

# Nelinearni odgovor konstrukcija dimezioniranih hrvatskim i europskim normama

Vladimir Sigmund, Ivica Guljaš, Andreas Stanić

## Ključne riječi

konstrukcija,  
dimezioniranje,  
hrvatske norme,  
Eurokod 8,  
nelinearni odgovor,  
usporedba rezultata

## Key words

structure,  
design,  
Croatian standards,  
Eurocode 8,  
nonlinear response,  
comparison of results

## Mots clés

construction,  
dimensionnement,  
normes croates,  
Eurocode 8,  
réponse non linéaire,  
comparaison  
des résultats

## Ключевые слова:

конструкция, расчёт,  
хорватские нормы,  
Еврокод 8, нелинейный  
ответ, сравнение  
результатов

## Schlüsselworte:

Konstruktion,  
Bemessung,  
kroatische Normen,  
Eurokode 8,  
unlineare Erwiederung,  
Vergleich der Ergebnisse

V. Sigmund, I. Guljaš, A. Stanić

Pregledni rad

## Nelinearni odgovor konstrukcija dimezioniranih hrvatskim i europskim normama

U radu se prikazuje usporedba nelinearnog seizmičkog odgovora konstrukcija dimezioniranih prema hrvatskim normama (HRP) i prema Eurokodu (EC8) koja je napravljena na modelima regularnih armiranobetonskih konstrukcija sa tri sustava za preuzimanje horizontalnih sila. Odabrano je više modela konstrukcija, a njihovi odgovori na djelovanje potresa izračunani su za pretpostavljeno djelovanje niza potresa. Globalni i lokalni parametri odgovora su analizirani i predloženi su odgovarajući zaključci.

V. Sigmund, I. Guljaš, A. Stanić

Subject review

## Nonlinear response of structures designed according to Croatian and European standards

The nonlinear seismic response of structures dimensioned according to Croatian standards is compared with that of structures designed according to Eurocode 8. This comparison is based on models of regular reinforced-concrete structures with three systems for assuming horizontal forces. Several structural models have been selected and their seismic responses were calculated for the assumed impact of a series of earthquakes. Global and local seismic response parameters are analyzed and appropriate conclusions are proposed.

V. Sigmund, I. Guljaš, A. Stanić

Ouvrage de synthèse

## Réponse non linéaire des constructions dimensionnées selon les normes croates et européennes

L'article présente une comparaison de la réponse sismique non linéaire des constructions dimensionnées selon les normes croates et selon l'Eurocode 8, faite sur les modèles des constructions régulières en béton armé à trois systèmes de prise en charge des forces horizontales. On a choisi plusieurs modèles de constructions, tandis que leurs réponses à l'action sismique ont été calculées pour l'action supposée d'une série de séismes. Les paramètres globaux et locaux des réponses ont été analysés et commentés par des conclusions correspondantes.

В. Сигмунд, И. Гуляш, А. Станич

Обзорная работа

## Нелинейный ответ конструкций рассчитанных хорватским и европейским нормам

В работе показывается сравнение нелинейного сейсмического ответа конструкций рассчитанных по Хорватским нормам и по Еврокоду 8, выполненное на моделях регулярных железобетонных конструкций с тремя системами для переноса горизонтальных сил. Выбрано большее число моделей конструкций, а их ответы на действие землетрясений рассчитаны для предполагаемого действия ряда землетрясений. Глобальные и локальные параметры ответов анализированы, и предложены соответствующие заключения.

V. Sigmund, I. Guljaš, A. Stanić

Übersichtsarbeit

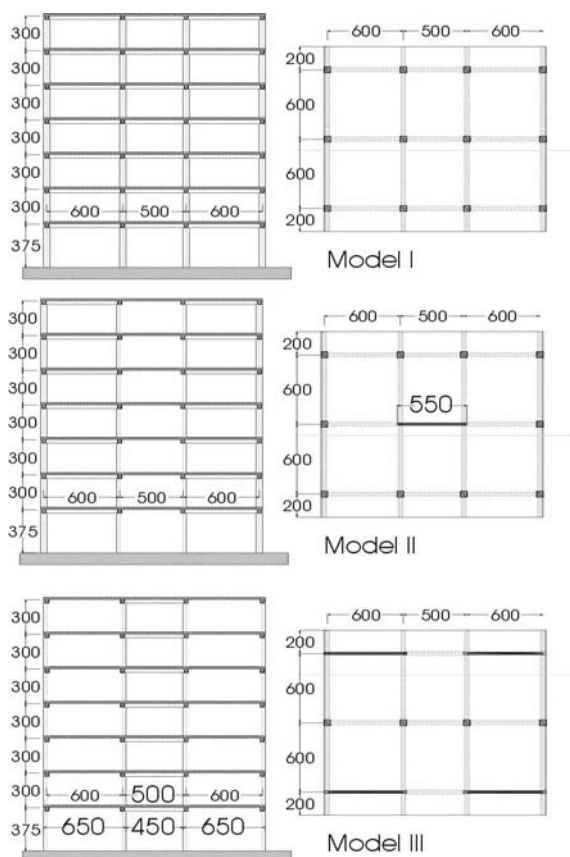
## Unlineare Erwiederung von Konstruktionen bemessen nach kroatischen und europäischen Normen

