

Primljen / Received: 14.5.2018

Ispravljen / Corrected: 20.1.2019

Prihvaćen / Accepted: 2.3.2019.

Dostupno online / Available online: 31.8.2019.

Metoda za procjenu seizmičkog ponašanja srednje visokih AB građevina

Autori:



Prof.dr.sc. **Halil Görgün**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Dicle, Turska
Građevinski fakultet
hgorgun@dicle.edu.tr



Derman Kaya, dipl.ing.građ.
Institucija socijalnog osiguranja
Diyarbakir, Turska
dermankaya1986@myynet.com



Doc.dr.sc. **Mehmet Emin Öncü**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Dicle, Turska
Građevinski fakultet
oncume@dicle.edu.tr



Dr.sc. **Senem Yılmaz Çetin**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Dicle, Turska
Građevinski fakultet
senyilmaz@dicle.edu.tr

Prethodno priopćenje

Halil Görgün, Derman Kaya, Mehmet Emin Öncü, Senem Yılmaz Çetin

Metoda za procjenu seizmičkog ponašanja srednje visokih AB građevina

Jaki potresi zabilježeni u Turskoj tijekom posljednjih pet desetljeća pokazuju da je većina postojećih zgrada nedovoljno otporna na njihovo djelovanje. U ovom se radu predlaže pojednostavljena inačica brze metode za procjenu seizmičkog ponašanja građevine (PERA) za analizu srednje visokih armiranobetonskih zgrada. Prilikom procjene ponašanja čitave građevine u obzir se uzima i utjecaj kritičnog kata. Postignuta je dobra podudarnost između predviđanja dobivenih pojednostavljenom metodom, metodom PERA i postupcima za procjenu ponašanja konstrukcija koji se temelje na odgovarajućim propisima.

Ključne riječi:

potres, procjena ponašanja, AB, Smithova metoda

Research Paper

Halil Görgün, Derman Kaya, Mehmet Emin Öncü, Senem Yılmaz Çetin

Performance-based seismic assessment method for medium-rise RC buildings

Severe earthquakes registered in Turkey over the last five decades have shown that most of the existing buildings exhibit low resistance to earthquake action. In this study, a simplified version of the performance based rapid seismic assessment method (PERA) is proposed for the analysis of medium-size reinforced-concrete buildings. The influence of a critical storey is also considered when evaluating performance of the entire building. Good agreement is obtained between predictions by the simplified method, the PERA method, and the code based structural performance assessment procedures.

Key words:

earthquake, performance evaluation, RC, Smith method

Vorherige Mitteilung

Halil Görgün, Derman Kaya, Mehmet Emin Öncü, Senem Yılmaz Çetin

Eine Methode zur Bewertung des Erdbebenverhaltens von mittelhohen Stahlbeton-Gebäuden

Die starken Erdbeben, die in den letzten fünf Jahrzehnten in der Türkei verzeichnet wurden, zeigen, dass die meisten vorhandenen Gebäude ihren Einflüssen nicht ausreichend standhalten. In dieser Arbeit wird eine vereinfachte Version der Methode für die Bewertung des Erdbebenverhaltens von Gebäuden (PERA) zur Analyse von mittelhohen Stahlbeton-Gebäuden vorgeschlagen. Bei der Bewertung des Verhaltens eines gesamten Gebäudes werden auch die Auswirkungen des kritischen Stockwerks berücksichtigt. Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den Vorhersagen aufgrund der vereinfachten Methode, der PERA-Methode und der Verfahren zur Bewertung des Verhaltens von Bauwerken auf der Grundlage der einschlägigen Vorschriften erzielt.

Schlüsselwörter:

Erdbeben, Bewertung des Verhaltens, Stahlbeton, Smith-Methode

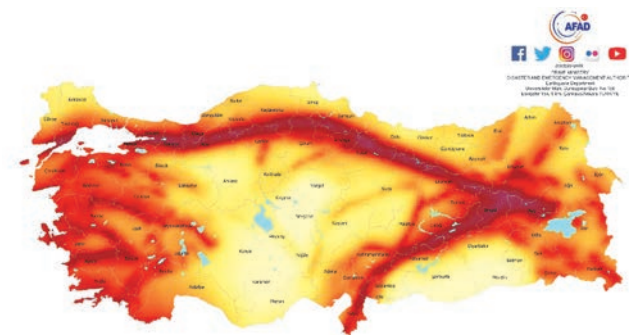
1. Uvod

Potresi zabilježeni u proteklih pedeset godina, kao što su Lice/Diyarbakır-Turska (1975.) magnitude 6.6, Spitak-Armenija (1988.) magnitude 7.0, Marmara-Turska (1999.) magnitude 7.4, Gujarat-Indija (2001.) magnitude 7.9, Sumatra-Indonezija (2004.) magnitude 9.1, Kašmir-Pakistan (2005.) magnitude 7.6, Sichuan-Kina (2008.) magnitude 7.9, Haiti (2010.) magnitude 7.0, Tohoku-Japan (2011.) magnitude 9.0, Erciș/Van-Turska (2011.) magnitude 7.2, Pakistan (2013.) magnitude 7.8 i Iran-Irak (2017.) magnitude 7.3, jasno pokazuju da su mnoge građevine smještene u seizmički aktivnim područjima diljem svijeta, a naročito u manje razvijenim ili nerazvijenim državama, ugrožene djelovanjem potresa. Zbog toga se stanje sigurnosti tih građevina treba procijeniti, a u tom kontekstu valja napomenuti da je Turska smještena duž vrlo aktivnih rasjednih linija, kao što su sjevernoanatolijski rasjed i istočnoanatolijski rasjed, te da su područja duž tih rasjednih linija gusto naseljena. Prema konačnoj službenoj procjeni turske vlade, 66 % državnog teritorija nalazi se u prvoj i drugoj seizmičkoj zoni, a u tim područjima živi otprilike 71 % stanovnika. Karta aktivnih rasjednih linija u Turskoj ažurirana je 21 godinu nakon prethodne karte (slika 1.).

Iako u Turskoj postoji 326 aktivnih rasjeda, na 485 segmenata magnitude mogu iznositi 5.5 ili više. Seizmička otpornost postojećih građevina ne može se odrediti brzo ako se provode postupci naznačeni u Turskom zakonu o protupotresnoj zaštiti (TSC 2007 [1]) i Propisima za određivanje rizičnih građevina (RDRS) [2]. Stoga se s provođenjem postupka obnove gradskih sredina u Turskoj pokazala potreba za primjenu jednostavnih i brzih, a i dalje dovoljno pouzdanih metoda. Metode i postupci za procjenu ugroženih građevina pomoću metode RDRS (eng. *Regulation on the Determination of Risky Structures - RDRS*) [2] prikazani su na slici 2. U odgovarajućoj su literaturi prikazane brojne metode za procjenu seizmičke sigurnosti.

Metode prvog stupnja su brže, a metode drugog stupnja su sporije ali pouzdanije. Metode savezne agencije za upravljanje u kriznim situacijama (FEMA P-154 i FEMA P-155) [3-7], te metode prikazane u radu Sucuoğlu i dr. [8] daju jednostavne postupke koji se temelje na vizualnom pregledu građevina.

