

Primljen / Received: 16.12.2014.

Ispravljen / Corrected: 13.2.2015.

Prihvaćen / Accepted: 20.2.2015.

Dostupno online / Available online: 10.7.2015.

# Utjecaj potresnih zona i lokalnih uvjeta tla na odziv armiranobetonskih zgrada

## Autori:



Dr. sc. **Burak Yön**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Dicle, Turska  
Fakultet inženjerstva  
Odjel za građevinarstvo  
[burakyon@gmail.com](mailto:burakyon@gmail.com)



Doc. dr. sc. **Mehmet Emin Öncü**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Dicle, Turska  
Fakultet inženjerstva  
Odjel za građevinarstvo  
[oncume@dicle.edu.tr](mailto:oncume@dicle.edu.tr)



Prof. dr. sc. **Yusuf Calayır**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište FIRAT, Turska  
Fakultet inženjerstva  
Odjel za građevinarstvo  
[ycalayir@firat.edu.tr](mailto:ycalayir@firat.edu.tr)

Pregledni rad

**Burak Yön, Mehmet Emin Öncü, Yusuf Calayır**

## Utjecaj potresnih zona i lokalnih uvjeta tla na odziv armiranobetonskih zgrada

U radu se preko distribucije plastičnih zglobova istražuje utjecaj potresnih zona i lokalnih uvjeta u tlu, definiranih u turskim potresnim normama na nelinearni odziv armiranobetonskih građevina. Za numeričku analizu je odabrana okvirna armiranobetonska zgrada i izvršeni su nelinearni dinamički proračuni odziva u vremenu. Za potrebe analiza, odabrani zapisi potresa su prilagođeni kako bi odgovarali proračunskom spektru odziva, pri čemu su u obzir uzeta potresna područja i lokalni uvjeti u tlu. U radu su uspoređeni međukatni pomaci, poprečne sile u podnožju zgrade te trošenje energije u odabranim zglobovima.

### Ključne riječi:

potresna područja, lokalni uvjeti u tlu, distribuirani plastični zglobovi, proračun odziva u vremenu

Subject review

**Burak Yön, Mehmet Emin Öncü, Yusuf Calayır**

## Effects of seismic zones and local soil conditions on response of RC buildings

The effect of seismic zones and local soil conditions given in Turkish Seismic Code on the nonlinear response of reinforced concrete buildings, evaluated using the distributed plastic hinge approach, is investigated in this paper. A RC frame building was selected for numerical analysis, and the nonlinear dynamic time history analyses were performed. For the purposes of analyses, selected earthquake records were adjusted to become compatible with the design response spectrum, taking into account seismic zones and local soil conditions. Interstorey drifts, cross-sectional forces at the base of the building, and energy dissipation for selected hinges, were compared in the paper.

### Key words:

seismic zones, local soil conditions, distributed plastic hinges, time history response analysis

Übersichtsarbeit

**Burak Yön, Mehmet Emin Öncü, Yusuf Calayır**

## Einfluss der Erdbebenzonen und lokaler Bodenverhältnisse auf das Verhalten von Stahlbetongebäuden

In dieser Arbeit werden Einflüsse der Erdbebenzonen und lokalen Bodenverhältnisse, die nach türkischen Erdbebennormen definiert sind, auf das nichtlineare Verhalten von Stahlbetongebäuden mittels der Ausbreitung plastischer Gelenke untersucht. Für numerische Analysen ist ein Gebäude mit Stahlbetonrahmen ausgewählt und das nichtlineare dynamische Verhalten im Zeitverlauf ist berechnet. Gegebene Erdbebenaufzeichnungen sind dem Berechnungsspektrum angepasst, wobei Erdbebenzonen und lokale Bodenverhältnisse berücksichtigt sind. Ein Vergleich der Stockwerksverschiebungen, der aufgenommenen Schubkräfte und der Energiedissipation ist für ausgewählte Gelenke aufgestellt.

### Schlüsselwörter:

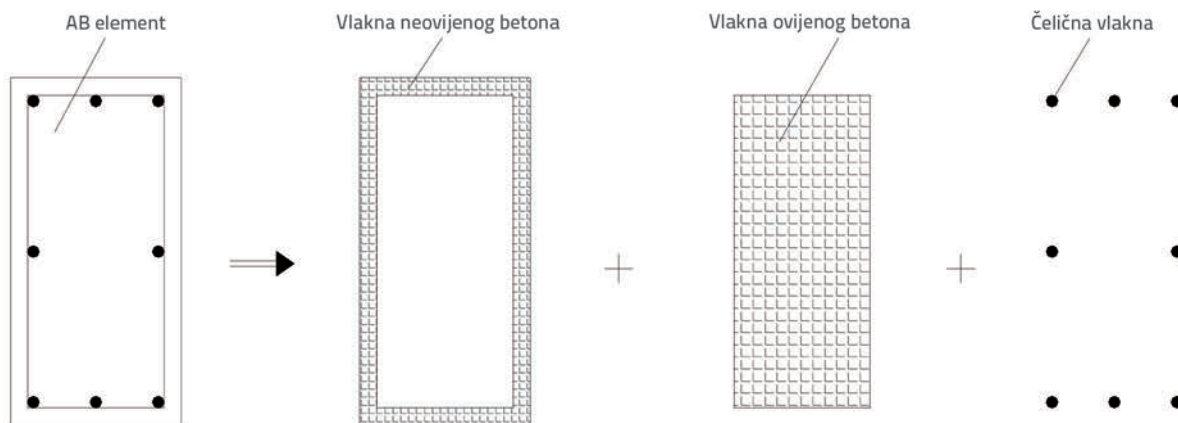
Erdbebenzonen, lokale Bodenverhältnisse, distribuierte plastische Gelenke, Zeitverlaufsanalyse

## 1. Uvod

Potresi su jedna od najopasnijih prirodnih katastrofa, koje od nastanka ljudskog roda pa do danas ne prestaju ugrožavati ljudske živote i nanositi goleme materijalne štete. Nedavni potresi, poput onoga koji je 1999. pogodio Kocaeli u Turskoj, zatim potres Bam u Iranu iz 2003., potres u Pakistanu iz 2005., potres u Wenчуанu u Kini iz 2008., potres L'Aquila u Italiji iz 2009., potres u Čileu iz 2010., potresi u Haitiju iz 2010. te potresi u Vanu u Turskoj iz 2011., također su uzrokovali ljudske žrtve i goleme materijalne štete. Brojni znanstvenici su analizirali štetu koju su potresi prouzročili na zgradama, te prenijeli naučeno iz takvih prirodnih katastrofa [1-9]. Značajna potresna aktivnost i lokalni uvjeti u tlu u velikoj mjeri utječu na stupanj oštećenja zgrada [10, 11]. Otkazivanje nosivosti i rušenje izraženiji su u područjima sa složenom i uslojenom strukturom tla. Do takvih oštećenja uglavnom dolazi zbog likvefakcije, rasjedanja i amplifikacije tla. Ovaj rad je fokusiran na utjecaj razine potresa (od 0,1g do 0,4g, gdje  $g$  označava gravitacijsko ubrzanje) na nelinearno ponašanje armiranobetonskih zgrada. Spomenuti utjecaji su određeni u skladu s potresnim zonama i lokalnim uvjetima u tlu, potresno definiranim kao Z1, Z2, Z3 i Z4, prema turskim normama za potres (TSC), [12]. U tu su svrhu za odabranu građevinu provedeni nelinearni dinamički proračuni odziva u vremenu. Za potrebe analize, odabrani zapisi potresnog ubrzanja su usklađeni tako da budu kompatibilni s proračunskim spektrom odziva koji se temelji na razini potresne aktivnosti i lokalnim uvjetima u tlu. Primjenom usklađenih zapisa potresa određeni su katni pomaci, ukupne poprečne sile u podnožju zgrade, krivulje moment-kut rotacije te količina potrošene energije na donjim krajevima dva stupa u prizemlju. Rezultati su međusobno uspoređeni. U nelinearnom proračunu primijenjen je pristup raspodijeljenih plastičnih zglobova.

## 2. Postupak uključivanja raspodijeljenih plastičnih zglobova

Model zglobova se odnosi na plastičnost koja je raspodijeljena po presjeku konstrukcijskog elementa te po njegovoj dužini.



