

Primljen / Received: 31.10.2014.

Ispravljen / Corrected: 16.3.2015.

Prihvaćen / Accepted: 26.3.2015.

Dostupno online / Available online: 10.9.2015.

Ovisnost odziva armiranobetonskih visokih zgrada o mjeri intenziteta potresa

Autori:



Mr.sc. **Jelena Pejović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Crne Gore
Građevinski fakultet Podgorica
jelenar@t-com.me



Prof.dr.sc. **Srđan Janković**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Crne Gore
Građevinski fakultet Podgorica
[srdjan@t-com.me](mailto: srdjan@t-com.me)

Prethodno priopćenje

Jelena Pejović, Srđan Janković

Ovisnost odziva armiranobetonskih visokih zgrada o mjeri intenziteta potresa

U radu je provedena analiza ovisnosti između mjere intenziteta potresa IM i parametra seizmičkog odziva EDP, radi pronalaženja i definiranja najučinkovitijih ovisnosti EDP-IM za armiranobetonske visoke zgrade. Kao referentna konstrukcija izabrana je trideseterokatna AB visoka zgrada konstrukcijskog sustava s AB jezgrom. U okviru analize provedeno je 240 nelinearnih dinamičkih analiza na djelovanje 60 potresnih zapisa na prostornom modelu konstrukcije. Analizirane su postojeće i predložene su nove mjere intenziteta koje daju najučinkovitije ovisnosti za AB visoke zgrade.

Ključne riječi:

visoke AB zgrade, mjera intenziteta, parametar seizmičkog odziva, nelinearna dinamička analiza

Preliminary report

Jelena Pejović, Srđan Janković

Dependence of RC high-rise buildings response on the earthquake intensity

The relationship between the ground motion intensity measure, IM, and the engineering demand parameter, EDP, is analysed in the paper so as to identify and define the most efficient EDP-IM relationships for RC high-rise buildings. A 30-story RC high-rise building with the core wall structural system was selected as the reference building. 240 nonlinear time-history analyses were conducted for 60 ground motions on the spatial model of the building. The existing intensity measures were analyzed and the new ones – providing the most efficient relationships for RC buildings – were proposed.

Key words:

high-rise RC buildings, intensity measure, engineering demand parameter, nonlinear time-history analysis

Vorherige Mitteilung

Jelena Pejović, Srđan Janković

Verhalten von Stahlbetonhochbauten im Bezug zur Erdbebenintensität

In dieser Arbeit wird der Bezug zwischen dem Intensitätsmaß IM und dem Parameter seismischer Antwort EDP analysiert, um das wirksamste Verhältnis EDP-IM für Stahlbetonhochbauten zu erforschen und zu definieren. Als Referenzobjekt wurde ein 30-stöckiges Stahlbetongebäude mit Kernwänden als Tragkonstruktion gewählt. Auf einem räumlichen Modell des Tragwerks beruhend wurden unter der Einwirkung 60 verschiedener Erdbebenaufzeichnungen 240 nichtlineare dynamische Analysen durchgeführt. Bestehende Intensitätsmaße wurden analysiert und neue Vorschläge, die insbesondere für Stahlbetongebäude anwendbar sind, wurden gegeben.

Schlüsselwörter:

Hochbauten, Intensitätsmaß, Parameter seismischer Antwort, nichtlineare dynamische Analyse

1. Uvod

Zbog urbanizacije, naglog rasta gradova i koncentracije materijalnih resursa u urbanim sredinama zadnjih desetljeća, izgradnja visokih zgrada u seizmički aktivnim područjima postaje svakodnevnim projektantski trend. U prosincu 2011. tvrdilo se u Savjetu za Visoke zgrade [1] da će se samo u dva desetljeća, od 2000. do 2020. godine, prosječna visina najviših zgrada udvostručiti. Iz tog razloga je, za seizmički aktivna područja, potrebno provesti sveobuhvatne studije na temu oštećljivosti AB visokih zgrada. Nedostatak istraživanja na ovu temu za visoke zgrade među prvima je prepoznao istraživački centar PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) koji trenutačno radi na velikom znanstvenoistraživačkom projektu *Tall Buildings Initiative* [2].

Sličan trend se pojavljuje i u južnoeuropskoj mediteranskoj zoni. S obzirom na to da je cijeli mediteranski pojas seizmički aktivno područje, potrebno je provesti detaljnije seizmičke analize ove klase zgrada. Ovaj rad predstavlja dio znanstvenoistraživačkog rada na temu probabilističke seizmičke analize i procjene oštećljivosti AB visokih zgrada za potresnu pobudu karakterističnu za južnoeuropsku mediteransku zonu. Konkretno, tema je ovog rada analiza ovisnosti između mjere intenziteta potresa IM i parametra seizmičkog odziva EDP, s ciljem pronalaženja i definiranja najučinkovitijih ovisnosti EDP-IM za AB visoke zgrade koje su ujedno i praktične. EDP-IM ovisnost je učinkovita ako daje najmanje rasipanje rezultata EDP za dane IM. EDP-IM ovisnost je praktična ako se veza može uspostaviti pomoću mjera intenziteta koje imaju jasnu fizičku interpretaciju i lako se proračunavaju iz potresnih zapisa i seizmičkih odziva koji su direktan rezultat nelinearne dinamičke analize [3]. Ta je ovisnost nužna kako bi se dobila vjerojatnost prekoračenja $P[EDP/IM]$ odgovarajuće mjere seizmičkog

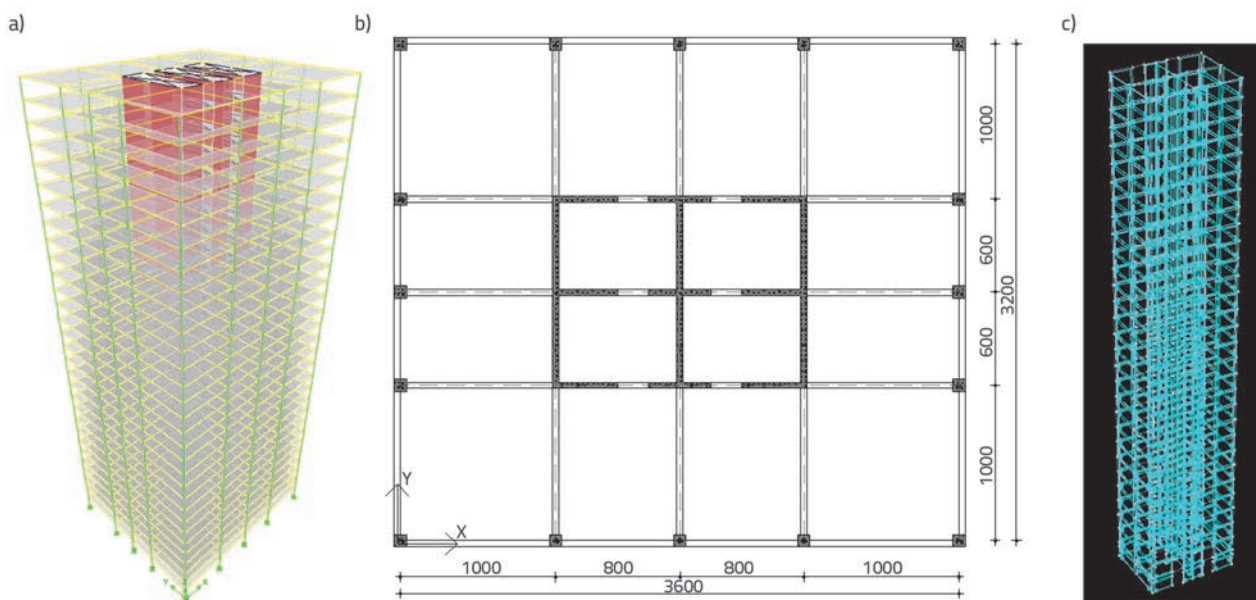
odziva EDP u ovisnosti o mjeri seizmičkog intenziteta IM u procesu probabilističke seizmičke analize prema zahtijevanom ponašanju konstrukcije (engl. *performance-based design*).

