

Primljen / Received: 18.9.2014.

Ispravljen / Corrected: 28.8.2015.

Prihvaćen / Accepted: 18.12.2015.

Dostupno online / Available online: 10.2.2016.

# Ocjena ponašanja armiranobetonskih zgrada s mekim prizemljem

Autor:



Doc.dr.sc. **R. Tuğrul Erdem**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Celal Bayar, Turska  
Fakultet tehničkih znanosti  
Odjel za građevinarstvo  
tugrul.erdem@cbu.edu.tr

Stručni rad

**R. Tuğrul Erdem**

## Ocjena ponašanja armiranobetonskih zgrada s mekim prizemljem

Određivanje seizmičkog ponašanja je važan zadatak seizmičke analize prema zahtijevanom ponašanju konstrukcije. Podudaranje rezultata dobivenih prema različitim normama od velike je važnosti u postupku seizmičkog ocjenjivanja konstrukcija. U radu je opisana nelinearna analiza ponašanja triju armiranobetonskih zgrada s mekim prizemljem primjenom metode konačnih elemenata prema normama FEMA-356 i FEMA-440, te turskim potresnim normama iz 2007. Za svaku konstrukciju je prikazano stanje oštećenosti, modalna svojstva, međukatni pomaci i globalne razine ponašanja te su dani odgovarajući prijedlozi.

**Ključne riječi:**

proračun s pomoću konačnih elemenata, nepravilne konstrukcije, nelinearni postupci, seizmičko ponašanje

Professional paper

**R. Tuğrul Erdem**

## Performance evaluation of reinforced concrete buildings with softer ground floors

Determination of seismic performance is a significant task in the performance-based seismic analysis of structures. The consistency between analysis results obtained according to various codes is highly significant for seismic evaluation of structures. Non-linear performance of three reinforced concrete buildings having a soft storey irregularity is studied based on the finite elements analysis according to FEMA-356, FEMA-440, and Turkish Earthquake Code - 2007. Damage situations, modal properties, storey drift ratios, and global performance levels are comparatively presented for each structure, and appropriate suggestions are given.

**Key words:**

finite elements analysis, irregular structures, non-linear procedures, seismic performance

Fachbericht

**R. Tuğrul Erdem**

## Beurteilung des Verhaltens von Stahlbetongebäuden mit weichem Geschoss

Die Bestimmung des seismischen Verhaltens ist eine wichtige Aufgabe bei der verhaltensbasierten Erdbebenanalyse. Eine Übereinstimmung von Resultaten, die aus verschiedenen Normen folgen, spielt eine große Rolle bei der seismischen Beurteilung von Tragwerken. In dieser Arbeit wird mittels der Finite-Elemente-Methode eine nichtlineare Analyse des Verhaltens von drei Stahlbetongebäuden mit weichem Geschoss gemäß der Normen FEMA-356 und FEMA-440, sowie gemäß der türkischen Erdbebennormen aus dem Jahre 2007 durchgeführt. Für jedes Tragwerk werden Schadensbilder, modale Eigenschaften, Stockwerksverschiebungen und das globale Verhalten dargestellt, sowie entsprechende Vorschläge gegeben.

**Schlüsselwörter:**

Finite-Elemente-Analyse, unregelmäßige Tragwerke, nichtlineare Methoden, seismisches Verhalten

## 1. Uvod

Beton je trajan materijal, otporan na tlak i može se lako oblikovati. Široko se primjenjuje u izgradnji različitih konstrukcija, od zgrada, brana, podvodnih tunela, mostova do cesta. Osim toga, koristi se kao zaštitni sloj protiv nuklearnog zračenja u suvremenim građevinama. Može biti konstrukcijski, ali i dekorativni element. Prikladan je za izolaciju od buke i otporan na požar. Obradljiv je, ekonomičan i ne zahtijeva često održavanje. Diljem svijeta, od svih postojećih konstrukcija najbrojnije su upravo armiranobetonske. Zbog velike čvrstoće, dugog vijeka trajanja i otpornosti na potrese i požare, takve se konstrukcije grade za različite namjene. Mnogi znanstvenici posljednjih su nekoliko desetljeća analizirali AB konstrukcije na djelovanje potresa različitog intenziteta, kao i njihovu razinu oštećenja.

Budući da horizontalna opterećenja uzrokuju horizontalne pomake, nakon potresa se mogu uočiti oštećenja uzrokovana tim pomacima. Do sada su diljem svijeta provedena različita istraživanja o seizmičkoj otpornosti građevina [1-5].

Projektanti moraju osigurati protupožarnu zaštitu konstrukcije. Zahvaljujući sastavu i strukturi materijala, beton je najizdržljiviji građevni materijal s obzirom na požar. Beton ima dobra konstrukcijska, ali i materijalna protupožarna svojstva. Prijenos topline kroz beton vrlo je spor. Dakle, betonski zidovi mogu zaštititi ostala mjesta tijekom požara u zgradi upravo zahvaljujući svojim svojstvima. Otpornost materijala i konstrukcijskih elemenata na požar definirana je u propisima ASTM Standard E119 [6]. Betonski elementi imaju dobra svojstva prema propisima ASTM E119. Dokazano je da lagani beton ima veću otpornost na požar.

Seizmička analiza prema zahtijevanom ponašanju konstrukcije je važna disciplina u kojoj se projektni kriteriji postavljaju ovisno o ciljanom ponašanju građevine izložene seizmičkim opterećenjima. Općenita ideja je da se odredi odnos zahtijevanog ponašanja i razina oštećenja građevine, kako bi se mogla provesti analiza građevina pod utjecajem seizmičkih opterećenja. U posljednjih nekoliko godina značajno je porastao broj istraživanja koja se temelje na seizmičkoj analizi prema zahtijevanom ponašanju konstrukcije, kako bi se mogla procijeniti oštećenja tijekom potresa [7, 8]. Takav postupak seizmičkog proračuna prihvaćen je kao novi poboljšani pristup s obzirom na tradicionalne proračunske metode. Prema prijedlozima znanstvenika, u bližoj će se budućnosti seizmička analiza prema zahtijevanom ponašanju konstrukcije uvrstiti u nove norme za projektiranje [9-11].

Ponašanje konstrukcija može se točnije ocijeniti primjenom nelinearnih metoda. Te metode postale su značajne u određivanju oštećenja prilikom ocjenjivanja neelastičnog ponašanja konstrukcija. Linearne metode temelje se na silama, a stanje oštećenja konstrukcije određuje se prema odnosu zahtijevane vrijednosti i sposobnosti nosivosti, dok se nelinearne metode temelje na deformacijama, te je potrebno više parametara kako bi se analizirali elementi konstrukcije. Općenito, norme zahtijevaju da se sve građevine moraju oduprijeti slabijem

potresnom djelovanju bez ikakvih oštećenja. Osim toga, u jačim potresima, zgrade moraju zadržati svoju stabilnost kako ne bi došlo do sloma konstrukcije te kako bi se minimalizirali i spriječili gubici.