Dargestellt ist ein Vergleich der unlinearen seismischen Erwiederung von Konstruktionen, bemessen nach kroatischen Normen und nach Eurokode 8, ausgeführt an Modellen regulärer Stahlbetonkonstruktionen mit drei Systemen für die Übernahme von horizontalen Kräften. Es wurden mehrere Konstruktionsmodelle auserwählt, und deren Erwiederungen auf die Erdbebenwirkung für vorausgesetzte Einwirkung einer Reihe von Erdbeben berechnet. Globale und lokale Erwiederungsparameter sind analysiert und entsprechende Schlüsse vorgeschlagen.

Autori: Prof. dr. sc. **Vladimir Sigmund**, dipl. ing. građ., mr. sc. **Ivica Guljaš**, dipl. ing. građ., **Andreas Stanić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku

## 1 Uvod

Na primjeru modelnih armiranobetonskih konstrukcija projektiranih prema hrvatskim propisima (HRP [3, 5]) i europskim normama (EC8 [9, 10]) analizirano je značenje prelaska na europske norme. Odabrane modelne konstrukcije uspoređene su u fazi projektiranja i pri nelinearnom dinamičkom odgovoru. Rezultati iz faze projektiranja prikazani su u [1].



Slika 1. Modelni objekti M1, M2 i M3

Modelne su konstrukcije regularne armiranobetonske konstrukcije od sedam katova i istih tlocrta. Horizontalna stabilnost konstrukcija osigurava se s tri različita sustava: okvirima, mješovitim (okvir + zid) i sustavom s nosivim zidovima. Stalno i korisno opterećenje te svojstva materijala jednaki su za sve modele i propise. Konstrukcije su locirane u VIII. i IX. potresnoj zoni i na tlu srednjih vrijednosti. Početne su dimenzije elemenata pretpostavljene iste, a razlike u količini materijala (armatura i beton) nastaju zbog primjene dvaju propisa za dimenzioniranje i oblikovanje konstrukcija građenih u seizmičkim područjima.

Model 1 (M1) jest armiranobetonska okvirna konstrukcija sa po tri okvira u X i Y smjeru. Model 2 (M2) mješoviti je sustav okvira i okvira sa zidom u X smjeru. Model 3 (M3) ima sustav nosivih zidova smještenih u ravni dvaju vanjskih okvira. Analiziran je smjer X.

## 2 Projektiranje i dimenzioniranje

Modelne su konstrukcije (M1, M2 i M3) dimenzionirane sukladno sljedećim propisima za opterećenja i dimenzioniranje elemenata:

propis	potresno opterećenje	dimenzioniranje
HRN	Pravilnik [3]	PBAB [5]
EC	EC8 [10]	EC2 [9]

Vertikalno opterećenje (stalno i korisno) te horizontalno opterećenje od vjetrova isto je za sve modele. Horizontalno opterećenje od potresa za povratni period potresa od 500 godina i dvije zone seizmičkog intenziteta VIII. i IX. MKS-64 računa se sukladno projektnim spektrima sadržanima u Pravilniku i EC8. Presječne sile izračunane su za najnepovoljnije kombinacije vertikalnog i horizontalnog opterećenja, uz uporabu pripadajućih parcijalnih koeficijenata sigurnosti. Dimenzioniranje je konstrukcija sprovedeno prema HRP i EC8 te prema posebnim kon-

Tablica 1. Osnovni podaci o geometriji, materijalu i dinamičkim svojstvima modela