Cilj je odrediti broj seizmički ugroženih građevina te njihov razmještaj u gradskoj aglomeraciji primjenom postupka brzog vizualnog pregleda (eng. *rapid visual screening - RVS*), nakon čega se provodi rangiranje seizmičkog rizika građevina i to samo na temelju pregleda vanjskog izgleda, dakle bez ulaska u građevinu, primjenom jednostavnih vizualnih kriterija. Dobiveni podaci obrađuju se pomoću "radnog obrasca za brzu vizualnu procjenu". Temeljem tog obrasca procjenjuje se seizmičko ponašanje građevine. Takav način analize i "metoda uličnog pregleda" provedena je iz drugačije perspektive u radu [8]. U svojoj metodi za procjenu rizika, ti su autori razvili odgovarajući slijed rizika, primjenom parametara o građevini koji se mogu utvrditi vizualnim pregledom izvana, a to su primjerice broj katova, meki katovi, značajna izbočenja (konzole) i vizualno uočljiva kvaliteta građevine.



Slika 1. Seizmička karta Turske [9]



Slika 2. Postupci i radnje pri procjeni rizičnih građevina (Ministarstvo okoliša i urbanizacije Republike Turske) [10]

Metode kao što su japanska metoda za definiranje seizmičkog indeksa [11], Hassanova i Sozenova metoda [12], Yakutova metoda [13], metoda P25 [14] i metoda Novozelandskog društva za potresno inženjerstvo [15], mogu se primjenjivati u analizi kada su građevine suviše gusto raspoređene te u slučaju vremenskih i materijalnih ograničenja. U literaturi nalazimo brojna istraživanja u kojima se razmatra mogućnost prilagodbe japanske metode za definiranje seizmičkog indeksa na građevine u Turskoj [16-20]. Favvata i dr. [21], Ni [22] te Ozmen i Inel [23] analizirali su neelastične utjecaje na parametre brze vizualne procjene na seizmičko ponašanje AB građevina. Priestley [24], Chandler i Mendis [25], Lervolino i dr. [26], Ruiz-Garcia i Miranda [27] te Jeong i dr. [28] predložili su metode za seizmičku procjenu temeljenu na probablističkom pristupu. Drugi su istraživači uspoređivali razne metode procjena (Lupoi i dr. [29] i Kalkan i Kunnath [30]). Osim toga, metode za analizu seizmičkog ponašanja postojećih građevina prikazane su i u raznim propisima i uputama (npr.: TSC 2007; NZSEE 2012 Eurokod 8, 3. dio; ASCE 41) [1, 15, 31, 32]. Ti se pristupi detaljno analiziraju u radu Ilkija i dr. [33].

Osim detaljne konstrukcijske analize koja može biti dugotrajna i zahtjevna u pogledu računalnih resursa, istraživanja vezana za terenske preglede građevina su potrebna u slučaju kada se ove metode primjenjuju za velik broj seizmički osjetljivih građevina u zemljama u razvoju. Ilki i dr. [33] predložili su jednostavniju metodu koja na minimum svodi opseg terenskog istraživanja. U toj je metodi jednostavniji pristup, a i pouzdanija je od ostalih metoda koje se predlažu u literaturi. Za potresno se djelovanje predlaže primjena prvog oblika titranja kod pretežno

armiranobetonskih okvirnih konstrukcija. Metoda se temelji na koncepciji prostornog utjecaja elemenata te uključuje razna pojednostavljenja i pretpostavke u okviru statičkog proračuna i procjene ponašanja. U toj se metodi koristi Mutovo načelo i kriterij ponašanja predložen u propisima TSC 2007 [1].

Uzete su u obzir određene pretpostavke o tipu elemenata, promjeru i razmještanju uzdužne i poprečne armature, posmičnoj i aksijalno-fleksijskoj čvrstoći stupova, kvaliteti betona, geometrijskim omjerima, te o rasporedu stupova. Kako se procjena seizmičke sigurnosti temelji na zakonu TSC 2007 [1], na minimum se svode mogući problemi, često prisutni kod drugih metoda za brzu procjenu, kao što je na primjer neusklađenost s regulativom [33].

2. Postupak PERA

Podaci prikupljeni tijekom nedavnih potresa jasno pokazuju da je velik broj građevina smještenih u seizmički aktivnim područjima osjetljiv na potresno djelovanje [33]. Kako bi se izbjegle katastrofalne posljedice potresa, građevine osjetljive na seizmička djelovanja trebaju se kategorizirati te se trebaju poduzeti odgovarajuće preventivne mjere. U tom se kontekstu trebaju prezentirati brzi, učinkoviti i financijski povoljni postupci, te usporediti s uobičajenim postupcima seizmičke procjene koji se baziraju na zakonskim odredbama. Mnoge pretpostavke koje se odnose na AB okvirne konstrukcije izgrađene u Turskoj spomenute su u metodi [33]. Međutim, moguće je da će trebati neke izmjene ako se metoda primjenjuje u drugim državama. Ipak, može se reći da je metodologija Ilkija i dr. [33] općenito korisna za sva seizmička područja u kojima ima mnogo armiranobetonskih građevina.

U metodi Ilkija i dr. [33] procjenjuje se seizmičko ponašanje AB okvirnih građevina prema načelima za procjenu ponašanja sadržanima u propisu TSC 2007. U propisu TSC 2007 [1] u obzir se uzimaju nepravilnosti građevine i detaljne karakteristike konstrukcije, kao i lokalna kategorija tla te seizmička zona u kojoj se građevina nalazi. Kako bi se odredilo ponašanje zgrade, trebaju se odrediti omjeri zahtjeva/nosivosti konstrukcijskih elemenata. Najprije se određuju zahtjevi u pogledu elastičnih unutarnjih sila i kapaciteta nosivosti, a zatim se za svaki element izračunavaju omjeri zahtjeva/nosivosti. Nakon toga slijedi određivanje razine oštećenja elementa ovisno o omjeru zahtjeva/nosivosti i međukatnom pomaku. Prilikom određivanja razine opterećenja, u obzir se uzimaju očekivani načini popuštanja konstrukcijskih elemenata, svojstva učvršćenja (zona poprečne armature), te razine uzdužnih i posmičnih sila. Na kraju se određuje razina seizmičke otpornosti građevine.

Po pristupu koji se u njoj primjenjuje, metoda PERA (eng. *performance based rapid seismic assessment* - PERA) [33] slična je metodi koja se predlaže u propisu TSC 2007 [1]. Prema toj metodi, vrijeme trajanja pregleda na terenu bitno je skraćeno, a postupci analize i procjene su pojednostavljeni. U okviru metode se procjenjuje razina oštećenja stupova prizemlja i međukatovima. Fleksijska čvrstoća i nosivost greda procjenjuje se na temelju količine armature i mjerenja greda te vizualnog

pregleda na tipičnim konstrukcijama građevine. Osim toga, u metodi se pretpostavlja razmještanje armature kao i kod stupova. Konstrukcijske nepravilnosti prikazane u tablici 1. prema propisu TSC 2007 [1], uzimaju se u obzir u metodi PERA [33] preko penalizacijskih koeficijenata. Količina podataka manja je od količine potrebne u spomenutim brzim i preliminarnim metodama. Algoritam je realniji od onog koji se koristi u uobičajenim metodama i to zbog određivanja kvalitete betona temeljem određenog broja ispitivanja, odgovarajućeg razmaka spona i vrste armature, te korištenja različitih načina usporedbe.

