

Primljen / Received: 23.6.2025.

Ispravljen / Corrected: 17.9.2025.

Prihvaćen / Accepted: 29.9.2025.

Dostupno online / Available online: 10.2.2026.

Povećanje seizmičke otpornosti armiranobetonskih zgrada korištenjem viskoznih prigušivača

Autori:

¹Izv.prof.dr.sc. **Heppy Kristijanto**heppy.k@its.ac.id

Autor za korespondenciju

²**Andreas Maxwell Sitompul**5012211055@student.its.ac.id¹Mr.sc. **Muhammad F. Firmansyah**6012221119@student.its.ac.id¹Dr.sc. **Ahmad Basshofi Habieb**ahmad.basshofi@its.ac.id¹Izv.prof.dr.sc. **Budi Suswanto**budi_suswanto@ce.its.ac.id¹ Tehnološki institut Sepuluh Nopember (ITS),
Indonezija

Odjel za građevinarstvo

² PT Wiratman, Indonezija

Stručni rad

**Heppy Kristijanto, Andreas Maxwell Sitompul, Muhammad Farhan Firmansyah,
Ahmad Basshofi Habieb, Budi Suswanto**

Povećanje seizmičke otpornosti armiranobetonskih zgrada korištenjem viskoznih prigušivača

Nedavni potresi ukazali su na ranjivost zgrada u visokorizičnim zonama, što je rezultiralo znatnom materijalnom štetom i ekonomskim gubicima. U radu se istražuje učinkovitost viskoznih prigušivača u povećanju seizmičke otpornosti deseterokatne zgrade od armiranog betona smještene u Jakarti, u području visoke seizmičke opasnosti. Provedena je usporedna analiza seizmičkih odgovora konvencionalne zgrade i zgrade s ugrađenim prigušivačima. Serija proračuna vremenske integracije provedena je korištenjem sedam potresnih zapisa prilagođenih spektru odgovora za maksimalni razmatrani potres. Ispitani su ključni parametri seizmičkog performansa, uključujući dinamičke karakteristike, poprečnu silu na temeljima, ubrzanje krova, omjer pomaka između katova te disipaciju energije. Rezultati pokazuju da ugradnja viskoznih prigušivača znatno smanjuje vlastiti period konstrukcije, poprečnu silu na temeljima i ubrzanje krova. Nadalje, zabilježeno je znatno smanjenje omjera pomaka između katova uz istodobno znatno povećanje ukupne disipacijske sposobnosti zgrade. Ti rezultati potvrđuju da su viskozni prigušivači učinkovito i primjenjivo rješenje za povećanje seizmičke otpornosti konstrukcija.

Ključne riječi:

viskozni fluidni prigušivači, seizmička otpornost, seizmička zaštita, proračun vremenske integracije, armiranobetonska zgrada

Professional paper

**Heppy Kristijanto, Andreas Maxwell Sitompul, Muhammad Farhan Firmansyah,
Ahmad Basshofi Habieb, Budi Suswanto**

Seismic performance enhancement of reinforced concrete buildings utilizing fluid viscous dampers

Recent seismic events have highlighted the vulnerability of buildings in high-risk zones, resulting in substantial damage and economic loss. This study investigated the effectiveness of fluid viscous dampers in enhancing the seismic performance of a 10-story reinforced concrete building located in Jakarta, an area highly susceptible to earthquakes. A comparative analysis of the seismic responses of both conventional and damped buildings was conducted. A series of linear time-history analyses were performed employing seven spectrally matched ground motions, targeting the maximum considered earthquake level response spectrum. Key seismic performance parameters, including dynamic characteristics, base shear, roof acceleration, interstory drift ratio, and energy dissipation, were examined. These findings demonstrate that the incorporation of FVDs results in significant reductions in the fundamental period of a structure, base shear, and roof acceleration. Furthermore, a substantial reduction in the interstory drift ratios was observed, in conjunction with a significant increase in the overall energy-dissipation capacity of the building. These findings position FVDs as an effective and suitable solution for improving the structural resilience.

Key words:

fluid viscous dampers, seismic performance, seismic protection, time history analysis, reinforced concrete building

1. Uvod

Nedavni potresi prouzročili su veliku štetu na zgradama u zemljama s visokim seizmičkim rizikom, što je dovelo do velikog broja žrtava i ekonomskih gubitaka [1]. Postoji niz tehnika za povećanje seizmičke otpornosti konstrukcija smanjenjem učinaka seizmičkih sila, uključujući konvencionalne pristupe dimenzioniranja. Međutim, konvencionalno dimenzioniranje aktivnog otpora potresima relativno je skuplje i ima određena ograničenja poput potrebe za opsežnim popravcima nakon potresa zbog akumulirane štete.

Neka istraživanja temelje se na principu disipacije energije dodavanjem prigušivača radi povećanja prigušenja konstrukcije, čime se znatno smanjuju pomaci i minimizira šteta. Prigušivači apsorbiraju i disipiraju energiju, poboljšavajući odgovor zgrade na seizmičke sile kroz mehanizme poput trenja, kretanja viskoznog fluida i elastičnih deformacija. Konvencionalni seizmički dizajn osigurava osnovnu čvrstoću i krutost potrebnu za izdržavanje potresa. Ugradnja seizmičkih zaštitnih uređaja poput izolacije temelja ili prigušivača dodatno smanjuje seizmičke zahtjeve [2-6] ili aktivno kontrolira i disipira seizmičku energiju pomoću prigušivača, što rezultira smanjenjem štete i poboljšanjem izvedbe zgrade [7, 8]. Različite vrste prigušivača, uključujući trenje, viskoelastične, histeretičke i prigušivače podešene mase, koriste se ovisno o razini seizmičkog rizika i specifičnim zahtjevima [9-11].

Viskozni prigušivači (eng. *fluid viscous dampers* - FVD) široko su priznati kao ekonomični uređaji za disipaciju energije zbog svoje sposobnosti disipacije znatne seizmičke energije i smanjenja vibracija zgrade kroz viskozni fluid. Zbog toga su prvi put primijenjeni u infrastrukturnim zgradama krajem osamdesetih godina 20. stoljeća, a zatim su postali ključni element u razvoju seizmičkog inženjersva, pružajući pouzdanu zaštitu od snažnih potresa i vjetrova. U posljednja četiri desetljeća FVD-ovi su se etablirali kao učinkovito rješenje, znatno poboljšavajući performanse novih i postojećih zgrada [12-14].

FVD se sastoji od čeličnog cilindra ispunjenog viskoznim silikonskim fluidom. Unutar cilindra kreće se klip s malim otvorima ili sustavom ventila. Kada je konstrukcija izložena seizmičkome potresu, kretanje klipa tjera fluid kroz otvore, učinkovito disipirajući kinetičku energiju seizmičkih valova, pretvarajući je u toplinsku energiju, koju konstrukcija može sigurno apsorbirati. Ključna karakteristika FVD-ova jest ta da je stopa disipacije energije proporcionalna brzini kretanja klipa [15-17].