Kao referentna konstrukcija izabrana je trideseterokatna AB visoka zgrada konstrukcijskog sustava s AB jezgrom. Radi pronalaženja najučinkovitijeg modela EDP-IM, provedeno je 240 nelinearnih dinamičkih analiza na djelovanje 60 potresnih zapisa sa širim opsegom magnituda, udaljenostima od rasjeda i različitim vrstama tla uzimajući na taj način u obzir neodređenosti pri izboru zapisa. Provedena je detaljna analiza i statistička obrada rezultata i izvedene su odgovarajuće ovisnosti EDP-IM. Analizirane su postojeće i predložene su nove mjere intenziteta koje daju najučinkovitije modele za armiranobetonske visoke zgrade.

2. Izbor i opis referentne konstrukcije visoke AB zgrade

Za referentnu konstrukciju u ovom radu izabrana je trideseterokatna AB visoka zgrada konstrukcijskog sustava s AB jezgrom koja preuzima cjelokupnu seizmičku silu i s AB okvirima po obodu koji preuzimaju samo gravitacijsko opterećenje [4]. Karakteristični tlocrt referentne AB visoke zgrade i modeli iz ETABS programa [5] i PERFORM-3D programa [6] prikazani su na slici 1. Konstrukcijski sustav s AB jezgrom je sustav koji je primjenjiv za zgrade do 40 do 50 katova [4]. Taj je konstrukcijski sustav izabran zato što odgovara katnosti koja je kao realno primjenjiva u ovom radu za južnoeuropsku mediteransku zonu. S druge strane, konstrukcijski sustavi sa zidovima su najčešće primjenjivani sustavi za preuzimanje potresnog djelovanja u južnoeuropskoj mediteranskoj seizmičkoj zoni.

Kad su visoke zgrade u pitanju, konstrukcijski sustav s AB jezgrom vrlo je prikladan iz arhitektonskih razloga i zbog toga



Slika 1. a) ETABS model referentne zgrade; b) Karakteristični tlocrt; c) Perform3D model referentne zgrade

se vrlo često primjenjuje. AB zidovi se postavljaju u središnjem dijelu zgrade oko komunikacijskih jezgra (dizala, stubišta) i na taj način formiraju prostorni sustav koji ima veliku nosivost na djelovanje horizontalnih seizmičkih sila u dva ortogonalna smjera. Prostor između središnje AB jezgre i oboda konstrukcije najčešće ostaje slobodan ili rijetko ispunjen AB stupovima, povezanim međukatnom konstrukcijom, koji predstavljaju sekundarne seizmičke elemente. Osnovne karakteristike referentne zgrade prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Osnovne karakteristike referentne zgrade

Karakteristike zgrade	Opis
Ukupna visina [m]	90
Broj katova	30
Visina kata [m]	3
Međukatna konstrukcija	puna AB ploča debljine 20 cm
AB grede	40 x 65 cm
AB stupovi	80 x 80 cm
Zidovi AB jezgre	1.-5. kat: debljina 40 cm 6.-30. kat: debljina 30 cm
Vežne grede AB jezgre	30 x 80 cm i 40 x 80 cm
Beton $f_{ck}(f_{cm})$ [MPa]	45(53)
Armatura $f_{yk}(f_{ym})$ [MPa]	500(575)
Modul elastičnosti betona E_{cm} [MPa]	36000

Proračun i dimenzioniranje referentne AB zgrade provedeno je prema Eurokodu 2 [7] i Eurokodu 8 – dio 1 [8]. Seizmičko opterećenje je definirano pomoću elastičnog spektra odziva, tipa 1 (s magnitudom površinskih valova $M_s > 5,5$). Poredbeno vršno horizontalno ubrzanje tla za usvojenu seizmičku zonu iznosi $a_{gR} = 0,37$ g. Za proračun referentne zgrade korišten je proračunski spektar odziva (elastični spektar odziva reduciran s faktorom ponašanja q pomoću kojeg se indirektno uzima u obzir da će konstrukcija pri djelovanju potresa trošiti energiju plastičnim ponašanjem njenih elemenata). Razmatrana zgrada projektirana je za razred umjerene duktilnosti (DCM). Konstrukcijski sustav razmatrane referentne zgrade je duktilni zidni sustav u oba horizontalna smjera, prema klasifikaciji iz Eurokoda 8 – dio 1. S obzirom na konstrukcijski sustav i postignutu pravilnost u tlocrtu i po visini, određena je vrijednost faktora ponašanja za DCM razred duktilnosti u iznosu od 3,6. Ukupna seizmička sila izračunana je pomoću višemodalne spektralne analize, što je sasvim primjereno s obzirom na utjecaj viših oblika titranja kod visokih AB zgrada. Vlastiti periodi titranja konstrukcije i modalni faktori doprinosa pojedinih oblika prikazani su u tablici 2. Konstrukcijski elementi su modelirani tako da imaju krutost jednaku jednoj polovini krutosti neraspucalih presjeka, što je u skladu s Eurokodom 8 – dio 1 [8]. Za linearnu analizu i proračun konstrukcije korišten je program ETABS [5]. Za potrebe proračuna napravljen je prostorni model konstrukcije.

Tablica 2. Vlastiti periodi titranja i pripadni modalni faktori doprinosa

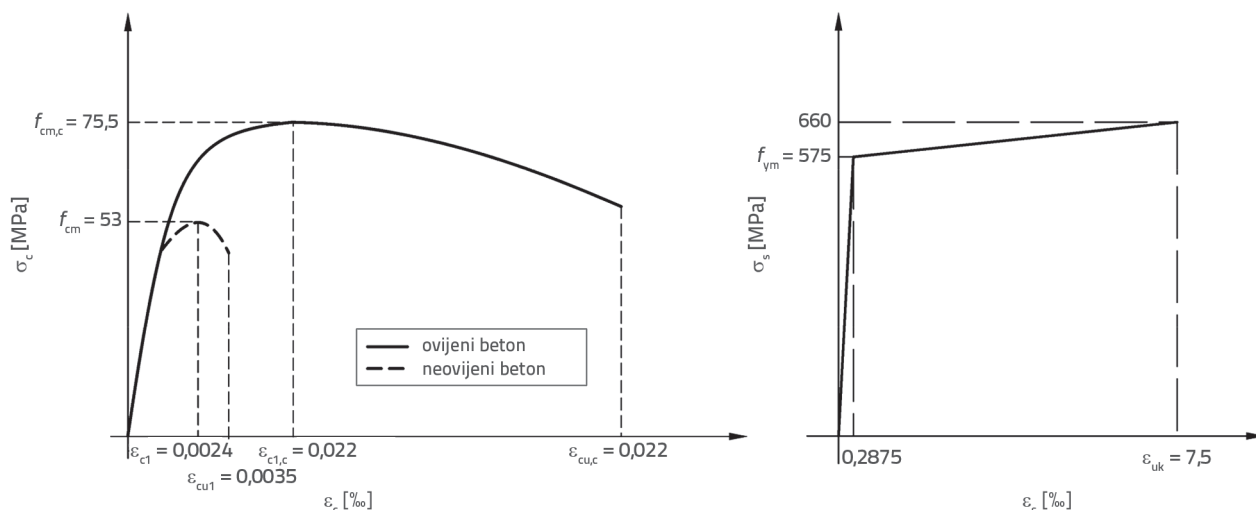
Oblik titranja	1	2	3	4
Vlastiti period u y smjeru [s]	2,880	0,623	0,270	0,164
Vlastiti period u x smjeru [s]	2,597	0,702	0,347	0,228
Modalni faktori doprinosa u y smjeru [%]	63,53	19,43	7,05	3,57
Modalni faktori doprinosa u x smjeru [%]	67,7	17,4	5,23	2,78
Suma modalnih faktora doprinosa prva 4 oblika titranja u y smjeru [%]				93,58
Suma modalnih faktora doprinosa prva 4 oblika titranja u x smjeru [%]				93,11

Analizom izračunanih seizmičkih utjecaja utvrđeno je da ukupnu seizmičku silu dominantno preuzimaju AB zidovi jezgre (95 % od ukupne seizmičke sile). Stupovi rubnih okvira preuzimaju samo 5 % od ukupne seizmičke sile, pri čemu je okvirno djelovanje u srednjim osima (rubni stup-greda-zid) zanemarivo. Iz tog razloga je AB jezgra bila predmet daljnjeg detaljnijeg proračuna i dimenzioniranja prema odgovarajućim odredbama Eurokoda 8, a nakon toga i nelinearnih dinamičkih analiza.