Norma	H1	H2-6	rasponi	f <sub>ctk</sub>	f <sub>yd</sub>	stup	grede	ploče	zid	To
	[m]	[m]	[m]	[Mpa]	[Mpa]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[sec]
<b>Model 1</b>										
HRN	3.75	3	6,5,6	40	400/500	50/50	30/50	18		0.865
EC8-HD	3.75	3	6,5,6	40	400/500	50/50	30/50	18		0.830
<b>Model 2</b>										
HRN	3.75	3	6,5,6	40	400/500	50/50	30/50	18	25	0.568
EC8-HD	3.75	3	6,5,6	40	400/500	50/50	30/50	18	35	0.552
<b>Model 3</b>										
HRN	3.75	3	6,5,6	40	400/500	50/50	30/50	18	25	0.323
EC8-HD	3.75	3	6,5,6	40	400/500	50/50	30/50	18	40	0.314
H - visina objekta od tla; L1 - rasponi greda; dimenzije stupa b/d; dimenzije greda b/d; ploče - debljina ploča; zid - debljina zida; To - osnovni period osciliranja konstrukcije; f <sub>ctk</sub> - MB; f <sub>yd</sub> - granica tečenja čelika.										

struktivnim zahtjevima za objekte u seizmičkim područjima. Rezultati dimenzioniranja i usporedba potrebnih količina materijala navedeni su u [11, 12].

**3 Nelinearna analiza**

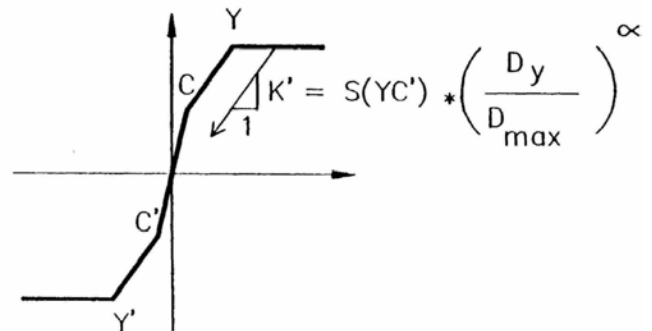
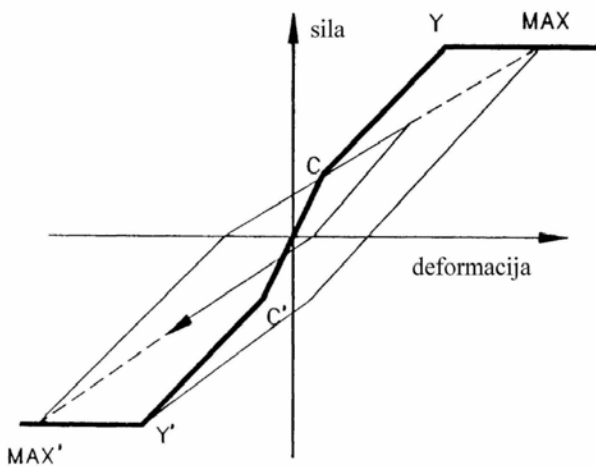
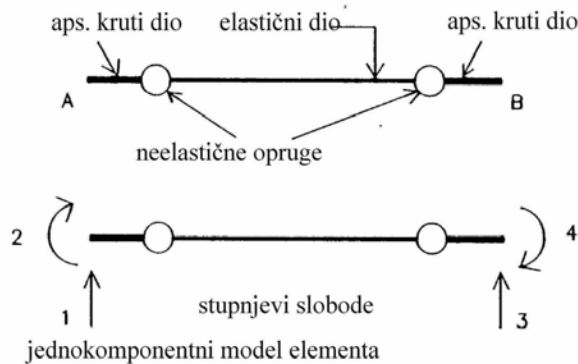
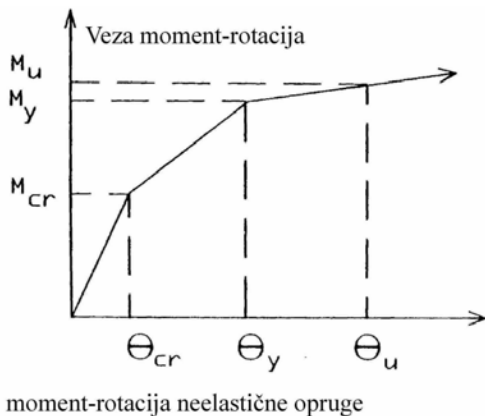
Za nelinearnu analizu odgovora armiranobetonskih konstrukcija uporabljen je program LARZ [7]. Program je razvijen i kalibriran primjenom rezultata dinamičkih ispitivanja armiranobetonskih konstrukcija koje su sadržavale okvire i zidove [6, 13, 17]. Proračun je ograničen na ravninske probleme uz zanemarivanje deformacija izvan ravnina. U brojnim radovima pokazano je da rezultati proračuna odstupaju do najviše 10% od mjerenih rezultata na modelima.