Uređaji za disipaciju energije dijele se na aktivne i pasivne. Aktivni FVD-ovi dinamički prilagođavaju svoja svojstva vanjskim uzbuđenjima, zahtijevajući senzore, računalo i napajanje, što ih čini skupima. Pasivni FVD-ovi djeluju autonomno bez vanjskog napajanja ili intervencije [18-20]. Ovo istraživanje fokusirano je na pasivne FVD-ove. Pasivni FVD-ovi imaju fiksnu ovisnost sile i brzine te je njihov odgovor izravno uzrokovan pomakom konstrukcije [21]. FVD-ovi ne povećavaju krutost konstrukcije, već smanjuju potrebu za dodatnom krutošću omogućujući dodatno prigušenje. Osim toga FVD-ovi nisu jako osjetljivi

na promjene temperature ili frekvencije [22, 23], što ih čini pouzdanijom opcijom od drugih pasivnih uređaja.

Opsežna analitička istraživanja potvrđuju učinkovitost i praktičnu primjenjivost FVD-ova u konstrukcijama izloženima seizmičkim djelovanjima. Naprimjer, Ijmulwar i Patro [24] pokazali su da integracija FVD-ova u redovitu AB deseterokatnicu smanjuje poprečnu silu temelja i katova za 30 %. Miani i sur. [13] istražili su učinke ugradnje FVD-ova u šesterokatnicu, nepravilnu AB stambenu zgradu, i utvrdili da prigušivači apsorbiraju 82 % ukupne seizmičke energije, ostavljajući samo 18 % energije za disipaciju vlastitim prigušenjem zgrade. Također su zabilježena znatna smanjenja unutarnjih sila elemenata, uključujući smanjenje momenta savijanja na gredama od 43 % i smanjenje smičnih sila na stupovima od 58 %.

De Domenico i sur. [25] pokazali su da FVD-ovi u šesterokatnicama tipa MRF, tj. okvirna konstrukcija (eng. *Moment Resisting Frame* - MRF) smanjuju apsolutna ubrzanja katova za 70 % i omjer pomaka između katova za 50 % u odnosu na strukture bez FVD-ova. Rezultati potvrđuju prikladnost FVD-ova za učinkovito smanjenje seizmičkih sila i očuvanje integriteta konstrukcije, posebno u višekatnim MRF sustavima.

Osim njihove učinkovitosti u MRF sustavima, FVD-ovi su pokazali velike koristi i za druge tipove konstrukcija. Lan i sur. [26] istraživali su šesterokatne zgrade s okvirom i šipkama, opremljene viskoznim prigušivačima te zabilježili približno smanjenje pomaka krova za 23 % i smanjenje poprečne sile na temeljima za 19 %. Na temelju tih rezultata, Ahmed [27] ispitao je 40-katnicu armiranobetonskoga zidanog jezgrenog zida i uočio znatna poboljšanja, uključujući smanjenje pomaka krova za 33 – 36 %, smanjenje savijajućih momenata u sredini zida do 44 %, smanjenje posmičnih deformacija za 37 %, smanjenje zahtjeva rotacije u temelju zida za gotovo 69 % te smanjenje rotacija spojenih greda do 100 %, uz smanjenje zahtjeva inelastične energije za 450 %. Nedavno su Alhamdany i Dilsiz [28] procijenili trokatnu armiranobetonsku zgradu saniranu FVD-ovima i zabilježili znatna poboljšanja seizmičkog odgovora: omjeri pomaka između katova smanjeni su za približno 62,5 % u smjeru X i 65 % u smjeru Y; pomaci krova smanjeni su za oko 85 % u smjeru X i 53 % u smjeru Y, a ubrzanja krova smanjena su za približno 43 % i 55 % u smjerovima X i Y, respektivno. Ti rezultati zajednički naglašavaju svestranost FVD-ova u poboljšanju seizmičke otpornosti različitih tipova konstrukcija, čime se proširuje njihova primjenjivost izvan konvencionalnih MRF konfiguracija.

U ovome radu opisana je primjena FVD-ova u pasivnim prigušivačkim sustavima za visokogradnju. U studiji je razvijen model deseterokatne armiranobetonske (AB) zgrade s posebnim okvirom otpornim na moment (eng. *special moment resisting frame* - SMRF). Primarni je cilj studije usporediti seizmičku izvedbu konvencionalne zgrade s izvedbom zgrade opremljene FVD-ovima pri istim scenarijima pomaka tla, koristeći linearni proračun vremenske integracije. Projektiranje FVD-ova temelji se na Priručniku za projektiranje prigušivača tvrtke Taylor Devices i FEMA P-1051 [29, 30]. Te smjernice pružaju detaljne

postupke i zahtjeve za projektiranje konstrukcija s prigušivačkim sustavima, uzimajući u obzir karakteristike zgrade, svojstva prigušivača i predviđene ciljeve izvedbe. Na kraju u radu su prezentirani zaključci dobiveni analizom i simulacijama.

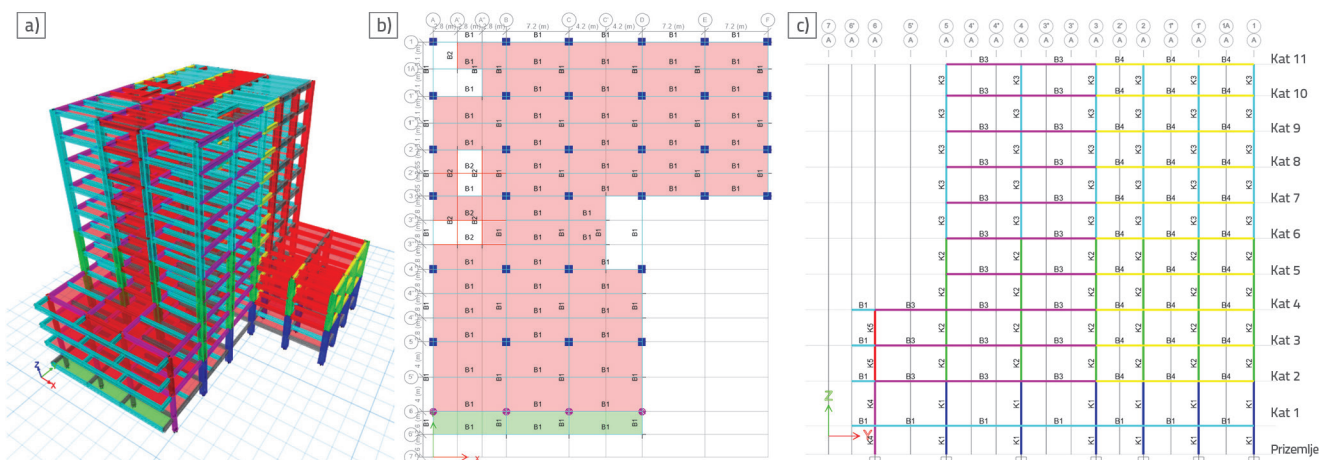
2. Metodologija

Primarni cilj ove studije bio je usporediti seizmičku otpornost konvencionalnih zgrada i zgrada opremljenih prigušivačima. Promatrani parametri koji su uspoređivani uključivali su dinamičke karakteristike (prirodni period i faktor participacije modalne mase), poprečnu silu na temeljima, ubrzanje krova, omjer međukatnih pomaka i disipaciju energije.