Tablica 1. Penalizacijski koeficijenti za konstrukcijske nepravilnosti

Nepravilnost	Penalizacijski koeficijenti
A - Tlocrtne nepravilnosti	
A1 - Torzijska nepravilnost	0,85
A2 - Diskontinuirana podna konstrukcija	0,95
A3 - Konzole u tlocrtu	0,95
B - Visinske nepravilnosti	
B1 - Nedostatna čvrstoća međukatne konstrukcije (slabi kat)	0,95
B2 - Nedostatna krutost međukatne konstrukcije (mekani kat)	0,85
B3 - Diskontinuitet vertikalnih konstrukcijskih elemenata	0,95

Kada se primjenjuje metoda PERA [33], pretpostavlja se da je prizemlje građevine kritični kat za seizmičko djelovanje, kako je i definirano u propisu RDRS [2]. Osnovna posmična sila (V_b) prikazana je u jednadžbi (1), gdje je A_0 (tablica 2.) ubrzanje tla, W je težina građevine ($G + 0,3Q$), G je stalno opterećenje, a Q je korisno opterećenje. Koeficijent spektra $S(T)$ definiran je u propisu TSC 2007 (slika 3.). Vrijednosti T_A i T_B su rubni periodi (tablica 3.). Prirodni period titranja građevine procijenjen je pomoću izraza (2). Koeficijent 0,85 koristi se u izrazu (1) za definiranje utjecaja visokih oblika titranja koji se primjenjuju u pristupu TSC 2007. Vrijednost n iskazana u izrazu (2) predstavlja broj katova koji sudjeluju u prvom obliku titranja za promatrani smjer. Detaljniji i složeniji se proračun može napraviti kako bi se odredili prirodni oblici titranja konstrukcije.

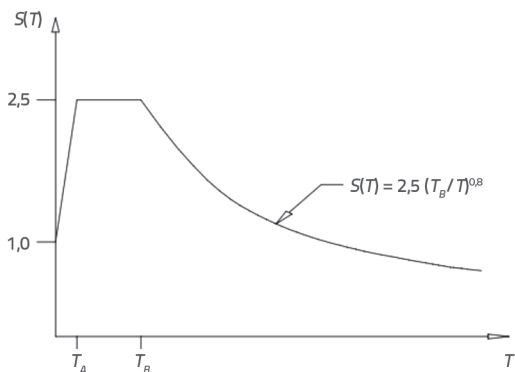
$$V_b = 0,85 \cdot W \cdot S(T) \cdot A_0 \quad (1)$$

$$T = 0,2n \quad (2)$$

Tablica 2. Koeficijent ubrzanja tla (A_0) (TSC 2007) [1]

Seizmička zona*	A_0
1	0,40
2	0,30
3	0,20
4	0,10

*1: Visoka, 2: Srednja, 3: Mala, 4: Niska



Slika 3. Proračunski spektar odziva predložen u TSC 2007 [1]

Tablica 3. Karakteristični periodi spektra (T_A, T_B) (TSC 2007) [1]

Kategorija lokalnog tla	T _A [s]	T _B [s]
Z1	0,10	0,30
Z2	0,15	0,40
Z3	0,15	0,60
Z4	0,20	0,90

V_{ij} je posmična sila stupa, izraz (3), h_i je visina stupova prizemlja, a I_i je moment inercije stupova prizemlja. Koeficijent γ je sažeti prikaz vrijednosti γ₀ + γ₁ + γ₂ + γ₃, a izračunava se prema izrazu (4) gdje je γ₀ koeficijent točke infleksije.

$$V_{ij} = V_b \left(\frac{I_i}{h_i^3} \right) \left(\frac{\sum I_i}{\sum h_i^3} \right) \quad (3)$$

$$V = V_0 + V_1 + V_2 + V_3 \quad (4)$$

Tablica 4. Koeficijent točke infleksije (γ₀) ovisno o omjeru krutosti (k̄) grede i stupa

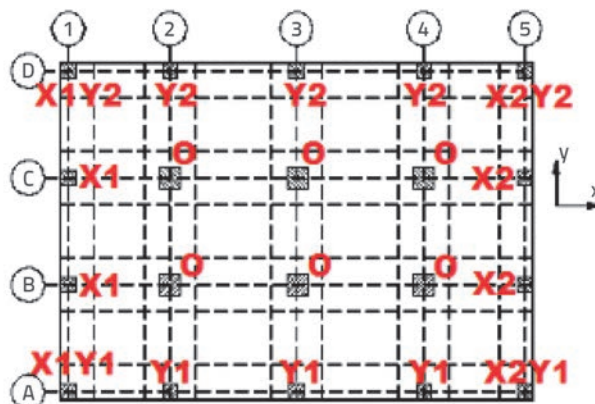
Broj katova	k̄	γ ₀													
		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
1	0,80	0,75	0,70	0,65	0,65	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
2	0,95	0,80	0,75	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,60	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,50
3	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
4	1,10	0,90	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
5	1,20	0,95	0,80	0,75	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
6	1,20	0,95	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
7	1,20	0,95	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
8	1,20	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
9	1,20	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55

U metodi PERA [33] pretpostavlja se da y = y₀, a koeficijenti γ₁ + γ₂ + γ₃ se ne uzimaju u obzir. Vrijednosti iskazane su u Mutovoj metodi (tablica 4.) [34] za opterećenje vjetrom i seizmičko opterećenje. Koeficijent krutosti (k̄) iskazan je u izrazu (5), gdje vrijednosti k₁ i k₂ označavaju krutost grede, a k_c krutost stupa. Što se tiče utjecaja pojave pukotina na krutost, pretpostavlja se da je greda element pravokutnog presjeka. Većina tih pretpostavki usvojena je kako bi se omogućila brza procjena građevine te ubrzala i pojednostavnila istraživanja na terenu [33].

$$\bar{k} = \frac{k_2}{k_{ci}} \quad (\text{za vanjske stupove}) \quad (5)$$

$$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2}{k_{ci}} \quad (\text{za unutarnje stupove})$$

U metodi PERA [33], prve i posljednje (vanjske) osi označene su s x₁, x₂ u smjeru x te s y₁, y₂ u smjeru y. Oznake kutnih stupova su x₁y₁, x₂y₁ itd.. (slika 4.).