Slika 1. Karakteristični vlaknasti modeli AB elementa

Prema tom modelu, konstrukcijski se elementi dijele na tri vrste vlakana: za kontrolu nelinearnog ponašanja uzdužne armature, ovijenog betona koji se sastoji od betonske jezgre te neovijenog betona koji se sastoji od zaštitnog sloja betona. Vlaknasto modeliranje karakterističnog presjeka armiranobetonskog elementa pokazno je na slici 1. U nelinearnoj analizi su konstrukcijski elementi podijeljeni na četiri dijela. Sto vlakana po presjeku korišteno je za diskretizaciju konstrukcijskih elemenata. Za prigušenje je korišteno Rayleighovo prigušenje. Model s raspodijeljenim plastičnim zglobovima točniji je od modela s točkastim zglobovima, posebice kada postoji velika promjena uzdužne sile (Mwafy i Elnashai [13]). Međutim, Taucer i dr. [14], Petrangeli [15], te Jeong i Elnashai [16] provjerili su točnost toga modela uspoređujući ga s eksperimentalnim podacima. Zbog toga taj model koriste istraživači. Mwafy [17] je analizirao faktore proračunskog potresnog odziva građevina s betonskim zidovima. U okviru numeričkog ispitivanja odabrao je i analizirao pet građevina, gdje je pritom primijenio model raspodijeljenih zglobova. Duan i Hueste [18] su analizirali potresno ponašanje peterokatne armiranobetonske zgrade dimenzionirane u skladu s kineskim potresnim propisima. U analizama su primjenjivali model raspodijeljenih zglobova. Kwon i Kim [19] su proveli ispitivanje armiranobetonske zgrade oštećene za vrijeme potresa Pisco-Chincha 2007., koji se dogodio u Peruu. Numeričku analizu te zgrade proveli su primjenom modela raspodijeljenih zglobova. Samo i Manfredi [20] proveli su analize primjenjujući metodu postupnog guranja te dinamičku metodu proračuna na izvedenim i obnovljenim zgradama kako bi ocijenili djelotvornost spregova kojima je onemogućeno izvijanje. U nelinearnoj analizi primijenili su model raspodijeljenih elemenata. Yön i Calayır [21] su primijenili metodu postupnog guranja na armiranobetonskoj zgradi pomoću modela točkastih i raspodijeljenih zglobova, gdje su pritom koristili razne obrasce horizontalnog opterećenja. Carvalho i dr. [22] napravili su usporednu analizu raznih pristupa za modeliranje zglobova pomoću nelinearne statičke i dinamičke analize na armiranobetonskoj konstrukciji. Yön i Calayır [23] istražili su utjecaj ovojne armature i čvrstoće betona na

nelinearno ponašanje armiranobetonskih zgrada, gdje su primijenili model raspodijeljenih zglobova.

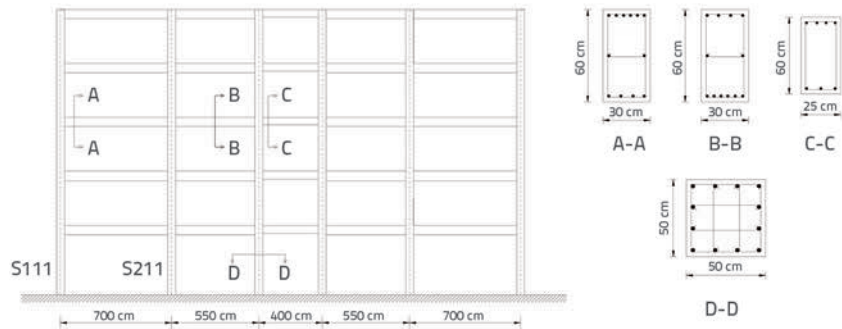
U ovom se radu primjenjuje model raspodijeljenih zglobova u svrhu istraživanja utjecaja potresnih zona i lokalnih uvjeta u tlu na armiranobetonske zgrade. U nelinearnim analizama upotrijebljen je program SeismoStruct [24] koji može simulirati neelastični odziv konstrukcijskih sustava podvrgnutih statičkim i dinamičkim opterećenjima. Za usklađivanje podataka o potresnom ubrzanju s projektiranim spektrima upotrijebljen je program SeismoArtif [25].

### 3. Numerička analiza

#### 3.1. Opis zgrade i svojstva materijala

Za potrebe numeričke analize odabran je peterokatni armiranobetonski okvir s četiri polja i visokom duktilnošću. Ukupna visina zgrade iznosi 18,5 metara. Visina prvog kata zgrade iznosi 4,5 m, a svaki od ostalih katova je visok 3,5 m. Dimenzije stupova iznose 50 x 50 cm, a dimenzije gređa su 25x50 u srednjem polju i 30 x 60 cm u ostalim poljima. Debljina ploče iznosi 12 cm. Zgrada je analizirana prema potresnim zonama i lokalnim uvjetima u tlu prema TPN-u. Pretpostavljeno je da koeficijent važnosti zgrade iznosi 1,0 te da je beton razreda C25, a armatura kvalitete je S420. Pogled odabrane okvirne građevine i presjeci konstrukcijskih elemenata prikazani su na slici 2. Četiri Gaussove integracijske točke odabrane su za proračun sila i odnosa naprezanja-deformacija za svaki presjek. Za ovu je zgradu usvojeno dodatno stalno i promjenjivo opterećenje u iznosu redom od 1,5 kPa te 2,0 kPa, u skladu sa zahtjevima turske norme 498 [26]. Pretpostavljeno je da je zgrada kruto upeta u podlogu, te u obzir nisu uzeti popustljivost tla i svojstveno prigušenje.

Za armature šipke je korišten bilinearni elastoplastični model materijala, koji uključuje kinematičko očvršćenje. Betonski materijal je definiran pomoću jednoosnog modela ovijenog betona. Utjecaj ovijenosti je proračunan primjenom Manderovog modela (Mander i dr. [27]). Parametri koji se odnose na zone ovijenosti u konstrukcijskim elementima prikazani su u tablici 1.



Slika 2. Presjek kroz zgradu, poprečni presjeci stupa i gređe

Tablica 1. Parametri koji se odnose na zone ovijenosti u konstrukcijskim elementima

Konstrukcijski elementi		Uzdužna armatura	Razmak poprečne armature [cm]	Dužina zone ovijenosti [cm]	Faktor ovijenosti
Stup	Zona ovijenosti stupa	12Ø16	10	80	1,2970
	Središnja zona stupa		15		1,1817
Greda	Zona ovijenosti gređe	gornja armatura 6Ø14	10	120	1,1400
	Središnja zona gređe	donja armatura 4Ø14	20		1,0452
Greda	Zona ovijenosti gređe	gornja armatura 5Ø14	10	100	1,0085
	Središnja zona gređe	donja armatura 4Ø14	20		1,0021

Tablica 2. Kriteriji ponašanja primijenjeni u analizi

Razina oštećenja	Granične vrijednosti za učvršćeni beton	Granične vrijednosti za neovijeni beton	Granične vrijednosti za armaturu
Granica minimalnog oštećenja (MN)	$(\epsilon_{cu})_{MN} = 0,0035$	0,0035	$(\epsilon_s)_{MN} = 0,010$
Sigurnosna granica oštećenja (GV)	$(\epsilon_{cg})_{GV} = 0,0035 + 0,01 \left( \frac{\rho_s}{\rho_{sm}} \right) \leq 0,0135$	0,0037	$(\epsilon_s)_{GV} = 0,040$
Granica oštećenja pri slomu (GC)	$(\epsilon_{cg})_{GC} = 0,004 + 0,014 \left( \frac{\rho_s}{\rho_{sm}} \right) \leq 0,018$	0,0040	$(\epsilon_s)_{GC} = 0,060$

#### 3.2. Kriteriji sloma

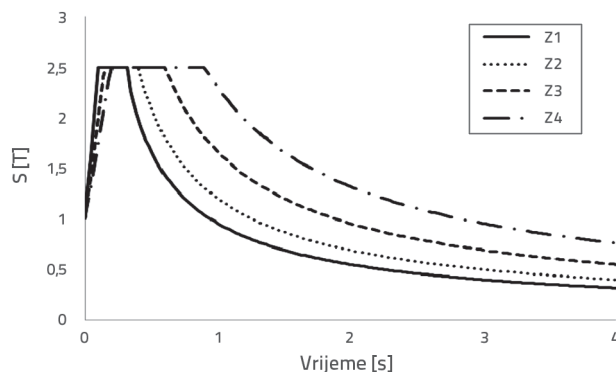
Kriteriji potresnog ponašanja definirani su prema turskoj potresnoj normi [12]. U potresnoj su analizi primijenjene tri razine oštećenja, prema [12]: granica minimalnog oštećenja (MN), sigurnosna granica oštećenja (GV) i granica oštećenja pri slomu (GC). Te su granične vrijednosti prikazane u tablici 2.

U tablici 2. vrijednost  $\epsilon_{cu}$  predstavlja graničnu deformaciju neovijenog betona, dok  $\epsilon_{cg}$  predstavlja graničnu deformaciju ovijenog betona. Vrijednost  $\epsilon_s$  predstavlja deformaciju armature. Vrijednost  $\rho_s$  je volumenski omjer spiralne armature smještene u presjeku i raspoređene u vidu "posebnih potresnih spona za ovijanje i prepletanje", dok vrijednost  $\rho_{sm}$  definira volumetrijski omjer poprečne armature koja se mora nalaziti u poprečnom presjeku [12].

