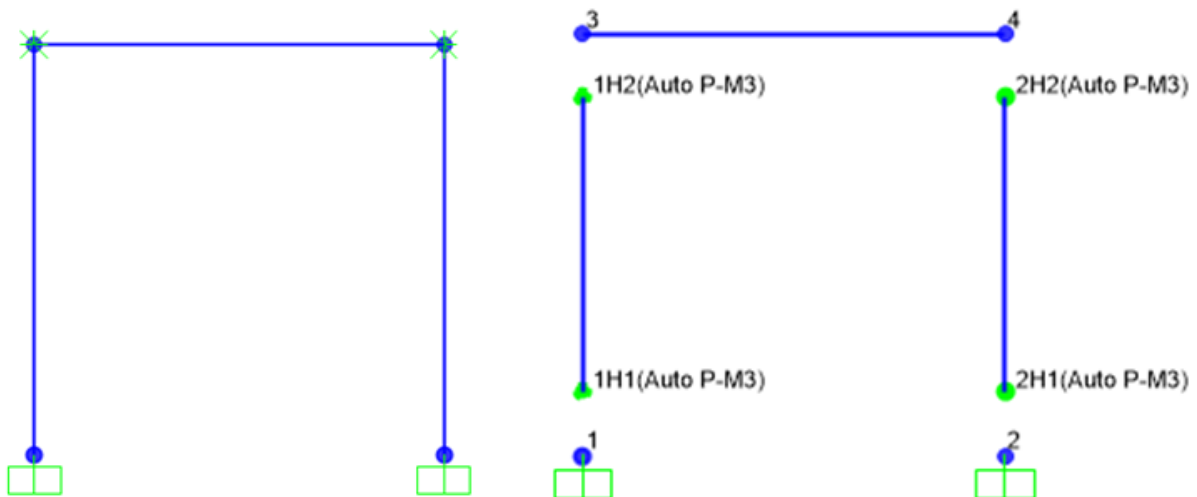
Weight and Mass		Units
Weight per Unit Volume	76,9729	KN, m, C
Mass per Unit Volume	7,849	
Isotropic Property Data		
Modulus of Elasticity, E	2,100E+08	
Poisson, U	0,3	
Coefficient of Thermal Expansion, A	1,170E-05	
Shear Modulus, G	80769231,	
Other Properties for Steel Materials		
Minimum Yield Stress, Fy	235000,	
Minimum Tensile Stress, Fu	360000,	
Effective Yield Stress, Fye	258500,	
Effective Tensile Stress, Fue	396000,	

Slika 5. Mehaničke karakteristike odabranog čelika - SAP2000

Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

Nakon formiranja numeričkog modela metalnog okvira (Slika 6) za potrebe pushover analize potrebno je prvo definirati plastične zglobove kako bi se uzela u obzir moguća plastifikacija nožica stupova uslijed seizmičkog djelovanja. SAP2000 posjeduje standardne, već definirane zglobove pa nije potrebno određivati nove. Točnije postoje dvije osnovne vrste zglobova: standardni zglobovi i zglobovi definirani od strane projektanta kao i generirani zglobovi, međutim samo prva dva tipa mogu biti pridružena ramovskim elementima [10]. Odabrani su štapovi i dodijeljene Hinge opcije po default-u za kombinaciju aksijalne sile i momenta savijanja P-M3 (Slika 7).



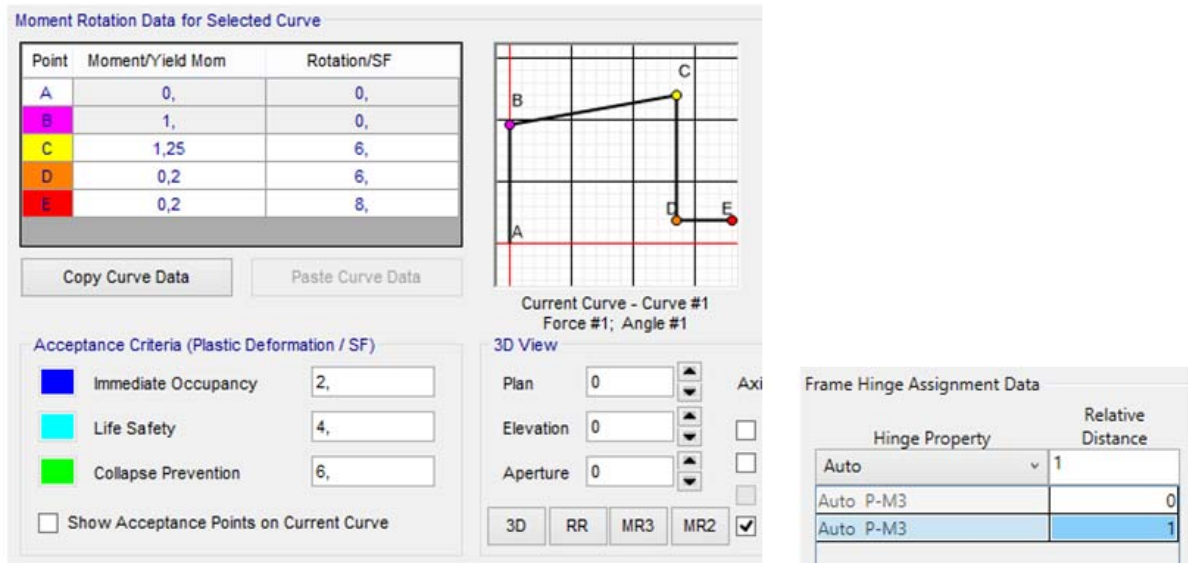
Slika 6. Numerički model metalnog okvira i zadani plastični zglobovi - SAP2000