Slika 4. Oznake stupova (kutni, rubni i unutarnji)

Zahtjev posmične sile stupa (V_{ei}) izračunava se pomoću izraza (6). M_{rbi} i M_{rti} označavaju kapacitete nosivosti stupa na dnu tj. na vrhu poprečnog presjeka. M_k je zahtjev za moment nosivosti stupa grede. M_{ri} i M_{rj} su momenti nosivosti na krajevima grede, izrazi (7), (8) i (9).

$$V_{ei} = \frac{M_{rbi} + M_{rti}}{L_{ni}} \quad (6)$$

$$M_v = \min(M_{rt}, M_k) \quad (7)$$

$$M_k = M_{ri}/2 \quad (\text{za vanjske stupove}) \quad (8)$$

$$M_k = (M_{rj} + M_{ri})/2 \quad (\text{za unutarnje stupove}) \quad (9)$$

U izrazima (10) i (11), r_{1i} i r_{2i} su omjeri zahtjeva i nosivosti stupova. Razine oštećenja određuju se pomoću tablice 5. U toj tablici MN označava minimalno oštećenje, SL je granica sigurnosti, a FL je granica otkazivanja. Granica oštećenja određuje se prema koeficijentu relativnog katnog pomaka (tablica 6.).

$$r_{1i} = \frac{V_{ei}}{V_{ri}} \quad (10)$$

$$r_{2i} = \frac{M_{ei}}{M_{ri}} \quad (11)$$

Tablica 5. Odnosi utjecaja i nosivosti (r_b) definiraju granicu oštećenja za armiranobetonske stupove (TSC 2007) [1]

Duktilni stupovi			Granica oštećenja		
$\frac{N_k}{A_c f_{cm}}$	Učvršćenje	$\frac{V_e}{bdf_{cm}}$	MN	SL	FL
$\leq 0,1$	Dostupno	$\leq 0,65$	3	6	8
$\leq 0,1$	Dostupno	$\geq 1,30$	2,5	5	6
$\geq 0,4$ i $\leq 0,7$	Dostupno	$\leq 0,65$	2	4	6
$\geq 0,4$ i $\leq 0,7$	Dostupno	$\geq 1,30$	1,5	2,5	3,5
$\leq 0,1$	Nedostupno	$\leq 0,65$	3,5	5	5
$\leq 0,1$	Nedostupno	$\geq 1,30$	2,5	3,5	3,5
$\geq 0,4$ i $\leq 0,7$	Nedostupno	$\leq 0,65$	2	3	3
$\geq 0,4$ i $\leq 0,7$	Nedostupno	$\geq 1,30$	1,5	2	2
$\geq 0,7$	-	-	1	1	1

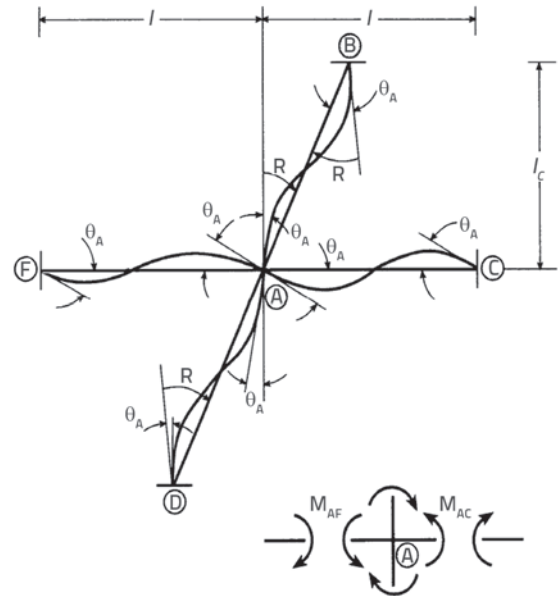
Tablica 6. Granice relativnog međukatnog pomaka (TSC 2007) [1]

Odnos relativnog katnog pomaka	Granica oštećenja		
	MN	SL	FL
	0,01	0,03	0,04

3. Predložena metoda

U ovom je radu izmijenjena brza metoda za seizmičku procjenu bazirana na ponašanju (PERA [33]). Stoga, ovdje se prikazuje alternativa metode PERA [33] koja se posebno odnosi na

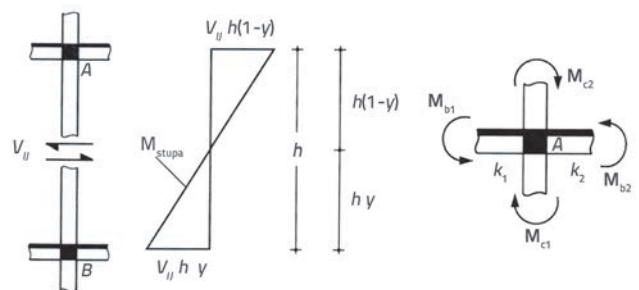
armiranobetonske okvirne građevine. U predloženoj metodologiji koriste se pristupi prikazani u dobro poznatoj Smithovoj metodi [35]. U toj se metodi točka infleksije deformacijske linije postiže u sredini svih elemenata okvira, što je shematski prikazano na slici 5.



Slika 5. Model podelemenata za neukrućeni (fleksibilan) okvir prema Smith-ovoj metodi [33]

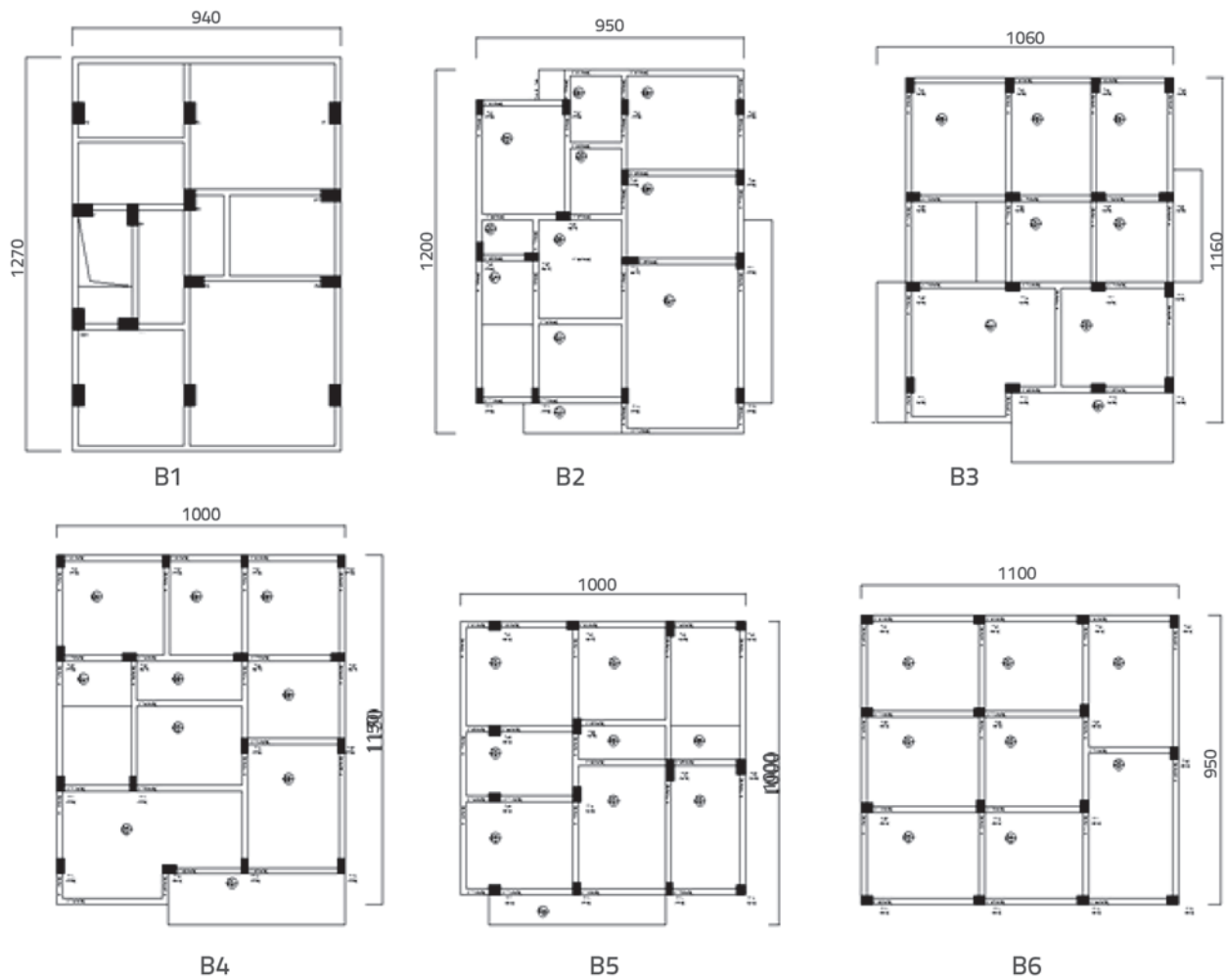
U Smithovoj je metodi prikazan pristup za određivanje točke infleksije grede i stupova. Navode se osnovne pretpostavke Smithove metode [35] (u odnosu na slike 5. i 6.):

