

Primljen / Received: 30.5.2022.

Ispravljen / Corrected: 19.8.2022.

Prihvaćen / Accepted: 6.11.2022.

Dostupno online / Available online: 10.3.2023.

Alternativni pristup za izračunavanje optimalne veličine viskoznog prigušivača

Autorica:

Izv.prof.dr.sc. **Elif Cagda Kandemir**, dipl.ing.grad.

Demokratsko sveučilište u Izmiru, Turska

Građevinski fakultet

elifcagda.kandemir@idu.edu.tr

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Elif Cagda Kandemir

Alternativni pristup za izračunavanje optimalne veličine viskoznog prigušivača

Ovaj rad istražuje optimalnu veličinu viskoznog prigušivača potrebnu za sprječavanje sudara peterokatnice s krutim zidom. Sastoji se od dva dijela, oba temeljena na novoj primjeni metode wavelet koherencije (WCoh). U prvom su dijelu slučajevi udara procijenjeni metodom WCoh, a u drugom je predložen pristup temeljen na metodi WCoh za optimizaciju veličine viskoznog prigušivača. Za provjeru predložene metode korišten je validacijski model i primijećeno je da se ukupne veličine prigušivača dobro slažu. Nelinearni viskozni prigušivači imaju omjer prigušenja koji je identičan onom linearnih viskoznih prigušivača, ali imaju nižu silu prigušivanja, čime štite konstrukciju i prigušivač pri velikim brzinama konstrukcija. Ovo je istraživanje pokazalo da se wavelet koherencija može koristiti za identifikaciju seizmičkog sudara.

Ključne riječi:

seizmički sudar, viskozni prigušivač, kontinuirana wavelet transformacija (CWT), wavelet koherencija (WCoh), gibanja tla u blizini rasjeda

Research Paper

Elif Cagda Kandemir

Alternate approach for calculating the optimum viscous damper size

This study explores the optimal viscous damper size required to prevent a five-story building from colliding with a rigid wall. It comprises two parts, both based on the novel application of the wavelet coherence method (WCoh). In the first, impact incidents were estimated using the WCoh method, and in the second, an approach based on WCoh for optimizing the viscous damper size was proposed. A validation model was used to verify the proposed method and good agreement among total damper sizes was observed. Nonlinear viscous dampers have also investigated due to their lower damping force than viscous dampers produce. This study has shown that wavelet coherence can be used to identify seismic pounding.

Key words:

seismic pounding, viscous damper, continuous wavelet transform (CWT), wavelet coherence (WCoh), near-fault ground motions

1. Uvod

Migracije iz sela u gradove u potrazi za boljim životnim uvjetima ne samo da povećavaju gužvu u gradovima već i smanjuju količinu zemljišta koje se može koristiti za izgradnju stambenih zgrada. Stoga se u gradskim područjima često mogu uočiti susjedne zgrade s malo prostora između njih. Na slici 1. mogu se vidjeti susjedne zgrade bez seizmičkog razmaka na jednoj od glavnih ulica u Izmiru, koji je treći najveći grad u Turskoj. Grad se nalazi u aktivnoj seizmičkoj zoni; stoga je u prošlosti doživio jake potrese, a 2020. godine bio je izložen potresu u Egejskom moru. Susjedne su zgrade podložne ozbiljnim oštećenjima tijekom potresa zbog spomenutih nedovoljnih razmaka i neusklađenog ponašanja susjednih konstrukcija. Desetljećima su stručnjaci istraživali probleme vezane uz seizmičke događaje u svim aspektima: optimalni razmaci između susjednih konstrukcija [1-5], analitički modeli za seizmičke sile [6-13], metode za ublažavanje učinaka potresa [14-19], i tako dalje. Iako je znatan interes za ovu temu [20-24], postoje pitanja o kojima istraživači nisu postigli konsenzus i njihova rješenja ostaju neodređena. Nedavno su metode obrade signala privukle pozornost istraživača koji su upoznati s temama građevinarstva. Wavelet transformacija, koja pruža frekvencijski sadržaj vremenskog signala, ima bolje skaliranje i pomak prozorske funkcije od Fourierovih transformacija [25]. Mohebi i sur. [26] upotrijebili su složenu Morlet mother wavelet funkciju za izvođenje kontinuirane wavelet transformacije (CWT) i otkrivanje oštećenja uzrokovanih seizmičkim silama. Xing i sur. [27] izveli su wavelet transformaciju odziva ubrzanja konstrukcije s jednim stupnjem slobode (SDOF) koja se sudara s krutom barijerom kako bi otkrili sudare i eksperimentalno potvrdili metodu. Young Noh i sur. [28] proveli su CWT seizmičkih odziva uzimajući u obzir samo prvi oblik za otkrivanje konstrukcijskih oštećenja, a Yazdanpanah i sur. [29] poboljšali su metodu korištenjem složenih Morletovih i viših načina doprinosa za određivanje krivulja oštetivosti i procjenu stanja konstrukcije.

Metoda predložena u ovom radu lako je razumljiva i može se primjenjivati u preliminarnom oblikovanju viskoznih prigušivača. Cilj metode je regulirati seizmičke odzive konstrukcija uz pomoć viskoznih prigušivača simulacijom njihovih odziva s optimalnim razmacima na temelju učestalosti njihovih odziva. Brojna istraživanja usmjerena su na veličinu i/ili položaj viskoznih prigušivača u zgradama. De Domenico i sur. [30] pregledali su metode ugradnje međukatnog viskoznog prigušivača.



Slika 1. Susjedne zgrade u Izmiru



Svrha njihovih istraživanja je smanjiti ili ograničiti seizmičke odzive povećanjem ukupnog omjera prigušenja korištenjem stohastičkih i optimizacijskih metoda s različitim pristupima i ograničenjima. Nadalje, Silvestri i sur. [31] predložili su drugačiju shemu ugradnje, nazvanu "fiksna točka" (engl. *fixed point*), za određivanje veličine viskoznih prigušivača spajanjem svih prigušivača na tlo, a koja je različita od ovog istraživanja u tom aspektu, definiranu u postupku od pet koraka. Predloženi pristup koristi samo seizmičke odzive dobivene numeričkim metodama za određivanje veličine međukatnog viskoznog prigušivača nakon njihove obrade primjenom metoda temeljenih na valićima (engl. *wavelet*).

Modeli sudara zahtijevaju numeričku analizu kako bi se dobila udarna sila i njeno vrijeme na temelju brojnih koeficijenata sudarajućih površina i njihove geometrije. Međutim, predložena metoda može se primijeniti za pronalaženje slučaja udara usporedbom seizmičkih odziva dobivenih za konstrukcije s odgovarajućim seizmičkim razmacima i bez njih na temelju tehnike wavelet koherencije.