### 3.3. Parametri potresa i lokalni uvjeti u tlu

Odabrana svojstva potresnog ubrzanja prikazana su u tablici 3. Potresni zapisi su dobiveni iz PEER-ove baze snažnih podrhtavanja [28] i skaliran im je frekvencijski sastav kako bi se prilagodili ciljanom proračunskom spektru definiranom s obzirom na potresne zone i lokalne uvjete u tlu prema TPN-i. Karakteristični periodi spektra prema kategorijama tla (od Z1 do Z4) i grupama tla prikazani su u tablicama 4 i 5. Osim

toga, elastični spektri odziva, izrađeni sukladno s lokalnim kategorijama tla, prikazani su na slici 3.



Slika 3. Preporučeni elastični spektri odziva za kategorije tla od Z1 do Z4 prema TSC (za 5% prigušenja)

Tablica 3. Zapisi potresnih ubrzanja odabrani za dinamičku analizu

Potresi	Mjerna stanica	Smjer	Datum	Magnituda	PGA [g]	Trajanje [s]
Kocaeli	Düzce	N-S	17. kolovoz 1999.	7,4	0,358	26,44
Loma Prieta	Corralitos	E-W	18. listopad 1989.	6,9	0,644	40,0
Imperial Valley	El Centro Array	E-W	19. svibnja 1940.	7,0	0,313	40,0

PGA - najveće horizontalno ubrzanje tla (eng. Peak ground acceleration)

Tablica 4. Karakteristični periodi spektra prema kategorijama tla iz TSC (eng. Turkish Seismic Code), [12]

Lokalne kategorije tla	$T_A$ [s]	$T_B$ [s]	Grupe tla i debljina najvišeg sloja tla
Z1	0,10	0,30	grupa tla (A); grupa tla (B) sa $h_1 \leq 15$ m
Z2	0,15	0,40	grupa tla (B) sa $h_1 > 15$ m; grupa tla (C) sa $h_1 \leq 15$ m
Z3	0,15	0,60	grupa tla (C) sa $15 \text{ m} < h_1 \leq 50$ m; grupa tla (D) sa $h_1 \leq 10$ m
Z4	0,20	0,90	grupa tla (C) sa $h_1 > 50$ m; grupa tla (D) sa $h_1 > 10$ m

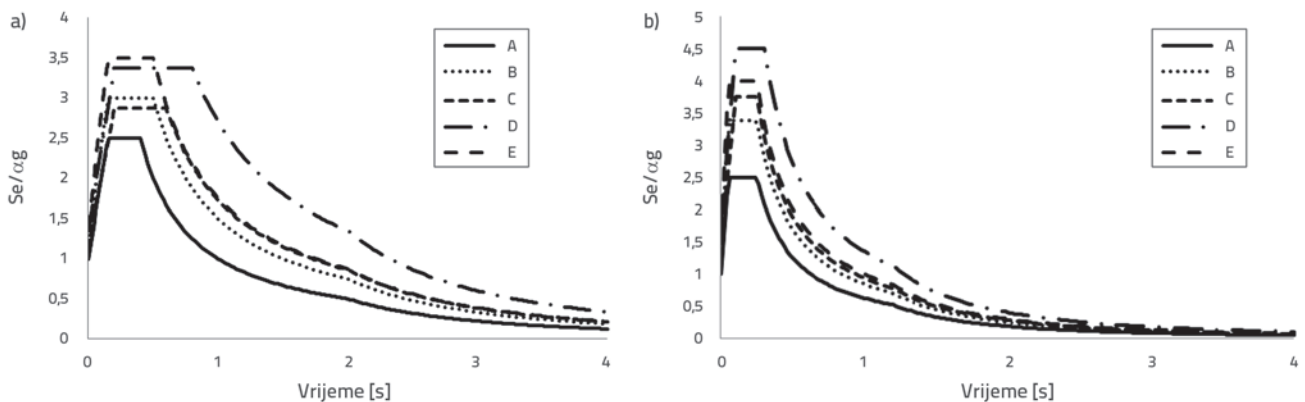
Tablica 5. Grupe tla definirane u TSC, [12]

Grupe tla	Opis grupe tla	Standardna penetracija (N/30)	Relativna gustoća [%]	Jednoosna tlačna čvrstoća [kPa]	Brzina posmičnih valova [m/s]
A	1. Masivne vulkanske stijene, zdrave nerastrošene metamorfne stijene, čvrste cementirane sedimentne stijene	-	-	> 1000	> 1000
	2. Vrlo zbijeni pijesak, šljunak...	> 50	85-100	-	> 700
	3. Tvrdna glina i prašinstva glina...	> 32	-	> 400	> 700
B	1. Meka vulkanska stijena kao što je tuf i aglomerat, istrošene cementirane sedimentne stijene s plohom diskontinuiteta.....	-	-	500-1000	700-1000
	2. Zbijeni pijesak, šljunak.....	30-50	65-85	-	400-700
	3. Glina čvrstog konzistentnog stanja, prašinstva glina...	16-32	-	200-400	300- 700
C	1. Jako istrošene meke metamorfne stijene i cementirane sedimentne stijene s ploham diskontinuiteta	-	-	< 500	400-700
	2. Srednje zbijeni pijesak i šljunak....	10-30	35-65	-	200-400
	3. Glina polučvrstog konzistentnog stanja i prašinstva glina.....	8-16	-	100-200	200-300
D	1. Meki duboki aluvijalni slojevi s visokom razinom podzemne vode	-	-	-	< 200
	2. Nevezani pijesak.....	< 10	< 35	-	< 200
	3. Glina lako gnječivog konzistentnog stanja i prašinstva glina.....	< 8	-	< 100	< 200

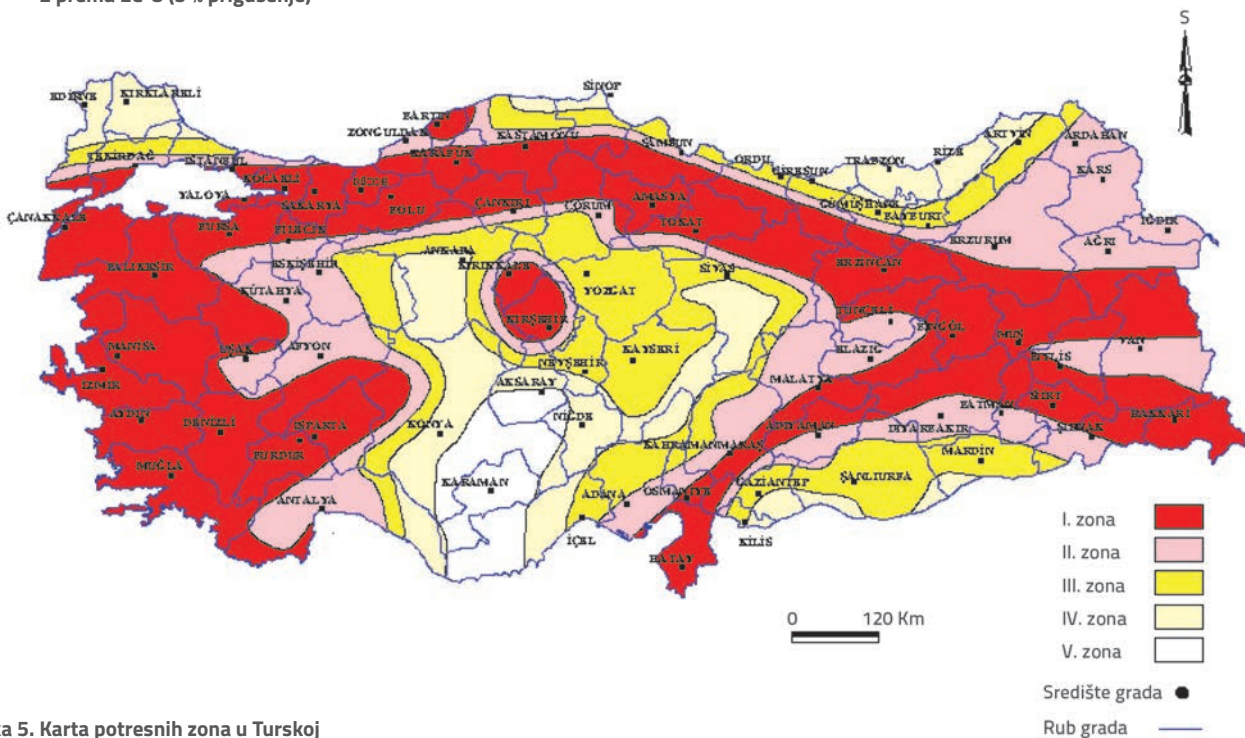
Kada se spektri odziva prema TPN-i usporede s onima iz Eurokoda (EC-8) [29], može se uočiti da se u TPN-i spominju četiri kategorije tla (Z1, Z2, Z3 i Z4) dok je u EC-8 definirano sedam tipova tla (A, B, C, D, E, S1 i S2). Kategorije tla S1 i S2 su u EC-8 opisane kao posebne kategorije tla. U područjima u kojima nalazimo tla tipa S1 i S2 trebaju se provoditi posebna istraživanja u svrhu određivanja potresnog opterećenja. Slom tla pod potresnim opterećenjem posebno se treba analizirati u slučaju kategorije tla S2. Osim toga, dva se spektra predlažu u EC-8: tip 1 i tip 2. Spektar tipa 2 se koristi kada su magnitude valova tla  $M_s$ , koje čine najveći dio potresnog rizika, manje od 5,5. Ti spektri su prikazani na slikama 4.a i 4.b. Na tim slikama vrijednosti  $S_e$ ,  $a_g$  i  $\gamma(S)$  redom pokazuju elastični spektralni odziv, proračunsko ubrzanje tla i period vibracija linearnog sustava s jednim stupnjem slobode.

