

Odabir optimalne mjere intenziteta tipične zidane zgrade u urbanom području grada Zagreba

Ante Pilipović¹, izv. prof. dr. sc. Mario Uroš²

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ante.pilipovic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, mario.uros@grad.unizg.hr

Sažetak

U okviru analize ranjivosti ("fragility") i oštetljivosti ("vulnerability") tipičnih zgrada važan korak je odabir optimalne mjere intenziteta potresa (IM – eng. *intensity measure*) koja će dati najmanja rasipanja u odzivu konstrukcije na seizmičku pobudu. Odabrana je tipična zidana zgrada u centru Zagreba te je provedena inkrementalna dinamička analiza (IDA) i statistička obrada rezultata proračuna. Određen je odnos mjera intenziteta i srednjeg maksimalnog međukatnog pomaka (IDR_{avg}) kao odabranog parametra seizmičkog odziva (EDP – eng. *engineering demand parameter*) metodom linearne regresije. Odabrane su optimalne mjere intenziteta između praktičnih kandidata po kriteriju najmanjeg rasipanja rezultata. Optimalne mjere intenziteta su vršna brzina tla PGV (eng. *peak ground velocity*) i srednja spektralna akceleracija $S_{a,avg}$ (0,5s - 0,8s) te su vezane za brzine gibanja tla i odgovor konstrukcije u području vlastitih perioda.

Ključne riječi: mjera intenziteta, parametar seizmičkog odziva, inkrementalna dinamička analiza, zidane zgrade, stanja oštećenja, odziv konstrukcije

Selection of optimal intensity measure for a typical masonry building in the urban area of Zagreb

Abstract

In the scope of seismic fragility and vulnerability analysis of typical buildings an important step is the selection of optimal intensity measure (IM) for earthquakes that will give minimal dispersion in structural responses to seismic loading. A typical masonry building from Zagreb city centre is selected. Incremental dynamic analysis (IDA) is performed along with statistical processing of analysis results. Optimal intensity measures are selected among practical candidates by linear regression, observing the relationship between intensity measures and average maximum interstorey drift (IDR_{avg}) as the selected engineering demand parameter (EDP). Optimal intensity measures are peak ground velocity PGV and average spectral acceleration $S_{a,avg}$ (0,5s-0,8s) and are related to ground velocity and structural response in the period range of eigenvalues.

Key words: intensity measure, engineering demand parameter, incremental dynamic analysis, masonry buildings, damage states, structural response

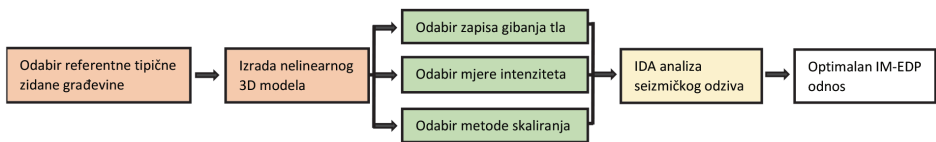
1 Uvod

Problem određivanja učinaka gibanja tla na ponašanje zgrada je ključna komponenta u procesu određivanja potresnog rizika nekog područja [1]. Do gibanja tla dolazi zbog pojave potresa, a njihove učinke na gibanje tla opisujemo preko determinističkih scenarija ili probabilističkom analizom seizmičkog hazarda (PSHA) nekog područja [2]. Potresi nastaju na rasjedima u zemljinoj kori, a skup svih seizmogenih rasjeda i njihove karakteristike određuje seizmotektonske značajke nekog područja. Gibanje tla uslijed potresa bilježi se akcelerografima i seizmografima iz kojih proizlaze kinematičke veličine akceleracije, brzine i pomaka tla ($u(t)$), a koje su pogodne za primjenu pri proračunu građevinskih konstrukcija koje redovito numerički modeliramo i promatramo kao dinamičke sustave (oscilatore) [3]. Općenitije, možemo definirati mjeru intenziteta gibanja tla (IM) kao bilo koju veličinu koja će opisati gibanje tla, a koja će se moći dovesti u vezu s odzivom konstrukcije.

Krajnji učinci potresa redovito se izražavaju kroz stupnjeve oštećenja građevine određene graničnim vrijednostima nekog parametra seizmičkog odziva (EDP) pri kojem građevina prelazi iz jednog stanja oštećenja u drugo. Postoje razni EDP koji mogu opisivati stanje građevine nakon potresa, a obično su vezani za maksimalne pomake istaknutih točaka konstrukcije ili relativne pomake katova. Takvo određivanje oštećenja zahtijeva nelinearni model konstrukcije koji će moći opisati stvarno ponašanje građevina u području djelomičnog gubitka nosivosti te razlikovanje raznih stupnjeva oštećenja praćenjem samo jednog EDP. Jednako tako, i gibanje tla uslijed potresa se uzima kao jedinstvena vrijednost IM koja opisuje intenzitet konkretnog potresa.