U ovom je istraživanju primijenjena analiza linearnog proračuna vremenske integracije (eng. *Linear Time History Analysis* - LTHA) u skladu s odredbama ASCE 7-16 [31]. U Odjeljku 12.6. navedeno je da je linearna analiza vremenske integracije prihvatljiva metoda za seizmičko projektiranje, dok se nelinearna analiza vremenske integracije koristi u slučajevima kada je potrebna detaljna procjena neelastičnog ponašanja. Nadalje, odjeljak 12.9.2. dopušta primjenu linearne analize vremenske integracije za procjenu dinamičkog ponašanja konstrukcija pod seizmičkom pobudom, ali pod uvjetom da konstrukcijski model ostane elastičan i da su svi zahtjevi standarda zadovoljeni. Budući da je cilj ove studije istražiti učinkovitost fluidnih viskoznih prigušivača (FVD), koji uglavnom djeluju unutar elastičnog raspona disipirajući energiju prigušenjem koje ovisi o brzini, LTHA pruža prikladan i standardima usklađen okvir bez potrebe za nelinearnim modeliranjem.

2.1. Modeliranje zgrade

Reprezentativna konstrukcija u studiji slučaja, prikazana na slici 1., jest deseterokatnica od armiranog betona (AB) s okvirnom nosivom konstrukcijom (MRF) visine 41 m. Zgrada je projektirana kao zgrada obrazovne namjene smještena u gradu Jakarta, a klasificirana je kao kategorija rizika IV. sa srednjom klasom tla (SD).

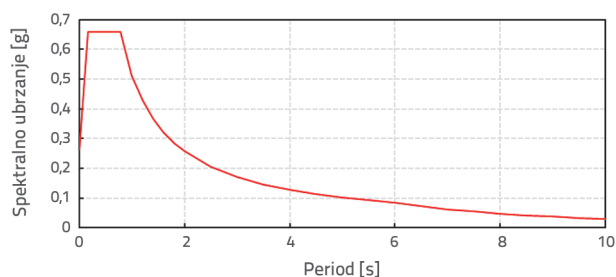


Slika 1. a) Prostorni (3D) prikaz; b) tlocrtni prikaz; c) presjek modela zgrade

Glavne materijalne karakteristike uključuju beton standardne tlačne čvrstoće od 30 MPa (odgovarajući modul elastičnosti jest 25.742 MPa prema indonezijskom standardu za normalni beton) i armaturu s granicom tečenja od 400 MPa. Grede i stupovi modelirani su pomoću štapnih elemenata, dok su ploče modelirane pomoću plošnih elemenata, pri čemu je pretpostavljeno linearno elastično ponašanje. Dimenzije i detalji armature greda i stupova prikazani su u tablicama 1. i 2.

Za analizu nosivosti konstrukcija je modelirana primjenom metode konačnih elemenata (FEM) korištenih u linearnoj analizi. Primijenjena opterećenja klasificirana su kao vlastita težina, dodatno stalno, uporabno, seizmičko opterećenje i opterećenje vjetrom, pri čemu su sva određena prema važećemu građevinskom standardu. Vlastito opterećenje određeno je na temelju težine konstrukcijskih elemenata. Dodatno stalno opterećenje uključuje završnu obradu poda, kanale i fasadu, ukupno 1,5 kN/m² za površinska opterećenja, dok su pregradni zidovi dodavali dodatno 1 kN/m² za linijska opterećenja. Uporabna opterećenja dodijeljena su prema namjeni prostora: 1,92 kN/m² za učionice, 4,79 kN/m² na hodnicima i 0,92 kN/m² za krov.

U ovoj su studiji provedene dvije vrste seizmičkih analiza. Prva je uključivala linearnu analizu spektrom odziva za preliminarnu procjenu, a druga linearnu analizu vremenskom integracijom (LTHA). Projektni spektar odgovora zgrade izveden je prema najnovijemu indonezijskom seizmičkom standardu s periodom povratka od 2500 godina i prigušenjem od 5 %, a koji je prikazan na slici 2.



Slika 2. Projektirani spektar odziva za Jakarta

Tablica 1. Detalji armature greda

Primarna greda								
Tip			Uzdužna šipka			Stremenska šipka		
Naziv	b [mm]	h [mm]	Lokacija	n	D [mm]	n	D [mm]	s [mm]
B1	350	650	Ležaj (gornja zona)	5	22	2	10	100
			Srednji raspon (donja zona)	3	22			
B2	350	600	Ležaj (gornja zona)	4	22	2	10	100
			Srednji raspon (donja zona)	3	22			
B3	350	650	Ležaj (gornja zona)	6	22	2	10	100
			Srednji raspon (donja zona)	4	22			
B4	350	650	Ležaj (gornja zona)	5	22	2	10	100
			Srednji raspon (donja zona)	4	22			
B5	450	900	Ležaj (gornja zona)	8	29	4	10	100
			Srednji raspon (donja zona)	5	29			

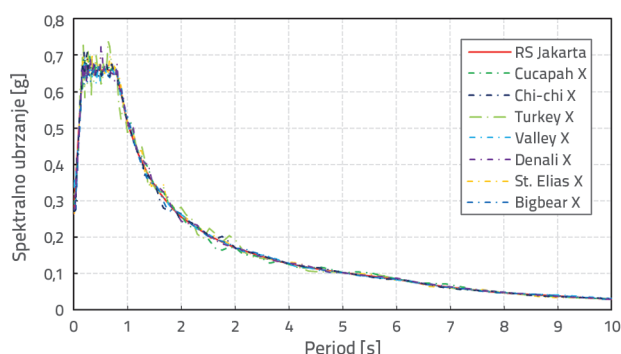
Tablica 2. Detalji armature stupova

Stup							
Tip			Uzdužna šipka		Stremenska šipka		
Naziv	b [mm]	h [mm]	n	D [mm]	n	D [mm]	s [mm]
K1	900	900	32	29	6	10	100
K2	900	900	24	29	4	10	100
K3	800	800	20	29	4	10	100
K4	800	-	29	29	4	10	100
K5	800	-	14	29	4	10	100
K6	900	900	32	29	5	10	100