Ovo istraživanje predstavlja obećavajuću metodu za određivanje optimalne veličine prigušivača potrebnog za sprječavanje sudara. Najprije je prikazan pristup wavelet koherencije za procjenu sudara na temelju CWT-a. Nakon tog postupka uslijedilo je optimiziranje viskoznih prigušivača kako bi se spriječilo sudaranje. Kada se radi o optimizaciji, objektna funkcija minimizirala je ukupni koeficijent viskoznog prigušivača s koeficijentom wavelet koherencije jednakim jedan. Budući da nakon dodavanja prigušivača konstrukcija postaje elastična, razmatrano je linearno elastično ponašanje zgrade [31, 32]. U ovom radu korištena su dva modela: jedan koji su predložili Lavan i Levy [32] za provjeru valjanosti predložene metode i drugi koji su predložili Kandemir-Mazanoglu i Mazanoglu [33] za parametarsku analizu pri različitim razmacima i potresnim gibanjima. Linearne i nelinearne veličine viskoznih prigušivača implementirane su za zgradu od pet katova, a rezultati su uspoređeni.

2. Opis problema

Ovdje se predstavljaju ciljevi, metodologija i optimizacijski pristup predložene metode. Cilj je odrediti veličinu viskoznog prigušivača za zgradu od pet katova koji sprječava jednostrani sudar u kruti zid. Prigušivači su postavljeni vodoravno između uzastopnih katova vodeći računa o ravnomjernoj raspodjeli veličine prigušivača. Ovo istraživanje koristi promjene učestalosti odziva sustava za procjenu veličina sudara i viskoznih prigušivača. U okviru ovog rada, wavelet transformacija, moćna tehnika za otkrivanje informacija o frekvenciji signala, primjenjena je nakon metode wavelet koherencije.

2.1. Odnos WCoh metode i sudara konstrukcija

Udarne sile koje djeluju na konstrukciju aktiviraju se kada se seizmički razmak zatvori u nepredviđenom trenutku. Zbog nasumičnosti udarnih sila, odzivi konstrukcija su nelinearni u elastičnom području konstrukcije. Jednadžba gibanja za model s više stupnjeva slobode podvrgnut jednostranom sudaru je $[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} + \{F_p\} = -[M]\{1\} x_g$, pri čemu je $[M]$ matrica mase, $[C]$ je matrica koeficijenta prigušenja, a $[K]$ je matrica krutosti dok su $\{\ddot{X}\}$, $\{\dot{X}\}$ i $\{X\}$ odziv konstrukcije na ubrzanje, brzinu i pomak. $\{F_p\}$ uključuje sudarne sile svakog kata koji ima aktivno i pasivno stanje povezano sa zatvorenim odnosno otvorenim razmacima. Pasivno stanje nastaje pri izostanku sudara. Ako dođe do sudara, odnosno aktivnog stanja, vrijednost sile ovisi o odabranom modelu. U srodnoj literaturi postoje mnogi modeli koji se mogu koristiti za simulaciju elemenata razmaka koji proizvode udarne sile [34-37]. Konstrukciji se dodaje krutost i/ili prigušenje aktivirano razmakom, a prirodna se frekvencija mijenja tijekom udara. U ovom se trenutku wavelet transformacija može koristiti nakon metode wavelet koherencije i za promatranje frekvencijskih razlika između konstrukcija s odgovarajućim seizmičkim razmakom i bez njega.

Nedavno su tehnike obrade signala, uključujući wavelet pristupe, postale značajne u građevinarstvu [38-40]. Prije rasprave o WCoh metodi, prvo ćemo ukratko predstaviti wavelet transformaciju. Wavelet transformacije su prikladnije za pružanje simultanih informacija o frekvenciji i vremenu za nestacionarne signale od Fourierovih transformacija zahvaljujući svojoj adaptivnoj prozorskoj tehnici. Ova metoda razgrađuje signal u osnovne funkcije proširene (skalirane) i prevedene (pomaknute) verzije mother wavelet funkcije. Postoje dvije vrste wavelet transformacija: diskretne i kontinuirane. Diskretna wavelet transformacija (DWT) koristi samo podskup parametara skale i pomaka, a CWT izračunava wavelet koeficijente na svakoj skali u diskretnom vremenu. Unatoč velikom računalnom opterećenju, potonja je primjenjena u ovom istraživanju zahvaljujući mogućnosti korištenja adaptivne prozorske funkcije (engl. *adaptive windowing* - ADWIN) za pružanje informacija o frekvenciji. Wavelet koeficijenti, $C(a,b)$, kao funkcije a i b , izračunavaju se množenjem izvornog signala s odgovarajuće skaliranim i pomaknutim valićima kako slijedi [41]:

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi(a,b,t) dt \quad (1)$$

$$\psi(a,b,t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \cdot \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (2)$$

pri čemu je $\psi(a, b, t)$ glavni valić, a t , a , i b su faktori vremena, veličine i pomaka. ψ^* je kompleksni konjugat valića. Parametar veličine (a) je obrnuto proporcionalan frekvenciji. Posljedično, koeficijent korelacije skaliranog valića sa signalom iscrtava se na

ravnini frekvencije i vremena. Skalogram CWT-a pokazuje korelaciju između skaliranih (a) i pomaknutih (b) valića i signala. Nagle varijacije u signalu mogu se detektirati visokom frekvencijom, a one sporije niskom frekvencijom. Valići imaju različite oblike, kao što su Haar, Morlet, Daubechies i sombrero (Mexican Hat). Morletov wavelet, koji je korišten u ovom istraživanju, složena je funkcija koja se pokazala učinkovitom za izdvajanje frekvencije za dijagnozu signala, [42, 43]. Također je primijenjen u detekciji seizmičkog signala [44, 45]. Wavelet koherencija je metoda koja predstavlja frekvencijsku sinkronizaciju dviju vremenskih serija u određenom vremenskom rasponu. Koeficijenti koherentnosti (WCoh) izračunavaju se pomoću izraza (3) i (4):

$$WCoh = \frac{|S(C_x^*(a,b)C_y(a,b))|^2}{S(|C_x(a,b)|^2) \cdot S(|C_y(a,b)|^2)} \quad (3)$$

$$\Delta\varphi(t,a) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[W^{XY}(t,a)]}{\text{Re}[W^{XY}(t,a)]} \quad (4)$$

pri čemu $C_x(a,b)$ i $C_y(a,b)$ predstavljaju CWT-ove x i y signala pri a veličinama i b pozicijama. Eksponent * je kompleksni konjugat, a S je operator za izgladivanje parametara vremena i veličine. U izrazu (3), izraz cross-wavelet ($C_x^*(a,b)C_y(a,b)$) uključen je u brojnik. $\Delta\varphi$ označava fazu valića. Koeficijenti su iscrtani u frekvencijsko-vremenskom prostoru, a faza je označena strelicama. Wavelet koherencija uzima vrijednosti između nule i jedan kako bi predstavila različitost odnosno sličnost. Za WCoh, nula i jedan predstavljaju potpuno različite i točno odgovarajuće frekvencijske sadržaje. Za detaljne informacije o temi, molimo proučite Torrence i Compo [25] i Grinsted i sur. [46].