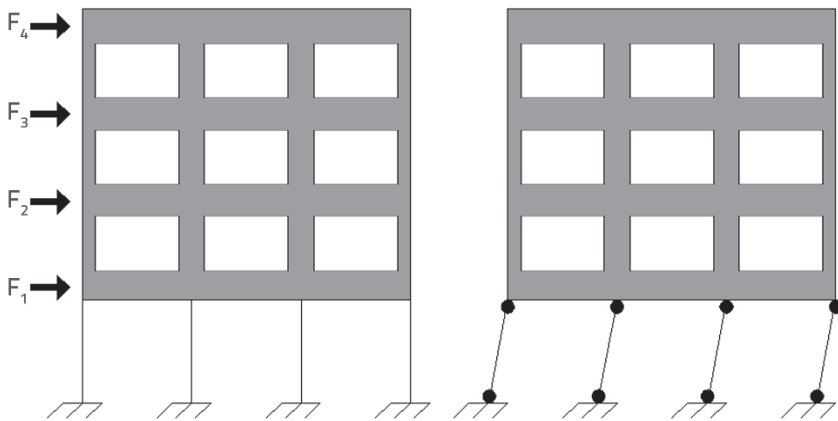
Koncept pouzdane ocjene ponašanja građevine temelji se na određenim metodama, od projektiranja do potvrde analize u proračunu konstrukcija. Kriteriji ponašanja ispunjeni su ako parametri ponašanja nakon provedene analize ne prelaze dopuštene granice navedene u normama. Osim toga, međukatni pomaci uzimaju se kao važan faktor u ocjeni ponašanja, a njihove vrijednosti su pokazatelji razina ponašanja višekatih zgrada tijekom seizmičkih opterećenja. Budući da veliki međukatni pomaci obično uzrokuju značajna oštećenja ili slom građevine, potrebno je osigurati njihovu jednoliku raspodjelu na svim katovima zgrade.

Trajnost, krutost i duktilnost glavni su parametri koje treba osigurati da bi zgrada bila otporna na potresna djelovanja. Horizontalni i vertikalni diskontinuiteti uzrokuju konstrukcijske nepravilnosti u višekatih zgradama. Prizemlja u zgradama mogu biti projektirana drugačije od ostalih katova, s različitom visinom i rasporedom zidova, iz ekonomskih razloga. Stoga se u takvim zgradama pojavljuju takozvana meka prizemlja gdje tijekom potresa često dolazi do velikih deformacija i sloma [12, 13]. Seizmički odziv nepravilnih zgrada s mekim prizemljem može se odrediti samo primjenom nelinearnih proračunskih metoda.

U ovom je radu provedena nelinearna analiza postojećih nepravilnih armiranobetonskih konstrukcija s tri, pet i sedam katova. Visina prvog kata različita je u svim zgradama. Izračunane su težine zgrada, periodi i sudjelujuće mase. Razine oštećenja konstrukcijskih elemenata dobivene su primjenom nelinearnih metoda prema FEMA-356 (DCM), FEMA-440 (DCM) i TEC-2007. Nakon toga određene su globalne razine ponašanja konstrukcija te su određene veličine međukatnih pomaka. Primijenjen je programski paket temeljen na metodi konačnih elemenata SAP2000 [14]. Na temelju uspoređenih rezultata dani su zaključci i prijedlozi.

## 2. Slučaj mekog prizemlja

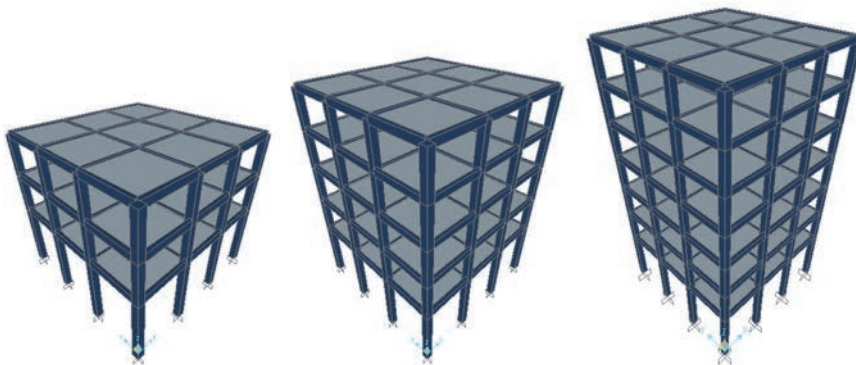
Meka prizemlja građevina jedan su od glavnih razloga velikih oštećenja i sloma višekatih zgrada pod utjecajem seizmičkih opterećenja. Prizemlja različitih visina u odnosu na ostale katove obično se ponašaju drugačije od ostatka konstrukcije tijekom potresa. Mnoge građevine imaju meka prizemlja, a obično se nalaze na glavnim ulicama i imaju komercijalnu namjenu, primjerice u njima se nalaze trgovine, restorani, banke i izložbeni prostori. Takve zgrade imaju staklene fasade, a zidovi od opeke nalaze se točno iznad mekog prizemlja. U mekim prizemljima takvih građevina pojavljuju se ozbiljni problemi tijekom potresa. Zbog velikih deformacija i disipacije energije u stupovima mekog prizemlja mogu se uočiti oštećenja i trenutačni slom elemenata. Slika 1. prikazuje odziv konstrukcije s mekim prizemljem uslijed bočnih djelovanja.



Slika 1. Odziv mekog prizemlja



Slika 2. Oštećenja mekih prizemlja nakon potresa



Slika 3. Prostorni prikazi analiziranih konstrukcija

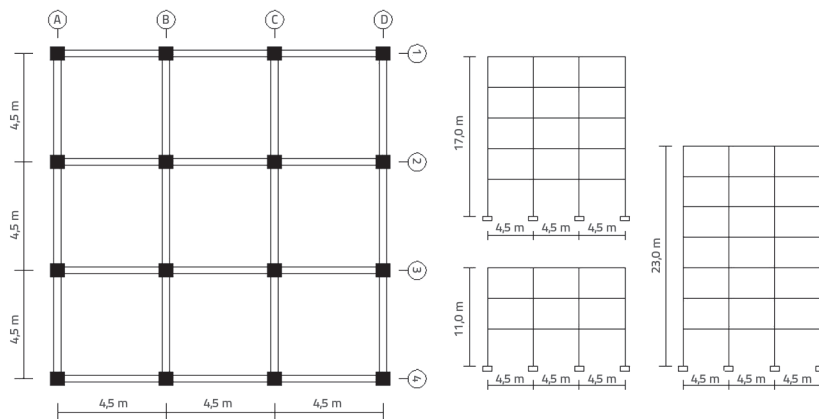
Meki katovi se nalaze u višekatnim stambenim zgradama s velikim otvorima. S obzirom na to da su deformacije koncentrirane u najdonjim katovima, mnoga su se oštećenja dogodila nakon nedavnih potresa [15, 16]. Takve građevine obično imaju malu nosivost, pogotovo za bočna djelovanja. Vrlo velika oštećenja obično se događaju u prizemljima, dok su u višim katovima ona ograničena. Neki primjeri zgrada s mekim katovima nakon djelovanja potresa prikazani su na slici 2., [17].