Tablica 3. Odabrani seizmički zapisi

Mehanizam	Smjer	Potres	Magnituda [Ms]	Udaljenost [km]	PGA [g]	Trajanje [s]
Benioff	X	Kocaeli, Turska 1999.	7,51	60,43	0,099	138,57
	Y				0,077	
	X	St, Elias, Aljaska 1979.	7,54	80	0,058	83,2
	Y				0,083	
	X	El Mayor, Meksiko 2010.	7,2	212,92	0,008	56,32
	Y				0,012	
Shallow Crustal	X	Imperial Valley, USA 1979.	6,53	50,1	0,097	28,57
	Y				0,121	
	X	Bigbear, USA 1992.	6,46	52,48	0,076	59,58
	Y				0,087	
Megathrust	X	Chi-Chi, Taivan 1999.	7,62	100,12	0,055	143,99
	Y				0,063	
	X	Denali, Aljaska 2002.	7,9	139,85	0,045	300
	Y				0,040	

Taj povratni period odražava uvjet maksimalnoga seizmičkog opterećenja, odnosno scenarij MCE (eng. *Maximum Considered Earthquake* - MCE) s ciljanom razinom rizika (2 % vjerojatnosti prekoračenja u 50 godina, period povratka 2475 godina), što se obično primjenjuje za procjenu najkritičnijeg scenarija opterećenja konstrukcije. Cilj primjene punog MCER opterećenja umjesto seizmičkog opterećenja temeljenog na povratnome periodu od 475 godina, ili dvije trećine MCER-a, jest naglasiti učinkovitost prigušivača pri rijetkim potresima visokog intenziteta i osigurati konzervativnu procjenu seizmičkog opterećenja. Budući da je model linearan, MCER odgovori interpretirani su kao gornja granica elastičnih procjena za procjenu robusnosti, s naglaskom na relativnim poboljšanjima izvedbe koja postižu FVD-ovi. Analiza vremenske integracije korištena je za precizno modeliranje odgovora konstrukcije na širok raspon karakteristika seizmičke pobude. Ta je metoda posebno potrebna za visoke zgrade i posebne zgrade koje uključuju dodatne sustave prigušenja. Odabran je skup od sedam parova seizmičkih zapisa usklađenih sa spektrom MCE, prikazan na slici 3.



Slika 3. Spektri seizmičkih zapisa usklađenih sa spektrom

Zapisi su odabrani na temelju procedure deagregacije seizmičkog rizika u skladu s indonezijskim standardom.

Detalji svih sedam parova zapisa navedeni su u tablici 3. Svaki je zapis pojedinačno usklađen sa ciljnim spektrom slijedeći konzervativnu proceduru provjere spektra, osiguravajući usklađenost s ASCE 7-16, eliminirajući mogućnost podcjenjivanja seizmičkih zahtjeva i smanjujući varijabilnost spektralnih odstupanja. To je omogućilo konzistentan ulazak za procjenu učinkovitosti FVD sustava.

2.2. Modeliranje fluidnih viskoznih prigušivača

Parametri i konfiguracija FVD-ova utvrđeni su iterativnim procesom dimenzioniranja. Karakteristike prigušivača temeljene su na MCER-u, što odgovara povratnome periodu od 2500 godina, a kako je navedeno u indonezijskome seizmičkom propisu i smjernicama za dimenzioniranje prigušivača. Karakteristike prigušivača ovise o ciljanoj vrijednosti prigušenja, krutosti konstrukcije, vlastitome periodu konstrukcije, kutu ugradnje FVD-a i broju instaliranih FVD-ova. Iterativni proces završava kada odabrani parametri zadovolje kriterije prihvatljivosti, tj. kada je tražena vrijednost prigušenja manja od prigušenja predloženog modela. Određivanje potrebnog kapaciteta prigušenja u početnoj fazi ključno je za postizanje željenog efekta. Potrebno prigušenje primijenjeno u ovome istraživanju je 30 %. Potrebni kapaciteti prigušenja za svaki kat i odabrani modeli FVD-a prikazani su u tablici 4.

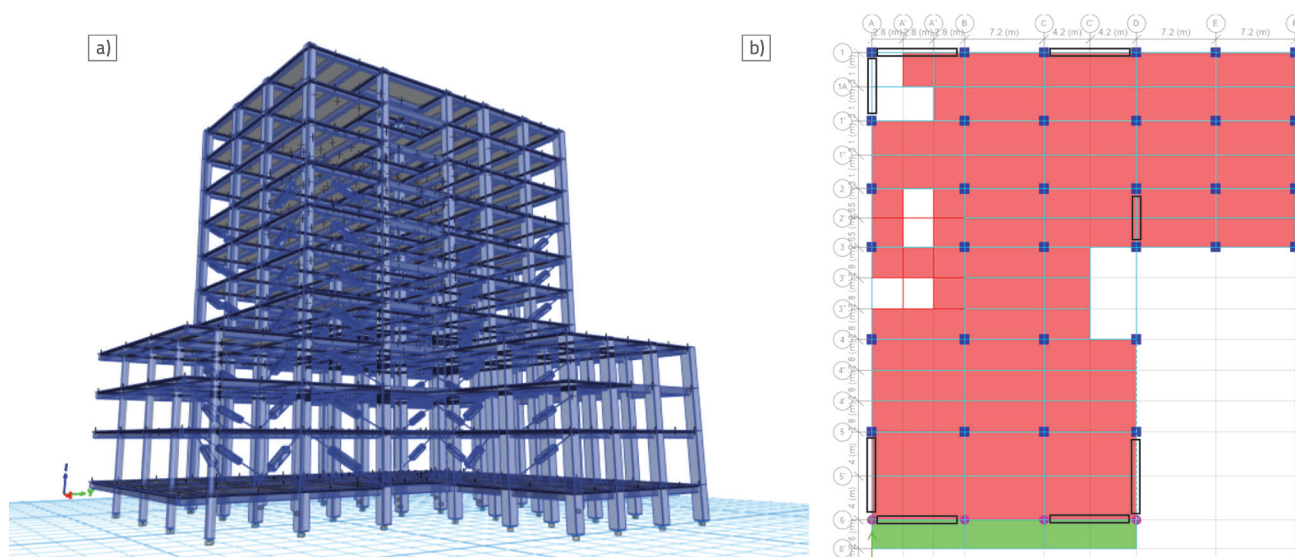
Kako bi se optimirala isplativost bez kompromisa u performansama, FVD-ovi su instalirani samo do sedmoga kata. Ta strategija djelomične ugradnje prihvaćena je nakon procjene da za postizanje ciljanih performansi prigušivači nisu neophodni na svim katovima. Geometrijski raspored FVD-ova u zgradi prikazan je na slici 4., gdje su njihove pozicije prikazane crnim kvadratima. Za točnu numeričku analizu konačnim elementima važno je definirati parametre FVD-ova kako bi se repliciralo njihovo fizičko ponašanje. Ti parametri uključuju efektivnu krutost i koeficijente prigušenja. Tri varijante modela FVD-ova, dobivene iterativnim procesom, navedene su u tablici 5.