U ovoj studiji, metoda wavelet koherencije primijenjena je na odzive ubrzanja uslijed potresnog gibanja tla kada konstrukcija ima adekvatne i neadekvatne seizmičke razmake. WCoh koji se razlikuje od jedan označava različite učestalosti sadržaja odziva; tada dolazi do sudara. Nakon ugradnje viskoznih prigušivača između uzastopnih katova u konstrukciji zgrade, budući da se ne očekuju sudari, frekvencijski sadržaji seizmičkih odziva postaju ekvivalentni onima kada sustav ima odgovarajući seizmički razmak, to jest stanje bez sudara, stvarajući WCoh u iznosu od jedan. Jednadžba gibanja riješena je Newmarkovom postupnom metodom s konstantnim prosječnim ubrzanjem i vremenskim intervalom od 0,001 s. To je učinjeno kako bi se dobio odziv ubrzanja konstrukcije sa sudarom i bez sudara.

2.2. Optimizacija veličine viskoznog prigušivača temeljena na WCoh

Ovdje se opisuje postupak za određivanje optimalne veličine viskoznog prigušivača koji sprječava sudare. Metoda wavelet koherencije, objašnjena u prethodnom odjeljku, pohranjuje koeficijente u matricu s veličinom razdoblje \times trajanje. Za

potpunu koherenciju signala, svi koeficijenti koherencije moraju biti jednaki jedan u svakom razdoblju. Stoga je uveden novi parametar, nazvan prosječni koeficijent wavelet koherencije (AWC). AWC se izračunava prema jednadžbi (5), pri čemu je T trajanje signala, i je razdoblje, i WCoh koeficijent je odgovarajući period.

$$AWC_i = \frac{\sum_{t=0}^T (WCoh\ koeficijent)_t}{T} \tag{5}$$

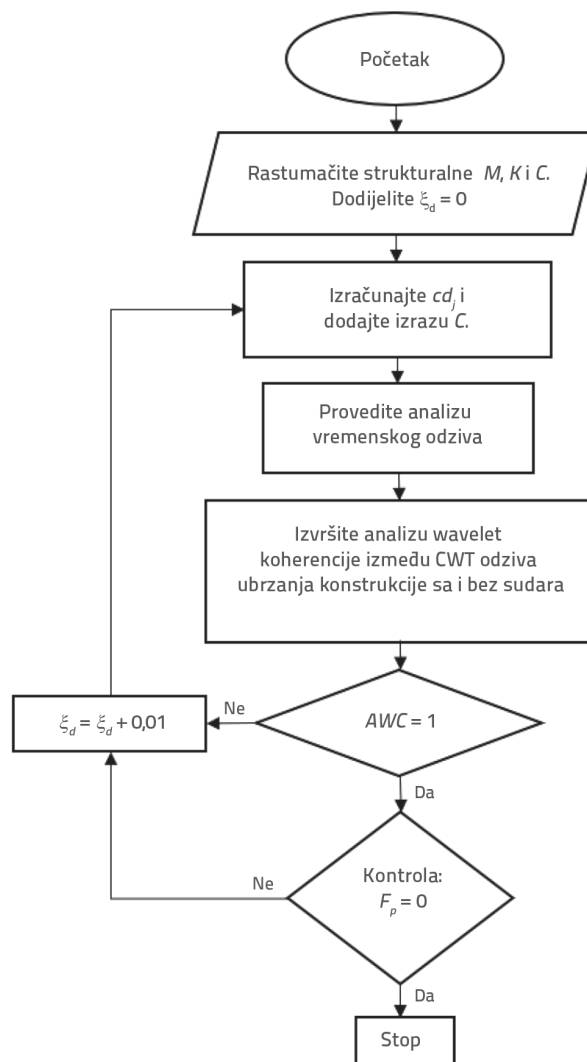
Postupak koji se slijedi u ovom radu prikazan je dijagramom toka na slici 2. Objektna funkcija je minimalni ukupni koeficijent prigušenja ($Cd = \sum c_d$). Ograničenje nejednakosti primjenjuje niže (lb) i više (ub) granice na koeficijent prigušenja (c_d) svakog prigušivača ugrađenog na svakom katu ($lb \leq c_d \leq ub$). lb je nula za slučaj bez prigušivača, a ub je 3×10^6 Ns/m. Ograničenje jednakosti je da prosječna wavelet koherencija mora biti jednaka jedan (AWC = 1). Proces optimizacije može se sažeti na sljedeći način:

- Korak 1.** Unesite podatke o konstrukciji kao matrice mase, krutosti i prigušenja. Matrica prigušenja generirana je Rayleighovom metodom prigušenja s omjerom prigušenja od 5 % za prvi i zadnji oblik.
- Korak 2.** Unesite dodatni omjer prigušenja viskoznih prigušivača (isprva se dodjeljuje nula za stanje bez prigušivača).
- Korak 3.** Provodi se analiza vremenskog odziva i dobivaju se odzivi ubrzanja svakog kata.
- Korak 4.** WCoh metoda primjenjuje se na CWT odziva ubrzanja konstrukcije sa sudarom i bez njega. Zatim se izračunava AWC svakog kata.
- Korak 5.** Ako su svi AWC-ovi jednaki jedan, provodi se analiza vremenskog odziva kako bi se odredile sudarne sile pomoću Kelvin-Voigtovog modela (ili bilo kojeg drugog modela navedenog u literaturi). Ako nema sudara ni na jednom katu, algoritam se prekida i viskozni prigušivač nije potreban.
- Korak 6.** Ako jedan od AWC-ova u koraku 5 nije jednak jedan, dodatni omjer prigušenja (ξ_d) postupno se povećava (u koracima od 0,01 u ovom radu) i koeficijenti viskoznog prigušenja (cd) svakog kata između ograničenja nejednakosti izračunavaju se i uvode u odgovarajuće mjesto matrice prigušenja konstrukcije (C). Prigušivači se postavljaju od prvog kata nadalje.
- Korak 7.** Koraci 3 i 4 se ponavljaju postupnim povećanjem ξ_d sve dok ograničenje jednakosti AWC ne bude jednako jedan i dok se ne dogodi nijedan sudar na svim katovima.

Jednadžba dodatnog omjera prigušenja (ξ_d) za međukatne linearne viskozne prigušivače dana je u FEMA 273 [52] kako slijedi:

$$\xi_d = \frac{T_1 \sum_j cd(\alpha)_j \cos^2(\theta_j) (\phi_j - \phi_{j-1})^2}{4\pi \sum_i m_i \phi_i^2} \tag{6}$$

pri čemu je T_1 temeljni prirodni period, $cd(a)$ je koeficijent prigušenja sa a koji označava eksponent brzine, m_j je nula ako je prigušivač horizontalan, a m_j označava masu jednog kata. $(\phi_j - \phi_{j-1})$ označava relativne horizontalne modalne pomake između uzastopnih katova u prvom obliku. Eksponent i se koristi za indeksiranje kata dok j označava kat na koji su dodani prigušivači. Ovaj optimizacijski algoritam pokrenut je za dva slučaja za razmake od 10 i 15 cm između konstrukcije i krutog zida u različitim potresima u blizini rasjeda.