### 3. Opis zgrada

Zgrade koje su analizirane imaju tri, pet i sedam katova. Te konstrukcije predstavljaju tipične stambene niske, srednje visoke i visoke armiranobetonske zgrade smještene u urbanom području. Izvedene su kao okvirne konstrukcije tipičnih poprečnih presjeka, bez nosivih zidova. Budući da je visina kata značajan parametar u nepravilnim građevina s mekim prizemljem, svi katovi su visoki 3 m, osim prizemlja čija je visina 5 m. U prizemlju su ugrađeni stakleni prozori, debljina vanjskih zidova iznosi 20 cm, a unutarnjih zidova 10 cm na svim katovima zgrade. Klasifikacija tla je Z3 prema normi TEC-2007, što odgovara razredu C definiranom u FEMA. Pretpostavka je da se zgrade nalaze u seizmički vrlo aktivnom području. Prostorni modeli s konačnim elementima prikazani su na slici 3.

Površina tlocrta zgrada je 13,5 x 13,5 m. Što se tiče svojstava gradiva, pretpostavljeno je da tlačna čvrstoća betona iznosi 25 MPa, a granica popuštanja uzdužne i poprečne armature je 420 MPa. Debljina ploča je 12 cm. Tlocrt i presjeci katova zgrade prikazani su na slici 4.

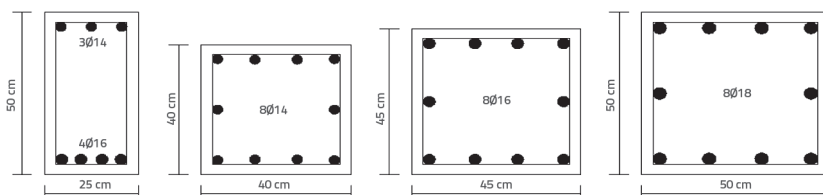
Poprečni presjeci rubnih stupova prizemlja veći su od presjeka drugih stupova, a presjeci greda su isti za sve katove. Presjeci konstrukcijskih elemenata prikazani su u tablici 1. Detalji presjeka stupova i greda u prizemlju prikazani su na slici 5.



Slika 4. Geometrija zgrade

Tablica 1. Dimenzije poprečnih presjeka elemenata

Vrsta konstrukcije	Dimenzije grede [cm]	Dimenzije rubnih stupova u prizemlju [cm]	Dimenzije ostalih stupova [cm]
Zgrada s 3 kata	25 x 50	40 x 40	30 x 40
Zgrada s 5 katova		45 x 45	35 x 45
Zgrada sa 7 katova		50 x 50	40 x 50



Slika 5. Detalji presjeka grede (25x50) i stupova (40x40, 45x45, 50x50)

Tablica 2. Svojstva glavnih oblika titranja

Vrsta konstrukcije	Period [s]	Postotak sudjelujuće mase [%]
Zgrada s 3 kata	0,57	96
Zgrada s 5 katova	0,86	93
Zgrada sa 7 katova	1,14	91

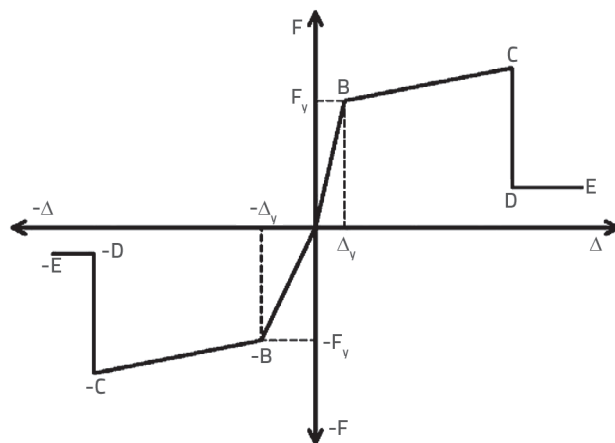
Vertikalna opterećenja sastoje se od stalnog i pokretnog opterećenja ploča, opterećenja zidova na grede, kao i vlastite težine konstrukcijskih elemenata. Težina zgrade s tri kata je 421,4 t, s pet katova je 686,4 t i sa sedam katova je 941,4 t. Prvi periodi glavnih oblika titranja s pripadnim sudjelujućim masama prikazani su u tablici 2.

Nakon određivanja težine i modalnih svojstava, plastični zglobovi su definirani na krajevima stupova i grede kako bi se provela nelinearna analiza. Odnos momenta i rotacije elemenata definiran je u programskom paketu SAP2000. Za ovo je provedena analiza momenta i zakrivljenosti konstrukcijskih elemenata u računalnom programu Semap [18], kao što je prikazano na slici 6. Primijenjen je modificirani Kent-Parkov model [19] ovijenog betona u analizi odnosa momenta i zakrivljenosti elemenata.

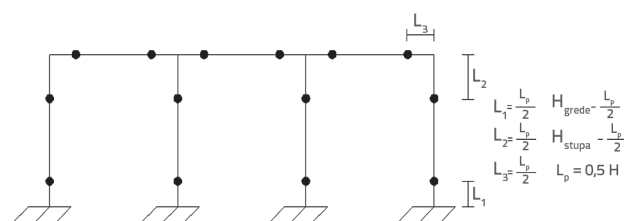


Slika 6. Odnos momenta i zakrivljenosti

Idealizirana krivulja odnosa sile i deformacije plastičnog zgloba na slici 7. određena je u programu SAP2000 i njome su definirani plastični zglobovi konstrukcijskih elemenata. Potrebno je osam točaka da se odredi krivulja. Međutim, za simetrično ojačane elemente dovoljne su i četiri točke. Dio krivulje od 0 do A odnosi se na stanje bez opterećenja. Kada je postignuta čvrstoća  $F_v$  u zglobu, nastupa razvlačenje konstrukcijskog elementa. Nakon točke B, sila u zglobu mijenja se s obzirom na deformaciju. Kada vrijednost pomaka dođe do točke C, plastični zglob dolazi do područja sloma. Konačno, plastični zglob potpuno gubi čvrstoću, a trenutak sloma konstrukcije događa se nakon dostizanja točaka D i E. Položaji plastičnih zglobova konstrukcijskih elemenata prizemlja prikazani su na slici 8. Izraz  $L_p$  označava duljinu plastičnog zgloba na slici 8.