Svaki zapis gibanja tla može se opisati različitim mjerama intenziteta. Neke od njih opisuju gibanje tla u vremenskom području (npr. PGA), dok druge opisuju učinke gibanja tla na linearne jednostupanjske (SDOF) oscilatore u frekventnom području (npr. spektralna akceleracija S_a) te mogu biti vezane za dinamička svojstva konkretne građevine [4] ili ne moraju [5]. Za opis gibanja tla je prikladno uzeti onu mjeru koja će na optimalan način povezati učinke različitih potresa na gibanje tla na promatranoj lokaciji i odziv konstrukcije na toj lokaciji, izražen nekim EDP-om. Ove kriterije izražavamo pojmovima *efikasnosti* i *dostatnosti* mjere intenziteta [6-7]. *Efikasnost* mjeri rasipanje rezultata EDP za danu IM [8], a *dostatnost* promatra u kolikoj mjeri odabrana IM obuhvaća gibanje tla uslijed potresa raznih karakteristika koji su mogući na danom području. Nadalje, postoje vrlo efikasne i dostatne IM, ali ih se ne može lako izračunati iz zapisa gibanja tla, stoga je i *praktičnost* IM važan kriterij jer je u suprotnom bitno sužen prostor njezine šire upotrebe. Postoje i drugi kriteriji važni pri nalaženju krivulja ranjivosti koje ovdje nećemo razmatrati [9]. Odabir optimalne mjere intenziteta stoga se svodi na odabir one mjere koja ima najveću *efikasnost*, *dostatnost* i *praktičnost* za promatrano seizmički aktivno područje i za promatrane tipove građevina izložene potresu na tom području [10].

U sklopu 2BESAFE projekta koji se bavi izradom novih modela oštetljivosti tipičnih zgrada u urbanim područjima bitan korak je odrediti optimalnu mjeru intenziteta za odabrane građevine koje će se razmatrati [11]. Ovo su glavni doprinosi sadašnjeg istraživanja: (1) odabrana je referentna tipična zidana zgrada u gradu Zagrebu, (2) uspostavljen je 3D model konstrukcije koji uključuje materijalnu i geometrijsku nelinearnost te je odabran prikladan EDP parametar koji opisuje odziv konstrukcije, (3) odabrani su zapisi gibanja tla uslijed potresa reprezentativni za grad Zagreb te način njihovog skaliranja, (4) odabrane su IM po kriteriju praktičnosti, između kojih će se birati optimalna IM temeljem efikasnosti kao najboljeg pokazatelja te je (5) provedena inkrementalna nelinearna “time-history” analiza konstrukcije (IDA) pri djelovanju odabranih zapisa gibanja tla pri raznim intenzitetima. Kao rezultat dobiven je oblak parova točaka IM-EDP za sve IM te je provedena statistička analiza kojom je utvrđena optimalna mjera intenziteta (slika 1).



Slika 1. Shematski prikaz procesa odabira optimalnog odnosa IM-EDP

2 Opis odabrane referentne tipične zgrade

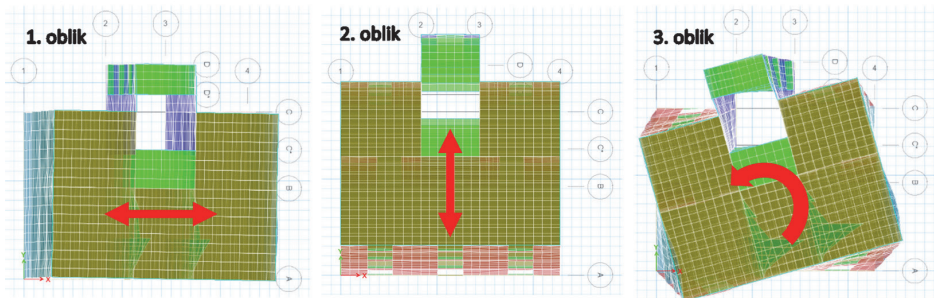
U centru Zagreba uobičajena je zidana tipska zgrada unutar bloka, građena u prvoj polovici 20.st. Nosivi sustav je nearmirano žiđe s usvojenim karakteristikama materijala danima u tablici 1. Zgrada je tlocrtnih dimenzija 1170 x 910 mm visine kata 3,8 m. Za ovaj tip zgrade radi jednostavnosti usvojena je katnost P+3K iako većina realnih građevina ovoga tipa ima i poluukopani podrum. Zgrada je postavljena na krute ležajeve, a utjecaj tla uzet je kroz izbor potresnih zapisa, no radi se o tlu C kategorije. Zgrada ima nosive zidove u oba smjera i to 17 % u X te 10,13 % u Y smjeru u prizemlju. Nosivi zidovi su debljine 60 cm, 45 cm (stubište) i 30 cm (dilatacija sa susjednim zgradama), a pregradni zidovi su debljine 15 cm. Stubište se proteže u Y smjeru sa suprotne strane od pročelja. Kao stropna konstrukcija pretpostavljeni su drveni grednici sa više slojeva dasaka koji imaju funkciju relativno krute dijafragme te su time izbjegnuti lokalni mehanizmi otkazivanja i osigurano je globalno ponašanje konstrukcije. Ukupna masa zgrade (bez temelja) je 929 t i raspodijeljena je u čvorovima konačnih elemenata. Dinamička svojstva zgrade za prva tri oblika titranja prikazana su u tablici 2, a sami oblici na slici 2. Odabran je koeficijent kritičnog vi-skoznog prigušenja.