Slika 2. Dijagram toka postupka optimizacije

3. Gibanja tla

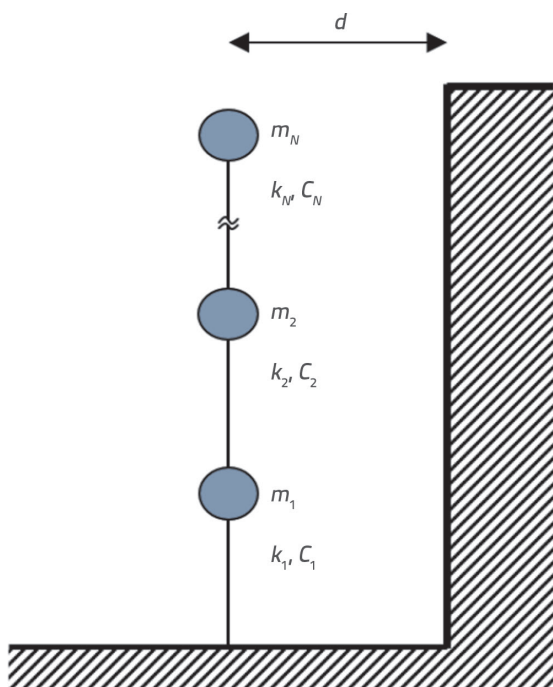
Odabrana gibanja tla primjeri su potresnih gibanja tla u blizini rasjeda. Potresi su skalirani prema dijagramu ubrzanja u pokrajini Kocaeli (geografska širina 40,696536°, dužina 29,811293°) u Turskoj, za koje su spektralna ubrzanja 2,059 i 0,694 u razdobljima od 0,2 i 1 s, a razred tla je ZC (vrlo gusto tlo i meke stijene) [47]. U tablici 1. prikazana su svojstva odabranih potresa.

Tablica 1. Odabrana potresna gibanja

Ime potresa, godina	Stanica	Komponenta	PGA [g]	Skalirajući faktor
Chi-Chi, 1999.	TCU065	E	0,790	0,667
	TCU065	N	0,575	
Imperial Valley, 1979.	Array #5	140	0,529	0,781
	Array #7	140	0,341	
Kobe, 1995.	Takatori	0	0,618	0,905
	Takatori	90	0,671	
Kocaeli, 1999.	Duzce	180	0,312	1,226
	Duzce	270	0,364	
Landers, 1992.	Lucerne	260	0,725	1,034
	Lucerne	345	0,789	
Northridge, 1994.	Rinaldi	228	0,874	0,689
	Rinaldi	318	0,472	

4. Model konstrukcije

Konstrukcija koja se razmatra u ovom istraživanju peterokatni je posmični okvir i idealiziran je kao model s koncentriranim masama i krutostima. Masa i krutost svakog kata bile su 1×10^5 kg i $6,8 \times 10^7$ N/m [33]. Prirodni period prvog oblika bio je 0,85 s. Inherentno prigušenje od 5 % korišteno je za prvi i zadnji oblik kako bi se izradila Rayleighova matrica prigušenja. Konstrukcija je procijenjena za razmake (d) od 10 i 15 cm. Slika 3. prikazuje navedeni model.



Slika 3. Model koncentrirane mase i krutosti konstrukcije i krutog zida

5. Rezultati

Rezultati ovog istraživanja prikazani su u dva podnaslova. Prvi prikazuje seizmičke sudare detektirane WCoh metodom, a drugi prikazuje rezultate optimizacije. Postavljanje modela i analiza vremenskog odziva pri potresnom gibanju i wavelet analiza provedeni su u MATLAB-u [48].

5.1. Procjena seizmičkog sudara primjenom Wcoh metode

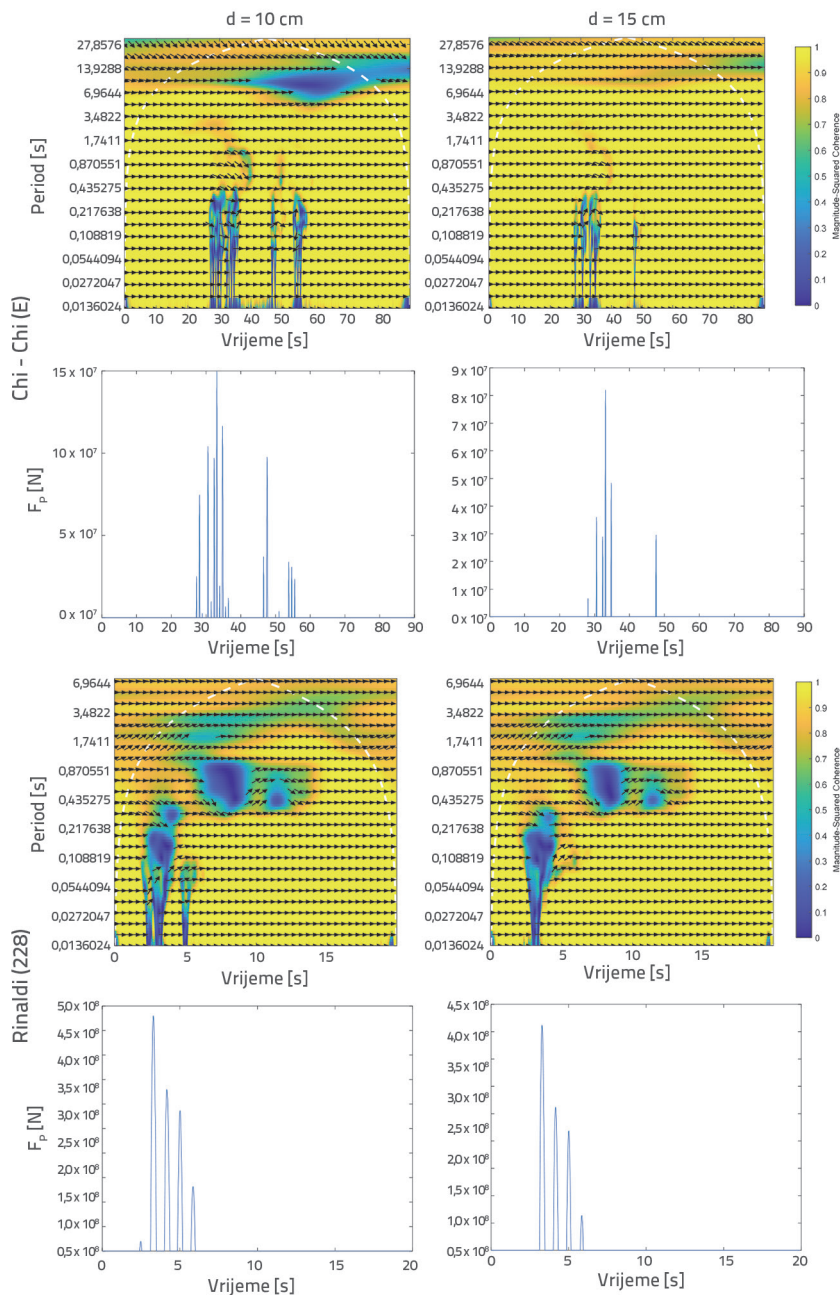
U ovom odjeljku uspoređeni su odzivi ubrzanja za konstrukciju s dovoljnim seizmičkim razmakom i bez njega pomoću metode wavelet koherencije. Ta je usporedba provedena kako bi se otkrile razlike u frekvencijama. Proučeni su rezultati potresa Chi-Chi i Northridge jer su oni imali najveće udarne vrijednosti. Izračunan WCoh koeficijenti krovnog ubrzanja sa sudarom i bez sudara prikazani su u odnosu na vrijeme. U zadanom spektru žuto označava visoku koherenciju, a plavo nisku koherenciju. Bijela isprekidana linija prikazuje konus utjecaja bez rubnih učinaka. Strelice u grafovima wavelet koherencije imaju različita značenja: strelice usmjerene udesno označavaju signale koji su u fazi, strelice ulijevo označavaju faznu razliku od 180°, a strelice usmjerene gore i dolje označavaju faznu razliku od 90°. Smjer strelica ne utječe na koeficijente koherencije.