Slika 7. Odabrana vrsta plastičnih zglobova P-M3

Osobine zadanih plastičnih zglobova P-M3 prikazane su na Slici 8. Prilikom pridruživanja plastičnih zglobova metalnim stupovima vodili smo računa da ih pozicioniramo na krajeve stubova. Postavili smo ih tamo gdje očekujemo plastifikaciju presjeka na način da u „Frame Hinge Assignment Data“ prozoru na položaje relativne udaljenosti unesemo krajeve štapova sa brojevima 0 i 1 (Slika 8). Numerički model metalnog okvira i plastični zglobovi koji su dodijeljeni stupovima okvira prikazani su na slici 6., dok su tipovi odnosno vrste dodijeljenih plastičnih zglobova prikazani na slici 9.

Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima



Slika 8. Osobine odabranih P-M3 plastičnih zglobova

All Hinge Props

Name	Type	Behavior	Generated	From
2H1	Interacting P-M3	Deformation Controlled	Yes	Auto
2H2	Interacting P-M3	Deformation Controlled	Yes	Auto
3H1	Interacting P-M3	Deformation Controlled	Yes	Auto
3H2	Interacting P-M3	Deformation Controlled	Yes	Auto

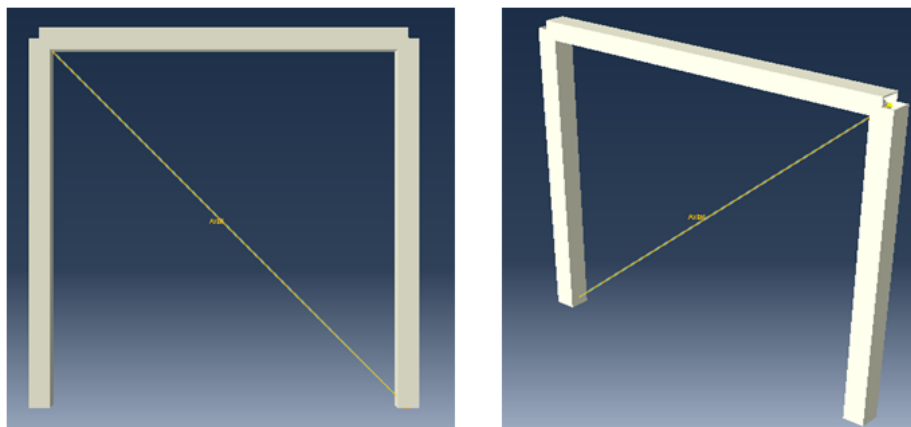
Slika 9. Vrste plastičnih zglobova dodijeljenih stupovima okvira

4.1.2 Modeliranje metalnog okvira upotrebom programskog paketa ABAQUS

Metalni okviri su modelirani uporabom linearnih grednih konačnih elemenata s dva čvora u prostoru B31. Globalna veličina konačnih elemenata iznosi 50mm. Materijalne karakteristike numeričkih modela kao i opis konačnih elemenata dan je u Tablici 1.

Čelična greda okvira će biti ankerirana za plafon, kako bi uzeli taj utjecaj u obzir povećali smo aksijalnu krutost grede. U programskom paketu ABAQUS uzeta je u obzir plastifikacije nožica stupova tako da ih nije bilo potrebno dodatno definirati. Nakon ispitivanja metalnog okvira bez ojačanja, istom smo dodali dijagonalno mehanički damper upotrebom connector elemenata (Slika 10).

Buljubašić, E., Simonović, G.




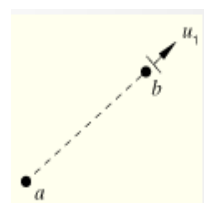
Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

Slika 10. Numerički model metalnog okvira - ABAQUS

4.2 Modeliranje metalnog okvira ojačanog mehaničkim damperom

Metalnom okviru smo dijagonalno aplicirali mehanički damper osobina navedenih u nastavku. Numerički model i formiranje plastičnih zglobova prilikom pushover analize prikazani su na Slici 11.

Tablica 1. Materijalne karakteristike numeričkih modela i opis konačnih elemenata - ABAQUS