Tablica 1. Mehaničke karakteristike ziđa

Zapreminska težina	γ [kN/m ³]	18
Modul elastičnosti	E_M [N/mm ²]	1500
Modul posmika	G_M [N/mm ²]	500
Tlačna čvrstoća ziđa	f_m [N/mm ²]	3,400
Početna posmična čvrstoća ziđa	f_{v0} [N/mm ²]	0,160
Dijagonalna vlačna čvrstoća ziđa	f_t [N/mm ²]	0,114
Koeficijent trenja	μ	0,400
Tlačna čvrstoća opeke	f_b [N/mm ²]	10,00

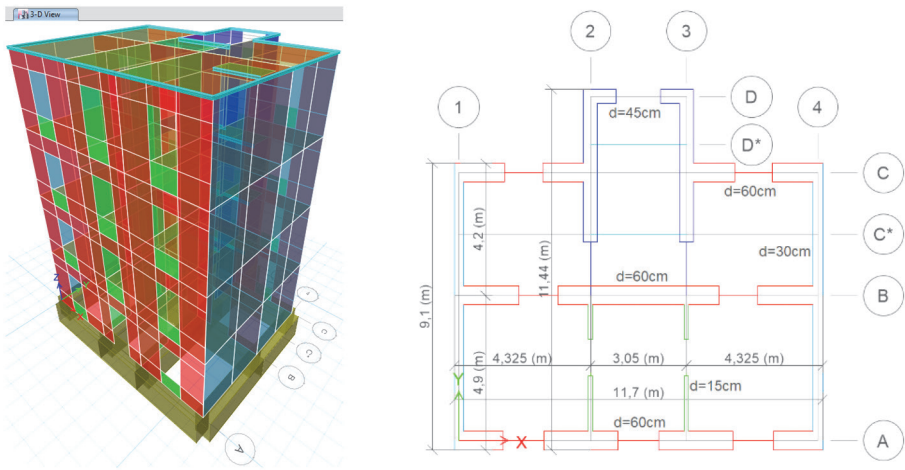
Tablica 2. Frekvencije i periodi titranja za prva tri oblika titranja zgrade

Oblik titranja	Period T [s]	Frekvencija f [Hz]
1	0,428	2,339
2	0,422	2,368
3	0,288	3,469



Slika 2. Prva tri oblika titranja

Izrađen je 3D model u računalnom programu ETABS (slika 3) [12] te je najprije proveden linearni proračun prema EC6 i EC8 uzimajući u obzir smanjenje krutosti uslijed raspucavanja poprečnih presjeka. Prema dobivenim rezultatima proveden je proračun posmične nosivosti ziđa za svaki od mehanizama sloma kao podloga za definiranje nelinearnih posmičnih plastičnih zglobova na sredini svakog ziđa koji opisuju dominantni nelinearni doprinos pri odzivu konstrukcije. Krivulje kapaciteta nosivosti plastičnih zglobova definirane su kao trilinearni dijagrami poprečna sila-pomak s padajućom zadnjom granom. Sami nelinearni dinamički proračuni izvršeni su direktnom integracijom Hilber-Hughes-Taylor metodom.



Slika 3. Prikaz 3D modela i karakterističnog tlocrta referentne građevine iz računalnog programa ETABS

3 Ulazni podaci

3.1 Izbor zapisa gibanja tla i način skaliranja

S obzirom da se Zagreb nalazi na području s kompresijskom tektonikom gdje prevladavaju reversni rasjedi, izabrani su uglavnom akcelerogrami nastali od potresa na takvim rasjedima [13]. Ukupno je odabrano 13 parova zapisa gibanja tla (X i Y smjer). Od njih je 11 iz američke baze potresnih zapisa Peer NGA-West 2 [14], te 2 domaća od posljednjih potresa u Zagrebu (ožujak 2020.) i Petrinji (prosinac 2020.). Potres u Petrinji nastao je na “strike-slip” rasjedu i odabran je kako bi se uzela u obzir prisutnost i takvih tipova rasjeda koji se ne mogu zanemariti.

U tablici 3 prikazani su svi odabrani potresni zapisi s pripadajućim izvornim seizmotektonskim parametrima i mjerama intenziteta PGA, PGV i $S_{a,avg}$ (0,5s - 0,8s) u Y smjeru bez faktora skaliranja. Ovih 13 zapisa nije dovoljno da opišu odziv konstrukcije podjednako na svim razinama seizmičkog opterećenja. Umjesto odabira dodatnih zapisa koji bi pokrili mnogo različitih intenziteta potresa (opisanih preko IM) odabran je IDA pristup uniformnog skaliranja svih zapisa po intenzitetima unaprijed određenima fiksnim nizom vrijednosti PGA (0,1g – 0,25g u inkrementima od 0,025g). Koristeći program SeismoSignal svaki pojedini par zapisa najprije je skaliran (faktorom skaliranja istim za oba smjera) na vrijednost PGA od 0,1g, a zatim i na ostale veće vrijednosti [15]. Zapisi su skalirani s obzirom na PGA vrijednost u X smjeru. Zagrebački i petrinjski potres skalirani su u istim inkrementima sve do 0,3g jer se pokazalo da uzrokuju manja oštećenja.