- spojevi (A) i (C) su pravolinijski raspoređeni (uzdužna deformacija stupova je zanemariva)
- spojevi (A) i (D) su pravolinijski raspoređeni (stropne ploče su beskonačno krute u svojim ravninama)
- rotacije u spojevima (F) i (C) jednake su veličine
- rotacije na krajevima stupova jednake su veličine
- točka infleksije deformacijske linije nalazi se u sredini svih elemenata okvira, kao što se to vidi na slikama 5. i 6.



Slika 6. Varijacija seizmičkog momenta za grede i stupove

U Smithovoj je metodi [35] usvojeno da koeficijent infleksije iznosi $\gamma = \gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 0,50$, pa se tako točka nultog momenta



Slika 7. Tipski tlocrti postojećih građevina (prilagođeno na temelju Ozcelikova rada 2014.) [36] (dimenzije su u cm)

Tablica 7. Opće karakteristike analiziranih građevina

Građevina	Broj katova	Prosječne tlocrtne dimenzije [m]	Godina građenja	Klasa armature	Spone: Promjer/razmak [mm]	Zona učvršćenja
B1	4	9,4 x 12,7	1990.	S220	8/200	Da
B2	4	9,5 x 12,0	1990.	S220	8/200	Ne
B3	4	10,6 x 11,6	1990.	S220	8/200	Ne
B4	3	10,0 x 11,5	1990.	S220	8/200	Ne
B5	3	10,0 x 10,0	1990.	S220	8/200	Da
B6	3	11,0 x 9,5	1990.	S220	8/200	Ne
B7	3	8,6 x 10,2	1974.	S220	8/150	Ne
B8	3	9,5 x 9,0	1974.	S220	8/150	Da
B9	3	9,0 x 10,5	1974.	S220	8/150	Ne
B10	3	9,1 x 9,75	1979.	S220	8/150	Ne
B11	3	9,9 x 8,8	1979.	S220	8/150	Ne
B12	3	9,8 x 10,25	1979.	S220	8/150	Ne
B13	3	13,25 x 10,15	2001.	S420	8/300	Ne
B14	3	14,5 x 9,5	2003.	S420	8/120	Da
B15	3	9,4 x 14,7	2005.	S420	8/120	Da

nalazi na polovici visine stupa računajući od osnove stupa, slike 5. i 6. Ta je pretpostavka izuzetno značajna jer onemogućuje inženjerima zaposlenima u praksi primjenu krive vrijednosti, a ujedno se i štedi vrijeme koje bi bilo potrebno za izračunavanje pojedinačnih vrijednosti $V_0 + V_1 + V_2 + V_3$.

4. Rezultati i rasprava

Rezultati analize predložene metode uspoređeni su s metodama TSC 2007 [1], RDRS [2] i PERA [33]. Rezultati su dobiveni na temelju 720 analiza provedenih za 15 postojećih građevina (koje su opisane oznakama od B1 do B15) a nalaze se na lokaciji Başıskele/Kocaeli u Turskoj. Građevine B1-B6 istražio je Ozcelik 2014. [36], a građevine B7-B15 istražio je Vulas 2014 [37]. Tipiski tlocrti građevina B1-B6 prikazani su na slici 7., a osnovne karakteristike građevina B1-B15 iskazane su u tablici 7. Iz te se tablice vidi da su sve građevine locirane u prvoj seizmičkoj zoni. Prva seizmička zona definirana je kao zona visokog seizmičkog rizika. Visina analiziranih građevina varira od tri do četiri kata. Građevine su izgrađene uglavnom između 1975. i 2000. godine u skladu s propisom TSC 1975. [38]. U starijim zgradama, izgrađenima prije 2000. godine, korištena je armatura klase S220, dok je armatura klase S420 korištena u ostalim građevinama. Analizirane građevine podvrgnute su horizontalnom opterećenju u smjeru osnovnih ravninskih osi. Pretpostavljene su vrijednosti tlačne čvrstoće betona od 10, 14 i 20 MPa. U analizi su zasebno razmatrane kategorije tla Z2 i Z3 (tablica 3.).

Tablica 8. Sažeti prikaz predviđanja prema metodama TSC 2007 [1] i RDRS (2013) [2]

TSC 2007 [1] RDRS (2013.)	TSC 2007 [1]		
	Sigurno	Nesigurno	Ukupno
Sigurno	210	66	276
Nesigurno	33	411	444
Ukupno	243	477	720

Tablica 9. Sažeti prikaz predviđanja prema metodama TSC 2007 [1] i PERA [33]

TSC 2007 [1] PERA (2014.)	TSC 2007 [1]		
	Sigurno	Nesigurno	Ukupno
Sigurno	151	96	247
Nesigurno	92	381	473
Ukupno	243	477	720

Tablica 10. Sažeti prikaz predviđanja prema metodi TSC 2007 [1] i predloženoj metodi

TSC 2007 [1] Predložena metoda	TSC 2007 [1]		
	Sigurno	Nesigurno	Ukupno
Sigurno	192	145	337
Nesigurno	51	332	383
Ukupno	243	477	720

Tablica 11. Sažeti prikaz predviđanja prema predloženoj metodi i ostalim metodama

Metoda	Broj građevina		
	Sigurno	Nesigurno	Ukupno
TSC 2007 [1]	243 (34 %)	477 (66 %)	720 (100 %)
RDRS	276 (38 %)	444 (62 %)	720 (100 %)
PERA	247 (34 %)	473 (66 %)	720 (100 %)
Predložena metoda	337 (47 %)	383 (53 %)	720 (100 %)

Tablica 12. Sažeti prikaz predviđanja prema predloženoj metodi i ostalim metodama (slučajevi visokog i niskog rizika razmotreni su zasebno)