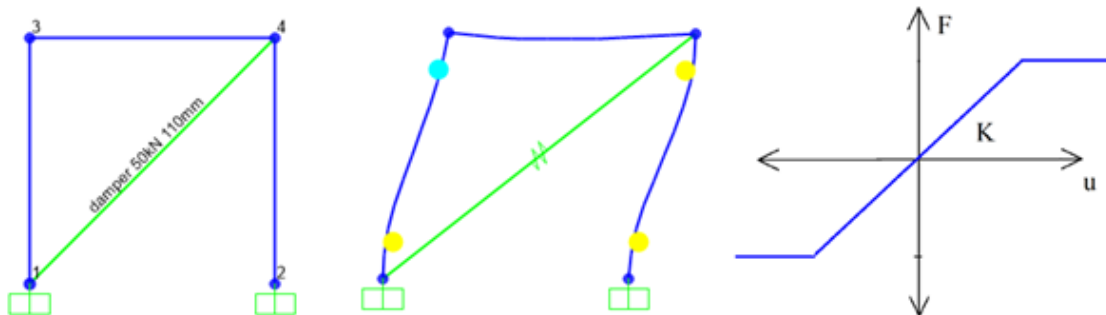
Elementi		Metalni okvir	Mehanički damper
Zapreminska težina [Tona/mm ³]		7,70E-09	-
Modul elastičnosti [N/mm ²]		210000	-
Poasonov koeficijent		0,25	-
Vrsta elementa		B31: linearni gredni konačni element s dva čvora u prostoru	Connector
Skupina		Greda	Translatorni tip-aksijalni
Konačni element	Vrsta	 Beam elements	 Connector elements such as springs and dashpots
	Odabrani		

Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

4.3 Modeliranje mehaničkih dampera

Mehanički damperi su modelirani link elementima s graničnim silama i graničnim pomjeranjima s pretpostavkom da je cijela dijagonala jedan element, mada se u stvarnosti mehanički damper instalira na dodatni element jer je relativno malih dimenzija. Mehaničke osobine dampera ovise o specifikacijama 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 date tačke. Na Slici 11 - desno prikazano je ponašanje mehaničkog dampera.

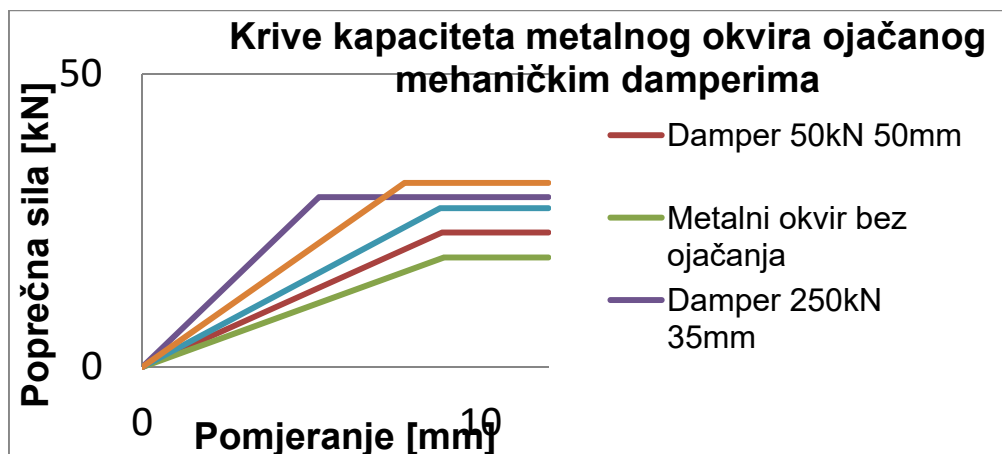


Slika 11. Numerički model metalnog okvira ojačanog mehaničkim damperima, lokacija formiranja plastičnih zglobova u SAP2000-u i ponašanje mehaničkog dampera

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.

5. PUSHOVER ANALIZA METALNOG OKVIRA

Nakon formiranja numeričkih modela metalnog okvira izvršena je pushover analiza. Kriva kapaciteta dobivena nelinearnom statičkom pushover analizom prikazana je na Slici 12 dok otpornost metalnog okvira na poprečne sile iznosi $H_{\max} \approx 18,00$ kN.



Slika 12. Krive kapaciteta metalnog okvira sa i bez ojačanja upotrebom mehaničkih dampera

Buljubašić, E., Simonović, G.

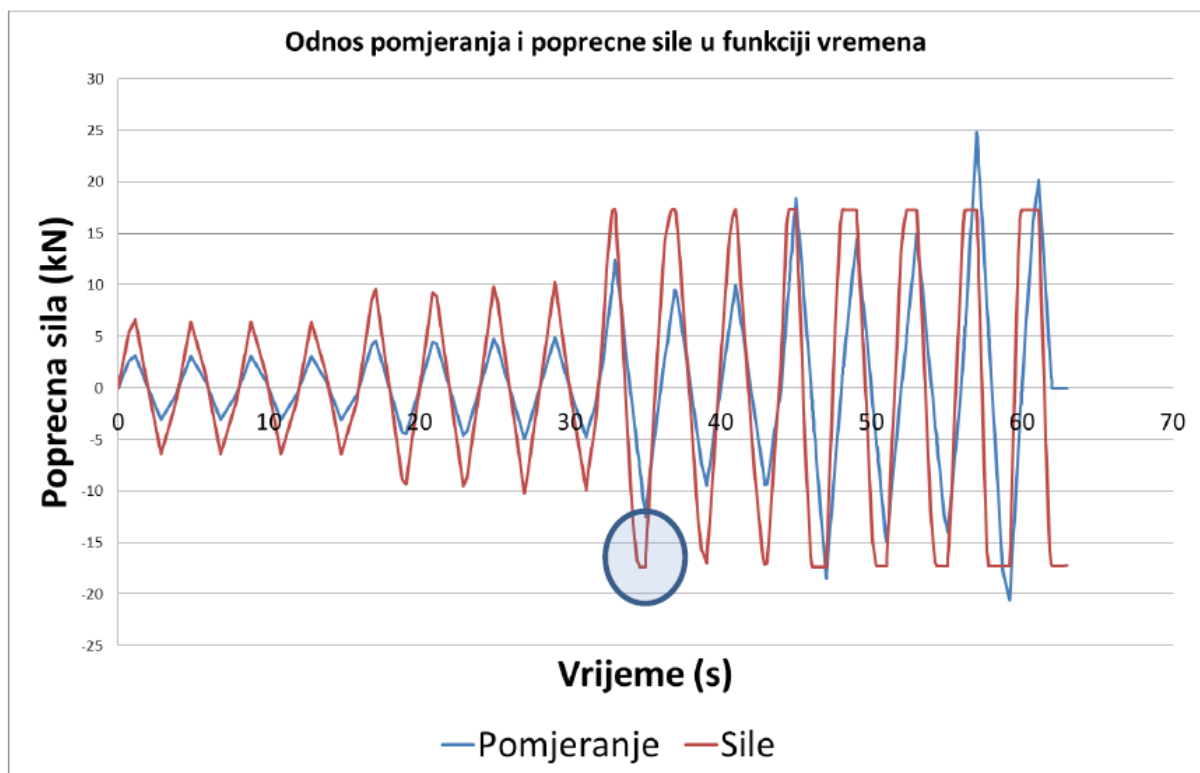
Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