Numerički se model definira element po element. Elementi konstrukcije definirani su geometrijom, materijalom i primarnim krivuljama ovisnosti između momenta i zakrivljenosti (momenta i rotacije, slika 2.a) te poprečne sile i pomaka. Za svaku konstrukciju, dimenzioniranu prema HRP i EC8, formirani su nelinearni matematički

modeli sa više stupnjeva slobode (element po element). Neelastičnosti je koncentrirana u predjelima plastičnih zglobova. Mase su izračunane za opterećenje  $g + p/2$  i koncentrirane su u katovima. Svaki kat ima sljedeće stupnjeve slobode: horizontalni, vertikalni i rotaciju. Početna krutost elemenata određena je za bruto betonski presjek elemenata. Modul elastičnosti izračunan je prema [12], a modul posmika, pretpostavljen je sa  $G = E/2$ . Povećavanjem deformacije modul posmika zida se smanjuje (slika 3.d). Uzdužna sila za izračun nosivosti stupova i zidova jest sila od stalnog opterećenje.

Konstrukcije su upete u temelje (ili temeljnu konstrukciju – podrum) i interakcija između tla i konstrukcije je zanemarena.

Trenutačne su matrice krutosti elemenata konstantne unutar vremenskog intervala. On se uzima dovoljno malen radi sprječavanja nestabilnosti i izbjegavanja velikih neuravnoteženih sila na kraju intervala. Numerička integracija sprovodi se Newmark-Beta metodom, uz konstantni koeficijent  $\beta = 0,25$ . Ekvivalentno viskozno priguše-



Slika 2. Primarna krivulja za grede i stupove te jednokomponentni model elementa s koncentriranim neelastičnim oprugama na krajevima

nje konstrukcije pretpostavljeno je sa 2%. Veličina početnoga ekvivalentnoga viskoznog prigušenja nije značajna za konstrukcije koje uđu u neelastično područje, pa se smatra da ne utječe bitno na vrijednost rezultata.

Numerički modeli su kalibrirani na rezultatima eksperimentalnih ispitivanja i pokazalo se da izračunati rezultati dobro prezentiraju ponašanje konstrukcija u neelastičnom području.

### 3.1 Primarna krivulja moment-zakrivljenost i poprečna sila-pomak elemenata

Primarna krivulja jest veza između opterećenja i deformacije (moment-zakrivljenost i sila-pomak) pri monotono rastućem opterećenju. Rotacija elementa je integral zakrivljenosti po dužini elementa i mjera je deformacijske sposobnosti elementa. Ona sadrži linearnu vezu moment-zakrivljenost u sredini elementa, nelinearnu vezu moment-zakrivljenost u području plastičnih zglobova na krajevima elementa, te doprinos rotaciji elementa zbog izvlačenja armature iz spoja elemenata (čvorova). Za izračunavanje primarne krivulje elemenata konstrukcije postoje dvije mogućnosti: a) numerički pristup izračunavanju veze između momenta-zakrivljenosti polazeći od karakteristika primarnih krivulja naprezanje-deformacija materijala i b) eksperimentalni pristup kojim se direktno izračunava moment-rotacija elementa na bazi statističke obrade eksperimentalnih rezultata. Izračunane karakteristike krutosti, po objema metodama, slične su za isti materijal i standardne vrijednosti. Vremenske krivulje odgovora te globalne i lokalne karakteristike odgovora, izračunane po objema metodama slične su izmjerjenima, a pogreške su unutar granica tolerancije (do 10%) [13, 17].

Za izračune su primijenjene eksperimentalne jednadžbe za grede i stupove po [1, 2] te za zidove po [8]. Jednadžbe su modificirane tako da odgovaraju zahtijevanim ulaznim parametrima uporabljenoga programa [7].

### 3.2 Model greda i stupova

Grede i stupovi predstavljani su kao idealno elastični elementi bez mase sa dvije neelastične opruge na krajevima elementa (slika 2.b) u kojima se koncentriraju neelastične deformacije zbog djelovanja momenta savijanja. Moguće su dvije krute zone ispred neelastičnih opruga čime se predstavlja kruta veza između grede i stupa (čvor) te grede i zida. Neelastične opruge predstavljaju histerežno ponašanje armiranobetonskih elemenata pri savijanju i daju krutost i otpor svakoj promjeni pomaka. Primijenjen je Takeda histerezni model sa svojstvima promjene krutosti pri otvaranju pukotina i u momentu nastanka tečenja, trošenje energije i pri malim pomacima nakon prelasku granice tečenja, degradaciju krutosti porastom deformacija (slika 2.c i 2.d). Deformacije od smicanja