Tablica 4. Raspored FVD-ova po katovima i kapacitet prigušenja

Etaža	K_x [kN/m]	K_y [kN/m]	C_x	C_y	F_x [kN]	F_y [kN]	FVD specifikacija	
							Broj modela	Kapacitet prigušenja [kN]
Krov	265899,5	434415,5	1961,0	2906,8	444,9	726,8	-	-
10	334271,5	523329	2465,3	3501,8	635,6	995,0	-	-
9	353656,1	550058,6	2608,3	3680,6	672,4	1045,8	-	-
8	359562,4	559045,5	2651,8	3740,7	683,6	1062,9	-	-
7	365871,4	563229,7	2698,3	3768,7	695,6	1070,9	17170	2000
6	393139,8	588504,7	2899,5	3937,9	747,5	1118,9		2000
5	435525,3	611045,1	3212,1	4088,7	828,1	1161,8		2000
4	541776,6	748031,5	3995,7	5005,3	1030,1	1422,2	20875	3000
3	560689,1	739221,6	4135,2	4946,4	1066,0	1405,5		3000
2	572483,7	689003,4	4222,1	4610,3	1360,6	1637,5		3000
1	2341892	2706012	17271,8	18106,8	3562,1	4116	17200	6500

Tablica 5. Parametri dizajna odabranih modela FVD-ova

Broj modela	Kapacitet prigušenja [kN]	Efektivna krutost [kN/m]	Koeficijent prigušenja [kN.s/m]
17170	2000	27727.37	7757.964
20875	3000	41591.06	11636.95
17200	6500	112642.5	31516.73



Slika 4. Raspored FVD-ova u zgradi: a) Prostorni (3D) prikaz; b) tlocrt koji prikazuje pozicije prigušivača (crni pravokutnici)

Važno je napomenuti da analiza spektralnog odziva u ovome istraživanju nije bila namijenjena usporedbi odziva konstrukcije, već je služila isključivo kao preliminarni alat za dizajn FVD-ova. Ciljani spektar odziva, razvijen u skladu s ASCE 7-16 i FEMA P-1051, korišten je za određivanje odgovarajućih koeficijenata i eksponenata prigušivača. Nakon toga seizmička učinkovitost zgrada s prigušivačem i bez njega procijenjena je isključivo pomoću linearne analize vremenske integracije (LTHA).

3. Rezultati i rasprava

U ovome poglavlju prikazana je usporedba parametara seizmičkog odgovora građevine dobivenih analizom konačnih elemenata za dva strukturna modela (konvencionalni i sustav s prigušivačima). Rezultati se razmatraju u smislu glavnih kriterija seizmičkog ponašanja: dinamičke karakteristike, poprečna sila na temeljima, relativan međukatni pomak, ubrzanje krova i disipacija energije. Ova analiza procjenjuje učinkovitost primjene FVD-ova u smanjenju seizmičkog opterećenja i minimiziranju oštećenja konstrukcije.

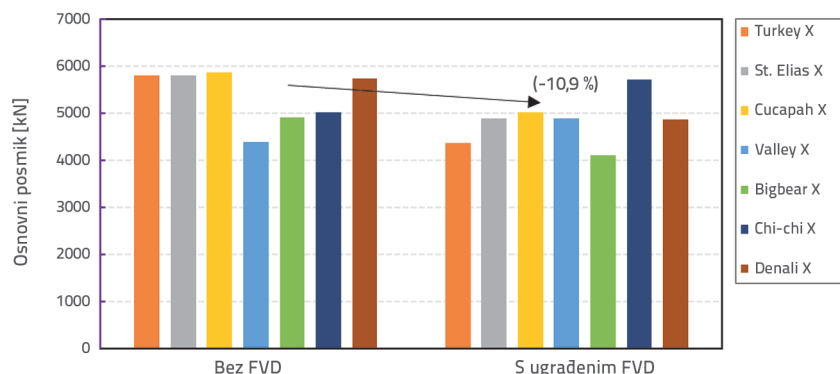
3.1. Dinamičke karakteristike

Dinamičke karakteristike proučavanih konstrukcija uključuju prirodni period i faktore sudjelovanja modalne mase. Usporedba prvih triju modova za dva modela zgrade prikazana

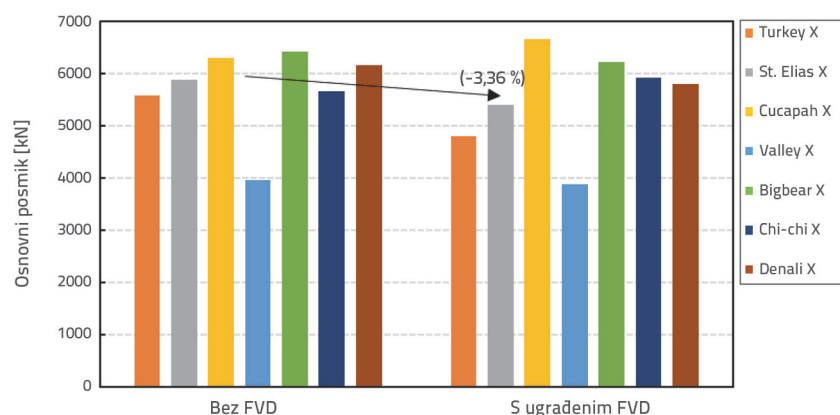
je u tablici 6. Ugradnja FVD-ova učinkovito je skratila vlastiti period konstrukcije s 1,758 s na 1,581 s u prvome modu, što je smanjenje od približno 10 %. To smanjenje povoljno je za smanjenje međukatnih pomaka povećanjem krutosti konstrukcije. Iz aspekta faktora sudjelovanja mase može se uočiti mala razlika između sustava zgrada. Oba modela postigla su minimalni faktor sudjelovanja mase od 90 % u 12. modu, što potvrđuje ispravnost raspodjele mase u modelu i zadovoljava zahtjeve seizmičkog pravilnika.

Tablica 6. Usporedba dinamičkih karakteristika zgrada

Dinamičke karakteristike		Konvencionalni	Prigušeni
Period	Mod 1	1,758	1,581
	Mod 2	1,595	1,434
	Mod 3	1,247	1,099
Masovno sudjelovanje (X-smjer)	Mod 1	69,03 %	68,30 %
	Mod 2	69,45 %	68,50 %
	Mod 3	69,50 %	68,50 %
Masovno sudjelovanje (Y-smjer)	Mod 1	0,27 %	0,10 %
	Mod 2	59,56 %	66,10 %
	Mod 3	73,22 %	72,80 %