Kako bi se potvrdili dijagrami koherentnosti, sile sudara modelirane Kelvin–Voigtovim modelom (linearna opruga-prigušivač) izračunane su pomoću izraza (7) do (9), prema [7]:

$$F_p(t) = k_p \delta(t) + c_p \dot{\delta}(t) \tag{7}$$

$$c_p = 2\xi_p \sqrt{k_p \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \tag{8}$$

$$\xi_p = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \tag{9}$$



Slika 4. Wavelet koherencija ucrtana je između odziva ubrzanja sa sudarom i bez sudara i odgovarajućih dijagrama sudarne sile i vremena

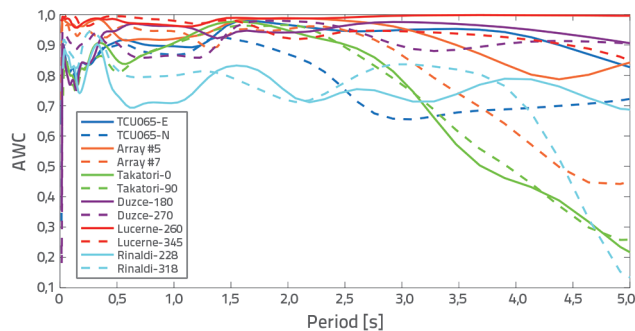
pri čemu je $F_p(t)$ sudarna sila kao funkcija vremena (t), k_p je krutost, a c_p je koeficijent prigušenja modela udara. $\delta(t)$ i $\dot{\delta}(t)$ su relativni pomak i brzina između dva konstrukcijska elementa koja se sudaraju. ξ_p je omjer prigušenja udara, a e je koeficijent restitucije. Mase sudarajućih elemenata označavaju se kao m_1 i m_2 , to jest mase kata konstrukcije (1×10^5 kg) i krutog zida (1×10^5 kg) koji odgovaraju katu susjedne zgrade. U ovom istraživanju, k_p se pretpostavlja da je 20 puta veći od koeficijenta krutosti kata, kako je predložio Anagnostopoulos [7]. Štoviše, ξ_p , od 0,14 ($e = 0,65$) korišten je za betonske površine, kako su

predložili Azevedo i Bento [49]. Linearna opruga i prigušivač se aktiviraju kada se zatvori razmak između konstrukcija, stvarajući sudarnu silu.

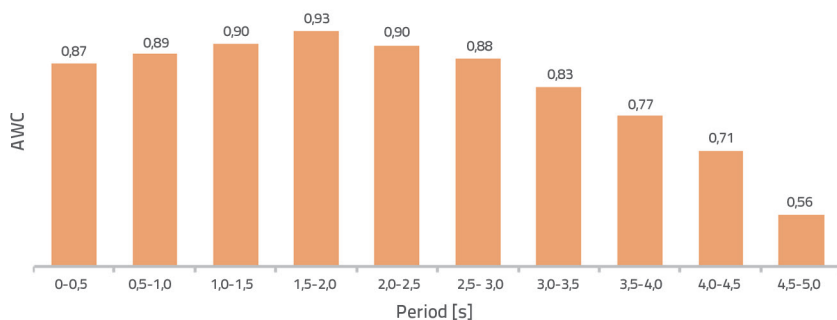
Slika 4. prikazuje wavelet koherenciju i njihove odgovarajuće grafikone udarne sile i vremena. Plave linije, koje se pojavljuju između 0 i 0,5 s u oba potresa, pokazuju trenutke sudara. Intenzivnija nijansa plave predstavlja veću sudarnu silu. Odgovarajući grafikoni sudarne sile i vremena potvrđuju rezultate dobivene iz WCoh dijagrama. Grafikoni prikazuju plava područja uz prethodno pomenute linearne vertikalne formacije. Na primjer, između 0,4 i 1,5 s, koeficijenti površinske nekoherencije primijećeni su za obje udaljenosti razmaka tijekom potresa Rinaldi. Može se reći da su te nekoherentnosti posljedica fazne razlike između ponašanja nakon sudara. Treba imati na umu da strelice usmjerene udesno pod različitim kutovima u odnosu na horizontalu (gore i dolje) označavaju pozitivno korelirane signale.

5.2. Optimizirana ukupna veličina prigušivača

U ovom se odjeljku iznosi obrada wavelet koeficijenata koherencije dobivenih u prethodnom odjeljku. Nakon WCoh analize odziva ubrzanja u MATLAB-u, koeficijenti se pohranjuju kao matrica veličine razdoblje \times trajanje. Posljedično, prosječne vrijednosti WCoh koeficijenata u svakom razdoblju konstrukcije [50] izračunane su kako je dano u izrazu (5) i definirane kao ograničenje jednakosti u procesu optimizacije. Slika 5. prikazuje odnos AWC-period za svako potresno gibanje u 0 do 5 s.