Metoda	Broj građevina		
	Sigurno	Nesigurno	Ukupno
TSC 2007	243 (100 %)	477 (100 %)	720 (100 %)
RDRS	210 (86 %)	411 (86 %)	621 (86 %)
PERA	151 (62 %)	381 (80 %)	532 (74 %)
Predložena metoda	192 (79 %)	332 (70 %)	524 (73 %)

Rezultati su dobiveni za 720 različitih slučajeva [15 (broj građevina) x 3 (C10, C14, C20) x 2 (Z2, Z3) x 2 (učvršćenje, bez učvršćenja) x 4 (smjerovi +X, -X, +Y, -Y)], a analizirano je 15 građevina. Svih 720 slučajeva analizirano je prema postupcima TSC 2007 [1] i RDRS [2] primjenom računalnog programa za proračun konstrukcija Sta4CAD [39], a analizu je proveo Ozcelik [36] za građevine B1-B6, dok je Vulas [37] analizirao građevine B7-B15. Osim toga, 720 analiza proveli su Ilki i dr. [33] pomoću metode PERA. Koraci analize predviđeni u postupku PERA [33] primijenjeni su u ovom radu, a pritom je Mutova metoda [34] zamijenjena Smithovom metodom [35].

U tablicama od 8. do 12. uspoređeni su rezultati dobiveni za 720 različitih slučajeva pomoću metoda TSC 2007 [1], RDRS [2], PERA [33] i predložene metode. Svaka od tih metoda korištena je za detaljnu usporedbu tih 720 slučajeva.

Rezultati dobiveni metodom RDRS [2] prikazani su u tablici 8. gdje su uspoređeni s rigoroznom analizom pomoću metode TSC 2007 [1]. Kod 243 od 720 slučajeva (34 %) zabilježeno je ponašanje na razini prije rušenja, dok je kod 477 slučajeva (66 %) zabilježeno ponašanje na razini rušenja. Drugim riječima, prema metodi TSC 2007 [1], 66 % analiziranih slučajeva izrazito je osjetljivo na djelovanje potresa.

Prema metodi RDRS [2], 276 slučajeva (38 %) može se smatrati sigurnima, dok su 444 (62 %) slučaja nesigurna (vidi tablicu 8. i tablicu 11.). Ti rezultati pokazuju da postoji dobra podudarnost između rezultata dobivenih metodama RDRS [2] i TSC 2007 [1] (34 % i 66 %). Isto tako, ako se zasebno analiziraju slučajevi visokog i niskog rizika, opet su procjene dobivene metodom RDRS [2] poprilično podudarne s predviđanjima provedenima metodom TSC 2007 [1]. Broj sigurnih slučajeva prema metodama TSC 2007 [1] i RDRS [2] iznosi 243 tj. 210 (učinak od 86 % prema metodi TSC 2007 [1]). Nesigurni slučajevi procijenjeni pomoću metoda TSC 2007 [1] i RDRS [2] iznosili su 477 tj. 411 (opet je dobiven učinak od 86 % prema metodi TSC 2007 [1]). Odnos od 86 % može se smatrati prihvatljivom razinom podudarnosti. Isto tako, od ukupno 720 ukupnih sigurnih i nesigurnih slučajeva (sigurnost života, prevencija rušenja i rušenje) određenih pomoću metode TSC 2007 [1], metodom RDRS [2] istovremeno je dobiven 621 niski i visoki slučaj rizika (uspjeh od 86 % u odnosu na TSC 2007 [1]), kao što se to vidi u tablici 12.

Rezultati analiza pomoću metode PERA [33] uspoređeni su u tablici 9. s rigoroznom analizom pomoću postupka TSC 2007 [1]. Ako prihvatimo da su procjene metodom TSC 2007 [1] referentne, prema prikazu iz tablice 9., tada rezultati metode PERA [33] upućuju na 247 sigurnih i 473 nesigurna slučaja, što predstavlja 34 % tj. 66 % od 720 analiziranih slučajeva. Te su vrijednosti prilično – iako konzervativno – podudarne s TSC 2007 [1] (34 % tj. 66 % slučajeva). Osim toga, ako kao i prije zasebno analiziramo sigurne i nesigurne slučajeve, rezultati postignuti metodom PERA [33] i dalje su prilično podudarni s metodom TSC 2007 [1]. Od 243 sigurna slučaja (sigurnost života ili prevencija rušenja) koji se predviđaju pomoću metode TSC 2007 [1], 151 slučaj je također označen kao siguran pomoću metode PERA [33] (postotak uspjeha u odnosu na TSC 2007 [1] iznosi 62 %). Isto tako, od 477 nesigurnih slučajeva (rušenje) predviđenih metodom TSC 2007 [1], u metodi PERA [33] istovremeno imamo 381 nesigurni slučaj (uspješnost od 80 % u odnosu na TSC 2007 [1]). Tako je 62 % i 80 % odgovora dobiveno za sigurne i nesigurne slučajeve. Metodom PERA [33] istovremeno su predviđena 532 slučaja niskog rizika i visokog rizika (uspješnost od 74 % u odnosu na TSC 2007 [1]), kao što se to vidi u tablici 12.

Usporedba ponašanja građevina za 720 slučajeva prema metodi TSC 2007 [1] i predloženoj metodi prikazana je u tablici 10. Predviđanje prema predloženoj metodi upućuje na 337 sigurnih i 383 nesigurnih slučajeva, što iznosi 47 % tj. 53 % od ukupno 720

analiziranih slučajeva. Te vrijednosti pokazuju prihvatljivu razinu podudarnosti između vrijednosti prema predloženoj metodi i vrijednosti prema TSC 2007 [1] (34 % tj. 66 %). Ako i ovdje zasebno analiziramo sigurne i nesigurne slučajeve, možemo uočiti da su predviđanja pomoću predložene metode poprilično podudarna s predviđanjima prema metodi TSC 2007 [1]. Od 243 sigurna slučaja (sigurnost života ili sprečavanje rušenja) predviđenih pomoću TSC 2007 [1], 192 su u predloženoj metodi definirana kao slučajevi niskog rizika (uspješnost od 79 % u odnosu na TSC 2007 [1]). Isto tako, od 477 nesigurnih slučajeva (rušenje) predviđenih prema TSC 2007 [1], 332 slučaja su u predviđenoj metodi definirana kao slučajevi visokog rizika (uspješnost od 70 % u odnosu na TSC 2007 [1]). Dakle, podudarnost od 79 % i 70 % utvrđena je za sigurne tj. nesigurne slučajeve. Također su definirani i utjecaji tlačne čvrstoće betonskih kocaka, postojanja učvršćenja te uvjeta tla, što je određeno prema metodi TSC 2007 [1]. Uočeno je da se postotak nesigurnih slučajeva općenito smanjuje s povećanjem tlačne čvrstoće betonskih kocaka, što je očekivano. Čini se da za pojedinačne čvrstoće betona, na klasifikaciju ponašanja prema metodi TSC 2007 [1] bitno utječu dva parametra, učvršćenje i uvjeti tla. Isto tako, od ukupno 720 sigurnih i nesigurnih slučajeva (sigurnost života ili sprečavanje rušenja i rušenje) predviđenih prema TSC 2007 [1], u predloženoj su metodi predviđena 524 slučaja niskog rizika i visokog rizika (uspješnost od 73 % u odnosu na TSC 2007 [1]), kao što se to vidi u tablici 12.