Slika 5. Usporedba osnovnih sila smicanja zgrade duž X-smjera



Slika 6. Usporedba osnovnih sila smicanja zgrade duž Y-smjera

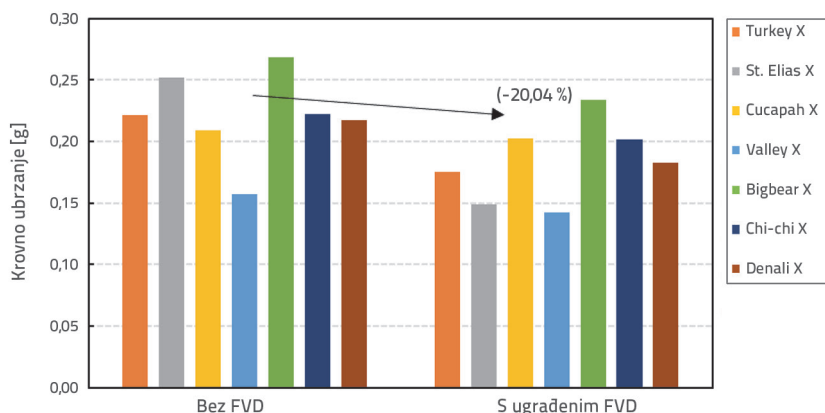
3.2. Osnovna sila smicanja

Poprečna sila u temeljima predstavlja ukupne horizontalne sile koje se prenose na konstrukciju i ključni je pokazatelj za procjenu efekta seizmičkog opterećenja. Na slikama 5. i 6. prikazana je usporedba prosječnih vršnih vrijednosti osnovne sile smicanja za oba modela pod utjecajem sedam seizmičkih zapisa duž smjerova X i Y. Prosječne vrijednosti osnovne sile smicanja duž osi X za konvencionalni sustav i sustav s prigušivačima bile su redom 5358,71 kN i 4831,94 kN. Odgovarajuće, duž osi Y prosječne vrijednosti za oba sustava bile su 5703,20 kN i 5517,40 kN. Ukupno, rezultati jasno pokazuju da je dodavanje FVD-ova rezultiralo smanjenjem osnovne sile smicanja za 10,9 % i 3,36 % duž smjerova X i Y. To smanjenje osnovne sile smicanja pripisuje se inherentnome prigušnom učinku FVD-a na konstrukciju, koji poboljšava sposobnost disipacije energije konstrukcije tijekom potresa. Međutim, povećanje osnovne sile smicanja u modelu s FVD-om uočeno je kod određenih seizmičkih zapisa, konkretno Chi-Chi X, Chi-Chi Y, Imperial Valley X i Cucapah Y. To se može objasniti

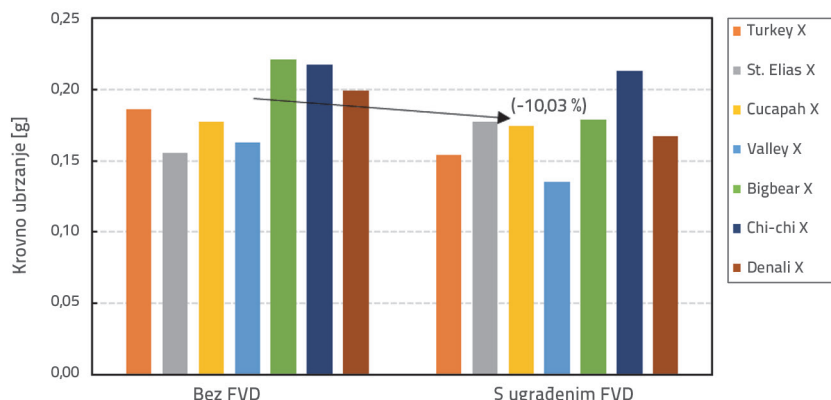
frekvencijskim sastavom tih zapisa i njihovom interakcijom s dinamičkim svojstvima konstrukcije. Ti su potresi pokazivali relativno visoka vršna ubrzanja tla i dominantne frekvencije u spektru blizu prvog perioda zgrade. Kada se dominantne frekvencije ulaznog potresa približe vlastitim frekvencijama konstrukcije, tada može doći do rezonancijskih efekata koji pojačavaju inercijske sile, što rezultira povećanjem poprečne sile u temeljima, čak i kada su instalirani viskozni prigušivači. U takvim slučajevima prigušivači i dalje djeluju disipirajući seizmičku energiju, čime se smanjuju pomaci i ubrzanja. Međutim, reakcija osnovne sile smicanja ostaje ovisna o spektralnim karakteristikama potresa. To objašnjava veće vrijednosti poprečne sile u temeljima kod određenih zapisa u usporedbi s konvencionalnim sustavom. Promjena perioda konstrukcije uzrokovala je drugačiju interakciju s potresom, koja se u odabranome slučaju pokazala nepovoljnom. No, uspoređujući ju s rezonancom s konstrukcijom bez prigušivača, ona je povoljnija.

3.3. Ubrzanje na krovu

Ubrzanje na krovu ključni je faktor za osiguranje uporabljivosti i integriteta zgrade minimiziranjem oštećenja nestrukturnih elemenata tijekom potresa. Na slikama 7. i 8. prikazani su rezultati vršnih ubrzanja na krovu pod odabranim seizmičkim djelovanjem duž obaju horizontalnih smjerova. Za smjer X prosječno ubrzanje na krovu smanjilo se s 0,22 g u konvencionalnome sustavu na 0,18 g u sustavu s prigušivačima. Slično tome, za smjer Y vrijednosti su također smanjene s 0,19 g na 0,17 g. To je rezultiralo smanjenjem od 20 % duž smjera X i 10



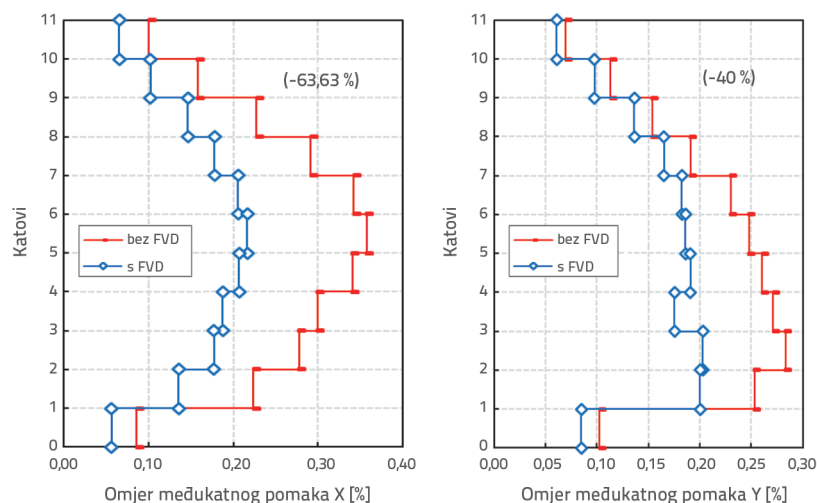
Slika 7. Usporedba ubrzanja krova zgrade duž smjera X