6. PUSHOVER ANALIZA METALNOG OKVIRA OJAČANOG MEHANIČKIM DAMPERIMA

Na prethodno analiziranom metalnom okviru dodana je dijagonala koja je modelirana link (SAP2000) odnosno connector (ABAQUS) elementima koji će simulirati ponašanje mehaničkog dampera. Upotrijebljeni su mehanički damperi različitih specifikacija odnosno različitih graničnih vrijednosti pomjeranja i nosivosti. Utjecaji mehaničkog dampera su višestruki, ukrućivanjem metalnog okvira dolazi do povećanja otpornosti na poprečne sile i smanjuje se pomjeranje vrha okvira uslijed bočnih djelovanja. Dobivene krive kapaciteta metalnog okvira sa i bez ojačanja prikazane su na Slici 12.

7. DINAMIČKO ISPITIVANJE METALNOG OKVIRA OJAČANOG MEHANIČKIM DAMPERIMA

Metalni okvir bez ojačanja izložen je cikličnom opterećenju s programom pomjeranja koji ima tri ciklusa po četiri ponavljanja prikazanog na Slici 13. Nakon dostizanja graničnog pomjeranja metalni okvir pri sili od $H_{max} \approx 18,00$ kN počinje da teče što se može jasno vidjeti na Slici 13. Istim uvjetima smo izložili metalni okvir ojačan mehaničkim damperom „MD50kN50mm“ i vidljivi su pozitivni efekti uporabe istog kroz povećanje krutosti sustava odnosno povećanja otpornosti sustava na poprečne sile (Slika 14).



Slika 13. Poprečna sila i pomjeranje metalnog okvira bez ojačanja u funkciji vremena

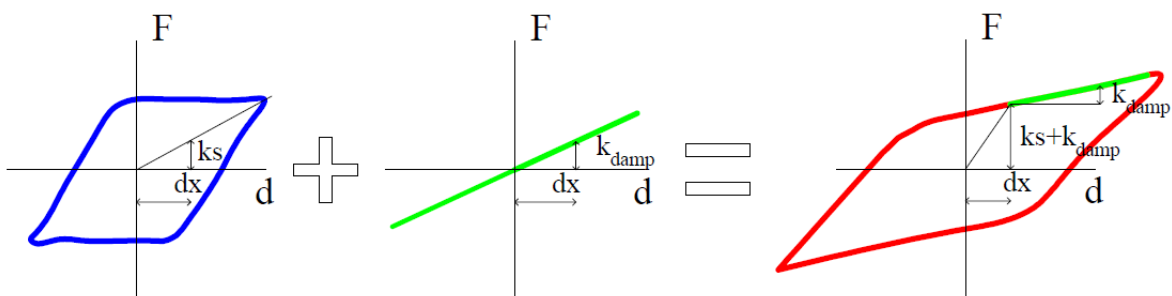
Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima



Slika 14. Poprečna sila i pomjeranje metalnog okvira ojačanog mehaničkim damperom MD 50kN 50mm u funkciji vremena

Bitno je naglasiti da ponašanje cjelokupnog sustava, u ovom slučaju metalnog okvira ojačanog mehaničkim damperima, ovisi o ponašanju pojedinačnih komponenata okvira i mehaničkog dampera. Ponašanje ojačanog sistema trebalo bi biti približno jednako sumi nelinearnih odgovora metalnog okvira i dampera pri istom pomjeranju (Slika 15), [11].