Slika 7. Idealizirani odnos sile i deformacije

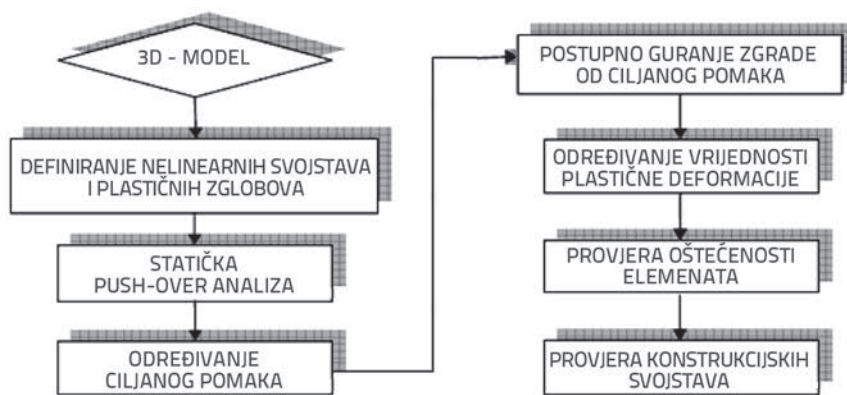


Slika 8. Položaj plastičnih zglobova

Nakon toga, stanje oštećenja elemenata i razine ponašanja svih građevina određuju se na temelju usporedbe vrijednosti koje se odnose na plastičnu rotaciju s граниčnim vrijednostima koje su propisane u FEMA-356 (DCM), FEMA-440 (DCM) i TEC-2007.

### 4. Nelinearne analize

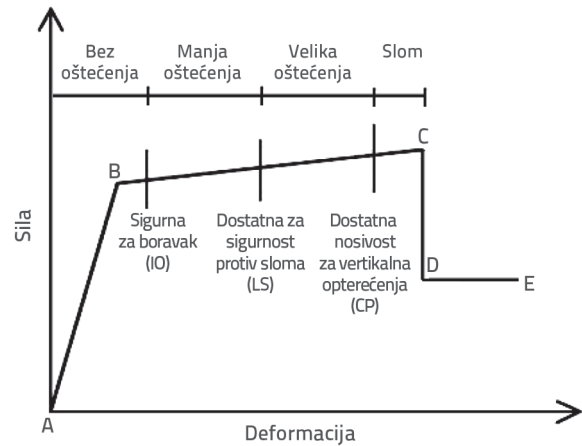
Za određivanje seizmičkog ponašanja zgrada primijenjena je nelinearna metoda postupnog guranja pri gravitacijskim i bočnim djelovanjima. Statička metoda postupnog guranja je niz nelinearnih inkrementalnih statičkih analiza koje se provode kako bi se odredila bočna deformacija i stanje oštećenja konstrukcijskih elemenata. Ponašanje konstrukcije opisano je krivuljom sposobnosti nosivosti koja predstavlja odnos poprečne reakcije i pomaka krova. Budući da se metodom postupnog guranja može pouzdano i brzo odrediti nelinearni odziv zbog jednostavnosti i male numeričke zahtjevnosti same metode, znanstvenici je često koriste umjesto elastičnih statičkih ili dinamičkih metoda [20-22]. Nelinearne proračunske metode detaljno su pojašnjenje u glavnim smjernicama. Posljednjih nekoliko godina češće se primjenjuju metode temeljene na pomacima negoli metode temeljene na silama zbog izravnog odnosa između zahtijevanog ponašanja zgrade i razina oštećenja. Glavni koraci u nelinearnim metodama od faze modeliranja do provjere razine ponašanja prikazani su na slici 9.



Slika 9. Koraci u nelinearnoj analizi

Nelinearne metode definirane u raznim normama razlikuju se u načinu određivanja ciljanih pomaka i kriterija prihvatljivosti koji se temelje na graničnim vrijednostima ponašanja. Tri razine ponašanja slično su definirane u normama, a to su stanje oštećenja pri kojem zgrada ostaje sigurna za boravak (eng. *immediate occupancy* - IO), zatim stanje značajnih oštećenja zgrade, no uz dostatnu sigurnost protiv lokalnog ili globalnog sloma (eng. *life safety* - LS), te stanje značajnih oštećenja zgrade na rubu djelomičnog ili potpunog sloma, uz dostatnu nosivost za vertikalna opterećenja (eng. *collapse prevention* - CP). Na razini ponašanja IO, manje pukotine mogu se uočiti u nekonstrukcijskim elementima, a nema oštećenja konstrukcijskih elemenata. Na razini LS, mogu se uočiti samo ograničena oštećenja, no ne može doći do sloma i svi elementi konstrukcije moraju zadržati krutost. Na razini CP, neki zidovi mogu biti srušeni i dolazi do trajnih deformacija konstrukcije, no spriječen je slom cijele konstrukcije. Odnos sile i deformacije u plastičnim zglobovima koji se primjenjuje za određivanje razina ponašanja sa mjestima

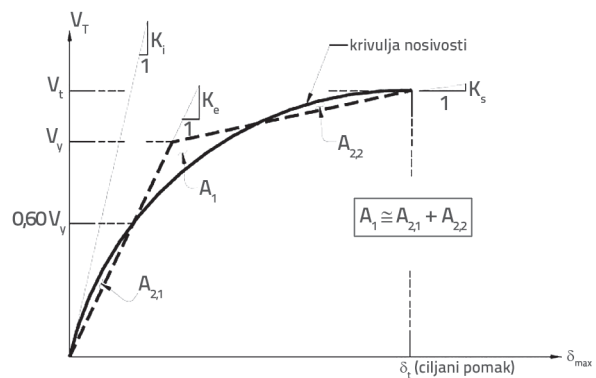
oštećenja prikazan je na slici 10. Postoji pet točaka pomoću kojih se opisuje ponašanje s obzirom na materijalna svojstva, količinu armature, vrstu konstrukcijskih elemenata i uzdužno opterećenje elementa.



Slika 10. Razine ponašanja konstrukcije

#### 4.1. Analiza ponašanja prema normama FEMA

Ciljana vrijednost pomaka može se također izračunati prema metodi koeficijenta pomaka, definiranoj u normi FEMA. U toj metodi, poprečna reakcija ( $V_c$ ) i pomak vrha ( $\delta_{max}$ ) određeni su primjenom statičke metode postupnog guranja. Krivulja je idealizirana kao bilinearna. Dok nagib prvog pravca predstavlja elastičnu krutost ( $K_e$ ), nagib drugog predstavlja elastoplastičnu krutost ( $K_s$ ). Površine područja ispod stvarne i idealizirane krivulje sposobnosti nosivosti trebaju biti jednake, kako je prikazano na slici 11.