U tablicama 11. i 12. daje se sažet prikaz predviđanja pomoću metoda TSC 2007 [1], RDRS [2], PERA [33] i predložene metode. Ponovo se može uočiti da postoji podudarnost metoda RDRS [2], PERA [33] i predložene metode s predviđanjima pomoću metode TSC 2007 [1]. Podudarnost od 86 % dobivena je primjenom metode RDRS [2], dok je podudarnost od 62 % (sigurni slučajevi) i 80 % (nesigurni slučajevi) dobivena promjenom metode PERA [33], a podudarnost od 79 % (sigurni slučajevi) i 70 % (nesigurni slučajevi) dobivena je pomoću predviđene metode. Takav stupanj podudarnosti smatra se zadovoljavajućim. Slični su rezultati dobiveni i u slučaju iznimno zahtjevne analize metodom TSC 2007 [1], iako je analiza provedena uz nešto drugačije pretpostavke.

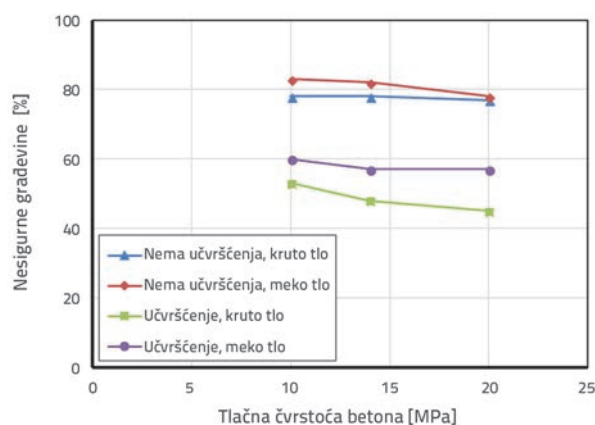
Osim usporedbe između metode TSC 2007 [1] i predložene metode, Ilki i dr. [33] istražili su utjecaj značajnih varijabli, kao što su kvaliteta betona, učvršćenje i uvjeti tla, na ponašanje predložene metode. Zabilježena je vrlo dobra podudarnost s rezultatima TSC 2007 [1].

Podudarnost od 86 %, 74 % i 73 % zabilježena za sigurne i nesigurne slučajeve pomoću metoda RDRS [2], PERA [33] i predložene metode može se smatrati zadovoljavajućom. Zadovoljavajuća razina podudarnosti predviđanja dobivena je usporednom analizom pojednostavljene metode, metode PERA i postupaka za ocjenu ponašanja konstrukcije koji se baziraju na propisima, vidi tablicu 12.

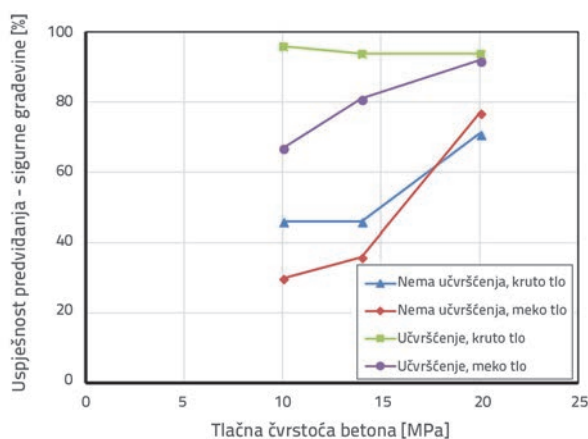
Slika 8. prikazuje kako na predviđanja pomoću metode TSC 2007 [1] utječu neki parametri, kao što su tlačna čvrstoća betona (C10, C14 i C20), poprečna armatura (učvršćenje, bez učvršćenja) i

uvjeti tla (kruto i meko). Na toj slici horizontalna os x označava tlačnu čvrstoću betona, a vertikalna os y označava postotak nesigurnih slučajeva u svakoj skupini parametara. Općenito uzevši, postotak nesigurnih slučajeva pada s povećanjem tlačne čvrstoće betona.

Osim usporedbe između metode TSC 2007 [1] i predložene metode, na slici 9. prikazan je utjecaj tlačne čvrstoće betona, dostatno učvršćenje i uvjeta tla, na ponašanje predložene metode. Na toj slici, stanje učvršćenja (s učvršćenjem, bez učvršćenja) i uvjeti tla (kruto, meko) definirani su kao serije podataka koje su podudarne s četiri skupine parametara. Na vertikalnoj osi sada imamo postotak rezultata za siguran slučaj prema TSC 2007 [1]. Ti su rezultati uspješno predviđeni pomoću predložene metode. Prema slici 9., vrlo uspješne stope predviđanja u odnosu na TSC 2007 [1] dobivene su za dvije od četiri skupine parametara.



Slika 8. Utjecaj nekih parametara na predviđanja pomoću metode TSC 2007 [1]



Slika 9. Usporedba predložene metode i metode TSC 2007 [1]

5. Zaključak

U radu se predlaže pojednostavljena verzija metode PERA za brzu procjenu seizmičke sigurnosti postojećih armiranobetonskih okvirnih građevina srednje visine, odnosno predstavlja se modifikacija metode PERA (metode za brzo seizmičko ocjenjivanje na bazi ponašanja građevine). Koraci postupka PERA korišteni su uz zamjenu Mutove metode sa Smithovom metodom. Valjanost predložene metode provjerena je na primjeru uobičajenih armiranobetonskih okvirnih konstrukcija srednje visine kod kojih je dominantan prvi oblik titranja. Predložena metoda u zadovoljavajućoj je mjeri prihvatljiva kako za sigurne tako i za nesigurne slučajeve. Utvrđena je dobra podudarnost između predložene metode, metode PERA i uobičajenih detaljnih postupaka za procjenu seizmičke sigurnosti, i to u okviru ispitivanja koja su provedena za 720 različitih slučajeva na tipičnim armiranobetonskim okvirnim građevinama srednje visine u Turskoj. Prikazana je i usporedba učinkovitosti građevina na bazi 720 slučajeva primjenom rigorozne metode TSC 2007 [1] i predložene metode. Predviđanjem prema predloženoj metodi dobivamo 337 sigurnih i 383 nesigurna slučaja, tj. 47 % i 53 % od ukupnog broja slučajeva. Te vrijednosti upućuju na prihvatljivu razinu podudarnosti predložene metode s vrijednostima iz metode TSC 2007 [1] (34 % tj. 66 %). Potrebno je napomenuti da se predloženom metodom mogu postići rezultati mnogo brže nego što je to slučaj kod uobičajenih metoda za procjenu ponašanja konstrukcija. Ne samo da je točnost predložene metode prihvatljiva za građevine s manjim brojem nepravilnosti konstrukcije, već se ona isto tako može znatno brže provesti od sada dostupnih uobičajenih metoda za procjenu ponašanja građevina. U budućnosti bi se trebale provesti dodatne analize kako bi se ocijenila i poboljšala pouzdanost predložene brze metode za procjenu seizmičke pouzdanosti, i to za građevine s većim brojem nepravilnosti konstrukcije koje su definirane u uobičajenim metodama za ocjenu ponašanja konstrukcije, te za građevine s posmičnim zidovima u oba osnovna smjera.