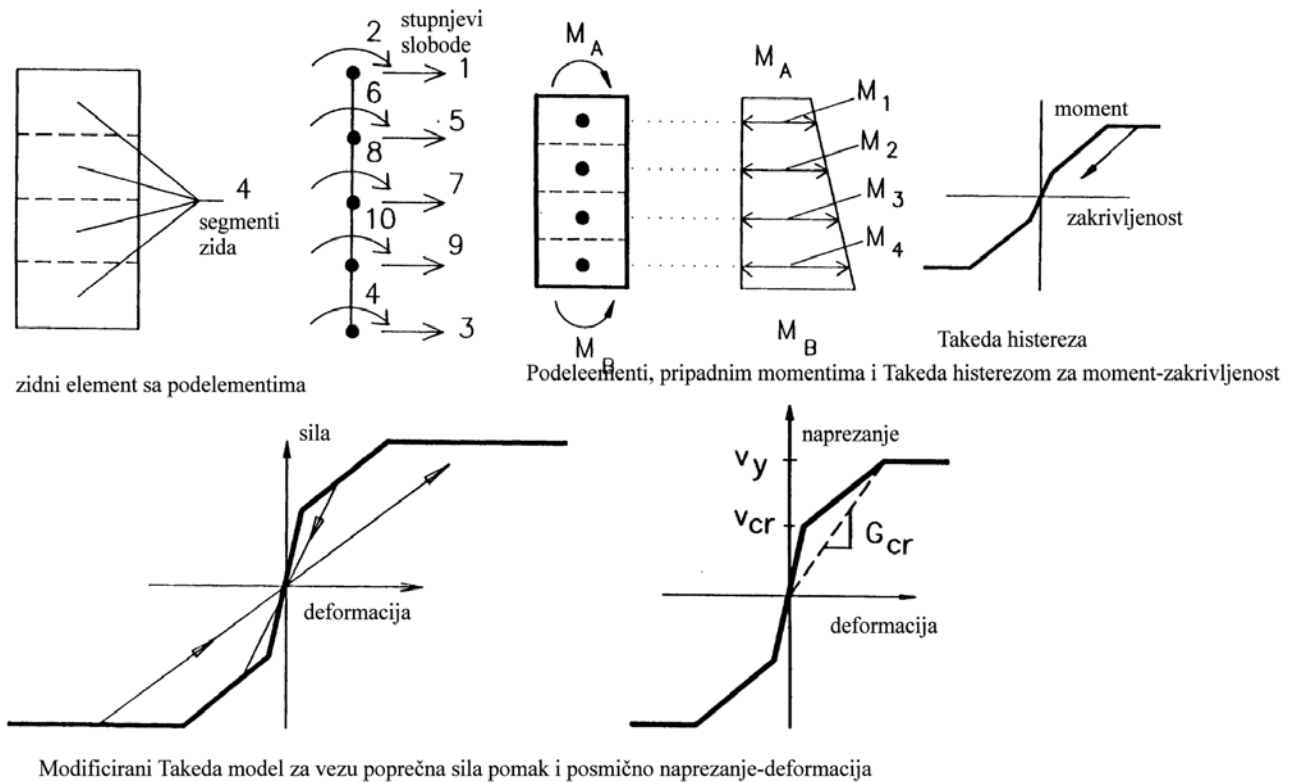
pretpostavljene su proporcionalnim deformacijama savijanja. Istraživanja su pokazala da se uz pravilno odabrane karakteristike primarne krivulje odgovora te kapaciteta histereznog prigušenja, amplituda maksimalnog odgovora i vremenske krivulje odgovora bitno ne razlikuju između raznih histereznih modela.

Inicijalna krutost greda izračunana je uz uzimanje u obzir sudjelujuće širine ploče. Armatura iz ploče zanemaruje se u tijeku projektiranja, ali se njezin utjecaj mora uzeti u obzir pri razmatranju relativnih momenata nosivosti grede i stupa te određivanja potrebnog predimenzioniranja nosivosti stupa u odnosu prema gredi [6]. Početna sudjelujuća širina ploče za izračunavanje nosivosti grede do početka tečenja jest  $b = b_g + 0,25 \times L_1$  (gdje je  $L_1$  = razmak nul-točaka momenta). Armatura iz sudjelujuće širine ploče je iskorištena za izračunavanje negativnih momenata savijanja greda. Konačna sudjelujuća širina ploče, za izračunavanje granične nosivosti, jest  $b = b_g + 20 \times h_0$  (gdje je  $h_0$  = visina ploče i  $b \leq 1$ /raspona u drugom smjeru). Sudjelujuća širina ploče je ista za grede uz vanjske i unutarnje stupove. Elastična dužina greda je osni razmak stupova umanjen za krutu zonu spoja grede i stupa (7/8 debljine stupa). Dužine plastičnih zglobova greda su jednake visini grede.