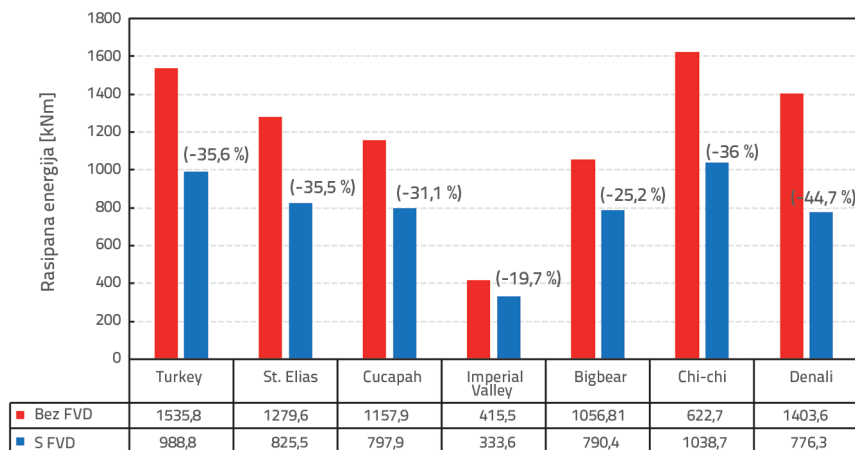
Slika 8. Usporedba ubrzanja krova zgrade duž smjera Y

% duž smjera Y nakon ugradnje FVD-a, čime se povećala i razina udobnosti za stanare zgrade. Sva ubrzanja za oba modela ostala su ispod prihvatljivog ograničenja od 0,3 g, kako je navedeno u japanskoj praksi projektiranja, čime je osigurana uporabljivost zgrade tijekom potresa i nakon njega [32].

maksimalne vrijednosti pomaka od 0,36 %, dok su modeli s prigušivačima pokazali vrijednosti od 0,22 %, pri čemu se oba maksimuma javljaju na petome katu. Na slici 9. za smjer Y prikazane su maksimalne vrijednosti od 0,28 % i 0,20 % za oba modela, pri čemu se te vrijednosti pojavljuju na drugome katu.



Slika 9. Usporedba omjera međukatnog pomaka zgrade u oba smjera



Slika 10. Usporedba disipirane energije inherentnim strukturama zgrade za oba sustava

3.4. Omjer međukatnog pomaka

Međukatni pomak definira se kao relativan horizontalni pomak između dvaju uzastopnih katova podijeljen visinom kata. Taj parametar ključni je pokazatelj za procjenu konstrukcijskih oštećenja te seizmičke sigurnosti. U ovoj su studiji za usporedbu odabrani potresi Chi-Chi, jer su oni proizveli najveće vrijednosti pomaka u usporedbi s ostalih šest parova potresnih zapisa. Na slici 9. prikazani su međukatni pomaci u oba smjera za dva modela. Za smjer X konvencionalni modeli pokazali su

Primjena FVD-ova u zgradi rezultirala je znatnim smanjenjem maksimalnih vrijednosti pomaka za 63,63 % i 40 % duž smjerova X i Y respektivno. Ti rezultati jasno pokazuju da dodavanje FVD-ova poboljšava odgovor konstrukcije i minimizira inercijske sile u zgradi.

3.5. Rasipanje energije

Primarni je cilj uključivanja FVD-ova povećanje sposobnosti disipacije energije konstrukcije lokalnim apsorpiranjem znatnog dijela ulazne seizmičke energije. Time se smanjuje energija prenesena na konstrukcijske elemente poput greda i stupova, čime se smanjuje opterećenje glavnih konstrukcijskih elemenata. Na slici 10. prikazana je ukupna disipirana energija u konstrukciji s FVD-ovima i bez njih. Najveće smanjenje disipirane energije zabilježeno je tijekom potresa Cucapah, s padom od 35,6 %, s 1157,9 kNm na 797,9 kNm. Ostala znatna smanjenja uočena su kod potresa Chi-Chi i Turkey, s padom od 36 % i 35,6 %. Nasuprot tome, najmanje smanjenje zabilježeno je kod potresa Imperial Valley, s padom od 19,7 %, s 415,5 kNm na 333,6 kNm. Ti rezultati pokazuju da FVD-ovi smanjuju energiju disipiranu konstrukcijskim sustavom, čime se povećava sposobnost konstrukcije da apsorbira seizmičku energiju bez izazivanja znatne štete

tijekom potresa. Općenito, ti rezultati ističu učinkovitost FVD uređaja u poboljšanju odgovora konstrukcije znatnim smanjenjem primljene i potrošene seizmičke energije, no njihova učinkovitost može varirati ovisno o geometrijskom rasporedu i karakteristikama FVD-ova.

4. Zaključak

Prikazano istraživanje pruža usporednu analizu seizmičkih performansi konvencionalne konstrukcije i konstrukcije s ugrađenim prigušivačima (FVD), podvrgnutih nizu linearnih analiza vremenske integracije kako bi se istražila učinkovitost dodavanja FVD-ova u deseterokatnu AB zgradu. Na temelju dobivenih rezultata mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Na temelju modalne analize implementacija sustava prigušenja FVD-ovima rezultirala je malim smanjenjem prvog perioda konstrukcije. Osnovni periodi, koji su inicijalno iznosili 1,758 s (smjer X) i 1,595 s (smjer Y), smanjeni su za približno 10 % u oba smjera, na 1,581 s (smjer X) i 1,434 s (smjer Y). To smanjenje osnovnog perioda pripisuje se povećanju krutosti uzrokovanom FVD-ovima. Omjeri sudjelovanja modalne mase ostali su uglavnom nepromijenjeni jer dodavanje FVD-ova nije znatno utjecalo na te parametre.
- Na temelju linearne analize vremenske integracije instalacija FVD-ova dovela je do poboljšanja svih analiziranih parametara: posmična sila na temeljima

smanjena je za 10,9 %, krov je ubrzan za 20 %, relativni međukatni pomak za 63 %, a disipacija energije za 44,7 % u usporedbi s konvencionalnim modelima. To povećanje seizmičke otpornosti ponajprije se pripisuje mehanizmu disipacije energije inherentnim FVD-ovima. Tijekom potresa FVD-ovi aktivno apsorbiraju i disipiraju znatan dio ulazne seizmičke energije, pretvarajući je u toplinu. Učinkovitom disipacijom te energije FVD-ovi smanjuju sve analizirane parametre, što povećava sposobnost strukture da učinkovitije podnese seizmička opterećenja. To čini FVD-ove prikladnim rješenjem za seizmičku zaštitu zgrada.

Pokazano poboljšanje seizmičkih performansi sustava s FVD-ovima može smanjiti očekivane gubitke tijekom potresa i omogućiti brzi povratak u normalne radne uvjete. Superiorne seizmičke performanse smanjuju rizik za korisnike zgrade, doprinoseći sigurnijemu i otpornijemu okruženju.

Zahvala

Autori zahvaljuju na financijskoj potpori indonezijskog Nacionalnog istraživačkog i inovacijskog ureda (BRIN) pod brojem granta 1179/PKTS/ITS/2023 (RIIM Program) te ITS Research Granta (PRIMA) za financijsku potporu objavljivanju pod brojem granta 1739/PKS/ITS/2025.