Slika 11. Određivanje ciljanih pomaka prema FEMA

Proračunski period ( $T_e$ ) konstrukcije izračunan je prema jednadžbi (1), pri čemu je  $T_1$  elastični period u pripadnom

Tablica 3. Proračunski koraci prema normama FEMA

Koeficijent	FEMA-356 (DCM)	FEMA-440 (DCM)
$C_0$	- Prvi modalni faktor doprinosa mase na razini pomaka kontrolnog čvora. - Modalni faktor doprinosa mase na razini kontrolnog čvora izračunan primjenom odgovarajućeg vektora oblika s obzirom na deformirani oblik građevine pri ciljanoj pomaku - To je objašnjeno s obzirom na nosivi sustav i broj katova, u tablici 3-2 prema FEMA 356.	
$C_1$	$C_1 = 1,00$ za $T_e \geq T_0$ $C_1 = \frac{1 + \frac{(R_0 - 1)T_0}{T_e}}{R_0}$ za $T_e < T_0$	$C_1 = 1 + \frac{(R-1)}{aT_e^2}$ $C_{1(T=0,2sn)}$ za $T < 0,2$ s $C_1 = 1,0$ za $T > 1,0$ s
$C_2$	Vrijednosti za različite nosive sustave i razine ponašanja dobit će se iz tablice 3-3, prema FEMA 356.	$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left( \frac{R-1}{T} \right)^2$ $C_{2(T=0,2sn)}$ za $T < 0,2$ s $C_2 = 1,0$ za $T > 0,7$ s
$C_3$	$C_3 = 1,00$ $\alpha = \frac{K_s}{K_e} > 0$ $C_3 = 1,0 + \frac{ \alpha (R_0 - 1)^{3/2}}{T_e}$ $\alpha = \frac{K_s}{K_e} \leq 0$	$C_3$ koeficijent se prema FEMA440 ne razmatra.

Tablica 4. Proračunski koraci prema TEC-2007

<p>1. Svaka točka <math>V_i, \delta_i</math> na krivulji sposobnosti nosivosti sustava s više stupnjeva slobode pretvorena je u odgovarajuću točku <math>S_{air}, S_{di}</math> spektra sposobnosti nosivosti ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode primjenom koeficijenta modalne mase i jednadžbi faktora doprinosa.</p> <p>2. Točka na krivulji spektra sposobnosti nosivosti određena je kao točka ponašanja, a krivulja spektra se idealizira kao bilinearna.</p>
<p>3. Nelinearni spektralni pomak, <math>S_{di1} = C_{R1} \cdot S_{de1}</math></p> <p>Linearni spektralni pomak, <math>S_{de1} = \frac{S_{ae1}}{(\omega_1^{(1)})^2}</math></p> <p>Spektralni pomak <math>C_{R1}</math> određuje se početnim periodom <math>T_1^{(1)}, T_1^{(1)} = 2\pi/\omega_1^{(1)}</math></p>
<p>4. Ako je početni period <math>T_1^{(1)}</math> jednak ili veći nego karakteristični period <math>T_B</math> spektra ubrzanja (veći karakteristični spektralni period za lokalne razrede tla), uzima se <math>C_{R1} = 1</math>.</p>
<p>5. Ako je <math>T_1^{(1)}</math> početni period manji od karakterističnog perioda <math>T_B</math> spektra ubrzanja,</p> $C_{R1} = \frac{1 + (R_{y1} - 1)T_B / T_1^{(1)}}{R_{y1}}$ <p><math>R_{y1}</math> je koeficijent smanjenja čvrstoće u prvom obliku titranja, <math>R_{y1} = \frac{S_{ae1}}{a_{y1}}</math></p>
<p>6. Kad je izračunana ciljana točka ponašanja, konvertirana krivulja sposobnosti nosivosti trebala bi biti linearizirana primjenom pravila jednakih površina, nakon čega se određuju vrijednosti <math>a_{y1}, R_{y1}, C_{R1}</math>.</p> <p>Ciljana točka ponašanja u početku nije poznata pa je nužna metoda pokušaja i pogrešaka.</p>

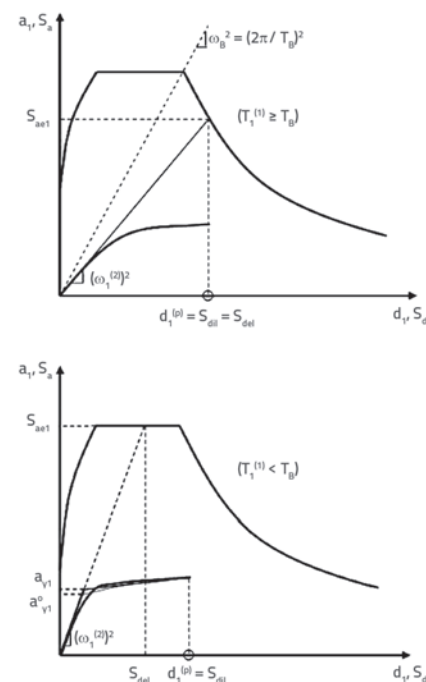
g je gravitacijsko ubrzanje. U tablici 3. prikazani su proračunski koraci prema normama FEMA-356 (DCM) i FEMA-440 (DCM), i parametri jednadžbe (2). Izraz  $T_0$  predstavlja karakterističan period spektra odziva u tablici 3.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \tag{1}$$

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \tag{2}$$

### 4.2. Analiza ponašanja prema TEC-2007

Koordinate krivulje sposobnosti nosivosti promijenjene su na modalni odziv ubrzanja/pomaka kako bi se odredila vrijednost ciljanoj pomaku ( $\delta_i$ ) prema TEC-2007. Ta vrijednost izračunana je na osnovi početnog perioda u TEC-2007, kao što je prikazano na slici 12. Proračunski koraci prema TEC-2007 prikazani su u tablici 4.