Zahvale

Autori zahvaljuju prof. dr. sc. Alperu Ilkiju, Muhammetu Ozeliku te Yesimu Vulasu što su im omogućili korištenje nacrti nekih građevina, magistarskog rada, i programa PERA. Autori također zahvaljuju izv. prof. dr. sc. Idrisu Bedirhanoglu na njegovim hvalevrijednim savjetima.

LITERATURA

- [1] Turkish Seismic Design Code (TSC 2007): Ankara, Turkey, 2007.
- [2] Regulation on the Determination of Risky Structures (RDRS): Ankara, Turkey, 2013.
- [3] FEMA P-154: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, Federal Emergency Management Agency; Washington D.C., USA, 1988a.
- [4] FEMA P-154: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, Second Edition, Federal Emergency Management Agency; Washington D.C., USA, 2002a.
- [5] FEMA P-155: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation, Federal Emergency Management Agency; Washington D.C., USA, 1988b.
- [6] FEMA P-155: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation, Second Edition, Federal Emergency Management Agency; Washington D.C., USA, 2002b.
- [7] FEMA P-155: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation, Third Edition, Federal Emergency Management Agency; Washington D.C., USA, 2015.
- [8] Sucuoğlu, H., Yazgan, U., Yakut, A.: A screening procedure for seismic risk assessment in urban building stocks, *Earthquake Spectra*, 23 (2007) 2, pp. 441–458.
- [9] Earthquake hazard map of Turkey: AFAD, 2018.
- [10] Ministry of Environment and Urbanisation of Turkey, www.csb.gov.tr, 17.10.2017.
- [11] Standard for Seismic Capacity Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings: Japanese Building Disaster Prevention Association, Ministry of Construction of Japan, 1990.
- [12] Hassan, A.F., Sozen, M.A.: Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes, *ACI Structural Journal*, 94 (1997) 1, pp. 31–39.
- [13] Yakut, A.: Preliminary seismic performance assessment procedure for existing RC buildings, *Engineering Structures*, 26 (2004) 10, pp. 1447–1462.
- [14] Bal, I.E., Gulay, F.G., Tezcan, S.S.: A new approach for the preliminary seismic assessment of RC buildings: P25 scoring method, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.
- [15] Recommendations for Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes; New Zealand Society for Earthquake Engineering, New Zealand, 2012.
- [16] Baysan, F.: Seismic safety assessment of an existing building with structural analysis and Japanese seismic index method, Graduate project, Istanbul Technical University, Istanbul, (in Turkish), 2002.
- [17] Ilki, A., Boduroglu, H., Ozdemir, P., Baysan, F., Demir, C., Sirin, S.: Comparison of the results of structural analysis and seismic index method for existing un-retrofitted and retrofitted structures, *Proceedings of the 5th National Conference on Earthquake Engineering*, Istanbul, Turkey. (in Turkish), 2003.
- [18] Boduroglu, H., Ozdemir, P., Ilki, A., Sirin, S., Demir, C., Baysan, F.: Towards a modified rapid screening method for existing medium rise RC buildings in Turkey, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 2004.
- [19] Boduroglu, H., Ozer, E., Saygun, A.I., Celep, Z., Trupia, A., Ozdemir, P., Ilki, A.: Seismic Safety assessment, 2005.
- [20] Ozdemir, P., Boduroglu, H., Ilki, A.: Seismic safety screening method, *Proceedings of the Spear Workshop*, Ispra, Italy, 2005.
- [21] Favvata, M.J., Naouma, M.C., Karayannis, C.G.: Limit states of RC structures with first floor irregularities, *Struct. Eng. and Mech.*, 47 (2013) 6, pp. 791–818.
- [22] Ni, P.: Seismic assessment and retrofitting of existing structure based on nonlinear static analysis”, *Struct. Eng. and Mech.*, 49 (2014) 5, pp. 631–644.
- [23] Ozmen, H.B., Inel, M.: Effect of rapid screening parameters on seismic performance of RC buildings, *Struct. Eng. and Mech.*, 62 (2017) 4, pp. 391–399.
- [24] Priestley, M.J.N.: Displacement based seismic assessment of reinforced concrete buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 1 (1997) 1, pp. 157–192.
- [25] Chandler, A.M., Mendis, P.A.: Performance of reinforced concrete frames using force and displacement based seismic assessment methods”, *Engineering Structures*, 22 (2000) 4, pp. 352–363.
- [26] Lervolino, I., Manfredi, G., Polese, M., Verderame, G.M., Fabbrocino, G.: Seismic risk of RC building classes, *Engineering Structures*, 29 (2007) 5, pp. 813–820.
- [27] Ruiz-Garcia, J., Miranda, E.: Probabilistic estimation of residual drift demands for seismic assessment of multi-storey framed buildings, *Engineering Structures*, 31 (2010) 1, pp. 11–20.
- [28] Jeong, S.H., Mwafy, A.M., Elnashai, A.S.: Probabilistic seismic performance assessment of code compliant multi-storey RC buildings, *Engineering Structures*, 34 (2012), pp. 527–537.
- [29] Lupoi, G., Calvi, G.M., Lupoi, A., Pinto, P.E.: Comparison of different approaches for seismic assessment of existing buildings”, *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (2004) 1, pp. 121–160.
- [30] Kalkan, E., Kunnath, S.K.: Assessment of current nonlinear static procedures for seismic evaluation of buildings, *Engineering Structures*, 29 (2007) 3, pp. 305–316.
- [31] Eurocode, Seismic Design of Buildings. Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings, European Committee for Standardization; Brussels, Belgium, 2005.
- [32] ASCE 41: Seismic Rehabilitation Standard, American Society of Civil Engineers; Washington DC, USA, 2006.
- [33] Ilki, A., Comert, M., Demir, C., Orakcal, K., Ulugtekin, D., Tapan, M., Kumbasar, N.: Performance based rapid seismic assessment method (PERA) for reinforced concrete frame buildings, *Advances in structural engineering*, 17 (2014) 3, pp. 439–459.
- [34] Muto, K.: Seismic analysis of reinforced concrete buildings, *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering*, Berkeley, California, USA, 1956.
- [35] Stafford Smith, B., Carter, C.: A method of Analysis for Infilled Frames. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 44 (1969) 1, pp. 31–48.
- [36] Ozcelik, M.U.: Seismic assessment of existing buildings using PERA, RDRS and TSC 2007, M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, 2014.
- [37] Vulas, Y.: Rapid performance seismic assessment method (PERA) for existing reinforced concrete frame buildings, M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, 2014.
- [38] Ministry of Public Works and Settlement of Turkey, Turkish Seismic Design Code; Ankara, Turkey, 1975.
- [39] Sta4CAD: Structural Analysis for Computer Aided Design, Sta Engineering Consultancy Ltd., Istanbul, Turkey, 2007.