Prilikom proračuna armiranobetonskih zidova ispunjene su sve odredbe pravilnika Eurokoda 8 – dio 1 [8] vezane za dimenzioniranje i armiranje duktilnih zidova razreda duktilnosti DCM. Postotci armiranja vertikalnom uzdužnom armaturom rubnih elemenata u vanjskim zidovima jezgre u smjeru y kreću se u granicama od 1,879 % u presjecima u prizemlju do 0,893 % u višim presjecima, dok se za unutrašnje zidove u smjeru y kreću u granicama od 0,959 % do 0,893 %. Postotci armiranja vertikalnom uzdužnom armaturom rubnih elemenata zidova u smjeru x kreću se od 3,587 % do 1,340 %. Vertikalne šipke su ravnomjerno raspoređene po opsegu rubnih elemenata na maksimalnom razmaku od 20 cm. Spone za ovijanje vertikalnih šipki rubnih elemenata usvojene su na svakih 10 cm u nižim presjecima (ili 15 cm u višim presjecima), tako da razmak između dvije susjedne uzdužne šipke, pridržane sponama, ne prelazi 20 cm. Postotci armiranja vertikalnom armaturom u središnjem dijelu presjeka kreću se u granicama od 0,536 % u presjecima u prizemlju do 0,211 % u višim presjecima, dok se postotci armiranja horizontalnom armaturom u središnjem dijelu presjeka kreću u granicama od 0,785 % u presjecima u prizemlju do 0,263 % u višim presjecima. Vertikalna i horizontalna armatura u središnjem dijelu presjeka zidova ravnomjerno je raspoređena po dužini odnosno visini.

3. Nelinearni model referentne AB visoke zgrade

Za nelinearnu dinamičku analizu korišten je program PERFORM-3D [6]. Napravljen je nelinearni prostorni model AB jezgre. Matematički model koji je korišten u linearnoj analizi je proširen tako da uključuje nosivost konstrukcijskih elemenata i njihovo



Slika 2. Dijagrami naprezanje-deformacija za: a) neovijeni i ovijeni beton sa srednjom vrijednošću tlačne čvrstoće u iznosu od 53 MPa; b) armaturni čelik sa srednjom vrijednošću naprezanja na granici tečenja u iznosu od 575 MPa

postelastično ponašanje. Da bi se što realnije predstavilo stvarno ponašanje konstrukcije pri nelinearnim analizama, svojstva elemenata su zasnovana na srednjim vrijednostima svojstava materijala u skladu s preporukama Eurokoda 8 – dio 1 [8], za razliku od faze proračuna gdje se usvajaju karakteristične vrijednosti svojstava materijala (vrijednosti s fraktilom 5 %) da bi se bilo na strani sigurnosti. Usvojeni su radni dijagrami neovijenog betona, ovijenog betona i armature u skladu s preporukama Eurokoda 8 – dio 2 [9]. Dijagram naprezanje-deformacija za ovijeni beton, definiran u Eurokodu 8 – dio 2 [9], temelji se na prijedlogu Mandera, Priestleya i Parka [10]. Dijagram naprezanje-deformacija za neovijeni beton sa srednjom vrijednošću tlačne čvrstoće u iznosu od 53 MPa i ovijeni beton za usvojeni način ovijanja poprečnom armaturom rubnih zidnih elemenata, prikazani su na slici 2.a. Dijagram naprezanje-deformacija za armaturni čelik definiran je u skladu s Eurokodom 8 – dio 2 [9] i predstavlja bilinearni dijagram sa srednjom vrijednošću naprezanja na granici tečenja u iznosu od 575 MPa i graničnim naprezanjem 660 MPa (slika 2.b). Modeliranje zidova AB jezgre izvedeno je pomoću nelinearnih vertikalnih elemenata uslojenog poprečnog presjeka (engl. *fiber elements*) [11]. Pomoću pojedinih vlakana, koja čine poprečni presjek zida, definirana je površina i lokacija armature unutar poprečnog presjeka i karakteristike betona. Ponašanje zidova na posmik modelirano je kao elastično. Vezne grede su tretirane i modelirane kao elastični gredni elementi s nelinearnim posmičnim plastičnim zglobovima u sredini raspona grede. Ponašanje posmičnog plastičnog zgloba temelji se na rezultatima J.W. Wallacea [12].

4. Izbor potresnih zapisa i načina skaliranja

Budući da se u ovom radu istražuje južnoeuropska mediteranska seizmička zona, trebalo je izabrati potresne zapise u okviru ove zone. Kao baza zapisa korištena je baza Seizmološkog zavoda Crne Gore i Europska baza zapisa jakih potresa [13]. U ovom

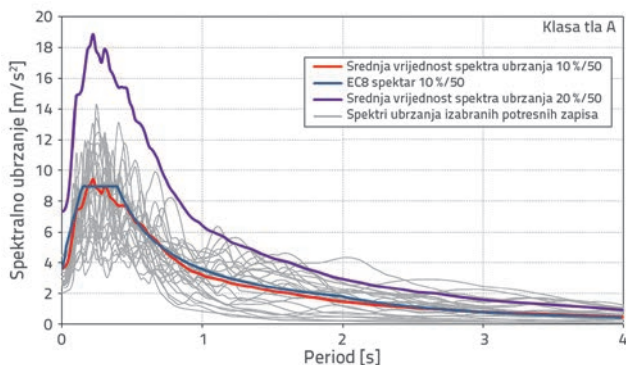
radu potresni zapisi su izabrani ovisno o vrijednosti magnitude M , udaljenosti od rasjeda R i vrsti tla. Upotrebom većeg broja potresnih zapisa sa širim opsegom magnituda, udaljenostima od rasjeda i različitim vrstama tla uzimaju se u obzir neodređenosti pri izboru zapisa. Visoke zgrade su specifične po tome što je opseg njihovog frekvencijskog odziva mnogo širi nego u slučaju nižih zgrada. Stoga je potrebno obuhvatiti što veći broj potresnih zapisa, različitih magnituda i udaljenosti od rasjeda. Neodređenosti pri izboru zapisa su najčešće mnogo veće od ostalih tipova neodređenosti u probalističkoj seizmičkoj analizi prema zahtijevanom ponašanju konstrukcije.

Izabrano je 60 potresnih zapisa od kojih je 25 snimljenih na stijeni, što odgovara tipu tla A po Eurokodu 8, i 35 snimljenih na čvrstom tlu što odgovara tipu tla B po Eurokodu 8. Vrijednosti magnitude izabranih zapisa nalaze se u opsegu između 5,1 i 7,0, dok se udaljenosti od rasjeda nalaze u opsegu od 5 do 70 km. Osnovni je kriterij za izbor potresnih zapisa taj da srednja vrijednost njihovih spektara odziva bude kompatibilna s odgovarajućim ciljnim spektrom u širem području perioda. Kao ciljni spektar izabran je elastični spektar Eurokoda 8 za povratni period od 475 godina, s proračunskim ubrzanjem tla u iznosu od 0,37g. S obzirom na to što na području južnoeuropske mediteranske seizmičke zone nema dovoljno potresnih zapisa koji bi mogli biti izabrani tako da se ne skaliraju, a da njihova srednja vrijednost odgovara Eurokodovom spektru, trebalo je prethodno skalirati potresne zapise. Kao način skaliranja izabran je postupak MSE (engl. *mean squared error*) [14]. Pomoću tog postupka potresni se zapisi skaliraju tako da faktori skaliranja minimiziraju srednju kvadratnu pogrešku (MSE - mean squared error) duž cijelog područja perioda. Srednja kvadratna pogreška predstavlja razliku između spektralnih ubrzanja potresnog zapisa i ciljnog spektra i računa se pomoću izraza (1):