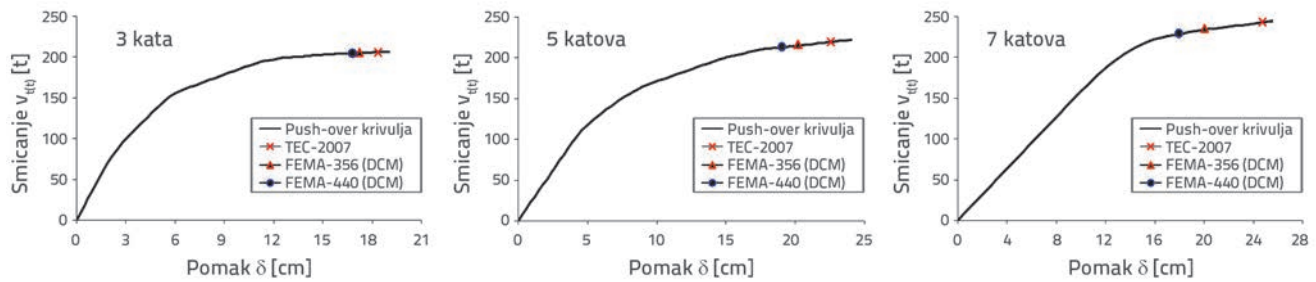


Slika 12. Određivanje ciljanog pomaka prema TEC-2007

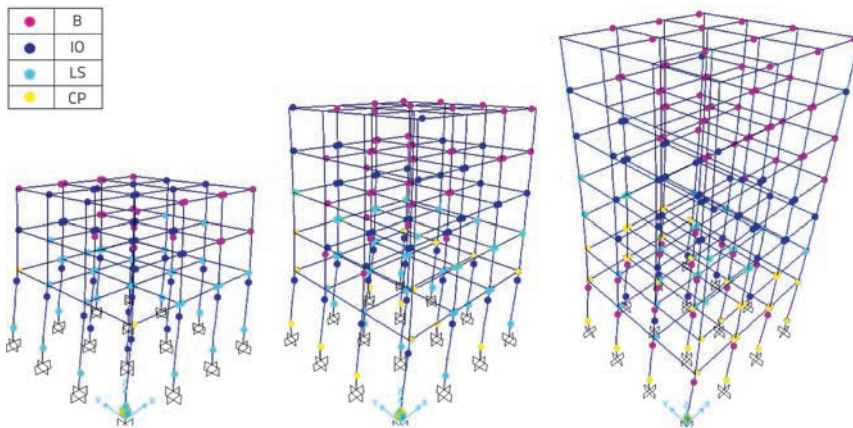
smjeru, a  $K_i$  je elastična bočna krutost konstrukcije. Nakon određivanja vrijednosti proračunskog perioda, ciljani pomak računa se primjenom jednadžbe (2) u kojoj je  $S_a$  vrijednost spektra odziva ubrzanja pri osnovnom proračunskom periodu i koeficijentu prigušenja zgrade u smjeru koji se razmatra, a

### 5. Rezultati

Analiza ponašanja je kombinacija projektiranja, vrste izgradnje i ocjene konstrukcija. Ta je analiza postala značajna u određivanju uzoraka raspodjele opterećenja i razina oštećenja, kako bi se



Slika 13. Ciljani pomaci zgrada



Slika 14. Plastični zglobovi pri ciljanim pomacima prema TEC-2007

odredilo neelastično ponašanje konstrukcija tijekom seizmičkih djelovanja. Znanstvenici se slažu da budući projekti trebaju ispuniti zahtijevano ponašanje. Opće proračunske metode za određivanje ponašanja imaju različite pristupe. U nelinearnim analizama postignut je značajan napredak u posljednje vrijeme. Deformacije, pomaci i oštećenja pouzdaniji su parametri od vrijednosti naprezanja pri određivanju ponašanja konstrukcije. Glavna svrha tih metoda jest određivanje ponašanja konstrukcije

uslijed potresa. Pri tome se obično primjenjuje inkrementalna statička metoda postupnog guranja u kojoj se razmatraju geometrija konstrukcijskog sustava i poprečni presjeci, te svojstva materijala s neelastičnim ponašanjem, a horizontalne sile se zadaju u koracima.

Krivulja sposobnosti nosivosti koja predstavlja odnos između poprečne reakcije i pomaka krova za svaku konstrukciju dobivena je primjenom metode postupnog guranja.

Ciljani pomaci izračunani su prema normama FEMA-356, FEMA-440 i TEC-2007 i označeni na krivuljama sposobnosti nosivosti, kao što se vidi na slici 13. Zgrade

su postupno gurane do postizanja ciljane vrijednosti pomaka kako bi se odredile razine oštećenja prema normama uzetim u obzir. Bočne seizmičke sile proporcionalne su dominantnom obliku titranja i zadaju se na sve katove u razmatranom smjeru djelovanja potresa. Nelinearne analize provode se dok se ne dostigne ciljana vrijednost pomaka. Odziv konstrukcije ograničen je na plastične zglobove na oba kraja konstrukcijskih elemenata pri ciljanom pomaku. Razmatrane građevine su

Tablica 5. Oštećenje elemenata na zgradi s 3 kata

Elementi	Kat	Stanje oštećenja	TEC-2007			FEMA-356			FEMA-440		
			IO	LS	CP	IO	LS	CP	IO	LS	CP
Grede	1	Broj	-	10	2	-	12	-	-	12	-
		[%]	-	83	17	-	100	-	-	100	-
	2	Broj	8	4	-	10	2	-	10	2	-
		[%]	67	33	-	83	17	-	83	17	-
	3	Broj	12	-	-	12	-	-	12	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
Stupovi	1	Broj	4	12	-	8	8	-	8	8	-
		[%]	25	75	-	50	50	-	50	50	-
	2	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	3	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-

IO - zgrada sigurna za boravak; LS - zgrada ima dostatnu sigurnost protiv sloma; CP - značajna oštećenja ali zgrada ima dostatnu nosivost za vertikalna opterećenja

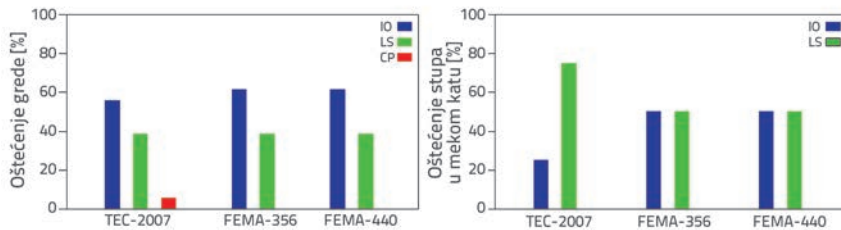
Tablica 6. Oštećenje elemenata na zgradi s 5 katova

Elementi	Kat	Stanje oštećenja	TEC-2007			FEMA-356			FEMA-440		
			IO	LS	CP	IO	LS	CP	IO	LS	CP
Grede	1	Broj	-	6	6	-	8	4	-	8	4
		[%]	-	50	50	-	67	33	-	67	33
	2	Broj	4	6	2	8	4	-	10	2	-
		[%]	33	50	17	67	33	-	83	17	-
	3	Broj	10	2	-	12	-	-	12	-	-
		[%]	83	17	-	100	-	-	100	-	-
	4	Broj	12	-	-	12	-	-	12	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	5	Broj	12	-	-	12	-	-	12	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
Stupovi	1	Broj	-	8	8	-	12	4	-	14	2
		[%]	-	50	50	-	75	25	-	87	13
	2	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	3	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	4	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	5	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-

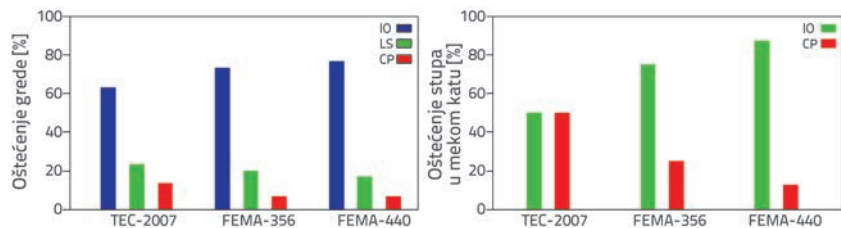
Table 7. Oštećenje elemenata na zgradi sa 7 katova