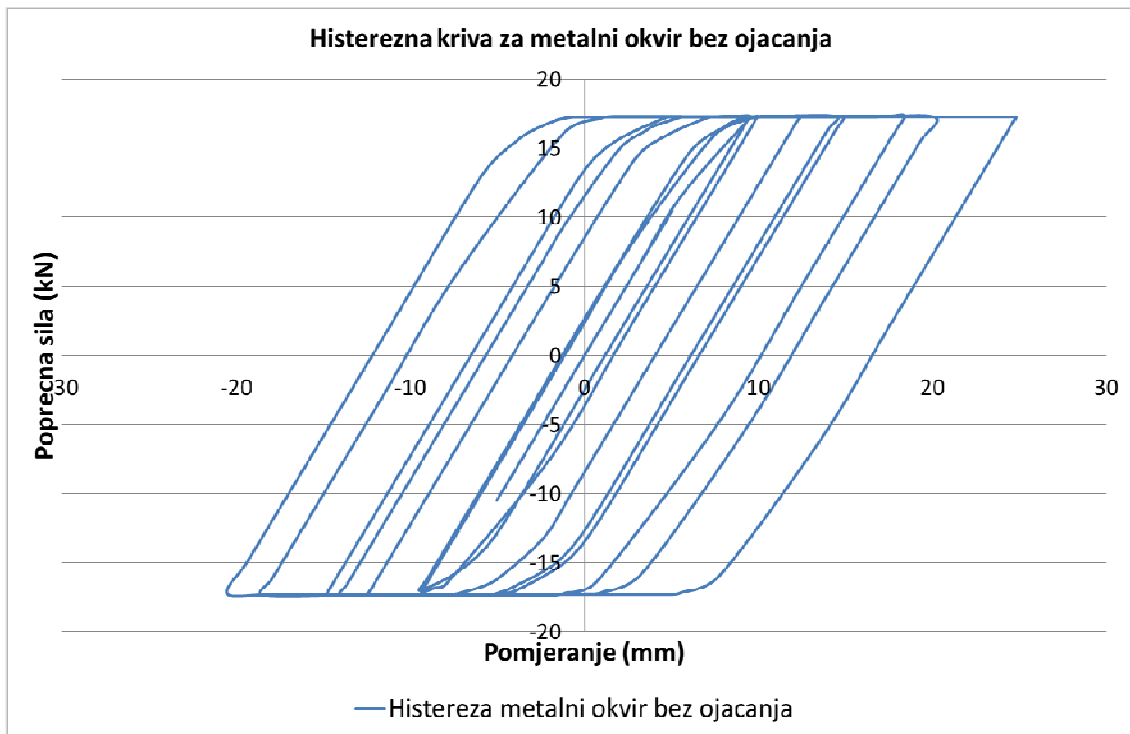


Slika 15. Ponašanje sistema prikazano kao zbir poprečne sile i pomjeranja na vrhu okvira

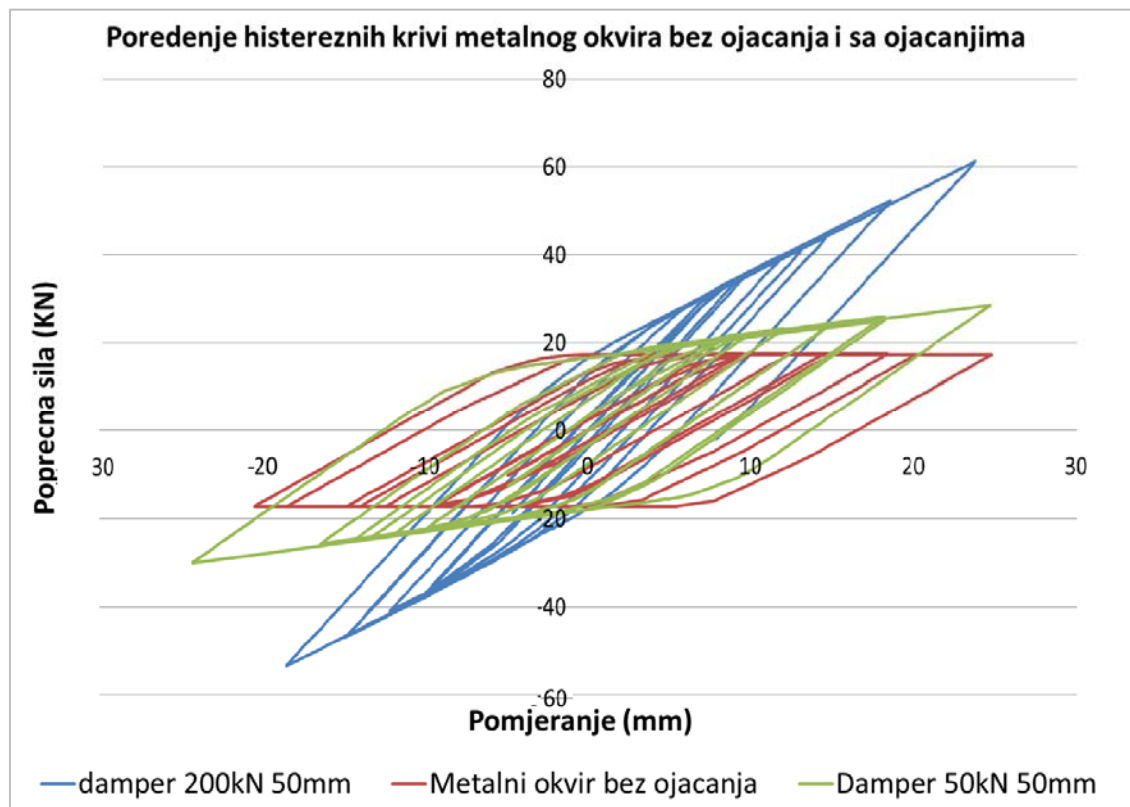
Krutost ojačanog sustava, k_o , trebala bi biti jednaka sumi krutosti metalnog okvira, k_s , i mehaničkog dampera k_{damp} za istu vrijednost pomjeranja dx (Slika 15). Kao dodatnu kontrolu dane izjave ispitali smo metalni okvir sa i bez ojačanja i usporedili utjecaje ojačanja. Na Slici 16 prikazana je histerezna kriva neojačanog metalnog rama, jasno je vidljivo da se backbone kriva slaže s krivom kapaciteta dobivenom u prethodnom poglavlju.

Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima



Slika 16. Histerezna kriva za metalni okvir bez ojačanja



Slika 17. Usporedba histereznih krivih metalnog okvira sa i bez ojačanja

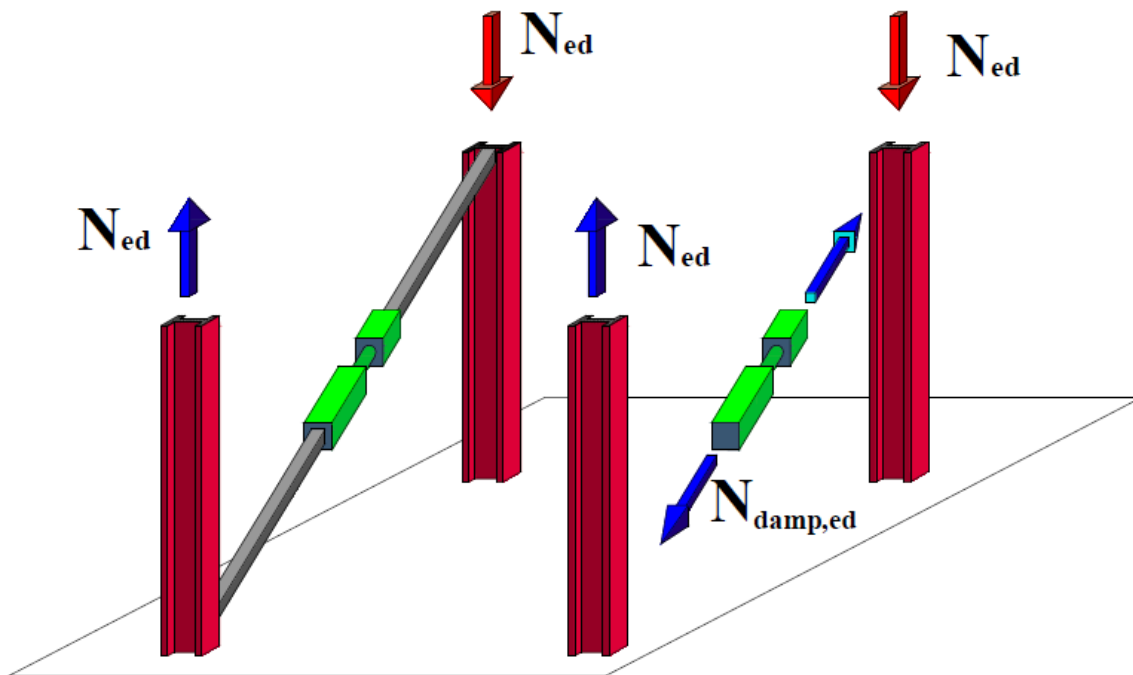
Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

Metalni okvir smo ojačali primjenom mehaničkih dampera „MD50kN50mm“ i „MD200kN50mm“ i dobivene histerezne krive usporedili s neojačanim okvirom (Slika 17). Usporedbom histereznih krivih vidljivo je da je za određeno pomjeranje krutost ojačanog sustava (Slika 18) u danoj točki jednak sumi krutosti metalnog okvira i mehaničkog dampera.

8. REKAPITULACIJA

Postoje razne vrste ojačavanja zidanih zidova, a jedna od njih jeste uporaba metalnih okvira. Kako su zidani zidovi elementi koji su jako slabi na seizmičke utjecaje ideja je u tome da taj utjecaj prebacimo na drugi element, u ovom slučaju na metalni okvir. Metalni okvir se postavlja neposredno u blizini zida kako bi mogao sudjelovati u preuzimanju opterećenja. Funkcija takvih okvira je primanje poprečnih sila koje su nastale kao posljedica seizmičkih djelovanja kao i prihvaćanje momenata savijanja zidanog zida rastavljajući ih na spreg sila koji će prihvatiti stupovi metalnog okvira (Slika 18).



Slika 18. Metalni okvir ojačan mehaničkim damperima i plan prijenosa sila

Analiziran je metalni okvir sa i bez ojačanja, prilikom čega su primijenjeni mehanički damperi različitih specifikacija. Rezultati numeričkih analiza prikazani su u Tablici 2.