Prema karti potresnih zona, koju je 1996. godine pripremila tursko Ministarstvo javnih radova i prostornog uređenja, Turska je podijeljena na pet potresnih zona. Prema TPN-i potresna zona prvog stupnja se smatra najopasnijom dok je peta zona područje u kojem nema opasnosti od potresa. Prema spomenutoj normi, ubrzanje tla od 0,1g do 0,4g propisuje se za zgrade koje se nalaze u prvoj, odnosno u četvrtoj potresnoj zoni. Ta je karta prikazana na slici 5.

Predominantni periodi dobiveni iz programa SeismoSignal [30] za originalne zapise, zgrade te skalirane zapise za ubrzanja tla od 0,3g i 0,4g prikazani su u tablici 6. Osim toga, proračunski spektri dobiveni množenjem elastičnog spektra s ubrzanjem tla i faktorom važnosti građevine, uzimajući u obzir lokalne uvjete u tlu, prikazani su na slikama 6.a - 6.d. Dakle, u određivanju odziva građevine u obzir se uzima utjecaj potresne zone i lokalnih uvjeta u tlu.

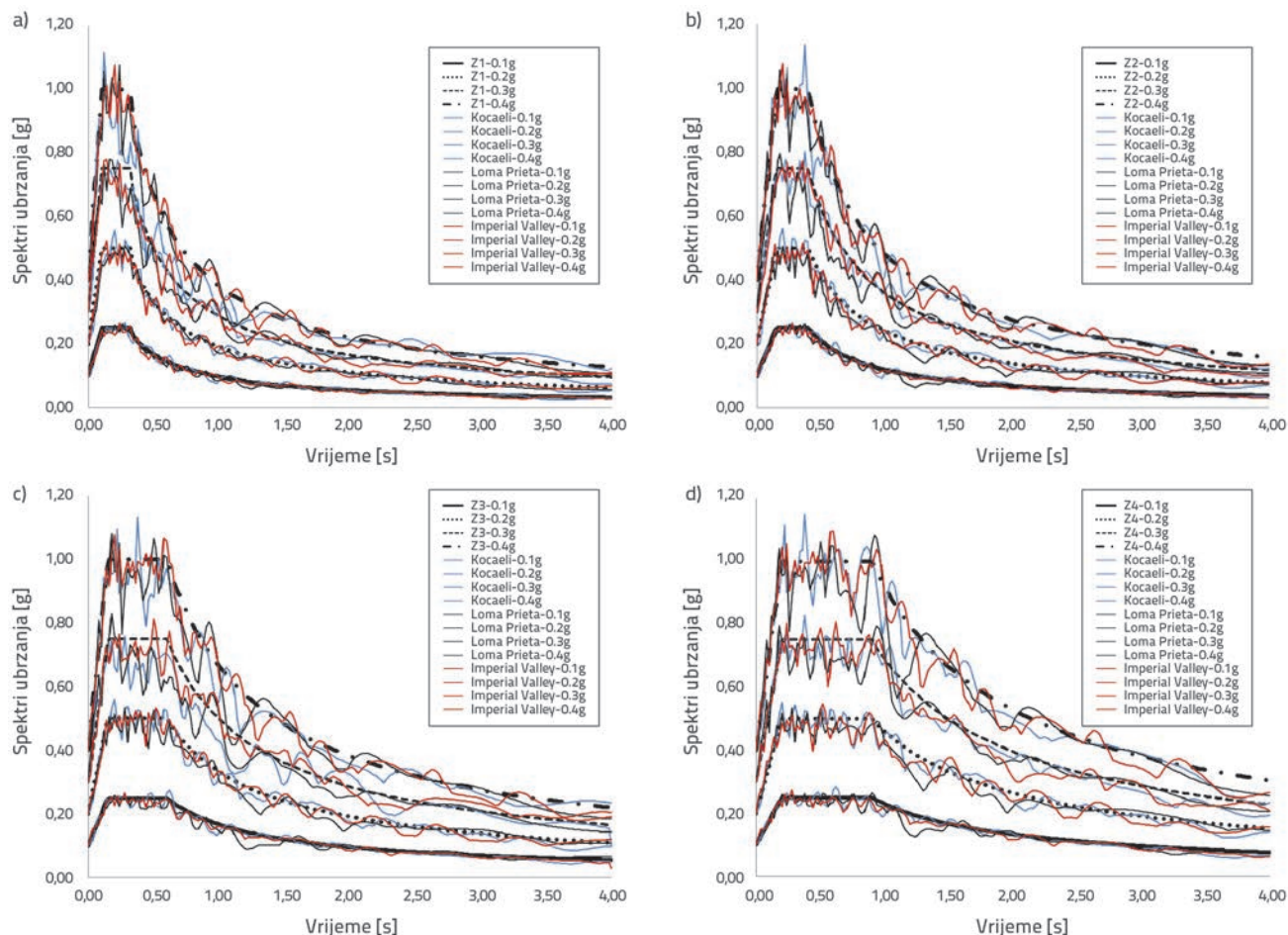


Slika 4. Preporučeni elastični spektar odziva: a) tipa 1 za kategorije tla od A do E, prema EC-8 (5 % prigušenje); b) tipa 2 za kategorije tla od A do E prema EC-8 (5 % prigušenje)



Slika 5. Karta potresnih zona u Turskoj





Slika 6. Spektri odziva zapisa potresnog ubrzanja skalirani s obzirom na ubrzanje tla tako da odgovaraju elastičnim projektnim spektrima definirani za četiri kategorije tla prema TSC: a) Z1; b) Z2; c) Z3; d) Z4

Tablica 6. Predominantni periodi originalnih i prilagođenih zapisa te zgrade

Potresi	Originalni zapisi	Predominantni periodi [s]								Zgrada
		Zapisi prilagođeni kategorijama tla i ubrzanjima tla								
		Z1		Z2		Z3		Z4		
0,3 g	0,4 g	0,3 g	0,4 g	0,3 g	0,4 g	0,3 g	0,4 g			
Kocaeli	0,28	0,20	0,28	0,28	0,28	0,40	0,60	0,90	0,86	0,9191
Loma Prieta	0,30	0,24	0,24	0,30	0,36	0,40	0,44	0,96	0,92	
Imperial Valley	0,46	0,26	0,24	0,36	0,30	0,50	0,52	0,86	0,82	

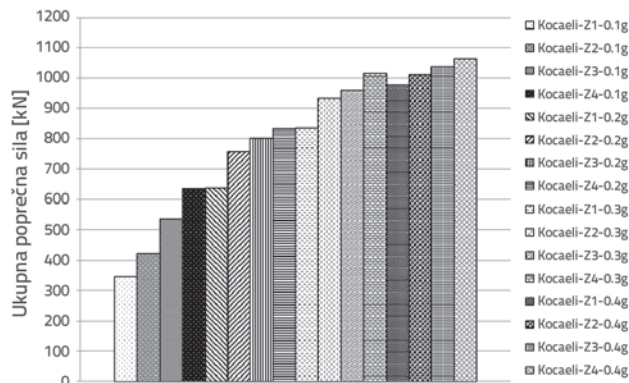
Iz tablice 6. se vidi da povećanje kategorije tla od Z1 do Z4 dovodi do značajnog povećanja dominantnog perioda potresa. Stoga su dominantni periodi prilagođenih zapisa za kategorije tla Z3 i Z4 bliske prvom prirodnom periodu zgrade.

#### 4. Rezultati numeričke analize

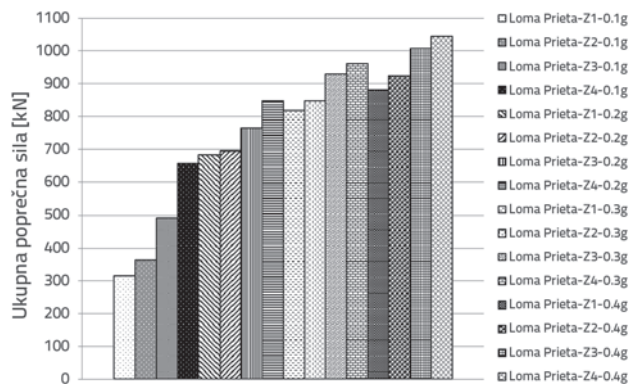
Ukupne poprečne sile u podnožju zgrade prikazane su na slikama od 7. do 9. za razne lokalne uvjete u tlu i ubrzanja

tla. Iz tih se slika može vidjeti da osnovne ukupne poprečne sile imaju tendenciju porasta od Z1 do Z4 za isto ubrzanje tla. Međutim, spomenuta se povećanja razlikuju ovisno o karakteristikama potresa.