Elementi	Kat	Stanje oštećenja	TEC-2007			FEMA-356			FEMA-440		
			IO	LS	CP	IO	LS	CP	IO	LS	CP
Grede	1	Broj	-	2	10	-	4	8	-	6	6
		[%]	-	17	83	-	33	67	-	50	50
	2	Broj	-	6	6	-	8	4	-	10	2
		[%]	-	50	50	-	67	33	-	83	17
	3	Broj	8	4	-	10	2	-	10	2	-
		[%]	67	33	-	83	17	-	83	17	-
	4	Broj	10	2	-	12	-	-	12	-	-
		[%]	83	17	-	100	-	-	100	-	-
	5	Broj	12	-	-	12	-	-	12	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	6	Broj	12	-	-	12	-	-	12	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	7	Broj	12	-	-	12	-	-	12	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
Stupovi	1	Broj	-	-	16	-	4	12	-	6	10
		[%]	-	-	100	-	25	75	-	37	63
	2	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	3	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	4	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	5	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	6	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-
	7	Broj	16	-	-	16	-	-	16	-	-
		[%]	100	-	-	100	-	-	100	-	-

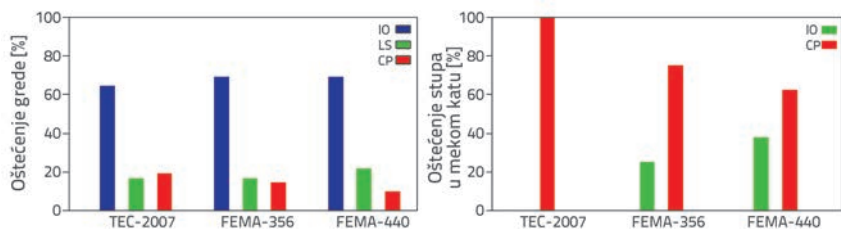




Slika 15. Oštećenja na zgradi s 3 kata



Slika 16. Oštećenja na zgradi s 5 katova



Slika 17. Oštećenja na zgradi sa 7 katova

postupno gurane do ciljanih pomaka pri čemu se otvaraju plastični zglobovi na krajevima konstrukcijskih elemenata.

Najveći ciljani pomak izračunan je prema normi TEC-2007 pa su najkonzervativniji rezultati dobiveni prema toj normi, kao što je prikazano na slici 14. Slični koraci u dobivanju rješenja su poduzeti i prema ostalim normama.

Nakon što su provedene nelinearne analize, a zgrade izložene opterećenju do ciljanih pomaka za svaku normu, stanje oštećenja elemenata određuje se prema definiranim razinama ponašanja IO, LS i CP. Zbog simetričnog tlocrta zgrade, istih poprečnih presjeka i materijalnih svojstava, oštećenja u smjeru x i y bila su jednaka. Zbog toga su rezultati za svaki kat prikazani samo za jedan smjer, prema normama TEC-2007, FEMA-356 i FEMA-440, a nalaze se u tablicama od 5. do 7.

Ukupna oštećenja svih konstrukcijskih elemenata izračunana su prema svakoj normi. Budući da se oštećenja stupova događaju

Nelinearna analiza ponašanja može se provesti dinamičkim ili statičkim proračunskim metodama. Budući da je potrebno više podataka o materijalu konstrukcijskog sustava, takve su metode pouzdanije. Međutim, dinamička analiza zahtijeva puno više vremena od statičke. Stoga su znanstvenici češće primjenjivali statičke analize. Te se metode temelje na ocjeni odnosa poprečne reakcije i pomaka, ovisno o vrsti materijala te o geometrijskim promjenama na konstrukciji.

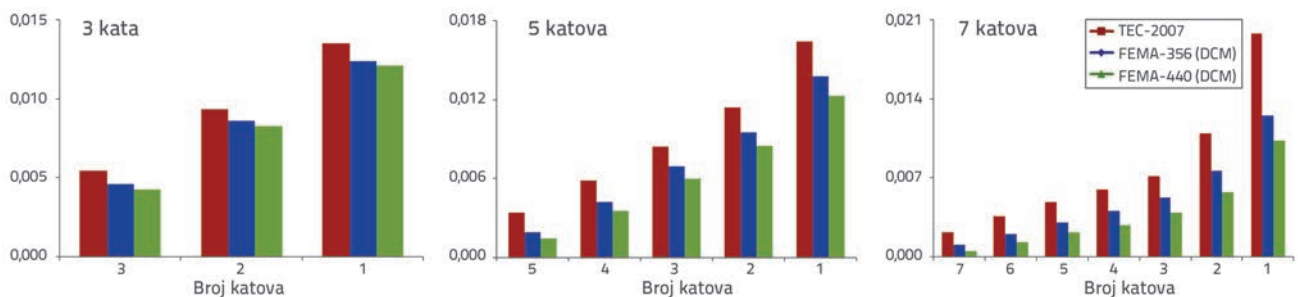
Seizmičko ponašanje konstrukcija može se realnije odrediti metodama koje se temelje na pomacima. Takve se metode temelje na odnosu zahtijevanih pomaka i bočne nosivosti zgrade za specifično podrhtavanje tla. U tim metodama zahtijevani pomak se određuje numerički. Metoda postupnog guranja je pojednostavljeni nelinearni statički proračunski postupak s inkrementalnim seizmičkim opterećenjima, čija se vrijednost postupno povećava do pojave mehanizma plastičnog sloma.

u mekom katu, rezultati su pokazani za grede i stupove prizemlja, na slikama od 15. do 17.

Budući da njihovo ponašanje izravno utječe na razinu oštećenja, međukatni pomaci zgrada s tri, pet i sedam katova, pri ciljanim pomacima, izračunani su na temelju normi kao što je prikazano na slici 18. Najveće vrijednosti dobivene su u prizemlju, a TEC-2007 daje najkonzervativnije rezultate među svim normama.

## 6. Zaključci i prijedlozi

Oštećenja i slomovi konstrukcija uslijed potresa jačih intenziteta uzrokuju znatne gubitke, pa se kontinuirano razvijaju postupci seizmičke analize na temelju zahtijevanog ponašanja konstrukcije i postupci ocjene konstrukcija. Znanstvenici su posebno proučavali određivanje seizmičkog ponašanja postojećih građevina i postupke ojačavanja zgrada kako bi izdržale potrese. Nedavno doneseni propisi težište stavljaju na definiranje linearnih i nelinearnih metoda ocjene ponašanja.



Slika 18. Međukatni pomaci prema različitim normama

Primijenjen je model koncentrirane plastičnosti, pri čemu je neelastično ponašanje definirano plastičnim zglobovima na krajevima konstrukcijskih elemenata. Krivulja sposobnosti nosivosti dobivena je nakon analiza primjenom metode postupnog guranja kako bi se odredilo stanje oštećenja i deformacije konstrukcijskih elemenata.