LITERATURA

- [1] Zhang, Y., Fung, J.F., Johnson, K.J., Sattar, S.: Review of seismic risk mitigation policies in earthquake-prone countries: Lessons for earthquake resilience in the United States, *Journal of Earthquake Engineering*, 26 (2022) 12, pp. 6208-6235, <https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1911889>
- [2] Cardone, D., Viggiani, L.R.S., Perrone, G., Telesca, A., Di Cesare, A., Ponzo, F.C., Ragni, L., Micozzi, F., Dall'Asta, A., Furinghetti, M., Pavese, A.: Modelling seismic response analysis of existing Italian residential RC buildings retrofitted by seismic isolation, *Journal of Earthquake Engineering*, 27 (2023) 4, pp. 1069-1093, <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2036271>
- [3] Sheikh, H., Pianese, G., Ruparathna, R., Van Engelen, N.C., Milani, G.: Nonlinear time history analyses of a rigid block isolated with unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators (UFREIs): A comparison between 3D finite elements phenomenological models, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 54 (2025) 2, pp. 449-470.
- [4] Pianese, G., Van Engelen, N., Toopchi-Nezhad, H., Milani, G.: Experimental numerical insights into unbonded partially bonded high-damping fibre-reinforced elastomeric isolator, *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 187 (2024), Paper 109016.
- [5] Habieb, A.B., Milani, G., Quaglini, V., Milani, F.: Experimentation numerical modelling of recycled rubber pads for seismic isolation under accelerated ageing, (2019), Paper 420006, <https://doi.org/10.1063/1.5114433>.
- [6] Habieb, A.B., Milani, F., Milani, G., Pianese, G., Torrini, D.: Vulcanization degree influence on the mechanical properties of Fiber Reinforced Elastomeric Isolators made with reactivated EPDM, *Polymer Testing*, 108 (2022), Paper 107496, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107496>
- [7] Das, A. Bandyopadhyay, D.: Study on seismic base shear deformation of regular irregular buildings using different properties of fluid viscous dampers, *Structures*, 76 (2025), Paper 108925, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108925>
- [8] Zoccolini L., Bruschi E., Pettorruso C., Rossi D., Quaglini V.: Fluid Viscous Dampers for seismic protection of bridges: a State of the Art, *Procedia Structural Integrity*, 62 (2024), pp. 669-676, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.093>
- [9] Almajhali, K.Y.M.: Review on passive energy dissipation devices techniques of installation for high rise building structures, *Structures*, 51 (2023), pp. 1019-1029, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.025>
- [10] Ortega, M., Lopez-Garcia, D., Fermandois, G.: Optimal properties of hysteretic dampers to minimize peak floor accelerations in multi-story buildings subjected to earthquakes, *Structures*, 70 (2024), Paper 107862, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107862>
- [11] Zeng, C., Zhang, Z., Su, N.: Enhanced vibration control on transmission towers with rotational inertial double tuned mass dampers for seismic wind hazards, *Structures*, 73 (2025), Paper 108326, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108326>

- [12] Mavrakakis, G.: Greece's new high-speed railway line: Detailed design construction engineering of bridge SG26, *Ce/Papers*, 4 (2021) 2-4, pp. 249-254, <https://doi.org/10.1002/cepa.1289>
- [13] Miani, M., Di Marco, C., Frappa, G., Pauletta, M.: Effects of dissipative systems on the seismic behaviour of irregular buildings - Two Case Studies, *Buildings*, 10 (2020) 11, Paper 202, <https://doi.org/10.3390/buildings10110202>.
- [14] Mokhtari, M. Naderpour, H.: Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings with nonlinear fluid viscous dampers, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20 (2022) 13, pp. 7675-7704, <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01508-7>.
- [15] Guo, T., Xu, J., Xu, W., Di, Z.: Seismic upgrade of existing buildings with fluid viscous dampers: Design methodologies case stud, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29 (2015) 6, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000671](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000671).
- [16] Ou, J.P., Long, X., Li, Q.S.: Seismic response analysis of structures with velocity-dependent dampers, *Journal of Constructional Steel Research*, 63 (2007) 5, pp. 628-638, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.034>
- [17] Xu, Z.D., Guo, Y.Q., Zhu, J.T. Xu, F.H.: Introduction in intelligent vibration control in civil engineering structures, (2017), pp. 1-20, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405874-3.00001-1>.
- [18] Lago, A., Trabucco, D., Wood, A.: Damping Technologies for Tall Buildings: Theory, design guidance case studies, (2019), <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815963-7.00001-4>.
- [19] Soong, T.T., Spencer, B.F.: Active, semi-active hybrid control of structures, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33 (2000) 3, pp. 387-402, <https://doi.org/10.5459/bnzsee.33.3.387-402>
- [20] Zoccolini, L., Bruschi, E., Cattaneo, S., Quaglini, V.: Current trends in fluid viscous dampers with semiactive adaptive behaviours, *Applied Sciences*, 13 (2023) 18, Paper 10358, <https://doi.org/10.3390/app131810358>
- [21] Buckle, I.G.: Passive control of structures for seismic loads, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33 (2000) 3, pp. 209-221, <https://doi.org/10.5459/bnzsee.33.3.209-221>
- [22] Lee, D., Taylor, D.P.: Viscous damper development future trend, *The Structural Design of Tall Buildings*, 10 (2001) 5, pp. 311-320, <https://doi.org/10.1002/tal.188>.
- [23] Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., McNamara, R.J.: Energy dissipation systems for seismic applications: Current practice recent developments, *Journal of Structural Engineering*, 134 (2008) 1, pp. 3-21, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(3))
- [24] Ijmulwar, S.S., Patro, S.K.: Seismic design of reinforced concrete buildings equipped with viscous dampers using simplified performance-based approach. *Structures*, 61 (2024), Paper No.: 106020, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106020>
- [25] De Domenico, D., Ricciardi, G., Takewaki, I.: Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: A review, *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 118 (2019), pp. 144-165, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.024>
- [26] Lan, X., Wei, G., Zhang, X.: Study on the influence optimisation design of viscous damper parameters on damping efficiency of frame shear wall structure, *Buildings*, 14 (2024) 2, Paper 497, <https://doi.org/10.3390/buildings14020497>
- [27] Ahmed, M.: Fluid viscous damper locations in reinforced concrete core-wall buildings, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures Buildings*, 170 (2017) 1, pp. 33-50, <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00007>
- [28] Alhamdany, A.M.A., Dilsiz, A.: Comparative evaluation of shear walls fluid viscous dampers in seismic retrofitting of RC public school buildings, *Structures*, 72 (2025), Paper 108231, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108231>
- [29] Building Seismic Safety Council: FEMA P-1051: NEHRP Recommended Seismic Provisions Design Examples, 2016.
- [30] Taylor Devices, Inc.: Fluid Viscous Dampers www.taylordevices.com/damper-manual/, 2024.
- [31] American Society of Civil Engineers: Minimum design loads associated criteria for buildings other structures (ASCE/SEI 7-16), American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>, 2017.
- [32] Pan, P., Zamfirescu, D.A.N., Nakashima, M., Nakayasu, N., Kashiwa, H.: Base-isolation design practice in Japan: Introduction to the post-Kobe approach, *Journal of Earthquake Engineering*, 09 (2005) 1, pp. 147-171, <https://doi.org/10.1142/S1363246905001943>.