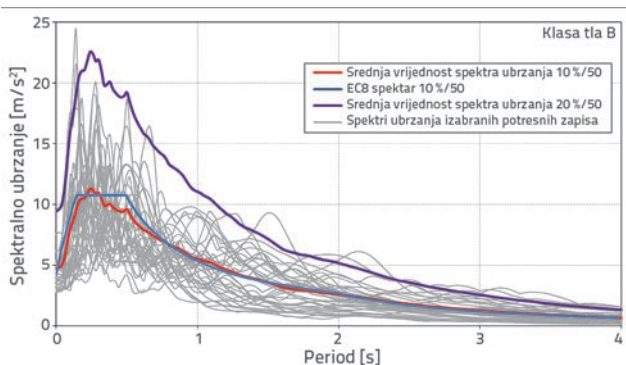
$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n [S_a^{ciljni}(T_i) - f \cdot S_a^{zapisa}(T_i)]^2}{n} \quad (1)$$

gdje f označava linearni faktor skaliranja. Kao srednja vrijednost spektara ubrzanja potresnih zapisa usvojena je geometrijska sredina pojedinih spektara ubrzanja [14].

Osim potresa koji odgovaraju povratnom periodu od 475 godina (potres koji ima 10 % vjerojatnosti premašaja u vremenskom intervalu od 50 godina), referentna konstrukcija je ispitana i na djelovanje potresa s povratnim periodom od 2475 godina (potres koji ima 2 % vjerojatnosti premašaja u vremenskom intervalu od 50 godina). S obzirom na to što u Eurokodu 8 – dio 1 nije definirana tako visoka razina seizmičkog intenziteta, u ovom su radu za određivanje prikladnih potresa intenziteta 2 %/50 poslužili podaci iz projekta *Seismic hazard harmonization in Europe – SHARE* [15]. Kao rezultat tog projekta konstruirane su karte seizmičke opasnosti za južnoeuropsku mediteransku seizmičku zonu za različite razine seizmičkog intenziteta. Seizmički intenzitet koji odgovara povratnom periodu od 2475 godina dvaput je veći od seizmičkog intenziteta koji odgovara povratnom periodu od 475 godina [15]. U skladu s tim, srednja vrijednost spektara ubrzanja zapisa potresa intenziteta 2 %/50 dva je puta veća od srednje vrijednosti spektara ubrzanja zapisa potresa intenziteta 10 %/50. Na slikama 3. i 4. prikazani su spektri izabranih potresnih zapisa za pojedine tipove tla skalirani pomoću MSE postupka za razinu intenziteta 10 %/50, njihova srednja vrijednost za razine intenziteta 10 %/50 i 2 %/50 te odgovarajući ciljni spektri (elastični spektri za pojedine tipove tla prema Eurokodu).



Slika 3. Spektri ubrzanja izabranih potresnih zapisa za tip tla A, njihova srednja vrijednost za razine intenziteta 10 %/50 i 2 %/50 i elastični EC8 spekter za tip tla A i razinu intenziteta 10 %/50



Slika 4. Spektri ubrzanja izabranih potresnih zapisa za tip tla B, njihova srednja vrijednost za razine intenziteta 10 %/50 i 2 %/50 i elastični EC8 spekter za tip tla B i razinu intenziteta 10 %/50

5. Izbor mjera intenziteta potresa i parametara seizmičkog odziva

Izbor prikladne mjere intenziteta jest pitanje o kojem se u potresnom inženjerstvu već dugo raspravlja. Mjere intenziteta potresa trebale bi biti takve da obuhvaćaju što više značajki potresa kao što su amplitude, frekvencijski sadržaj, trajanje jakog dijela gibanja tla i druge. Mjere intenziteta koje predstavljaju amplitude gibanja tla su: vršno ubrzanje tla (PGA), vršna brzina tla (PGV) i vršni pomak tla (PGD). Vršno ubrzanje tla PGA ima najveći utjecaj na seizmički odziv konstrukcija s većim frekvencijama (periodima manjim od 0,5 s), dok su konstrukcije s nižim frekvencijama, odnosno periodima većim od 0,5 s, osjetljivije na vršnu brzinu tla PGV i vršni pomak tla PGD [16]. Najčešće mjere intenziteta koje karakteriziraju frekvencijski sadržaj su: spektralno ubrzanje $S_a(T_1)$, spektralna brzina $S_v(T_1)$, spektralni pomak $S_d(T_1)$ i pseudospektralna brzina $PSV(T_1)$. Te mjere intenziteta su ovisne o vlastitom periodu titranja konstrukcije i predstavljaju vršne odzive sustava s jednim stupnjem slobode.

Visoke zgrade specifične su po tome što je opseg njihovog frekvencijskog odziva mnogo širi nego u slučaju nižih zgrada. Mjere intenziteta kao što su spektralne vrijednosti $S_a(T_1)$, $S_v(T_1)$, $S_d(T_1)$ i $PSV(T_1)$ reprezentiraju točno samo određene točke frekvencijskog sadržaja spektra odziva. Iz tog razloga, za slučaj visokih zgrada prikladnije su mjere intenziteta koje obuhvaćaju širi opseg frekvencijskog sadržaja spektara odziva. U ovom radu u prvoj su fazi detaljno analizirane postojeće mjere intenziteta, što su ih predložili pojedini istraživači, koje obuhvaćaju širi opseg spektara odziva. Zatim su, na osnovi tih mjera, autori ovog rada predložili nove mjere intenziteta. Mjere intenziteta koje su istraživane u ovom radu, a obuhvaćaju širi opseg frekvencijskog sadržaja spektara odziva mogu se predstaviti kako slijedi:

Housnerov intenzitet spektra SI_H

Housnerov srednji intenzitet spektra SI_H definira se kao površina ispod elastičnog spektra brzine između perioda 0,1 s i 2,5 s [17]:

$$SI_H = \frac{1}{2.4} \cdot \int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dT \quad (2)$$

Matsumurin srednji intenzitet spektra SI_m

Matsumurin srednji intenzitet spektra SI_m definira se kao površina ispod spektra brzine između perioda T_y i $2T_y$ gdje je T_y period na granici tečenja konstrukcije [18]:

$$SI_m = \frac{1}{T_y} \cdot \int_{T_y}^{2T_y} S_v(T) dT \quad (3)$$

Martinez-Ruedin srednji intenzitet spektra SI_{yh}

Martinez-Rueda je predložio da se druga granica integracije u integralu Matsumurinog srednjeg intenziteta spektra SI_m zamijeni s periodom T_h koji predstavlja period titranja konstrukcije u području ojačanja nakon tečenja [19]:

$$SI_{yh} = \frac{1}{T_h - T_y} \cdot \int_{T_y}^{T_h} S_v(T) dT \quad (4)$$

Zadnje navedene dvije mjere intenziteta (izrazi (3) i (4)) uzimaju u obzir povećanje vlastitog perioda titranja tijekom djelovanja potresa uslijed nelinearne degradacije krutosti i nosivosti. Iz tog razloga su usvojeni odgovarajući intervali perioda $[T_v, 2T_v]$ i $[T_v, T_h]$. U slučaju visokih AB zgrada utjecaj viših oblika titranja se ne može zanemariti, pa se u ovom radu za period na granici tečenja T_v usvaja vrijednost ponderiranog prosjeka modalnim faktorom između oblika titranja konstrukcije, izraz (5) [16]:

$$T_y = \frac{m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2 + \dots + m_n \cdot T_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (5)$$

gdje su m_1, \dots, m_n modalni faktori doprinosa pojedinih oblika titranja konstrukcije.