Slika 5. AWC za svako razdoblje i potres

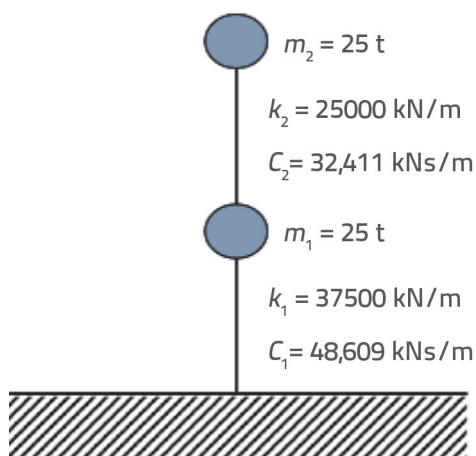


Slika 6. Prosječni AWC s odgovarajućim rasponima perioda

Slika 6. prikazuje prosječni AWC s vremenom uzimajući u obzir sve potrese. Najveća koherencija javlja se u rasponu od 1,5 do 2 s, a najmanja u rasponu od 4,5 do 5 s za ispitivana gibanja tla i konstrukcije. Smanjenje prosječne AWC s periodom pokazuje da je ponašanje u višim periodima potpuno drugačije kada konstrukcija ima neadekvatan seizmički razmak.

5.2.1. Validacijski model

Za provjeru predložene metode korišten je model iz studije Lavana i Levyja [32] prikazan na slici 7. Model predstavlja sustav s dva stupnja slobode u kojem je masa svakog kata 25 tona. Krutosti prvog i drugog kata iznose 37500, odnosno 25000 kN/m, a inherentni koeficijenti prigušenja 48,609 odnosno 32,411 kNs/m. Upotrijebljeno gibanje tla je NS komponenta potresa El-Centro iz 1940. godine skalirano s 2,01.



Slika 7. Validacijski model [32]

Tablica 2. Komparativni rezultati ukupnih veličina prigušivača

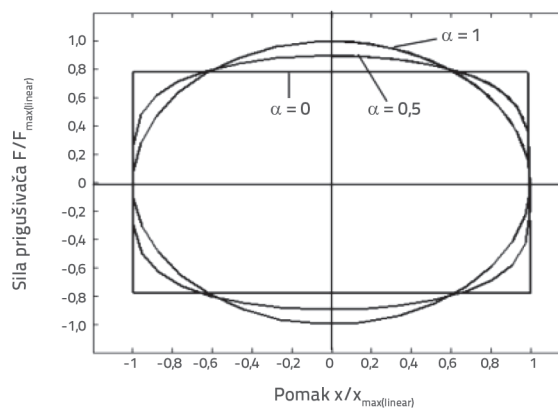
	Lavan i Levy (2005.)	Predložena metoda
Ukupni koeficijent prigušenja [kNs/m]	1522,2	1397,5 (-8,1 %)
Maksimalni katni pomaci (prvi i drugi kat)	9,0 i 9,0 mm	8,5 i 8,7 mm

U spomenutoj studiji, najveći katni pomak u koordinatnom sustavu katnih pomaka odabran je na 9 mm za ograničenje nejednakosti. Ako se katni pomaci pretvaraju u pomake, najveći dopušteni pomaci postaju 9 odnosno 18 mm za prvi i drugi kat.

Tablica 2. prikazuje usporedne rezultate ukupnih veličina prigušivača. Ukupna veličina prigušivača izračunana predloženom metodom bila je 8,1% manja od navedene preporuke, a maksimalni katni pomaci prvog i drugog kata manji su za 5 % i 3,3 %. Iako korištena referenca ne sadrži informacije o dodatnom omjeru prigušenja, u ovom je istraživanju dobiven dodatni omjer prigušenja od 25 %. Predloženom metodom dobivena je dobra korelacija.

5.2.2. Model peterokatnice

Peterokatnica je ispitana na različite udaljenosti razmaka i gibanja tla. Na konstrukciji su implementirani linearni (LVD) i nelinearni viskozni prigušivači (NVD). NVD-ovi proizvode manju silu prigušivanja između krajeva prigušivača nego LVD-ovi za isti odziv brzine konstrukcije. Razlog tome je eksponent brzine (α). Eksponent brzine ima vrijednosti između 0 i 1. Različiti tipovi prigušivača i njihove sile na temelju eksponenta brzine prikazani su na slici 8.



Slika 8. Omjer sile prigušivača i pomaka za trenje ($\alpha = 0$), NV ($\alpha = 0,5$) i LV ($\alpha = 1$) prigušivača [29]

Izraz (10) korišten je za izračunavanje koeficijenta prigušenja NVD-ova [53]:

Tablica 3. Dodatne veličine prigušivača ($\times 10^6$ Ns/m) i omjeri

Ime potresa, godina	Stanica (komponenta)	10 cm			15 cm		
		ξ_d	cd(1)	cd(0,5)	ξ_d	cd(1)	cd(0,5)
Chi-Chi, 1999.	TCU065 (E)	75	8,62	6,67	50	5,74	5,44
	TCU065 (N)	60	6,89	5,33	25	2,87	2,72
Imperial Valley, 1979.	Array #5 (140)	-	-	-	-	-	-
	Array #7 (140)	45	5,17	4,90	5,	0,57	0,54
Kobe, 1995.	Takatori (0)	85	9,77	7,56	75	8,62	8,17
	Takatori (90)	90	10,3	7,97	85	9,77	9,26
Kocaeli, 1999.	Duzce (180)	15	1,72	1,33	-	-	-
	Duzce (270)	50	5,74	4,44	10	1,15	1,09
Landers, 1992.	Lucerne (260)	25	2,87	2,22	-	-	-
	Lucerne (345)	-	-	-	-	-	-
Northridge, 1994.	Rinaldi (228)	95	11,1	8,59	65	7,47	7,08
	Rinaldi (318)	85	9,77	7,56	45	5,17	4,90

$$cd(a) = \frac{cd(1)(\omega_1 \cdot x_0)^{1-\alpha}}{\beta} \quad (10)$$

pri čemu je $cd(1)$ linearni koeficijent prigušenja, ω_1 je prva prirodna frekvencija zgrade, ξ_0 je maksimalni katni pomak, a β se izračunava na sljedeći način:

$$\beta = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2(1+\alpha/2)}{\pi \Gamma(2+\alpha)} \quad (11)$$

pri čemu je Γ gama funkcija. U ovom je ispitivanju, za eksponent brzine (α) pretpostavljeni iznos 0,5. Tablica 3. pokazuje dodatne omjere prigušenja (ξ_d) i veličine linearnih $cd(1)$ i nelinearnih $cd(0,5)$ viskoznih prigušivača.

Konstrukcije s viskoznim prigušivačima imaju dodatno prigušenje bez dodatne krutosti upravo zbog ovih uređaja. Ovo svojstvo rezultira istim frekvencijama za konstrukciju za odgovarajući seizmički razmak nakon ugradnje viskoznih prigušivača s dovoljnim koeficijentom prigušenja. Stoga je pristup wavelet koherencije prikladan za određivanje veličine viskoznog prigušivača koji sprječava sudare korištenjem odziva ubrzanja strukture s odgovarajućim odvajanjem i bez njega.