Budući da se ovdje ne radi o proračunu konstrukcije za određenu razinu seizmičkog hazarda, a korištenjem IDA metode nije niti moguće odabrati zapise konzistentne s hazardom dane lokacije, zapisi nisu skalirani s obzirom na odabrani ciljani spektar, već je mjera skaliranja upravo inkrement u intenzitetu PGA od 0,025g. Na taj način dolazimo do 96 parova akcelerograma koji su korišteni kao ulazno opterećenje za proračun konstrukcije.

Tablica 3. Seizmotektonski parametri odabranih potresnih zapisa

ID	Mjerna postaja	Magnituda M_w	Udaljenost od rasjeda R_{rup} [km]	Mehanizam rasjeda	Brzina posmičnih valova $V_{s,30}$ [m/s]	Izvorni PGA [g]	Izvorni PGV [m/s]	Izvorni $S_{a,avg}$ [g]
RSN70_SFE	San Fernando	6,61	27,4	Reversni	425,34	0,114	0,148	0,266
RSN130_F	Friuli 02 – Buia	5,91	11,03	Reversni	310,68	0,094	0,121	0,192
RSN359_C	Coalinga – 01	6,36	26,38	Reversni	381,27	0,232	0,275	0,288
RSN949_N	Northridge – 01 – Arleta	6,69	8,66	Reversni	297,71	0,308	0,23	0,568
RSN953_N	Northridge – 01 – Beverly Hills	6,69	17,15	Reversni	355,81	0,488	0,667	1,27
RSN957_N	Northridge – 01 – Burbank	6,69	16,88	Reversni	581,93	0,159	0,095	0,161
RSN4276_F	Friuli Aftershock – Buia	5,5	12,39	Reversni	310,68	0,106	0,09	0,218
RSN4277_F	Friuli Aftershock – Forgaria Cornino	5,5	16,52	Reversni	412,37	0,234	0,115	0,168
RSN4455_M	Montenegro – Herceg Novi	7,1	25,55	Reversni	585,04	0,255	0,134	0,313
RSN4456_M	Montenegro – Petrovac	7,1	8,01	Reversni	543,26	0,301	0,253	0,778
RSN4457_M	Montenegro – Ulcinj	7,1	4,35	Reversni	410,35	0,228	0,282	0,494
UHS_ZG_22_03	Zagreb 22.3.2020.	5,3	8	Reversni	<380,00	0,222	0,204	0,395
UHS_Petrinja	Petrinja, prosinac 2020.	6,4	47	“Strike – slip“	<380,00	0,126	0,059	0,117

3.2 Izbor mjera intenziteta gibanja tla (IM) i parametra seizmičkog odziva (EDP)

Razmotrene su samo praktične mjere intenziteta za koje nije potrebno mnogo dodatnog računa kako bi se odredile njihove vrijednosti. Prikazane su u tablici 4, a izračunate su pomoću programa SeismoSpect [15] za zadani skup potresnih zapisa. Ove mjere se najčešće i koriste u literaturi.

U odabranom skupu IM imamo predstavnike mjera u vremenskom i frekventnom području odziva, kao i mjere bazirane na akceleraciji, brzini i pomaku. Mjere temeljene na akceleraciji dobro opisuju odziv mase zgrade u smislu inercijalnih sila, a one bazirane na brzini više obuhvaćaju energetski odziv i disipaciju energije konstrukcije, dok mjere temeljene na pomacima dobro obuhvaćaju osjetljivost krutosti konstrukcije na potresnu pobudu. Optimalna mjera intenziteta stoga daje uvid i u način ponašanja konstrukcije.

Postoje i druge, preciznije mjere intenziteta, poput srednje spektralne akceleracije po periodima konstrukcije s težinskim faktorima jednakima faktorima modalne participacije [16, 17], no zbog manje praktičnosti se neće ovdje razmatrati.

Kao parametar seizmičkog odziva (EDP) odabran je srednji maksimalni međukatni pomak svih katova IDR_{avg} kao parametar temeljen na relativnim pomacima. Često se koristi jer se pokazalo da dobro razgraničuje stanja oštećenja konstrukcije, osobito stanje značajnog oštećenja [18].