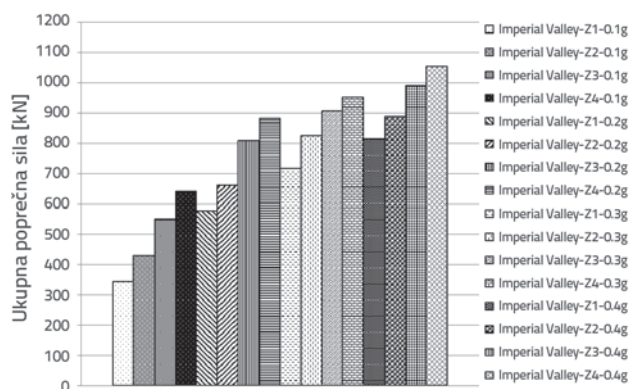
Prema tim slikama, najveće razlike za ukupne poprečne sile, za razne lokalne uvjete u tlu i za isto ubrzanje tla su dobivene za prilagođeni zapis potresa Imperial Valley. Može se uočiti da lokalni uvjeti u tlu imaju izraženiji učinak na ukupne poprečne sile u odnosu na ubrzanje tla.



Slika 7. Ukupne poprečne sile za zapis ubrzanja potresa Kocaeli, skaliranog s obzirom na ubrzanje tla tako da odgovara elastičnom projektom spektru za četiri kategorije tla prema TSC [12]



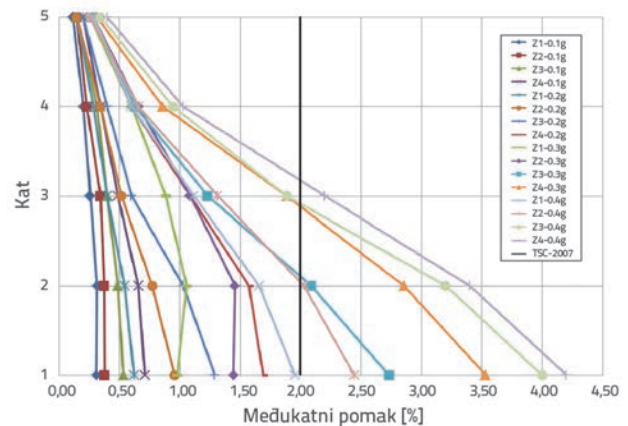
Slika 8. Ukupne poprečne sile za zapis ubrzanja potresa Loma Prieta, skaliranog s obzirom na ubrzanje tla tako da odgovara elastičnom projektom spektru za četiri kategorije tla prema TSC [12]



Slika 9. Ukupne poprečne sile za zapis ubrzanja potresa Imperial Valley, skaliranog s obzirom na ubrzanje tla tako da odgovara elastičnom projektom spektru za četiri kategorije tla prema TSC [12]

tlu su prikazani zajedno s ubrzanjima tla na slikama od 10. do 12.

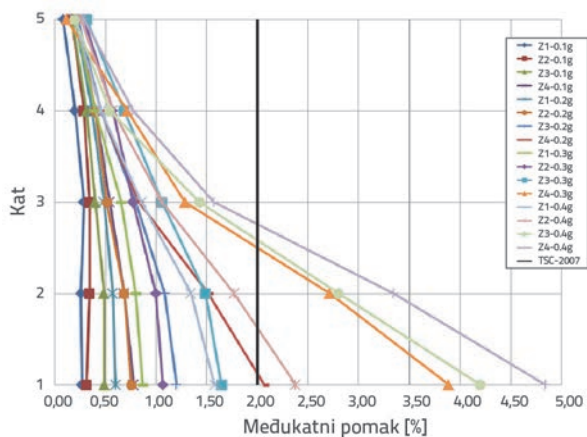
Međukatni pomaci dobiveni za skalirani potres Kocaeli prikazani su na slici 10. Za taj skalirani potres najveći omjer međukatnog pomaka su dobiveni za kategoriju tla Z4 s ubrzanjem tla od 0,4g, za kategoriju tla Z3 s ubrzanjem tla od 0,4g, za kategoriju tla Z4 s ubrzanjem tla od 0,3g, te za kategoriju tla Z3 s ubrzanjem tla od 0,3g. U tim slučajevima su omjeri međukatnog pomaka varirali od 3,0% do 4,25%. Međutim, najmanji međukatni pomaci su dobiveni za kategoriju tla Z1 s 0,1g, za kategoriju tla Z2 s 0,1g, za kategoriju tla Z3 s 0,1g i za kategoriju tla Z1 s 0,2g. U tim slučajevima su omjeri međukatnog pomaka varirali od 0,25% do 0,75%. Ti rezultati pokazuju da je najveći omjer međukatnog pomaka s ubrzanjem tla od 0,4g za kategoriju tla Z4 17 puta veći od najmanjega međukatnog pomaka s ubrzanjem tla od 0,1g za kategoriju tla Z1. Također, pomaci u prizemlju za kategorije tla Z3 i Z4 s ubrzanjem tla od 0,4g su otprilike za dva puta veći od međukatnih pomaka s ubrzanjem tla od 0,4g za kategorije tla Z1 i Z2.



Slika 10. Međukatni pomaci za zapisa ubrzanja potresa Kocaeli, skaliranog s obzirom na ubrzanje tla tako da odgovara elastičnom projektom spektru za četiri kategorije tla

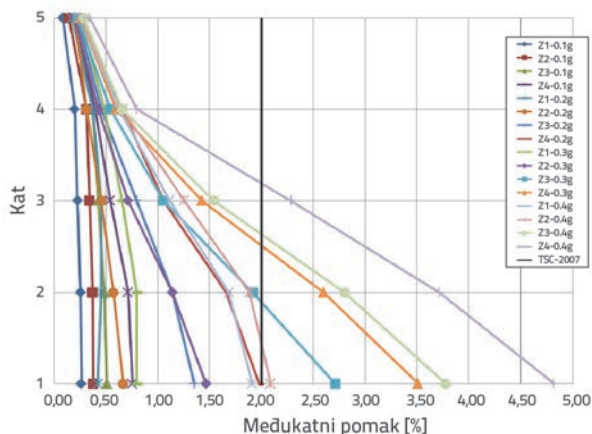
Međukatni pomaci dobiveni za potres Loma Prieta prikazani su na slici 11. Za taj skalirani potres najveći omjer međukatnog pomaka na prizemlju su dobiveni za kategoriju tla Z4 s ubrzanjem tla od 0,4g, za kategoriju tla Z3 s ubrzanjem tla od 0,4g, za kategoriju tla Z4 s ubrzanjem tla od 0,3g, te za kategoriju tla Z3 s ubrzanjem tla od 0,3g. Omjeri međukatnog pomaka su varirali od 2,75% do 5%. Međutim, najmanji međukatni pomaci su dobiveni za kategoriju tla Z1 s 0,1g, za kategoriju tla Z2 s 0,1g, za kategoriju tla Z3 s 0,1g i za kategoriju tla Z1 s 0,2g. Omjeri međukatnog pomaka su varirali od 0,25% do 0,75%. Ti rezultati pokazuju da je najveći omjer međukatnog pomaka s ubrzanjem tla od 0,4g za kategoriju tla Z4 20 puta veći od najmanjega međukatnog pomaka s ubrzanjem tla od 0,1g za kategoriju tla Z1. Također, pomaci u prizemlju za kategorije tla Z3 i Z4 s ubrzanjem tla od 0,4g su otprilike za 2-2,25 puta veći od međukatnih pomaka s ubrzanjem tla od 0,4g za kategorije tla Z1 i Z2.