Elastične karakteristike presjeka stupa izračunane su za puni betonski presjek stupa. Promjena uzdužne sile tijekom djelovanja potresa utječe na elastične deformacije stupa, ali ne na promjene nosivosti kod modela, što je opravdano rezultatima istraživanja. P-Δ efekti (porast momenta zbog vertikalnog opterećenja pri većim iznosima pomaka) uzeti su u obzir. Elastična dužina stupova jest visina kata umanjena za krutu zonu spoja grede i stupa (7/8 debljine grede što predstavlja kruti čvor). Dužina plastičnih zglobova stupova je 0,7 visine stupa.

### 3.3 Model zida

Nelinearni odgovor zidnih elemenata uključuje doprinos deformacija od savijanja i smicanja (slika 3.a). Svaki zid je izdijeljen na segmente unutar kata, a svaki segment može pretrpjeti različite nivoe elastičnih i neelastičnih deformacija (slika 3.b). Time se omogućava promatranje širenja neelastičnosti i opadanja krutosti po visini kata. Krutosti segmenata su u početku djelovanja konstantne, a kasnije se mijenjaju ovisno o stupnju neelastične deformacije segmenta. Histerežno ponašanje pri savijanju definirano je prema pravilima Takeda histereznog modela (slika 2.c i 3.b). Histerezni model veze poprečnih sila i pomaka je modificirani Takedin model s trilinearnom primarnom krivuljom, simetričan oko ishodišta i pri promjeni smjera djelovanja opterećenja prolazi kroz ishodište (slika 3.c i 3.d). Moduli elastičnosti i smicanja, E i G, isti su za sve segmente a potom se mijenjaju ovisno o dosegnutom nivou deformacija.



Slika 3. Model zidnog elementa sa segmentima i histereznim krivuljama za savijanje i smicanje

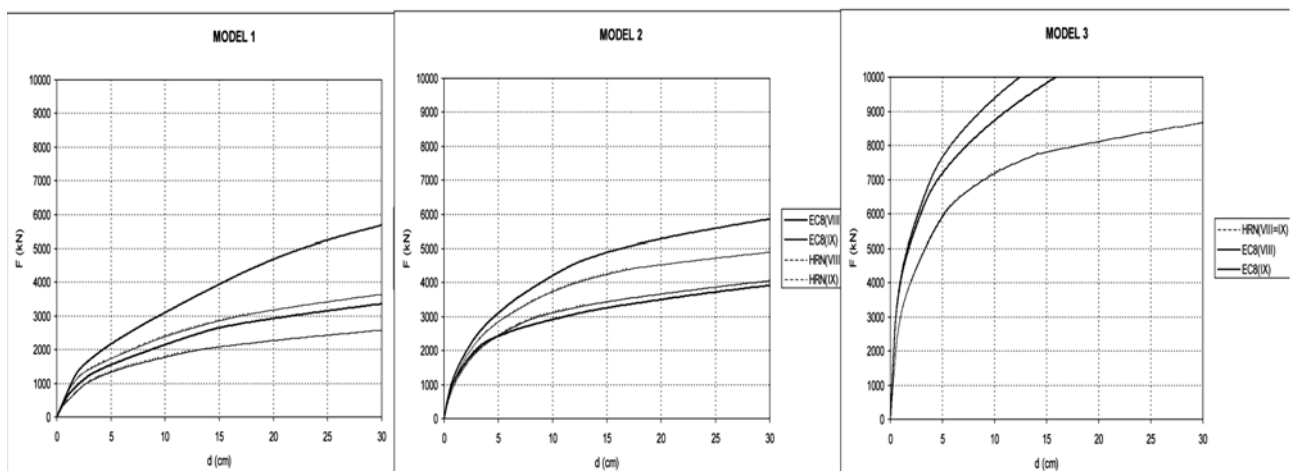
Takedin histerezni model primijenjen je uz parametar degradacije krutosti od  $\alpha = 0,5$  (slika 2.d).