Vrijednost perioda T_h u području ojačanja nakon tečenja se određuje pomoću nelinearne statičke metode postupnog guranja konstrukcije, kako je predložio Martinez-Rueda [19], pri čemu je korišten izraz (6):

$$T_h = T_y \cdot \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha \cdot \mu - \alpha}} \quad (6)$$

gdje su: $\mu = \Delta_h / \Delta_v$ faktor duktilnosti pomaka, Δ_h maksimalni pomak, Δ_v pomak na granici tečenja vrha konstrukcije i α odnos krutosti u području ojačanja nakon tečenja i početne krutosti.

Da bi se razmotrio utjecaj viših oblika titranja za proračun mjera intenziteta i perioda na granici tečenja T_v , za referentnu zgradu razmatrana su dva slučaja. U prvom slučaju su uzeti u obzir samo oblici titranja konstrukcije s modalnim faktorima doprinosa većim od 5 %, što su prva tri oblika titranja referentne zgrade. Drugi slučaj, gdje su uzeta u obzir prva četiri oblika titranja, analiziran je da bi se razmotrila potreba uzimanja u obzir onih oblika čiji su modalni faktori doprinosa manji od 5 %.

Autori su ovog rada za AB visoke zgrade definirali odgovarajuće srednje spektralne vrijednosti kao mjere intenziteta koje uzimaju u obzir utjecaj viših oblika titranja (ukupno tri oblika), i to:

- srednja spektralna brzina $S_{v,avg1}$, izraz (7):

$$S_{v,avg1} = \frac{m_1 \cdot S_v(T_1) + m_2 \cdot S_v(T_2) + m_3 \cdot S_v(T_3)}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (7)$$

- srednji spektralni pomak $S_{d,avg1}$, izraz (8):

$$S_{d,avg1} = \frac{m_1 \cdot S_d(T_1) + m_2 \cdot S_d(T_2) + m_3 \cdot S_d(T_3)}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (8)$$

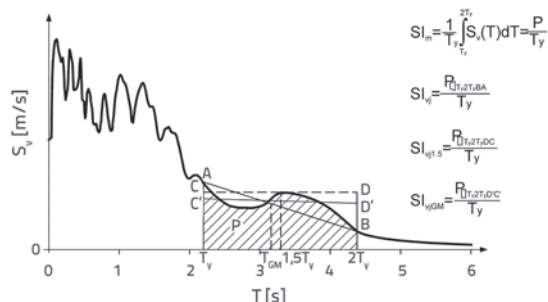
- srednja pseudospektralna brzina PSV_{avg1} , izraz (9):

$$PSV_{avg1} = \frac{m_1 \cdot PSV(T_1) + m_2 \cdot PSV(T_2) + m_3 \cdot PSV(T_3)}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (9)$$

Analogno tim mjerama intenziteta definirane su i $S_{v,avg2}$, $S_{d,avg2}$ i PSV_{avg2} koje uzimaju u obzir spektralne vrijednosti za prva četiri oblika titranja konstrukcije.

Matsumurin srednji intenzitet spektra SI_m i Martinez-Ruedin srednji intenzitet spektra SI_{vh} mjere su intenziteta definirane

preko integrala po spektru brzine, što nije baš praktično za brzi proračun. Na slici 5. vidi se da vrijednost srednjeg intenziteta spektra SI_m predstavlja površinu ispod dijagrama spektra brzine od točke T_v do točke $2T_v$ podijeljenu s T_v . Ta se površina može prikladno i približno zamijeniti površinom trapeza definiranog točkama T_v - $2T_v$ -B-A, ili s pravokutnicima čije se površine definiraju vrijednostima spektra u točki $1,5T_v$ (pravokutnik T_v - $2T_v$ -D-C) ili u točki T_{GM} koja se dobiva kao geometrijska sredina vrijednosti spektra brzine od perioda T_v do perioda $2T_v$ (pravokutnik T_v - $2T_v$ -D'-C').



Slika 5. Shematski prikaz načina dobivanja predloženih novih mjera intenziteta SI_{vj} , $SI_{vj1.5}$ i SI_{vjGM}

Shodno navedenom, autori ovog rada definirali su i predložili nove mjere intenziteta i to:

- srednji intenzitet spektra brzine SI_{vj} , izraz (10):

$$SI_{vj} = \frac{S_v(T_v) + S_v(2T_v)}{2} \quad (10)$$

- srednji intenzitet spektra brzine $SI_{vj1.5}$ koji predstavlja vrijednost spektra brzine za period titranja $1,5T_v$;
- srednji intenzitet spektra brzine SI_{vjGM} koji predstavlja geometrijsku sredinu vrijednosti spektra brzine od perioda titranja T_v do perioda titranja $2T_v$.

Predložene nove mjere intenziteta se lako i učinkovito proračunavaju iz spektra brzine, odnosno predstavljaju praktične mjere intenziteta. Primjenjivost tih mjera ispitana je analizom dobivenog rasipanja rezultata.

U ovom radu, kao parametar seizmičkog odziva izabran je međukatni pomak (relativni katni pomak podijeljen s visinom kata) koji predstavlja najkorišteniji parametar seizmičkog odziva. Međukatni pomak se vrlo jednostavno proračunava i pripada grupi praktičnih parametara seizmičkog odziva jer predstavlja direktan rezultat nelinearne dinamičke analize. Izabrane su dvije karakteristične vrijednosti međukatnog pomaka: maksimalni međukatni pomak za čitavu konstrukciju IDR_{max} i srednja vrijednost maksimalnih međukatnih pomaka IDR_{sr} . Maksimalni međukatni pomak, IDR_{max} je parametar seizmičkog odziva koji se najčešće upotrebljava za opisivanje stanja rušenja, dok se srednja vrijednost maksimalnih međukatnih pomaka IDR_{sr} upotrebljava za opisivanje stupnja oštećenosti.

6. Rezultati analize

Radi definiranja ovisnosti EDP-IM za AB visoke zgrade, referentna zgrada je izložena djelovanju 60 potresnih zapisa s dvije razine intenziteta u oba smjera konstrukcije. Ukupno je provedeno 240 nelinearnih dinamičkih analiza. Za toliki broj analiza trebalo je približno 60 sati rada na računalu Intel® Core™ i5-3470 CPU 3,20 GHz i 8 GB memorije. U ovom radu prezentirani su samo rezultati dobiveni za djelovanje potresnih zapisa u smjeru y referentne zgrade. Rezultati dobiveni za djelovanje zapisa u smjeru x su u skladu s rezultatima za smjer y i potvrđuju zaključke donesene u ovom radu.

Provođenjem nelinearnih dinamičkih analiza na djelovanje izabranih potresnih zapisa dobiveni su dijagrami rasipanja, prikazani sa 120 točaka parova (IM_i , EDP_i). Za svaki od konstruiranih dijagrama provedena je regresijska analiza, u okviru koje je napravljena detaljna statistička obrada rezultata i izvedene su odgovarajuće ovisnosti EDP-IM. Radi provođenja ove analize u programu MATLAB [20], napravljen je poseban program. Regresijskom analizom provedenom u ovom radu analizirani su algebarski modeli veze između EDP i IM i utvrđeno je da se najveći statistički stupanj povezanosti dobiva pomoću regresijskog modela definiranim pomoću izraza (11):

$$\widehat{EDP} = a \cdot IM^b \quad (11)$$

Pretpostavljena je ovisnost između parametra seizmičkog odziva EDP i mjere intenziteta IM u obliku izraza (11). Konstruirani su histogrami parametara seizmičkog odziva (za IDR_{max} i IDR_{sr}) iz kojih je uočeno da distribucija seizmičkog odziva odgovara lognormalnoj raspodjeli. Usporedba dobivene raspodjele s teorijskom lognormalnom raspodjelom napravljena je pomoću dva testa i to: X^2 testa i Kolmogorovog testa. Oba su testa potvrdila da je raspodjela seizmičkog odziva EDP (za IDR_{max} i IDR_{sr}) za odgovarajuću mjeru intenziteta IM lognormalna. Na slici 6. prikazan je histogram maksimalnog međukatnog pomaka IDR_{max} dobiven pri djelovanju 60 potresnih zapisa za dvije razine intenziteta 10 %/50 i 2 %/50 te odgovarajuća teorijska lognormalna raspodjela. Lognormalna raspodjela dobro opisuje dobivenu raspodjelu maksimalnog međukatnog pomaka IDR_{max} . Raspodjela slučajne veličine EDP/IM, odnosno parametra seizmičkog odziva prema mjeri intenziteta je lognormalna, sa srednjom vrijednošću