Efektivni omjer međukatnog pomaka koji prema TSC iznosi 2%, te međukatni pomaci zgrade za razne lokalne uvjete u



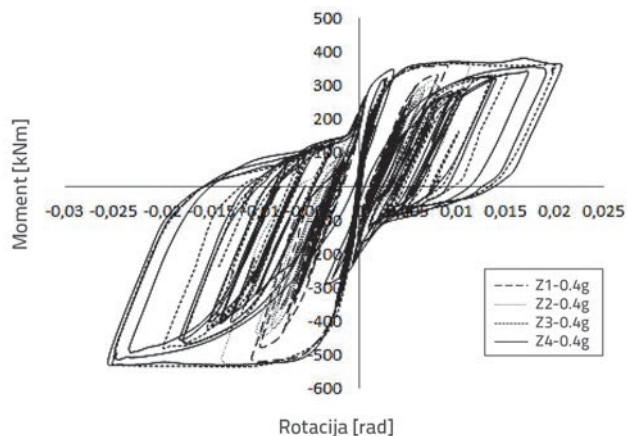
Slika 11. Međukatni pomaci za zapis ubrzanja potresa Loma Prieta, skaliranog s obzirom na ubrzanje tla tako da odgovara elastičnom projektom spektru za četiri kategorije tla

Međukatni pomaci dobiveni za potres Imperial Valley prikazani su na slici 12. Za taj skalirani potres najveći omjeri međukatnog pomaka u prizemlju su dobiveni za kategoriju tla Z4 s ubrzanjem tla od 0,4g, za kategoriju tla Z3 s ubrzanjem tla od 0,4g, za kategoriju tla Z4 s ubrzanjem tla od 0,3g, te za kategoriju tla Z3 s ubrzanjem tla od 0,3g. Omjeri međukatnog pomaka su varirali od 2,8 % do 5 %. Osim toga, manji međukatni pomaci su općenito dobiveni za razne kategorije tla s ubrzanjem tla od 0,1g. U tim slučajevima, omjeri međukatnog pomaka su varirali između 0,25 % i 0,75 %. Ti rezultati pokazuju da je najveći omjer međukatnog pomaka s ubrzanjem tla od 0,4g za kategoriju tla Z4 20 puta veći od najmanjega međukatnog pomaka s ubrzanjem tla od 0,1 g za kategoriju tla Z1. Također, pomaci na prizemlju za kategorije tla Z3 i Z4 s ubrzanjem tla od 0,4g su otprilike za 1,8 puta veći od međukatnih pomaka s ubrzanjem tla od 0,4g za kategorije tla Z1 i Z2. Dobiveni međukatni pomaci su uspoređeni s međukatnom granicom definiranom u TPN-i, te je ustanovljeno da su međukatni pomaci u kategorijama tla Z3 i Z4 veći od granične vrijednosti za ubrzanja tla od 0,3 i 0,4g.



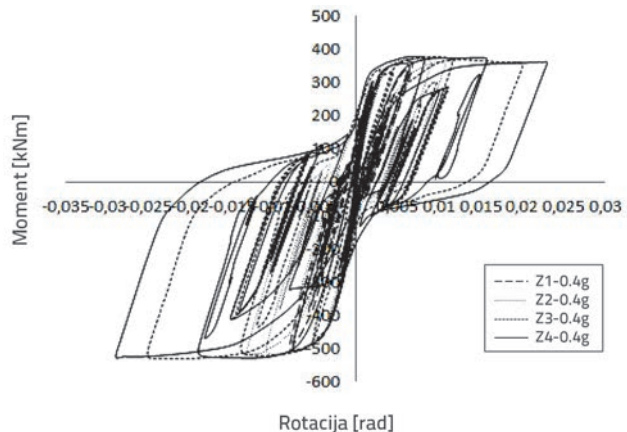
Slika 12. Međukatni pomaci za zapis ubrzanja potresa Imperial Valley, skaliranog s obzirom na ubrzanje tla tako da odgovara elastičnom projektom spektru za četiri kategorije tla

Krivulje moment-kut rotacije dobivene su za razne lokalne uvjete tla i za maksimalna ubrzanja tla (0,4g) za donji kraj stupa S111 na prizemlju. Te su krivulje prikazane na slikama od 13. do 15. Krivulje moment-kut rotacije, dobivene pomoću skaliranog potresa Kocaeli, prikazane su na slici 13. Tu je moguće vidjeti da se apsolutne maksimalne vrijednosti momenta javljaju kod 500 kNm, dok se apsolutne maksimalne rotacije javljaju pri 0,025 rad u kategorijama tla Z3 i Z4 za ubrzanje tla od 0,4g. Međutim, maksimalni moment za kategoriju tla Z2 javlja se pri 500 kNm, a maksimalna rotacija pri razini od 0,015 rad. Za kategoriju tla Z1 moment je sličan kao i u drugim kategorijama tla, a rotacija se javlja pri razini od 0,10 rad.



Slika 13. Krivulje moment-kut zaokreta na donjem kraju stupa S111 u prizemlju za skalirane zapise ubrzanja potresa Kocaeli za četiri kategorije tla s ubrzanjem tla od 0,4 g

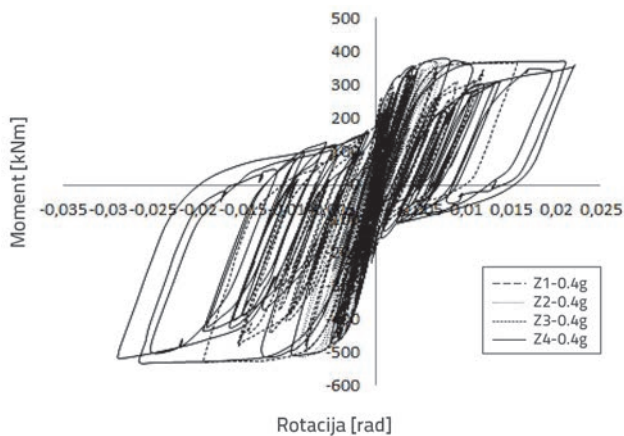
Krivulje moment-kut rotacije, dobivene za potres Loma Prieta, prikazane su na slici 14. Prema rezultatima, apsolutni maksimalni momenti za 0,4g su jednaki za sve vrste tla, a ta vrijednost iznosi otprilike 500 kNm. Što se tiče rotacije, apsolutna maksimalna rotacija za kategoriju tla Z4 nastaje pri 0,030 rad, dok u slučaju tla Z3 rotacija nastaje kod 0,025 rad. Međutim, kada se radi o tlu Z2, tu maksimalna rotacija nastaje pri 0,015 rad, dok se kod tla Z1 rotacija javlja kod 0,010 rad.



Slika 14. Krivulje moment-kut zaokreta na donjem kraju stupa S111 u prizemlju za skalirane zapise ubrzanja potresa Loma Prieta za četiri kategorije tla s ubrzanjem tla od 0,4 g

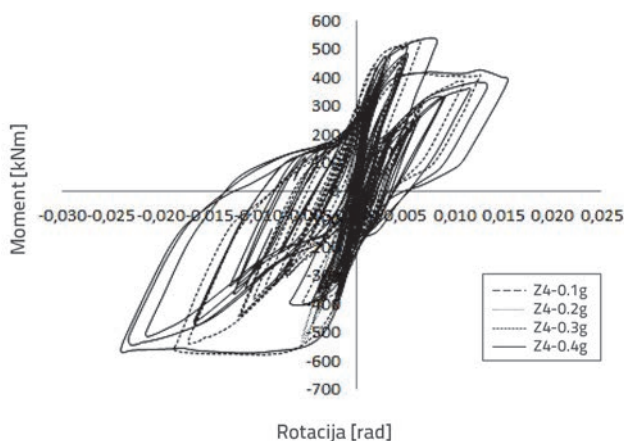


Krivulje moment-kut rotacije, dobivene za potres Imperial Valley, prikazane su na slici 15. Iz prikazanih rezultata se vidi da apsolutni maksimalni momenti iznose 500 kNm za maksimalno ubrzanje tla, i to za sve kategorije tla. Apsolutne maksimalne rotacije se javljaju pri 0,030, 0,020, 0,010 i 0,005 rad redom za kategorije tla Z4, Z3, Z2 i Z1.



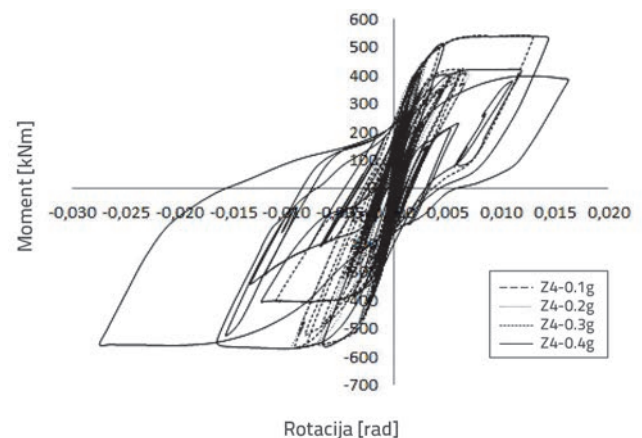
Slika 15. Krivulje moment-kut zaokreta na donjem kraju stupa S111 u prizemlju za skalirane zapise ubrzanja potresa Imperial Valley za četiri kategorije tla s ubrzanjem tla od 0,4 g

Krivulje moment-kut rotacije dobivene su za razna ubrzanja tla i za kategoriju mekog tla (Z4) za donji kraj stupa S211 u prizemlju. Krivulje moment-kut rotacije prikazane su na slikama od 16. do 18. Krivulje moment-kut rotacije, dobivene za potres Kocaeli, prikazane su na slici 16. za kategoriju tla Z4 i za razne vrijednosti ubrzanja tla. Može se uočiti da se apsolutne maksimalne vrijednosti momenta javljaju pri razini od 500 kNm, dok se apsolutne maksimalne vrijednosti rotacije javljaju pri 0,025 rad za ubrzanje tla od 0,4g. Međutim, za ubrzanje od 0,3g maksimalni moment se javlja pri 550 kNm dok se maksimalna rotacija javlja pri 0,15 rad. Slični momenti su dobiveni za ubrzanja od 0,1g i 0,2g. Osim toga, za ta ubrzanja su zabilježene rotacije od 0,005 rad.