### 3.4 Statička analiza modela (push-over)

Kapacitet nosivosti pojedinih objekata (nosivost na poprečne sile pri osloncu) utvrđen je statičkom nelinearnom analizom (tzv. *push-over*). Ona se provodi na modelu za dinamički proračun, a horizontalne sile se apliciraju po katovima uz inkrementalni prirast u više koraka. Pretpostavljena je trokutasta raspodjela horizontalnog optere-

ćenja (što odgovara dominantnom prvom tonu u odgovoru konstrukcija). Izračunana ovisnost poprečne sile osnove i pomaka krova prikazuje minimalna ukupna nelinearna svojstva konstrukcije i ostvarenu nosivost konstrukcija. Ova se metoda danas često primjenjuje za utvrđivanje nosivosti i mehanizma gubitka nosivosti konstrukcija, bilo u fazi projektiranja bilo u fazi procjene nosivosti postojećih konstrukcija.

Na slici 4. prikazan je odnos poprečne sile i pomaka krova za modelnu konstrukciju. Početna krutost  $M1:M2:M3 =$



Slika 4. Odnos poprečne sile prizemlja i pomaka krova modelnih konstrukcija

720:1450:6200 [kN/cm]. Krutost početka tečenja ( $K_y$ ) u odnosu prema početnoj ( $K_e$ ) iznosi 0,30 za M1 i M2 i 0,20 za M3. Krutost nakon nastanka tečenja redovito je veća za EC8 konstrukcije. Nakon početka tečenja u konstrukciji EC8 modeli imaju strmiju primarnu krivulju radi preraspodjele nosivosti na više elemenata. Kod HRP konstrukcija dolazi do koncentracije nelinearnosti u pojedinim područjima. Primjenom kapacitivnog predimensioniranja kod EC8 modela osiguran je primarni gubitak nosivosti zbog savijanja a ne smicanja. Kod HRP modela, zbog nedefinirane metode provjere ostvarene nosivosti, poželjan duktilni gubitak nosivosti nije osiguran.

### 3.5 Nelinearna dinamička analiza

Nelinearna dinamička analiza modela sprovedena je izračunom vremenskog odgovora na zapise registriranih potresa. Intenzitet potresa modificiran je skaliranjem maksimalne akceleracije da bi se dobile realne vrijednosti najvećih mogućih potresa za VIII. i IX. potresnu zonu (prema vrijednostima SI). Glavne karakteristike odabranih registracija potresa su u tablici 2. Odabrana su tri različita akcelerograma, kako bi se uključili potresi različiti

tih karakteristika (s obzirom na karakteristike tla, veličine pomaka, trajanja i frekvencije). Akcelerogrami Bar N-S i Petrovac N-S zabilježeni su tijekom potresa od 15. 4. 1979 u Crnoj Gori, a El Centro N-S registriran je 1940. godine u Kaliforniji.

Linearni spektri odgovora uz 5% kritičnog prigušenja prikazani su zajedno s projektnim spektrima po HRP i EC8 umnoženima sa koeficijentima redukcije opterećenja za pojedini tip objekta ( $q = 4$  do 5). Projektni spektar po EC8 čini ovojnici razmatranih potresa, dok su spektri po HRP manji od spektara potresa, tj. projektirane konstrukcije moraju imati veći osigurani duktilitet.

### 4 Usporedba nelinearnog odgovora modela

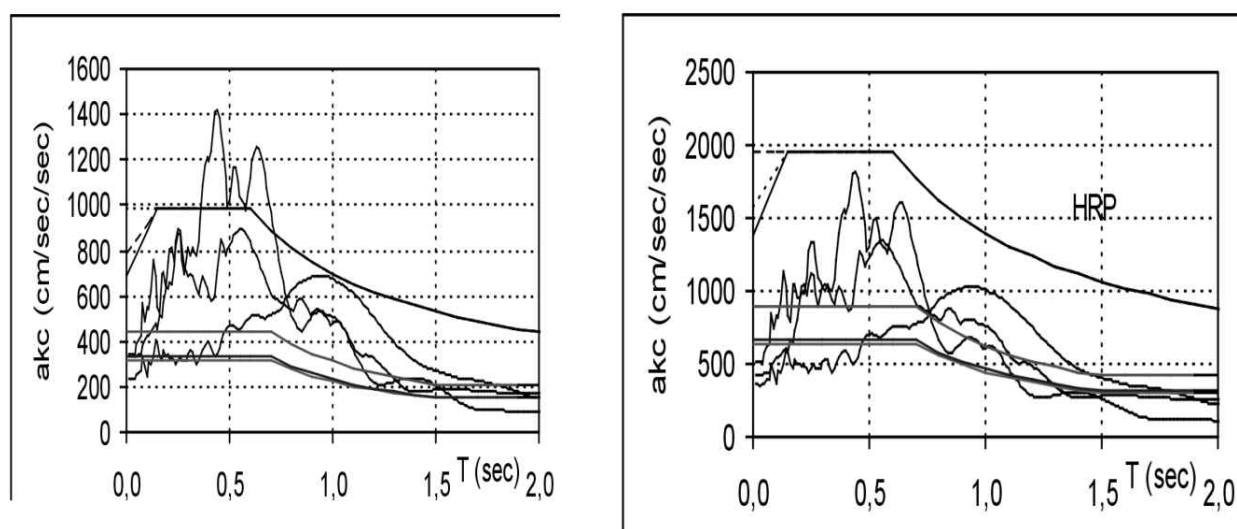
Provedena je nelinearna dinamička analiza modela proračunom vremenskog odgovora na zapise registriranih potresa iz poglavlja 3. Izvršena je analiza svakog modela za svaki od promatranih potresa.