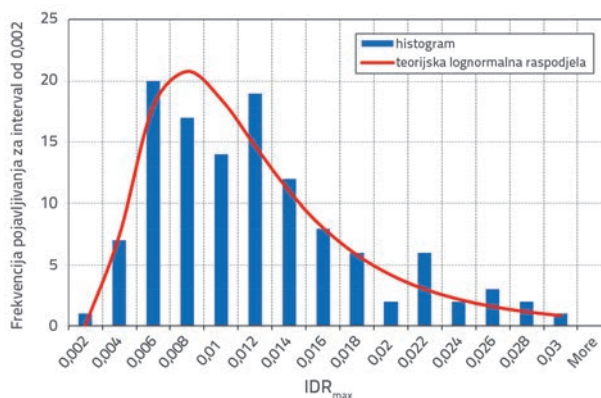
$$\hat{\mu}_{\ln EDP/IM} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln \widehat{EDP}_i}{N} \quad (12)$$

i standardnom devijacijom koja se računa kao srednja kvadratna devijacija prirodnih logaritama dobivenih rezultata (slučajnog uzorka) u odnosu na regresijsku krivulju:

$$\sigma_{\ln EDP/IM}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\ln \widehat{EDP}_i - \ln \widehat{EDP}_i \right]^2}{N-2} \quad (13)$$

gdje je N veličina slučajnog uzorka.

U ovom radu je za procjenu mjere rasipanja slučajne veličine EDP/IM usvojena vrijednost standardne devijacije definirane izrazom (13). Za svaku analiziranu ovisnost EDP/IM konstruiran je medijan (definiran izrazom 11), kao i 16-postotna i 84-postotna fraktila koje predstavljaju ovisnosti koje odgovaraju plus-minus jednoj standardnoj devijaciji od medijana.



Slika 6. Histogram maksimalnog međukatnog pomaka IDR_{max} i odgovarajuća teorijska lognormalna raspodjela

U tablici 3. prikazani su izvedeni parametri regresijskog modela a i b , izraz (11), dobiveno rasipanje rezultata (standardne devijacije) i koeficijenti varijacije. Za većinu razmatranih ovisnosti EDP-IM dobiveni su koeficijenti varijacije manji od 0,3, što znači da je dobivena vrlo mala varijabilnost rezultata. To upućuje na visoki stupanj točnosti proračunanih ovisnosti EDP-IM, što se događa zbog velikog broja izabranih potresnih zapisa, odnosno statističkim jezikom rečeno zbog velike veličine slučajnog uzorka.

Od parametara amplituda potresnog gibanja, vršna brzina tla (PGV) dala je manje rasipanje rezultata od vršnog ubrzanja tla (PGA) i vršnog pomaka tla (PGD). Uglavnom sve mjere intenziteta koje su vezane za brzinu dale su manje rasipanje u odnosu na one vezane za ubrzanja i pomake jer referentna konstrukcija ima osnovne periode titranja u području tripartitnog spektra osjetljivog na brzinu [21].

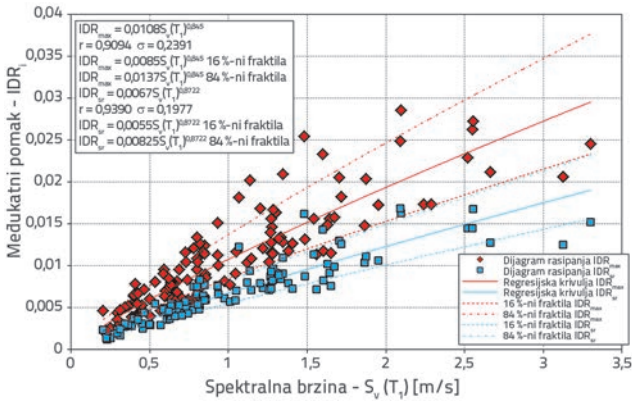
U odnosu na parametre amplituda, spektralne vrijednosti (parametri koji predstavljaju konkretne točke frekvencijskog sadržaja) pokazale su se učinkovitije, odnosno dale su manje rasipanje rezultata. Najmanje rasipanje rezultata od tih mjera dala je spektralna brzina $S_v(T_1)$, dok su ostale spektralne vrijednosti dale veće rasipanje (tablica 3.).

Na slici 7. prikazane su izvedene ovisnosti između spektralne brzine $S_v(T_1)$ i međukatnih pomaka IDR_{max} i IDR_{sr} . Iz izvedenih ovisnosti može se uočiti da se između ovih parametara može uspostaviti regresijski model (izraz 11) s vrlo visokim koeficijentima korelacije $r = 0,9094$ i $r = 0,9390$, što govori o vrlo visokoj izvedenoj matematičkoj povezanosti tih parametara. Dobivene su i vrlo male vrijednosti rasipanja σ_{IDR_{max}/S_v} i σ_{IDR_{sr}/S_v} kojima odgovaraju koeficijenti varijacije manji od 0,3, koji također pokazuju vrlo malu varijabilnost dobivenih podataka.

Tablica 3. Izvedeni parametri regresijskog modela, standardne devijacije i koeficijenti varijacije razmatranih ovisnosti IDR_i-IM_i

Parametar seizmičkog odziva EDP	Mjera intenziteta IM		Parametri regresijskog modela		Standardna devijacija σ	Koeficijent varijacije C.O.V.
	Opis	Oznaka	a	b		
IDR_{max}	Parametri amplituda gibanja tla	PGA	0,0039	0,5483	0,5222	0,5599
		PGV	0,0194	1,0960	0,2809	0,2865
		PGD	0,0096	0,0498	0,5719	0,6220
	Parametri koji predstavljaju konkretne točke frekvencijskog sadržaja	$S_a(T_1)$	0,0079	0,6178	0,2838	0,2896
		$S_v(T_1)$	0,0108	0,8450	0,2391	0,2426
		$S_d(T_1)$	0,0204	0,6045	0,2876	0,2937
		$PSV(T_1)$	0,0129	0,6135	0,2848	0,2907
	Parametri koji obuhvaćaju širi opseffrekvencijskog sadržaja	SI_H	0,0050	0,9663	0,2339	0,2371
		SI_m	0,0114	0,9181	0,2134	0,2159
		SI_{yh}	0,0117	0,9342	0,2108	0,2132
	Nove mjere intenziteta	$S_{v,avg1}$	0,0111	1,0760	0,2033	0,2054
		$S_{d,avg1}$	0,0267	0,6924	0,2611	0,2656
		PSV_{avg1}	0,0133	0,9442	0,2071	0,2093
		$S_{v,avg2}$	0,0114	1,0830	0,2051	0,2073
		$S_{d,avg2}$	0,0274	0,6940	0,2608	0,2653
		PSV_{avg2}	0,0136	0,9582	0,2070	0,2092
		SI_{vj}	0,0113	0,9163	0,2101	0,2124
		$SI_{vj1,5}$	0,0113	0,8643	0,2014	0,2035
		SI_{vjGM}	0,0115	0,9251	0,2001	0,2021
	IDR_{sr}	Parametri amplituda gibanja tla	PGA	0,0030	0,4198	0,5445
PGV			0,0116	1,0489	0,3161	0,3242
PGD			0,0059	0,0436	0,5725	0,6228
Parametri koji predstavljaju konkretne točke frekvencijskog sadržaja		$S_a(T_1)$	0,0048	0,6627	0,2066	0,2088
		$S_v(T_1)$	0,0067	0,8722	0,1977	0,1996
		$S_d(T_1)$	0,0134	0,6494	0,2108	0,2132
		$PSV(T_1)$	0,0082	0,6582	0,2081	0,2104
Parametri koji obuhvaćaju širi opseg frekvencijskog sadržaja		SI_H	0,0031	0,9633	0,1950	0,1969
		SI_m	0,0071	0,9456	0,1798	0,1813
		SI_{yh}	0,0073	0,9600	0,1760	0,1774
Nove mjere intenziteta		$S_{v,avg1}$	0,0069	1,0721	0,1680	0,1692
		$S_{d,avg1}$	0,0176	0,7336	0,1895	0,1912
		PSV_{avg1}	0,0083	0,9613	0,1795	0,1810
		$S_{v,avg2}$	0,0071	1,0780	0,1690	0,1702
		$S_{d,avg2}$	0,0181	0,7351	0,1893	0,1910
		PSV_{avg2}	0,0085	0,9739	0,1824	0,1839
		SI_{vj}	0,0070	0,9375	0,1682	0,1694
	$SI_{vj1,5}$	0,0071	0,8910	0,1674	0,1686	
SI_{vjGM}	0,0072	0,9518	0,1632	0,1643		