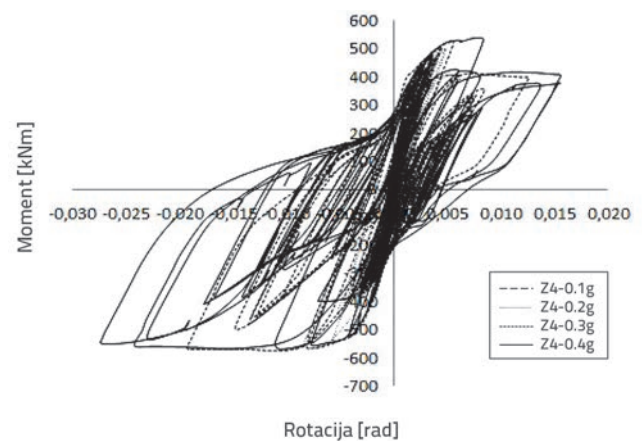
Slika 16. Krivulje moment-kut rotacije na donjem kraju stupa S211 u prizemlju za skalirane zapise ubrzanja potresa Kocaeli za kategoriju tla Z4 i četiri ubrzanja tla

Krivulje moment-kut rotacije određene za kategoriju tla Z4 i razna ubrzanja tla, prikazani su za skalirani potres Loma Prieta na slici 17. Rezultati pokazuju da se apsolutni maksimalni momenti za sva ubrzanja tla i za kategoriju tla Z4 javljaju kod približno 550 kNm. Međutim, apsolutne maksimalne rotacije se javljaju pri 0,030 rad za ubrzanje tla od 0,4g. Za ubrzanje od 0,3g apsolutna maksimalna rotacija iznosi 0,015 rad. Isto tako, rotacije od 0,010 rad i 0,005 rad zabilježene su za ubrzanja tla od 0,2g tj. 0,1g.



Slika 17. Krivulje moment-kut rotacije na donjem kraju stupa S211 u prizemlju za skalirane zapise ubrzanja potresa Loma Prieta za kategoriju tla Z4 i četiri ubrzanja tla

Krivulje moment-kut rotacije za donji kraj stupa S211 u prizemlju, dobivene za skalirani potres Imperial Valley, prikazane su na slici 18. Dobiveni rezultati pokazuju da su apsolutni maksimalni momenti vrlo izraženi i da se javljaju pri 550 kNm za kategoriju tla Z4 i za sva ubrzanja tla. Apsolutne maksimalne rotacije se javljaju pri 0,025, 0,020 i 0,005 rad redom za ubrzanja tla od 0,4g, 0,3g, 0,2g i 0,1g.



Slika 18. Krivulje moment-kut rotacije na donjem kraju stupa S211 u prizemlju za skalirani zapis ubrzanja potresa Imperial Valley za kategoriju tla Z4 i četiri ubrzanja tla

Tablica 7a. Stopa trošenja energije za ubrzanje tla od 0,4 g i razne kategorije tla

Promatrani zglob	Potresi	Količina energije [kJNm]			
		Ubrzanje tla = 0,4 g			
		Z1	Z2	Z3	Z4
Donji kraj stupa S111	Kocaeli	8,312	13,597	32,392	57,777
	Loma Prieta	4,826	10,816	26,931	40,868
	Imperial Valley	3,869	8,696	27,230	61,294

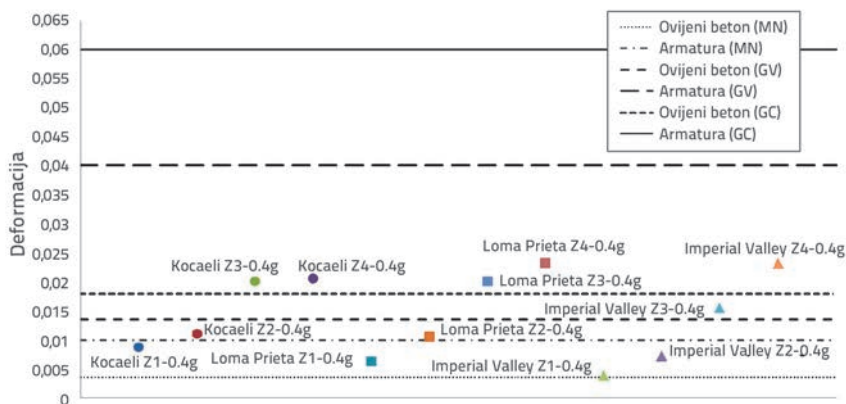
Tablica 7b. Stopa trošenja energije za kategoriju tla Z4 i razna ubrzanja tla

Promatrani zglob	Potresi	Količina energije [kJNm]			
		Kategorija tla Z4			
		0,1g	0,2g	0,3g	0,4g
Donji kraj stupa S211	Kocaeli	2,919	7,410	32,612	59,414
	Loma Prieta	2,601	9,194	20,391	44,293
	Imperial Valley	2,207	12,472	38,542	63,665

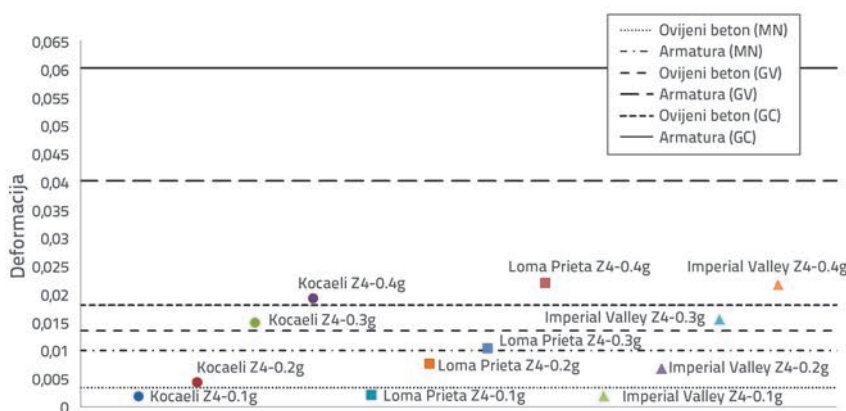
Količina energije potrošene u zglobovima na donjem kraju stupova S111 i S211 u prizemlju za ubrzanje tla od 0,4g i razne kategorije tla te za kategoriju tla Z4 i razna ubrzanja tla prikazana je u tablicama 7.a i 7.b. Iz tablica se može vidjeti da se na donjem kraju stupa S111 u prizemlju i za potrese skalirane na 0,4g povećava količina raspršene energije za otprilike 7 do 20 puta za omjer kategorija tla Z4/Z1. Međutim, za donji kraj stupa S211 u prizemlju i za kategoriju tla Z4 količina potrošene energije raste za 20 do 30 puta za omjer ubrzanja tla 0,4g / 0,1g, za promatrane skalirane potrese.

Prema [12], oštećenje se određuje u ovisnosti o razini deformacije. Ograničenja koja se odnose na razine oštećenja zaštitnog sloja betona, betona jezgre i čeličnih šipki prikazana su u tablici 2. Slike 19. i 20. prikazuju granice oštećenja za ovijeni beton i čeličnu šipku, te deformacije sukladno skaliranim zapisima potresa za donje krajeve stupova S111 i S211 u prizemlju. Iz tih slika se može vidjeti da za slučaj donjeg kraja stupa S111, deformacije dobivene za ubrzanje tla od 0,4g i za kategorije tla Z3 i Z4 premašuju granicu popuštanja (GC) ovijenog betona. Međutim, minimalne deformacije se javljaju za kategoriju tla Z1 pri ubrzanju tla od 0,4 g, gdje te vrijednosti ostaju ispod granice minimalnog oštećenja (MN) za čelične šipke. Za donji kraj stupa S211, deformacije proračunate za kategoriju tla Z4 i ubrzanje tla od 0,4g premašuju granicu popuštanja (GC) za ovijeni

beton. Minimalne deformacije se javljaju za kategoriju tla Z4 pri ubrzanju tla od 0,1g, gdje te vrijednosti ostaju ispod granice minimalnog oštećenja (MN) ovijenog betona.