4 Rezultati analize

Provedena je inkrementalna dinamička analiza (IDA) na 3D modelu temeljem 96 proračuna proizašlih iz 13 različitih parova zapisa horizontalnog ubrzanja tla (istovremeno u X i Y smjeru) skaliranih na 7-9 vrijednosti PGA raspodijeljenih po jednakim razmacima. Analiza je provedena koristeći računalo s procesorom 11th Gen Intel(R) Core(TM) i9-11900K @ 3.50GHz i 64GB RAM memorije, za što je trebalo u prosjeku 36 sati po proračunu. Na taj način dobiveno je 96 parova točaka (IM, EDP) koji su statistički obrađeni kako bi se odredila optimalna mjera intenziteta. Na mjesto IM stavili smo svaku od 13 odabranih mjera intenziteta, a na mjesto EDP srednji maksimalni međukatni pomak IDR_{avg} .

4.1 Efikasnost

Statistička obrada provedena je postupkom linearne regresije [18, 19]. Ako logaritmujemo IM i EDP parove vrijednosti, uočavamo da su linearno povezani, te se takav postupak standardno primjenjuje pri određivanju efikasnosti mjere intenziteta. Tako algebarski izraz kojim opisujemo vezu IM-EDP možemo zapisati:

$$EPD = a \cdot IM^b \quad (1)$$

pri čemu su a i b regresijski koeficijenti koji se određuju metodom najmanjih kvadrata.

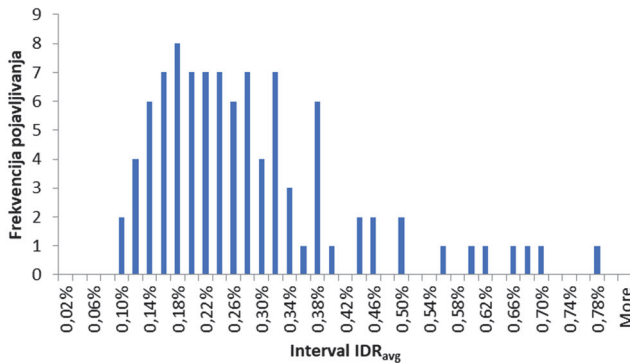
Na slici 4 je prikazana distribucija dobivenog EDP parametra od svih proračuna. Anderson-Darlingovim testom ustanovljeno je da se ne može odbaciti da dobivena distribucija pripada lognormalnoj raspodjeli, te je ona usvojena kao raspodjela za EDP. Stoga raspodjela slučajne veličine EDP/IM slijedi lognormalnu raspodjelu sa srednjom vrijednošću

$$\mu_{\ln EDP/IM} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln \widehat{EDP}_i}{N} \quad (2)$$

i standardnom devijacijom

$$\sigma_{\ln EDP/IM}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [\ln \widehat{EDP}_i - \mu_{\ln EDP/IM}]^2}{N-2} \quad (3)$$

gdje je vrijednost dobivena uvrštavanjem svakog pojedinog intenziteta u nizu od 96 proračuna u algebarski izraz s pripadajućim regresijskim koeficijentima. U tablici 4 dan je popis svih ispitanih mjera intenziteta s pripadajućim izračunatim statističkim parametrima.



Slika 4. Distribucija EDP parametra IDR_{avg} za sve proračune

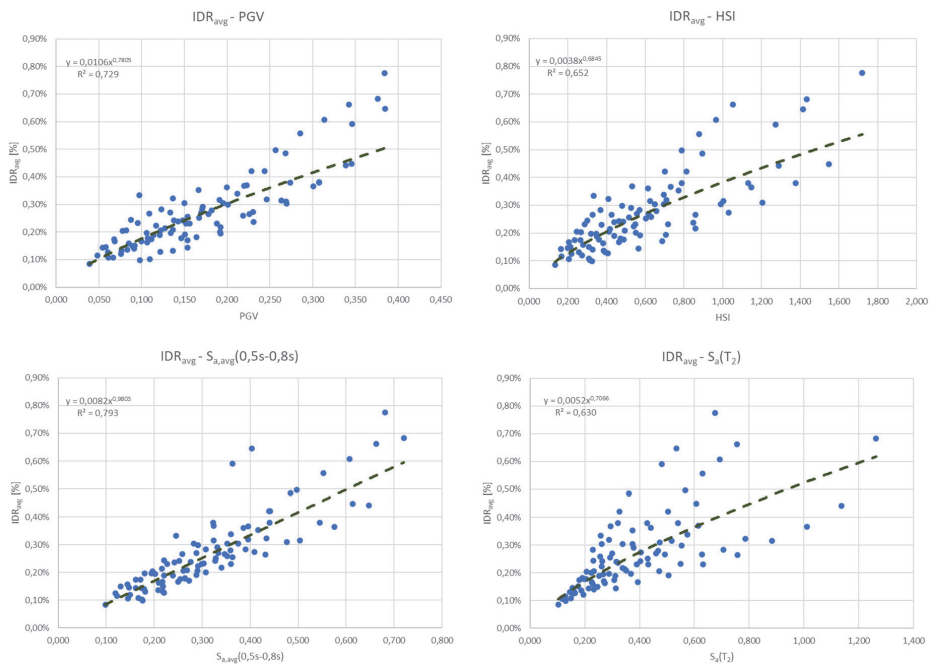
Tablica 4. Parametri regresijskog modela, standardna devijacija σ , koeficijenti korelacije R i varijacije C.O.V.