Dobivena regresijska krivulja predstavlja medijan, odnosno srednju vrijednost ovisnosti $IDR_i - S_v$. Na slici 7. prikazane su i krivulje koje odgovaraju plus-minus jednoj standardnoj devijaciji od medijana, odnosno 16-postotnoj i 84-postotnoj fraktili.

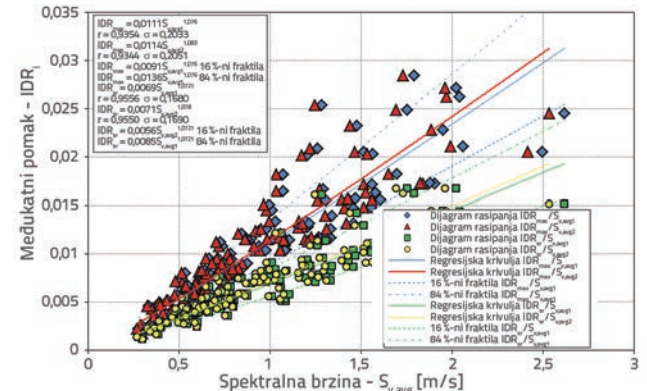


Slika 7. Izvedene ovisnosti između spektralne brzine $S_v(T_1)$ i međukatnih pomaka IDR_{max} i IDR_{sr}

Mjere intenziteta koje obuhvaćaju širi opseg frekventijskog sadržaja spektara odziva SI_m i SI_{vh} dale su manje rasipanje rezultata (15-35 %) od pojedinačnih spektralnih vrijednosti $S_a(T_1)$, $S_v(T_1)$, $S_d(T_1)$ i $PSV(T_1)$. To se događa zato što je kod visokih zgrada opseg njihovog frekventijskog odziva mnogo širi nego u slučaju nižih zgrada, pa su samim tim i mjere intenziteta koje obuhvaćaju širi opseg frekventijskog sadržaja spektara odziva učinkovitije. Rasipanje za slučaj srednjeg Matsumurinog intenziteta SI_m i srednjeg Martinez-Ruedinog intenziteta SI_{vh} je gotovo isto jer je za slučaj referentne zgrade period titranja T_h približno jednak $2T_v$. Također je uočeno da su mjere intenziteta SI_m i SI_{vh} dale manje rasipanje rezultata od SI_{hr} iako sve tri obuhvaćaju širi opseg frekventijskog sadržaja spektara odziva, s razlikom što SI_m i SI_{vh} obuhvaćaju vrijednosti spektra odziva u području većih perioda u odnosu na SI_{hr} .

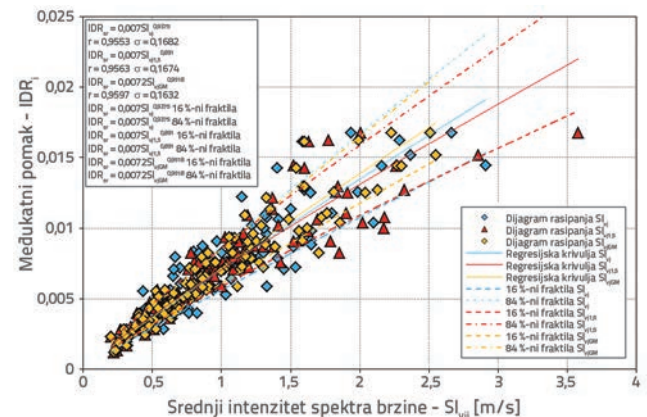
Srednje spektralne vrijednosti kao mjere intenziteta koje uzimaju u obzir utjecaj viših oblika titranja, $S_{v,avg1}$, $S_{d,avg1}$ i PSV_{avg1} , što su ih odredili autori ovog rada i predložili kao nove mjere intenziteta za AB visoke zgrade, izrazi (7), (8) i (9), dale su otprilike za 10 do 40 % manje rasipanje rezultata u odnosu na spektralne vrijednosti $S_v(T_1)$, $S_d(T_1)$ i $PSV(T_1)$. Time su se pokazale kao bolje mjere intenziteta kad su u pitanju visoke AB zgrade. Na slici 8. prikazane su izvedene ovisnosti između srednjih spektralnih brzina $S_{v,avg1}$ i $S_{v,avg2}$ i parametara seizmičkog odziva IDR_{max} i IDR_{sr} . Usporedbom dva karakteristična slučaja srednjih spektralnih brzina, prvog gdje su uzeti u obzir samo oblici titranja referentne zgrade s modalnim faktorima doprinosa većim od 5 %, što predstavlja samo prva tri oblika titranja konstrukcije $S_{v,avg1}$, i drugog gdje su uzeta u obzir prva četiri oblika titranja konstrukcije $S_{v,avg2}$, može se primijetiti da nema velikih razlika u dobivenom rasipanju, odnosno da je rasipanje gotovo isto. Iz ovoga se zaključuje da je pri proračunu srednjih spektralnih vrijednosti dovoljno uzeti u obzir samo oblike titranja koji dominantno utječu na odziv

sustava, odnosno u skladu s Eurokodom 8, one oblike titranja čiji su modalni faktori doprinosa veći od 5 % s ukupnom sumom većom od 90 %.



Slika 8. Izvedene ovisnosti između spektralnih brzina $S_{v,avg1}$ i $S_{v,avg2}$ i međukatnih pomaka IDR_{max} i IDR_{sr}

Kao ilustracija dobivenih rezultata analize novih mjera intenziteta, srednjih intenziteta spektra brzine SI_{vj} , $SI_{vj1.5}$ i SI_{vjGM} , koje su definirali autori ovog rada, na slici 9. prikazane su izvedene ovisnosti između pojedinih srednjih intenziteta spektara i parametra seizmičkog odziva IDR_{sr} . Sve tri definirane nove mjere intenziteta daju približno isto ili manje rasipanje rezultata kao i odgovarajući srednji intenziteti SI_m i SI_{vh} (koji ne zadovoljavaju značajno svojstvo praktičnosti zbog računanja preko integrala), što ih kvalificira za primjenu kao njihovih zamjena a ujedno i kao novih mjera intenziteta. Posebno se zbog jednostavnosti proračuna odnosno praktičnosti izdvajaju SI_{vj} i $SI_{vj1.5}$. Najučinkovitije od razmatranih ovisnosti EDP-IM visokih AB zgrada dobivaju se u slučaju predloženih novih mjera intenziteta SI_{vj} , $SI_{vj1.5}$, SI_{vjGM} (srednjih intenziteta spektra brzine) i $S_{v,avg}$ (srednje spektralne brzine).



Slika 9. Izvedene ovisnosti između novih predloženih mjera intenziteta SI_{vj} , $SI_{vj1.5}$ i SI_{vjGM} i međukatnog pomaka IDR_{sr}

Manje rasipanje rezultata dobiveno je kada se kao parametar seizmičkog odziva koristi srednja vrijednost maksimalnih

međukatnih pomaka IDR_{sr} u odnosu na maksimalni međukatni pomak za čitavu konstrukciju IDR_{max} . Zaključuje se da se točnije može odrediti stupanj oštećenja (preko IDR_{sr}) nego mogućnost rušenja konstrukcije (preko IDR_{max}) kod AB visokih zgrada.