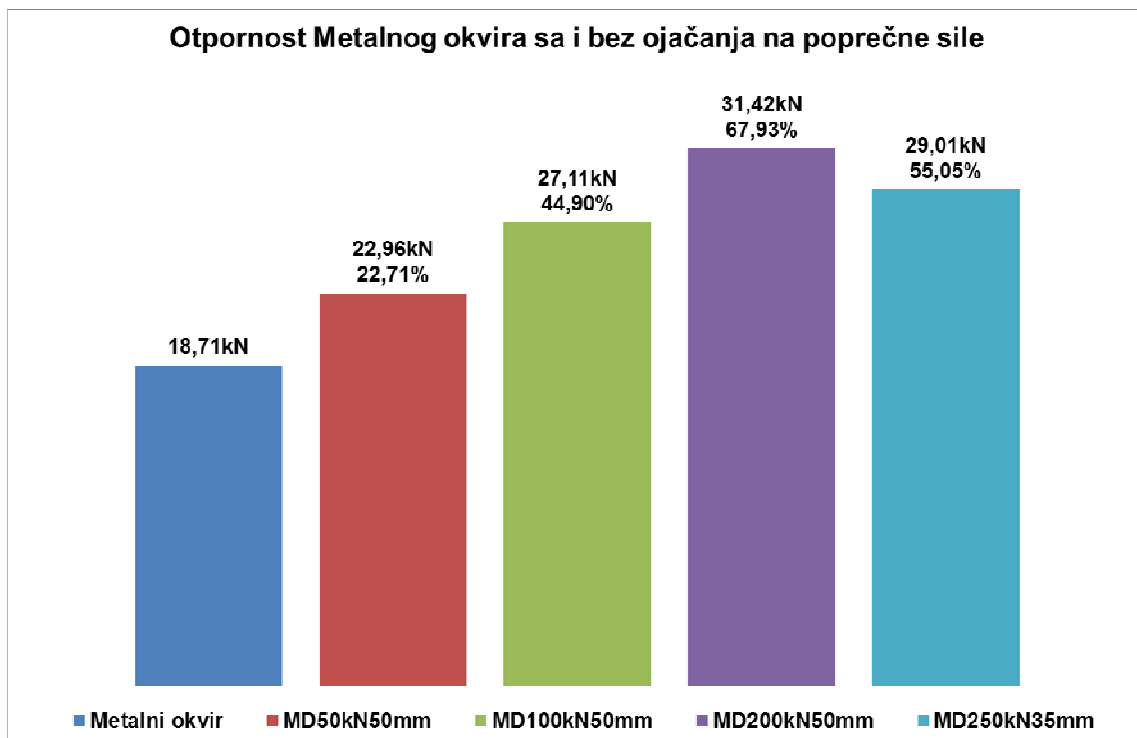
Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

Tablica 2. Pregled rezultata analize metalnih okvira sa i bez ojačanja

Elementi	Mehanički damper			Granične vrijednosti pri otkazivanju elementa		Procentualni prirast poprečne nosivosti prilikom ojačanja [%]
	Naziv (MD)	Specifikacije		Poprečna sila [kN]	Pomjeranje [mm]	
		Granična sila	Granično pomjeranje			
		[kN]	[mm]			
Metalni okvir	-	-	18,71	8,92	-	
Ojačanje okvira Mehaničkim damperom	50kN50mm	50	50	22,96	8,86	22,71
	100kN50mm	100	50	27,11	8,80	44,90
	200kN50mm	200	50	31,42	7,75	67,93
	250kN35mm	250	35	29,01	5,22	55,05

Lako se može uočiti da primjena mehaničkih dampera povećava krutost sustava. Uporabom mehaničkih dampera većih krutosti poprečna otpornost globalnog sustava raste, a pomjeranja sustava se smanjuju (Slika 19 i Slika 20).