IM	Opis	Izraz	a	b	R ²	σ	C.O.V.
PGA [g]	Vršno ubrzanje tla	$\max(\ddot{u}(t))$	0,0078	0,6792	0,4668	0,3511	0,0583
PGV [m/s]	Vršna brzina tla	$\max(\dot{u}(t))$	0,0106	0,7805	0,7293	0,2502	0,0415
PGD [m]	Vršni pomak tla	$\max(u(t))$	0,0098	0,3929	0,3574	0,3854	0,0640
A_{rms} [g]	Srednja kvadratna akceleracija	$\left(\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} (\ddot{u}(t))^2 dt\right)^{\frac{1}{2}}$	0,0182	0,5423	0,3176	0,3972	0,0659
V_{rms} [m/s]	Srednja kvadratna brzina	$\left(\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} (\dot{u}(t))^2 dt\right)^{\frac{1}{2}}$	0,0271	0,6496	0,4690	0,3504	0,0582
D_{rms} [m]	Srednji kvadratni pomak	$\left(\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} (u(t))^2 dt\right)^{\frac{1}{2}}$	0,0074	0,2192	0,1501	0,4433	0,0736
I_A [m/s]	Ariasov intenzitet [20]	$\frac{\cos^{-1}\xi}{g\sqrt{1-\xi^2}} \int_0^{t_0} (\ddot{u}(t))^2 dt$	0,0036	0,3631	0,5020	0,3393	0,0563
I_c	Karakteristični intenzitet [21]	$A_{rms}^{1,5} \cdot t_d^{0,5}$	0,0136	0,4567	0,4494	0,3568	0,0592
CAV [m/s]	Kumulativna apsolutna brzina [22]	$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \dot{u}(t) dt$	0,0010	0,6116	0,4068	0,3703	0,0615
HSI [m]	Housnerov spektralni intenzitet [23]	$\int_{0,1}^{2,5} PSV(T, \xi) dT$	0,0038	0,6845	0,6524	0,2835	0,0471
$S_{a,avg}(0,5-0,8s)$ [g]	Srednja spektralna akceleracija [24]	$\frac{1}{0,3} \int_{0,5}^{0,8} S_a(T, \xi) dT$	0,0082	0,9803	0,7930	0,2188	0,0363
$S_a(T_1)$ [g]	Spektralna akceleracija pri T_1	$S_a(T_1, \xi)$	0,0066	0,7888	0,5858	0,3094	0,0514
$S_a(T_2)$ [g]	Spektralna akceleracija pri T_2	$S_a(T_2, \xi)$	0,0052	0,7066	0,6298	0,2926	0,0486

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da su vršna brzina tla PGV i srednja spektralna akceleracija u fiksnom rasponu perioda $S_{a,avg}(0,5s-0,8s)$ najefikasnije mjere intenziteta. Imaju najmanji koeficijent varijacije, odnosno daju najmanje rasipanje rezultata. Vrijedno je pogledati i koeficijente korelacije, koji su za ove dvije mjere intenziteta najveći. Koeficijent korelacije R opisuje u kolikoj mjeri IM i EDP statistički ovise jedan o drugome te stoga predstavlja bolji prediktivni faktor za neke druge potrese koji

moгу djelovati na odabranu zgradu [19]. Spektralna akceleracija pri periodu drugog oblika $S_a(T_2)$ (Y smjer) te Housnerova mjera intenziteta HSI sljedeće su najefikasnije mjere.

Na slici 5 prikazane su ovisnosti IM-EDP u obliku oblaka točaka za četiri najpovoljnije mjere intenziteta. Prikazane su i regresijske krivulje koje na linearnoj skali poprimaju oblik potencije. $S_{a,avg}$ (0,5s-0,8s) i PGV su zaista najefikasnije mjere intenziteta sa najmanjim rasipanjem rezultata. Već je sada vidljivo koliko varijabilnosti postoji u određivanju povezanosti IM-EDP. Stoga je odabir optimalne mjere intenziteta važan doprinos smanjivanju brojnih neodređenosti i nesigurnosti u proračunu. Dobar odabir mjere intenziteta također donekle nadomješta manjkavosti u izboru potresnih zapisa.