Slika 19. Granice oštećenja i deformacije za skalirane potrese za donji kraj stupa S111 u prizemlju



Slika 20. Granice oštećenja i deformacije za skalirane potrese za donji kraj stupa S211 u prizemlju

#### 4. Zaključak

U ovom radu je pomoću modela raspodijeljenih plastičnih zglobova, i sukladno turskim potresnim normama istražen utjecaj potresnih zona i lokalnih uvjeta u tlu na nelinearno potresno ponašanje armiranobetonskih zgrada. Za potrebe numeričke analize odabran je primjerak okvirne armiranobetonske zgrade te su obavljani nelinearni dinamički proračuni odziva u vremenu. Odabrana su tri zapisa potresnog ubrzanja koji su prilagođeni tako da budu kompatibilni s proračunskim spektrom definiranim u turskim potresnim normama za razine potresne zone i lokalne uvjete u tlu. Obavljena je usporedba međukatnih pomaka, ukupnih poprečnih sila u podnožju zgrade, krivulja moment-kut rotacije, te trošenja energije na donjim krajevima dva stupa u prizemlju. Na temelju dobivenih rezultata mogu se dati sljedeći zaključci:

- Povećanje kategorije tla od Z1 do Z4 dovodi do bitnog povećanja predominantnog perioda potresa. Stoga su predominantni periodi skaliranih zapisa za kategorije tla Z3 i Z4 bliske prvim prirodnim periodima zgrade. Iz toga proizlazi da potresi na zgrade djeluju vrlo štetno.
- Ukupne poprečne sile pokazuju tendenciju rasta od Z1 do Z4 za isto ubrzanje tla. Također je utvrđeno da omjer porasta ukupne poprečne sile varira ovisno o svojstvima potresa.
- Što se tiče međukatnih pomaka, razine potresne aktivnosti su kritične za kategorije mekog tla. Međutim, za analizirane zgrade, kategorije tla mogu biti relativno kritičnije u odnosu na razine potresne aktivnosti kada se radi o potresima s malim amplitudama.

- Apsolutne vrijednosti maksimalnog momenta gotovo su identične za sve kategorije tla pri maksimalnom ubrzanju tla, dok apsolutne vrijednosti maksimalne rotacije variraju u nelinearnim analizama zgrade ovisno o potresu na koji se odnosi ispitivanje.
- Apsolutne vrijednosti maksimalnog momenta gotovo su identične pri raznim ubrzanjima tla u slučaju iste kategorije tla jer dosežu kapacitetni moment, dok apsolutne vrijednosti maksimalne rotacije variraju.
- Količina potrošene energije se bitno povećava s povećanjem kategorije tla i ubrzanja tla.
- Maksimalne deformacije su dobivene za ubrzanja tla od 0,3g i 0,4g za kategoriju tla Z4, i to za sve analizirane zapise. Međutim, minimalne deformacije su se javile za kategorije tla Z4 i Z1 redom pri ubrzanjima tla od 0,1g tj. 0,4g.

Rezultati pokazuju da potresne zone i lokalni uvjeti bitno utječu na nelinearni odziv armiranobetonskih zgrada. Stoga se potresne zone trebaju analizirati zajedno s lokalnim uvjetima u tlu prilikom projektiranja novih armiranobetonskih zgrada, tj. pri analizi postojećih zgrada.

#### Zahvale

Autori zahvaljuju SeismoSoftu na ustupanju besplatne akademske licencije za programe SeismoStruct i SeismoArtif te za probnu inačicu programa SeismiSignal.

#### LITERATURA

- [1] Sezen, H., Whittaker, A.S., Elwood, K.J., Mosalam, K.M.: Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practice in Turkey, *Engineering Structures*, 25(1), pp.103-114, 2003., [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00121-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00121-9)
- [2] Doğançın, A.: Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl earthquake in Turkey, *Engineering Structures*, 26(6), pp. 841-856, 2004., <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.02.005>
- [3] Kim, S.J., Elnashai, A.S.: Characterization of shaking intensity distribution and seismic assessment of RC buildings for the Kashmir (Pakistan) earthquake of October 2005, *Engineering Structures*, 31, pp. 2998-3015, 2009., <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.001>
- [4] Zhao, B., Taucer, F., Rossetto, T.: Field investigation on the performance of building structures during the 12 May 2008 Wenchuan earthquake in China, *Engineering Structures*, 31, pp. 1707-1723, 2009., <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.039>
- [5] Rojas, F., Naeim, F., Lew, M., Carpenter, L.D., Youssef, N.F., Saragoni, G.R., Adaros, M.S.: Performance of tall buildings in Concepción during the 27 February 2010 moment magnitude 8.8 offshore Maule, Chile earthquake, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20, pp. 37-64, 2011., <http://dx.doi.org/10.1002/tal.674>
- [6] O'Brien, P., Eberhard, M., Haraldsson, O., Irfanoglu, A., Lattanzi, D., Lauer, S., Pujol, S.: Measures of the Seismic Vulnerability of Reinforced Concrete Buildings in Haiti, *Earthquake Spectra*, 27 (S1), pp. 373-386, 2011.
- [7] Calayır, Y., Sayın, E., Yön, B.: Performance of structures in the rural area during the March 8, 2010 Elazığ-Kovancılar earthquake, *Natural Hazards*, 61(2), pp. 703-717, 2012., <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-0056-6>
- [8] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Pehlivan, M.: Performance and damages of reinforced concrete buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 53, pp. 49-72, 2013., <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.06.004>
- [9] Yön, B., Sayın, E., Köksal, T.S.: Seismic response of buildings during the May 19, 2011 Simav, Turkey earthquake, *Earthquakes and Structures*, 5 (3), pp. 343-357, 2013., <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2013.5.3.343>
- [10] Galal, K., Naimi, M.: Effect of soil conditions on the response of reinforced concrete tall structures to near fault earthquakes, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17, pp. 541-562, 2008., <http://dx.doi.org/10.1002/tal.365>
- [11] Jiang, H., Lu, X., Chen, L.: Seismic fragility assessment of RC moment-resisting frames designed according to current Chinese seismic design code, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 11-1, pp. 153-160, 2012.

- [12] Turkish Seismic Code, Ankara, Turkey, 2007.
- [13] Mwafy, A.M., Elnashai, A.S.: Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings, *Engineering Structures*, 23, pp. 407–424, 2001., [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00068-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00068-7)
- [14] Taucer, F.F., Spacone, E., Filippou, F.C.: A Fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures", Report No. UCB/EERC-91/17, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California Berkeley, 1991.
- [15] Petrangeli, M.: Fiber element for cyclic bending and shear of RC structures, II: Verification, *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 125 (9), pp. 1002–1009, 1999., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1999\)125:9\(1002\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:9(1002))
- [16] Jeong, S.H., Elnashai, A.S.: Analytical assessment of an irregular RC frame for full-scale 3d pseudo-dynamic testing part i: analytical model verification, *Journal of Earthquake Engineering*, 9 (1), pp. 95–128, 2005., <http://dx.doi.org/10.1080/13632460509350535>
- [17] Mwafy, A.: Assessment of seismic design response factors of concrete wall buildings, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 10, pp. 115–127, 2011., <http://dx.doi.org/10.1007/s11803-011-0051-7>
- [18] Duan, H., Hueste, M.B.D.: Seismic performance of a reinforced concrete frame building in China, *Engineering Structures*, 41, pp. 77–89, 2012.
- [19] Kwon, O.S., Kim, E.: Case study: Analytical investigation on the failure of a two-story RC building damaged during the 2007 Pisco-Chincha earthquake, *Engineering Structures*, 32, pp. 1876–1887, 2010., <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.022>
- [20] Sarno, L.D., Manfredi, G.: Seismic retrofitting with buckling restrained braces: Application to an existing non-ductile RC framed building, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, pp. 1279–1297, 2010., <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.001>
- [21] Yön, B., Calayır, Y.: Pushover Analysis of a Reinforced Concrete Building According to Various Hinge Models, 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, Tirana, pp. 1–10, 2013.
- [22] Carvalho, G., Bento, R., Bhatt, C.: Nonlinear static and dynamic analyses of reinforced concrete buildings - comparison of different modelling approaches, *Earthquakes and Structures*, 4 (5), pp. 451–470, 2013., <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2013.4.5.451>
- [23] Yön, B., Calayır, Y.: Effects of confinement reinforcement and concrete strength on nonlinear behaviour of RC buildings, *Computers and Concrete*, 14(3), pp. 279–297, 2014., <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2014.14.3.279>
- [24] SeismoStruct v7: A computer program developed for the accurate analytical assessment of structures, subjected to earthquake strong motion. Available at: [www.seismosoft.com](http://www.seismosoft.com) [September 8, 2014]
- [25] SeismoArtif v2.1: A computer program for generating artificial earthquake accelerograms matched to a specific target response spectrum. Available at: [www.seismosoft.com](http://www.seismosoft.com) [July 19, 2013]
- [26] TS 498: Design Loads for Buildings, Turkish Standards Institute, Ankara, Turkey
- [27] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, pp. 1804–1826, 1988., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- [28] PEER Strong Ground Motion Database, [peer.berkeley.edu/smcat/search.html](http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html)
- [29] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings
- [30] SeismoSignal v5.1 - A computer program for the processing of strong-motion data. Available at: [www.seismosoft.com](http://www.seismosoft.com) [July 19, 2013]