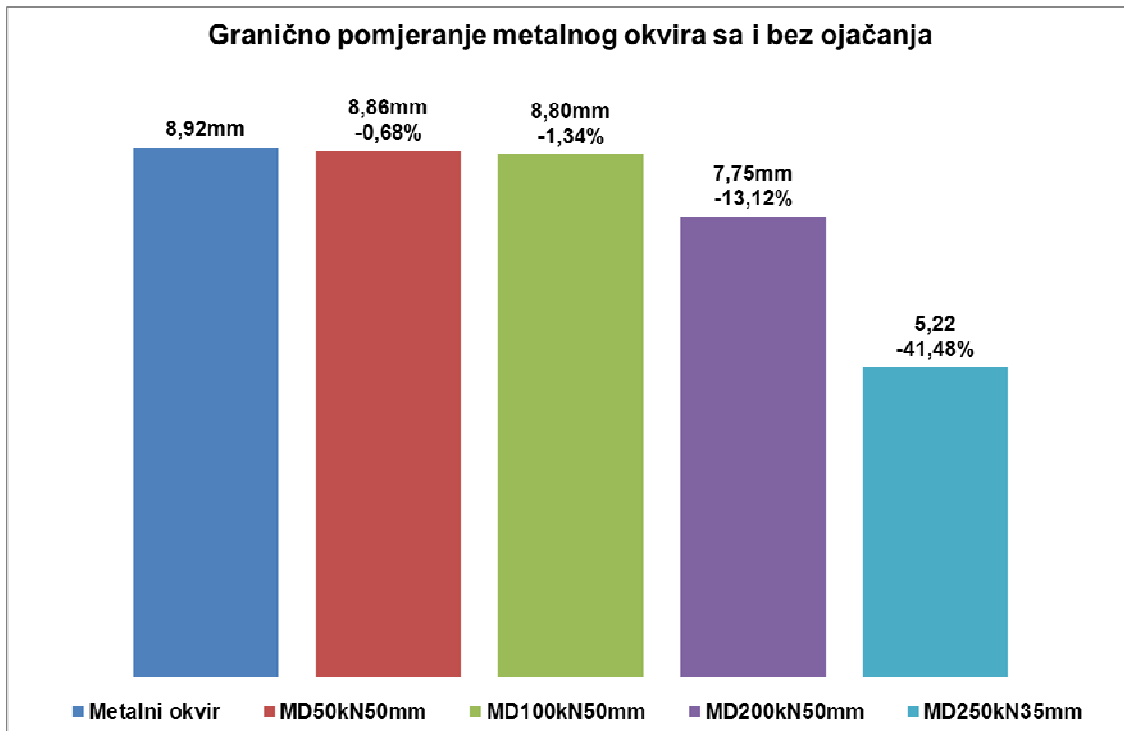


Slika 19. Otpornost metalnog okvira sa i bez ojačanja na poprečne sile

Buljubašić, E., Simonović, G.

Analiza ojačanja metalnih okvira s dijagonalno instaliranim mehaničkim damperima

Posebnu pažnju moramo posvetiti prilikom dimenzioniranja stupova okvira kako će primjenom mehaničkih dampera većih krutosti porasti i aksijalna sila u ojačanoj dijagonali što može izazvati koncentraciju napona u nožicama stupova, te u konačnici dovesti do otkazivanja uslijed plastifikacije nožica. Pomjeranja sistema će se umanjiti skoro za polovinu (Slika 20), ali pri pojavi plastifikacije nožice stupa će cijeli sustav otkazati. Pravilnim dimenzioniranjem možemo izbjeći negativni efekt kombinacije dampera velikih krutosti i okvira male otpornosti na poprečne sile.



Slika 20. Granična pomjeranja metalnog okvira sa i bez ojačanja

9. ZAKLJUČAK

U predstavljenom radu prikazana je analiza ojačanja metalnih okvira primjenom dijagonalno instaliranih mehaničkih dampera, pri čemu je u fokus rada stavljen utjecaj povećanja krutosti sustava uporabom mehaničkih dampera.

Treba naglasiti da dimenzije elemenata okvira prvenstveno ovise od geometriji i razini predkompresije postojećih zidanih zidova koji se žele ojačati o čemu će biti više rečeno u budućim radovima.

Numeričkom analizom smo potvrdili da je krutost ojačanog sustava, k_o , jednaka sumi krutosti metalnog okvira, k_s , i mehaničkog dampera k_{damp} za istu vrijednost pomjeranja d_x .

Dijagonalnim ojačanjem pored povećanja krutosti sustava smanjujemo i dužine izvijanja okvira, odnosno dovodimo do smanjenja pomjeranja i povećanja otpornosti na poprečne sile. Primjenom mehaničkih dampera većih krutosti proporcionalno raste globalna otpornost sustava na poprečne sile. Također je veoma bitno obratiti pozornost na pravilno dimenzioniranje stupova metalnog okvira vodeći računa o odnosima krutosti mehaničkih dampera i stupova. Ukoliko dijagonale imaju veću krutost od stupova okvira doći će do koncentracije napona u kutovima okvira što će izazvati plastifikaciju nožica stupova te otkazivanje sustava.

LITERATURA

1. Buljubašić, E., Simonović, G.: Analiza ojačanja zidanih zidova mehaničkim damperima, e-Zbornik: Elektronički zbornik radova građevinskog fakulteta, Vol. 9, No. 18, 2019.
2. Hrasnica, M., Biberkić, F., Medić, S.: In-Plane Behavior of Plain and Strengthened Solid Brick Masonry Walls, Key Engineering Materials, Juli 2017.
3. 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.
4. Hrasnica, M., Medić, S., Biberkić, F.: Experimental Testing of Solid Brick Masonry Walls, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Juni 2018.
5. Hrasnica, M., Medić, S.: Finite element modeling of experimentally tested solid brick masonry walls, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Juni 2018.
6. Medić, S.: Eksperimentalna i numerička analiza zidova od pune opeke izloženih utjecaju potresa, Doktorski rad, Građevinski fakultet Univerzitet Sarajevo, 2018.
7. Sučević, P.: Protupotresna izolacija građevina, Magistarski rad, Građevinski fakultet Zagreb, nepoznata godina izdavanja
8. Castaldo, P.: Integrated Seismic Design of Structure and Control Systems, Springer Tracts in Mechanical Engineering, Springer International Publishing Switzerland, 2014
9. Liang, Z., Lee, G.C., Dargush, G.F., Song, J.: Structural damping: Applications in Seismic Response Modification, CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.
10. Simonović, V., Simonović, G.: Nelinearna statička analiza po preporukama FEME 273, 274, 356, 440 i 450 i njena praktična primjena uz pomoć kompjuterskog software-a sap2000, Materijali i konstrukcije 50, br.1-2, 2007.
11. Simonović, V., Šahinagic-Isović, M., Selimotić, M., Simonović G.: Numerical analysis of seismic resistance of masonry buildings using passive dampers, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Juni 2018.
12. Sap2000, CSI Analysis Reference Manual, Computers and Structures, Inc., Berkley, California, USA, 2003.