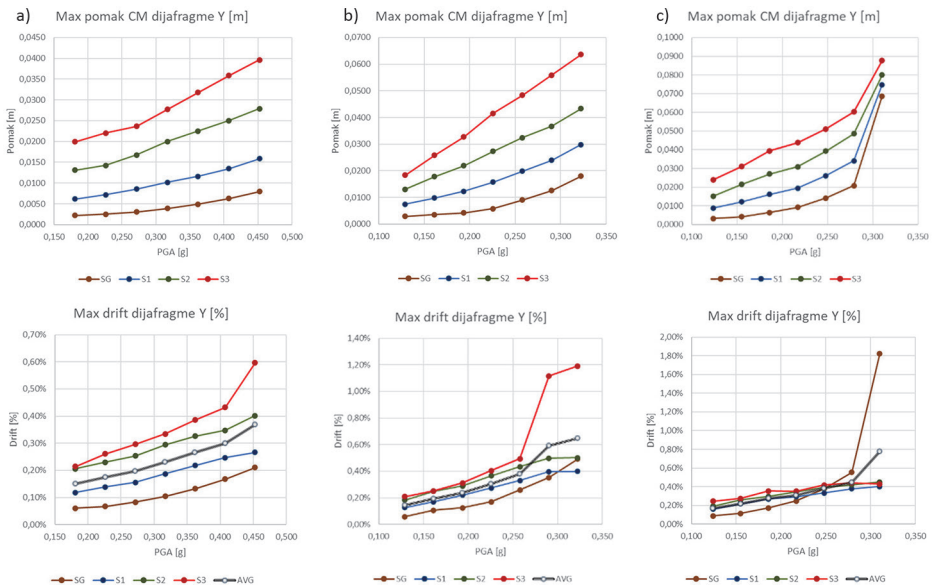
Slika 5. Izvedene ovisnosti IM-EDP za sljedeće IM: PGV, HSI, $S_{a,avg}$ (0,5s-0,8s), $S_a(T_2)$

S obzirom na IM koje se odnose na parametre amplitude gibanja tla, PGV je dao najbolje rezultate. HSI je mjera u području pseudobrzine, ali vezana za frekvencijski sadržaj odgovora konstrukcije. Odgovor odabrane tipske zidane zgrade najviše se događa kroz energiju gibanja zgrade. S druge strane, $S_{a,avg}$ (0,5s-0,8s) kao mjera vezana za akceleraciju najbolje opisuje povezanost odziva konstrukcije i potresne pobude, i to u području perioda referentne zgrade koji se povećava sa smanjenjem krutosti kao posljedica oštećenja pojedinih elemenata.

4.2 Ponašanje konstrukcije

Podrobnijom analizom IDA krivulja razdijeljenih po katovima za pojedine zapise možemo doći do daljnjih uvida o načinu odziva konstrukcije. Na slici 6 su prikazani odnosi $IDR_{max,kata}$ i $D_{CM,max,kata}$ (maksimalni pomak centra mase kata) prema PGA za sve razine intenziteta te za nekoliko potresnih zapisa.

Uočavamo najprije različite načine odziva konstrukcije po visini. Zapis RSN4277_F uzrokovao je progresivno sve veće pomake prema gornjim katovima, dok su ostali zapisi uzrokovali podjednake pomake svih katova za sve razine intenziteta potresa, osim pri najvećim razinama. Progibna linija konstrukcije različita je i ovisi o potresnoj pobudi. Konstrukcija ima kapacitet za odgovor na oba načina. Nadalje, vidimo da su potresi RSN4277_F i RSN359_C uzrokovali slom najvišeg kata jer on u zadnjem inkrementu ima naglo povećanje pomaka, dok ostali katovi i dalje prate svoj trend postupnog povećanja pomaka. Nosivost se iscrpila na najvišem katu. S druge strane, potres RSN4457_M uzrokovao je slom u prizemlju pri najvećoj razini intenziteta, a iz prikaza maksimalnih pomaka vidimo da istovremeno svi katovi prate nagli skok u pomaku. Dogodio se posmični slom prizemlja te se cijela zgrada translatala u smjeru djelovanja potresa.



Slika 6. Ovisnost EDP-PGA po katovima za zapise: a) RSN4277_F; b) RSN359_C i c) RSN4457_M

Rezultati u X smjeru dali su sličan poredak efikasnosti IM, uz nešto slabiju korelaciju za većinu IM, uključujući PGV i HSI koje su vezane za brzine. Međutim, $S_{a,avg}$ (0,5s-0,8s) za oba smjera ostaje jednako efikasna, no $S_a(T_1)$ u X smjeru postiže

$R^2=0,865$ što je čini optimalnom za X smjer. Gibanje u X smjeru je dominantno te je R^2 relativno visok za $S_a(T_1)$ i u Y smjeru. Ipak, $S_{a,avg}$ (0,5s-0,8s) ostaje bolji izbor zbog konzistentne efikasnosti u oba smjera.

5 Zaključak

Provedena je analiza ovisnosti između mjera intenziteta gibanja tla (IM) i odabranog parametra seizmičkog odziva (EDP) s ciljem određivanja optimalne mjere intenziteta za odabranu referentnu tipičnu zidanu zgradu. Kao rezultat statističke obrade podataka izvedene su odgovarajuće ovisnosti između 13 različitih mjera intenziteta i srednjeg maksimalnog međukatnog pomaka IDR_{avg} koje se mogu primijeniti pri određivanju maksimalnog odziva referentne zidane zgrade unutar bloka u centru Zagreba.

Pronađene su dvije optimalne i praktične mjere intenziteta: $S_{a,avg}$ (0,5s - 0,8s) i PGV, koje su pokazale najveći stupanj korelacije s IDR_{avg} . Slijede ih HSI i $S_a(T_2)$. Referentna zgrada osjetljiva je na brzinu tla i na akceleraciju u frekventnom području svojih prvih oblika titranja. Odziv zgrade na potres događa se primarno kroz disipaciju energije tijekom gibanja zgrade.