Tablica 3. prikazuje optimalne veličine i omjere prigušivača pri različitim potresnim gibanjima. Veličine prigušivača nisu dostupne za potrese Imperial Valley (Array #5) i Landers (Lucerne 345) za oba razmaka i potres Kocaeli (Duzce 180) za razmak od 15 cm jer nema sudara. Maksimalni koeficijent prigušenja dobiven je u potresu u Northridgeu (Rinaldi 228). Ukupna se veličina prigušivača smanjivala s povećanjem veličine razmaka. Nelinearni prigušivači smanjuju koeficijent prigušenja za 22,6 odnosno 5,23 % kada su razmaci 10, odnosno 15 cm. Ovaj je omjer jednak za sve potrese. Ispitivanje jednadžbe 10 pokazuje da je maksimalni katni pomak (x_0) jedina varijabla kada se veličina NVD-a izračunava iz LVD-a. Stoga u ovom istraživanju,

dok se zgrada sudara s krutim zidom, maksimalni katni pomak (x_0) jednak je udaljenosti razdvajanja za svako gibanje tla.

6. Zaključak

Alati za obradu signala postaju sve važniji te se primjenjuju u seizmičkom inženjerstvu. Znanje stečeno konvolucijom seizmičkih signala, kao što su gibanja tla ili odzivi konstrukcija, može pružiti uvid u dinamičko ponašanje seizmičke aktivnosti. Predložena metoda nije samo alternativa postojećim metodama, već također ima manje računalno opterećenje i lakša je za razumijevanje. Ovo je istraživanje pokazalo da se wavelet koherencija može koristiti za identifikaciju seizmičkog sudara. Osim toga, optimalne veličine prigušivača za sprječavanje sudara tijekom seizmičke aktivnosti dobivene su simulacijom seizmičkih odziva sa sudarom i bez sudara i dobivanjem njihovih frekvencijskih svojstava. Zaključci istraživanja mogu se sažeti na sljedeći način:

- Kada je konstrukcija izložena sudarima, koeficijenti wavelet koherencije za kraća razdoblja su niski, što upućuje na nisku koherenciju između odziva ubrzanja sa sudarom i bez sudara koji potvrđuju da je sudar prisutan.
- Analiza wavelet koherencije može se primijeniti za prepoznavanje točnog trenutka sudara. Osim toga, što je plava boja spektra koherencije jače izražena, to je sudarna sila jača. Stoga se WCoh dijagrami mogu koristiti za dobivanje informacija o sudarnoj sili bez primjene jednog od različitih modela u literaturi.
- Metoda wavelet koherencije obećavajući je alat koji se koristi za dobivanje veličine viskoznog prigušivača koristeći samo seizmičke odzive. Ima veliku brzinu obrade i lako ju je razumjeti.
- Nelinearni viskozni prigušivači imaju omjer prigušenja koji je identičan onom linearnih viskoznih prigušivača, ali imaju nižu silu prigušivanja, čime štite konstrukciju i prigušivač pri velikim brzinama konstrukcija.

LITERATURA

- [1] Hong, H.P., Wang, S.S., Hong, P.: Critical building separation distance in reducing pounding risk under earthquake excitation, *Structural Safety*, 25 (2003) 3, pp. 287-303, [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00080-2](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00080-2).
- [2] Lin, J.H.: Evaluation of critical separation distance to avoid seismic pounding between buildings: A spectral approach, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50 (2021) 11, pp. 2863-3882, <https://doi.org/10.1002/eqe.3476>
- [3] Penzien, J.: Evaluation of building separation distance required to prevent pounding during strong earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26 (1998) 8, pp. 849-858, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199708\)26:8<849::AID-EQE680>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199708)26:8<849::AID-EQE680>3.0.CO;2-M)
- [4] Khatami, S.M., Naderpour, H., Mortezaei, A., Razavi, S.M.N., Lasowicz, N., Jankowski, R.: Effective gap size index for determination of optimum separation distance preventing pounding between buildings during earthquakes, *Applied Sciences*, 11 (2021) 5, 2322, <https://doi.org/10.3390/app11052322>
- [5] Jankowski, R., Seleemah, A., El-Khoriby, S., Elwardany, H.: Experimental study on pounding between structures during damaging earthquakes, *Key Engineering Materials*, 627 (2015), pp. 249-252, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.627.249>
- [6] Xue, Q., Zhang, C., He, J., Zou, G., Zhang, J.: An Updated Analytical Structural Pounding Force Model Based on Viscoelasticity of Materials, *Shock and Vibration*, 2016 (2016), Article ID 2596923, 15 pages, <https://doi.org/10.1155/2016/2596923>
- [7] Anagnostopoulos, S.A.: Pounding of buildings in series during earthquakes, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 16 (1988) 3, pp. 443-456, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160311>
- [8] Davis, R.O.: Pounding of buildings modelled by an impact oscillator, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21 (1992) 3, pp. 253-274, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290210305>
- [9] Pantelides, C.P., Ma, X.: Linear and nonlinear pounding of structural systems, *Computers and Structures*, 66 (1998) 1, pp. 79-92, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(97\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(97)00045-X)
- [10] Karayannis, C.G., Favvata, M.J.: Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34 (2005) 1, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1002/eqe.398>
- [11] Jankowski, R.: Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34 (2005) 6, pp. 595-611, <https://doi.org/10.1002/eqe.434>
- [12] Mahmoud, S., Jankowski, R.: Elastic and inelastic multi-storey buildings under earthquake excitation with the effect of pounding, *Journal of Applied Sciences*, 9 (2009) 18, pp. 3250-3262, <https://doi.org/10.3923/jas.2009.3250.3262>
- [13] Khatiwada, S., Chouh, N., Butterworth, J.W.: A generic structural pounding model using numerically exact displacement proportional damping, *Engineering Structures*, 62-63 (2014) pp. 33-41, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.016>
- [14] Aida, T., Aso, T., Takeshita, K., Takiuchi, T., Fujii, T.: Improvement of the structure damping performance by interconnection, *Journal of Sound and Vibration*, 242 (2001) 2, pp. 333-353, <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3349>
- [15] Ying, Z.G., Ni, Y.Q., Ko, J.M.: Non-linear stochastic optimal control for coupled-structures system of multi-degree-of-freedom, *Journal of Sound and Vibration*, 274 (2004) 3-5, pp. 843-861, [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00610-2](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00610-2)
- [16] Basili, M., de Angelis, M.: Optimal passive control of adjacent structures interconnected with nonlinear hysteretic devices, *Journal of Sound and Vibration*, 301 (2007) 1-2, pp. 106-125, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.09.027>
- [17] Park, K.S., Ok, S.Y.: Hybrid control approach for seismic coupling of two similar adjacent structures, *Journal of Sound and Vibration*, 349 (2015), pp. 1-17, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.03.028>
- [18] Palermo, M., Silvestri, S.: Damping reduction factors for adjacent buildings connected by fluid-viscous dampers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 138 (2020), 106323, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106323>
- [19] Trombetti, T., Silvestri, S.: Novel schemes for inserting seismic dampers in shear-type systems based upon the mass proportional component of the Rayleigh damping matrix, *Journal of Sound and Vibration*, 302 (2007) 3, pp. 486-526, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.11.030>
- [20] Miari, M., Choong, K.K., Jankowski, R.: Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121 (2019), pp. 135-150, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.024>
- [21] López-Almansa, F., Kharazian, A.: Parametric study of seismic pounding between RC buildings with aligned slabs, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125 (2019) 105718, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105718>
- [22] Farahani, D., Behnamfar, F., Sayyadpour, H., Ghandil, M.: Seismic impact between adjacent torsionally coupled buildings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117 (2019), pp. 81-95, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.015>
- [23] Madani, B., Behnamfar, F., Tajmir Riahi, H.: Dynamic response of structures subjected to pounding and structure-soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 78 (2015), pp. 46-60, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.07.002>
- [24] Jia, H.Y., Lan, X.L., Zheng, S.X., Li, L.P., Liu, C.Q.: Assessment on required separation length between adjacent bridge segments to avoid pounding, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120 (2019), pp. 398-407, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.031>
- [25] Torrence, C., Compo, G.P.: A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (1998) 1, pp. 61-78, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)
- [26] Mohebi, B., Yazdanpanah, O., Kazemi, F., Formisano, A.: Seismic damage diagnosis in adjacent steel and RC MRFs considering pounding effects through improved wavelet-based damage-sensitive feature, *Journal of Building Engineering*, 33 (2021), 101847, <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101847>
- [27] Xing, S., Halling, M.W., Meng, Q.: Structural pounding detection by using wavelet scalogram, *Advances in Acoustics and Vibration* (2012) Article ID 805141, 10 pages, <https://doi.org/10.1155/2012/805141>
- [28] Young Noh, H., Krishnan Nair, K., Lignos, D.G., Kiremidjian, A.S.: Use of Wavelet-Based Damage-Sensitive Features for Structural Damage Diagnosis Using Strong Motion Data, *Journal of Structural Engineering*, 137 (2011) 10, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000385](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000385)