Meki kat značajna je nepravilnost u zgradama, jer uzrokuje oštećenje konstrukcije i gubitke. Glavni razlozi takvih nepravilnosti su katovi, odnosno prizemlja projektirana za trgovačku namjenu, a imaju različitu visinu od ostalih katova u zgradi, bez zidova od opeke. Budući da je ponašanje mekog prizemlja drugačije od ostalih katova, a u njihovim stupovima su uočeni veći pomaci, postoji opasnost da se takve zgrade sruše tijekom potresa. Znanstvenici traže način za razumijevanje mekih prizemlja uslijed seizmičkih aktivnosti koje uzrokuju neproporcionalna bočna naprezanja i ozbiljna oštećenja.

U ovom radu provedene su nelinearne statičke analize armiranobetonskih zgrada s tri, pet i sedam katova, s mekim prizemljima, prema normama FEMA-356 (DCM), FEMA-440 (DCM) i TEC-2007.

Svojstva materijala, tlocrt kata i veličine poprečnih presjeka konstantne su za sve analizirane zgrade. Te konstrukcije predstavljaju tipične niske, srednje visoke i visoke stambene zgrade. Krivulje sposobnosti nosivosti zgrada određene su primjenom nelinearne metode postupnog guranja. Nakon toga, svaka zgrada izložena je opterećenju do pojave ciljanih pomaka u skladu s normama. Određena su modalna svojstva konstrukcija

s razinama oštećenja konstrukcijskih elemenata i pomacima katova pri ciljanim pomacima.

Nakon ocjene ponašanja zgrada prema trima normama, zaključeno je da su najkonzervativniji rezultati dobiveni prema normi TEC-2007, u odnosu na norme FEMA-356 i FEMA-440. Najveća oštećenja pojavila su se u prizemljima, kao što je bilo očekivano. Manja oštećenja zabilježena su na višim katovima zgrada. Oštećenja konstrukcijskih elemenata proporcionalno se povećavaju s visinom zgrade. Velika oštećenja elemenata i veći pomaci katova zabilježeni su na zgradi sa 7 katova. Dok svi stupovi u mekom prizemlju zgrade sa 7 katova dostižu razinu ponašanja CP (stanje značajnih oštećenja zgrade na rubu djelomičnog ili potpunog sloma, uz dostatnu nosivost za vertikalna opterećenja) prema TEC-2007, 75 % stupova dostiže tu razinu prema FEMA-356, odnosno 63 % prema FEMA-440. Maksimalna oštećenja grede također su zabilježena prema TEC-2007. Oko 19 % greda sedmokatnice ostaje na razini CP prema TEC-2007, 14,3 % prema FEMA-356 i 9,5 % prema FEMA-440.

Prema dobivenim rezultatima, zaključeno je da nepravilna mekana prizemlja mogu uzrokovati teška oštećenja, prije svega u visokim zgradama. Stupovi u mekim prizemljima omogućuju razinu ponašanja LS (stanje značajnih oštećenja zgrade, uz dostatnu sigurnost protiv lokalnog ili globalnog sloma), samo u zgradama s 3 kata. S druge strane, stanje sloma nastupilo je na više katova, prije svega u gredama zgrada sa 7 katova. Konačno, ovo se istraživanje može unaprijediti analizom različitih vrsta konstrukcija s ojačanjima, primjenom nelinearnih metoda prema različitim normama.

## LITERATURA

- [1] Dolsek, M.: Development of Computing Environment for the Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Frames by Using Simplified Nonlinear Models, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8 (2010) 6, pp. 1309-1329.
- [2] Verderame, G.M., Polese, M., Mariniello, C., Manfredi, G.: A Simulated Design Procedure for the Assessment of Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings, *Advances in Engineering Software*, 14 (2010) 2, pp. 323-335.
- [3] Rozman, M., Fajfar, P.: Seismic Response of a RC Frame Building Designed according to Old and Modern Practices, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7 (2009) 3, pp. 779-799, <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-009-9119-4>
- [4] Golghate, K., Vijay, B., Amit, S.: Pushover Analysis of 4 Storey's Reinforced Concrete Building, *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2 (2013) 3, pp. 80-84.
- [5] Peruš, I., Klinc, P., Dolenc, M., Dolšek, M.: A Web-Based Methodology for the Prediction of Approximate IDA Curves, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42 (2013) 1, pp. 43-60.
- [6] ASTM E119-07, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, *West, Conshohocken, PA*, 2007.
- [7] Kalkan, E., Kunnath, S.K.: Assessment of Current Nonlinear Static Procedures for Seismic Evaluation of Buildings, *Engineering Structures*, 29 (2007), pp. 305-316, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.04.012>
- [8] Zou, X.K., Chan, C.M.: Optimal seismic performance-based design of reinforced concrete buildings using nonlinear pushover analysis, *Engineering Structures*, 27 (2005) 8, pp. 1289-1302, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.001>
- [9] FEMA-356, Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management Agency, Washington*, 2000.
- [10] FEMA-440, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, *Management Agency, Washington*, 2004.
- [11] Turkish Earthquake Code 2007, Specifications for Buildings to Be Built in Seismic Areas. *Ministry of Public Works and Settlement, Ankara*, 2007.
- [12] Stefano, M.D., Pintucchi, B.: A Review of Research on Seismic Behaviour of Irregular Building Structures since 2002. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6 (2008) 2, pp. 285-308, <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-007-9052-3>
- [13] Soni, D.P., Mistry, B.B.: Qualitative Review of Seismic Response of Vertically Irregular Building Frames. *Iset Journal of Earthquake Technology*, 43 (2006) 4, pp. 121-132.

- [14] SAP2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual, Computers and Structures Inc. Berkeley.
- [15] Kirac, N., Dogan, M., Ozbasaran, H.: Failure of Weak-Storey during Earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, 18 (2011) 2, pp. 572-581, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.09.021>
- [16] Lee, H.S., Ko, D.W.: Seismic Response Characteristics of High-Rise RC Wall Buildings Having Different Irregularities in Lower Stories. *Engineering Structures*, 29 (2007) 11, pp. 3149-3167, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.02.014>
- [17] <http://www.allianzrisk.com/>
- [18] İnel, M., Özmen, H.B., Bilgin, H.: SEMAp, Tubitak Research Project, 2007.
- [19] Scott, B.D., Park, R., Priestley, M.J.N.: Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates. *ACI Structural Journal*, 76 (1982) 1, pp. 13-27
- [20] Fajfar, P.: A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design. *Earthquake Spectra*, 16 (2000) 3, pp. 573-592, <http://dx.doi.org/10.1193/1.1586128>
- [21] İnel, M., Özmen, H.B.: Effect of Plastic Hinge Properties in Non-Linear Analysis of Reinforced Concrete Buildings. *Engineering Structures*, 28 (2006) 11, pp. 1494-1502, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.01.017>
- [22] Yalçiner, H., Marar, K.: Seismic Performance Evaluation of Corroded Reinforced Concrete Structures by Using Default and User Defined Plastic Hinge Properties. *Earthquake Engineering*, Chapter 11, USA, 2012.