Različiti zapisi uzrokuju raznovrsne mehanizme i lokacije otkazivanja. To ukazuje na različitost potresnih pobuda koje mogu djelovati na konstrukciju, ali i na širinu mogućnosti konstrukcije da se na pobudu odazove na različite načine, bilo otkazivanjem prizemlja ili najgornjeg kata. Optimalna mjera intenziteta obuhvaća sve ove načine odziva konstrukcije te dobro opisuje odziv pri istoj razini intenziteta ma kakav bio njezin način otkazivanja u mehaničkom smislu.

Dobiveni rezultati služe kao podloga za daljnje istraživanje koje obuhvaća analizu stanja oštećenja konstrukcije s obzirom na IM kako bi se vidjelo koja mjera intenziteta bolje razgraničuje stanja oštećenja i pri kojim EDP vrijednostima se ona ostvaruju, te temeljem toga izradu krivulja ranjivosti i oštetljivosti za referentnu građevinu.

Zahvala

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP – 2020-02-1128.

Literatura

- [1] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Rizik od potresa: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjericama za budućnost, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 10, pp.923-947
- [2] Dasović, I., Herak, M., Prevolnik, S.: Uvodno o potresu i njegovim učincima (poglavlje), Potresno inženjerstvo: Obnova zidanih zgrada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp.13-36, 2021
- [3] Chopra, A.K.: Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, First Edition, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1995
- [4] Kostinakis, K., Fontara, I.K., Athanatopoulou, A.M.: Scalar structure-specific ground motion intensity measures for assessing the seismic performance of structures: a review, Journal of Earthquake Engineering, 22, pp.630-665, 2018
- [5] Yang, D., Pan, J., Li, G.: Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 38, pp.1257–1280, 2009
- [6] Giovenale, P., Cornell, C.A., Esteva, L.: Comparing the adequacy of alternative ground motion intensity measures for the estimation of structural responses, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 33, pp.951-979, 2004
- [7] Luco, N., Cornell, C.A.: Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions, Earthquake Spectra, 23, pp.357-392, 2007
- [8] Kazantzi, A.K., Vamvatsikos, D.: Intensity measure selection for vulnerability studies of building classes, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 44, pp. 2677–2694, 2015
- [9] Padgett, J.E., Nielson, B.G., Desroches, R.: Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 37, pp.711-725, 2008
- [10] Pitilakis, K., Crowley, H., Kaynia, A.M.: Fragility functions of masonry buildings (Chapter), SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk, Springer, Dordrecht, pp.111-156, 2014
- [11] Žagar, T., Uroš, M., Atalić, J.: Izloženost tipskih zgrada u Zagrebu izgrađenih u drugoj polovini 20. stoljeća, 7. Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Zagreb, pp. 135-150, 2021
- [12] Computers & Structures, Inc., ETABS: Integrated Building Design Software, version 17, CSI, Berkeley, 2018
- [13] Herak, D., Herak, M., Tomljenović, B.: Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia, Tectonophysics, 465, pp.212–220, 2009

- [14] Ancheta, T.D., Bozorgnia, Y., Darragh, R.: PEER NGA-West2 Database: A Database of Ground Motions Recorded in Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regions, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 37, Lisbon, pp.30013-30019, 2012
- [15] Seismosoft Ltd., Seismoapps, Technical Information Sheet, Seismosoft's Suite of Earthquake Tools, Pavia, 2018
- [16] Vamvatsikos, D., Cornell, C.A.: Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 34, pp.1573–1600, 2005
- [17] Zhou, Y., Su, N., Lu, X.: An elastic spectral value-based intensity measure for the incremental dynamic analysis of tall buildings, Proceedings of the 5th Kwang-Hua Forum on innovations and implementations in earthquake engineering research, Shanghai, China, 2012
- [18] Pejović, J., Janković, S.: Ovisnost odziva armiranobetonskih visokih zgrada o mjeri intenziteta potresa, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 8, pp.749-759
- [19] Yan, Y., Xia, Y., Yang, J., Sun, L.: Optimal selection of scalar and vector-valued seismic intensity measures based on Gaussian Process Regression, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 152, 2022
- [20] Arias, A.: A measure of earthquake intensity, In: Hansen RJ (ed) Seismic design for nuclear power plants, MIT Press, Cambridge MA, pp. 438–483, 1970
- [22] Park, Y.J., Ang, A.H.S., Wen, Y.K.: Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings, Journal of Structural Engineering, 111, pp.740–57, 1985
- [23] Electrical Power Research Institute (EPRI): Criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake, Rapport np-5930 2848-16, USA: Electric Power Research Institute, 1988
- [24] Housner, G.: Measures of severity of earthquake ground shaking, In: Proceedings of US national conference on earthquake engineering, Ann Arbor, MI: EERI, pp.25–33, 1975
- [25] Eads, L., Miranda, E., Lignos, D.G.: Average spectral acceleration as an intensity measure for collapse risk assessment, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 44, pp. 2057–2073, 2015