- [29] Yazdanpanah, O., Formisano, A., Chang, M., Mohebi, B.: Fragility curves for seismic damage assessment in regular and irregular MRFs using improved wavelet-based damage index, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 182 (2021), 109558, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109558>
- [30] De Domenico, D., Ricciardi, G., Takewaki, I.: Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: a review, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 118 (2019), pp. 144-165, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.024>
- [31] Silvestri, S., Gasparini, G., Trombetti, T.: A five-step procedure for the dimensioning of viscous dampers to be inserted in building structures, *Journal of Earthquake Engineering*, 14 (2010) 3, pp. 417-447, <https://doi.org/10.1080/13632460903093891>
- [32] Lavan, O., Levy, R.: Optimal design of supplemental viscous dampers for linear framed structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35 (2006) 3, pp. 337-356, <https://doi.org/10.1002/eqe.524>
- [33] Kandemir-Mazanoglu, E.C., Mazanoglu, K.: An optimization study for viscous dampers between adjacent buildings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 89 (2017), pp. 88-96, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.06.001>
- [34] Anagnostopoulos, S.A.: Pounding of buildings in series during earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16 (1988) 3, pp. 443-456, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160311>
- [35] Davis, R.: Pounding of buildings modelled by an impact oscillator, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21 (1992), pp. 253-274, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290210305>
- [36] Pantelides, C.P., Ma, X.: Linear and nonlinear pounding of structural systems, *Computers and Structures*, 6 (1998) 1, pp. 79-92, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(97\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(97)00045-X)
- [37] Karayannis, C.G., Favvata, M.J.: Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34 (2005) 1, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1002/eqe.398>
- [38] Mahdavi, S.H., Rofooei, F.R., Sadollah, A., Xu, C.: A wavelet-based scheme for impact identification of framed structures using combined genetic and water cycle algorithms, *Journal of Sound and Vibration*, 443 (2019), pp. 25-46, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.11.022>
- [39] Maniatakis, C.A., Spyrakos, C.C., Kiriakopoulos, P.D., Tsellos, K.P.: Seismic response of a historic church considering pounding phenomena, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16 (2018), pp. 2913-2941, <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0293-5>
- [40] Hwang, S.H., Lignos, D.G.: Nonmodel-based framework for rapid seismic risk and loss assessment of instrumented steel buildings, *Engineering Structures*, 156 (2018), pp. 417-432, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.045>
- [41] Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J.M.: *MathWorks Wavelet Toolbox User's Guide*, MathWorks Inc.: Natick, MA, USA, 2015.
- [42] Chun, L.C., Zhengding, Q.: A method based on Morlet wavelet for extracting vibration signal envelope, 5th International Conference on Signal Processing Proceedings, 16th World Computer Congress, pp. 337-340, 2000.
- [43] Sheen, Y.T., Hung, C.K.: Constructing a wavelet-based envelope function for vibration signal analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18 (2004) 1, pp. 119-126, [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00046-3)
- [44] Heidari, A., Majidi, N.: Earthquake acceleration analysis using wavelet method, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 20 (2021) 1, pp. 113-126, <https://doi.org/10.1007/s11803-021-2009-8>
- [45] Lin, J., Qu, L.: Feature extraction based on morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis, *Journal of Sound and Vibration*, 234 (2000) 1, pp. 135-148, <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.2864>
- [46] Grinsted, A., Moore, J.C., Jevrejeva, S.: Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11 (2004) 5/6, pp. 561-566, <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>, 2004
- [47] Aksoylu, C., Mobark, A., Arslan, M.H., Erkan, I.H.: A comparative study on ASCE 7-16, TBEC-2018 and TEC-2007 for reinforced concrete buildings, *Revista de La Construcción*, 19 (2020) 2, pp. 282-305, <https://doi.org/10.7764/rdlc.19.2.282-305>
- [48] The Math Works, Inc. MATLAB. Version 2022a, The Math Works, Inc., 2022.
- [49] Azevedo, J., Bento, R.: Design criteria for buildings subjected to pounding, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, pp. 23-28, 1996.
- [50] Gu, X., Jamshidi, S., Sun, H.G., Niyogi, D.: Identifying multivariate controls of soil moisture variations using multiple wavelet coherence in the U.S. Midwest, *Journal of Hydrology*, 602 (2021) 126755, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126755>
- [51] De Domenico, D., Ricciardi, G., Takewaki, I.: Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: A review, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 118 (2019), pp. 144-165, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.024>
- [52] Federal Emergency Management Agency (FEMA 1997). NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Rep. No. 273/274, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.
- [53] Martinez-Rodrigo, M., Romero, M.L.: An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications, *Engineering Structures*, 25 (2003) 7, pp. 913-925, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00025-7)