S obzirom na postignutu kvalitetu rezultata, izvedene ovisnosti mogu se primjenjivati za određivanje međukatnih pomaka (IDR_{max} i IDR_{sr}) visokih AB zgrada konstrukcijskog sustava referentne zgrade za slučaj projektiranja u južnoeuropskoj mediteranskoj zoni.

7. Zaključak

U okviru provedene analize ovisnosti između mjere intenziteta potresa IM i parametra seizmičkog odziva EDP na primjeru izabrane referentne AB visoke zgrade doneseni su zaključci u smislu učinkovitosti pojedinih mjera intenziteta IM u odnosu na razmatrane parametre seizmičkog odziva IDR_{max} i IDR_{sr} . Kao rezultat detaljne analize i statističke obrade rezultata izvedene su odgovarajuće ovisnosti $IDR_{max}-IM_i$ i $IDR_{sr}-IM_i$. S obzirom na postignutu kvalitetu rezultata, izvedene ovisnosti se mogu primijeniti za određivanje međukatnih pomaka (IDR_{max} i IDR_{sr}) visokih AB zgrada konstrukcijskog sustava referentne zgrade i sličnih sustava za slučaj projektiranja u južnoeuropskoj mediteranskoj zoni.

Manje rasipanje rezultata dobiveno je kada se kao parametar seizmičkog odziva koristi srednja vrijednost maksimalnih međukatnih pomaka IDR_{sr} u odnosu na maksimalni međukatni pomak za čitavu konstrukciju IDR_{max} , što znači da se točnije može odrediti stupanj oštećenja (preko IDR_{sr}) nego mogućnost rušenja konstrukcije (preko IDR_{max}) kod AB visokih zgrada.

Mjere intenziteta koje su vezane za brzinu dale su manje disperzije rezultata u odnosu na one vezane za ubrzanja i pomake, i samim tim pokazale se kao učinkovitije mjere

intenziteta. Mjere intenziteta koje su zasnovane na frekvencijskom sadržaju učinkovitije su nego mjere koje predstavljaju amplitude gibanja tla (PGA, PGV i PGD). Mjere intenziteta koje obuhvaćaju šire opsege spektara odziva daju najučinkovitije ovisnosti parametra seizmičkog odziva i kada su visoke AB zgrade u pitanju.

Srednje spektralne vrijednosti koje uzimaju u obzir spektralne vrijednosti oblika titranja čiji su modalni faktori doprinosa veći od 5 %, $S_{v,avg}$, $S_{d,avg}$ i PSV_{avg} , a definirali su ih autori ovog rada kao mjere intenziteta, pokazale su se učinkovitije za slučaj AB visokih zgrada u odnosu na spektralne vrijednosti $S_v(T_1)$, $S_d(T_1)$ i $PSV(T_1)$. Stoga se predlažu kao mjere intenziteta prikladne za AB visoke zgrade. Posebno se od tih vrijednosti izdvaja $S_{v,avg}$, jer daje najmanje rasipanje rezultata.

Srednji intenziteti spektra brzine SI_{vj} , $SI_{vj1.5}$ i SI_{vjGM} koje su definirali autori ovog rada kao mjere intenziteta, daju približno isto ili manje rasipanje rezultata kao i odgovarajuće mjere intenziteta SI_m i SI_{vh} koje se definiraju preko integrala po spektru brzine. Stoga, autori ovog rada za slučaj AB visokih zgrada predlažu nove mjere intenziteta SI_{vj} i $SI_{vj1.5}$ koje su ujedno praktične, odnosno jednostavno se računaju iz spektra brzine i daju najučinkovitije ovisnosti $IDR_{max}-IM$ i $IDR_{sr}-IM$.

S obzirom na dobivene rezultate, autori nastavljaju raditi na njihovoj provjeri i zaključcima kako bi bili primjenjivi za čitav opseg različitih katnosti konstrukcijskog sustava referentne zgrade. Na taj će se način dobiti ovisnosti EDP-IM za čitavu klasu AB visokih zgrada konstrukcijskog sustava s AB jezgrom za južnoeuropsku mediteransku zonu.

Zahvala

Autori zahvaljuju Seizmološkom zavodu Crne Gore na ustupljenim podacima iz njihove baze o potresima.

LITERATURA

- [1] The Council on Tall Buildings and Urban Habitat (2011): The Tallest 20 in 2020: Entering the Era of the Megatall. Illinois Institute of Technology, Chicago, <http://www.ctbuh.org/TallBuildings/HeightStatistics/BuildingsinNumbers/TheTallest20in2020/tabid/2926/language/en-US/Default.aspx>, November 2014
- [2] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER): Tall Buildings Initiative <http://peer.berkeley.edu/tbi/>, November 2014
- [3] Janković, S.: *Probabilistička seizmička analiza armiranobetonskih ramovskih konstrukcija, Doktorska disertacija*, Građevinski fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, 2003.
- [4] Taranath, B.S.: *Reinforced concrete design of tall buildings*, International Code Council, Concrete Reinforcing Steel Institute, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2010.
- [5] Computers & Structures, Inc.: *ETABS 2013 integrated analysis, design and drafting of buildings systems*, CSI, Berkeley, 2013.
- [6] Computers & Structures, Inc.: *PERFORM 3D nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures*, CSI, Berkeley, 2006.
- [7] CEN European Committee for Standardization: *Eurocode 2 – Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings*, European standard EN 1992-1-1, CEN, Brussels, December 2004.
- [8] CEN European Committee for Standardization: *Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*, European standard EN 1998-1, CEN, Brussels, December 2004.
- [9] CEN European Committee for Standardization: *Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance Part 2: Bridges Annex E Probable material properties and plastic hinge deformation capacities for non-linear analyses*, European standard prEN 1998-2, CEN, Brussels, November 2004.

- [10] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.114 (1988), No.8, pp1804-1826.
- [11] Powell, G.H.: *PERFORM 3D Detailed example of a tall shear wall building - Nonlinear Modeling, Analysis and Performance Assessment for Earthquake Loads*, Computers & Structures Inc, Berkeley, 2007.
- [12] Wallace, J.W.: Behavior, Design, and Modeling of Structural Walls and Coupling Beams– Lessons from Recent Laboratory Tests and Earthquakes, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.6 (2012) No.1, pp.3-18
- [13] Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P., Margaris, B.: *Internet-site for European strong-motion data*, European Commission, Directorate-General XII, Environmental and Climate Programme, Brussels, <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk>, 2002.
- [14] PEER Pacific Earthquake Engineering Research Center: *Technical Report for the PEER Ground Motion Database Web Application*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2010.
- [15] Giardini, D., Woessner, J., Danciu, L., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Pinho, R., Valensise, G. and the SHARE consortium: *SHARE European Seismic Hazard Map*, European Commission www.share-eu.org, 2013.
- [16] Ji, J., Elnashai, A.S., Kuchma, D.A.: *Seismic fragility assessment for reinforced concrete high-rise buildings - Report 07-14*, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- [17] Housner, G.W.: Spectrum intensities of strong motion earthquakes, *Proc. Of Symposium on earthquake and Blast Effects on Structures*, EERI, 1952.
- [18] Matsumura, K.: On the intensity measure of string motions related to structural failures, *Proceedings 10WCEE*, Vol.1, pp. 375-380, 1992.
- [19] Martinez-Rueda, J.E.: Scaling procedure for natural accelerograms based on a system of spectrum intensity scales, *Earthquake Spectra*, 14 (1998)1, pp. 135-152.
- [20] The MathWorks, Inc.: *Matlab – The Language of Technical Computing*, Version R2013b 8.2.0.701, MathWorks Inc, Natick, MA
- [21] Chopra, A.K.: *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, First edition*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1995