Ocjena odgovora i usporedba rezultata izvršeni su pomoću ovojnice maksimalnih pomaka katova; maksimalnoga horizontalnog pomaka krova (pomak krova/visina kon-

Tablica 2. Osnovni podaci o razmatranim potresima

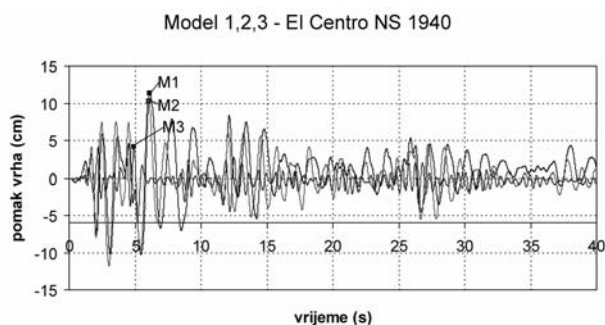
VIII zona Pobuda	Vrijeme [sec]	Acc [g]	SI_20% [cm]	Tg [sec]	IX zona Pobuda	Vrijeme [sec]	Acc [g]	SI_20% [cm]	Tg [sec]
0,67·Bar	47,84	0,24	121,0	0,98	Bar NS	47,84	0,364	180,0	0,98
El Centro	42,40	0,33	93,6	0,55	1.5·EC	42,40	0,500	178,0	0,55
0,78·Pet	48,26	0,34	118,0	0,47	Pet NS	48,26	0,436	151,0	0,47

Acc - vršno ubrzanje tla; S - Intenzitet Housnerovog spektra za prigušenje od 20%; Tg - karakteristični period pomaka tla (period u kojem završava pretpostavljeno područje konstantne akceleracije)



Slika 5. Spektri odgovora potresa uspoređeni s projektnim spektrima za VIII. i IX. potresnu zonu

strukcije = MDR%), relativnog katnog pomaka (relativni pomak kata/visina kata = IDR%), ovojnice maksimalnih poprečnih sila katova; odnosa poprečne sile prizemlja i težine objekta, usporedbe potrebne i ostvarene nosivosti, mjesta i redosljeda otvaranja plastičnih zglobova, potrebnog i ostvarenog duktiliteta presjeka te procjene dosezanja granične nosivosti i uporabljivosti.



Slika 6. Vremenska povijest odgovora modela M1, M2 i M3 za potres El Centro N-S, 1940. i VIII. zonu

Poželjno je da nivo oštećenja objekta tijekom potresa bude što manji, uz uvjet da cijena izvedbe takve konstrukcije bude razumna. Armiranobetonske konstrukcije se danas mogu projektirati i izvesti tako da posjeduju veliki duktilitet i najčešće je prosječan potrebni duktilitet elemenata manji od raspoloživog. Puna uporaba raspoložive nelinearnosti (duktiliteta) najčešće nije moguća zbog toga što a) konstrukcija mora imati svojstva koja će kontrolirati oštećenja kod malih i srednjih potresa koji su česti, b) relativni katni pomak vezan uz duktilitet može biti prevelik što rezultira oštećenjem nekonstruktivnih elemenata i većim pomacima (napreznjima) pri većim potresima i c) su oštećenja najčešće koncentrirana na ograničenom broju lokaliteta i raspodjela duktiliteta je osjetljiva na oblik potresne pobude. Stoga je ne-realno očekivati jednoliku raspodjelu duktiliteta u konstrukciji. Veliki duktilitet elemenata je poželjan, ali tek kao druga linija obrane konstrukcije.

Kriterije ponašanja konstrukcije možemo specificirati za granično uporabno i krajnje granično stanje.

Tablica 3 Veza između IDR i nivoa oštećenja konstruktivnih i nekonstruktivnih elemenata

Nivo oštećenja	Konstruktivni element	Nekonstruktivni element ispune
	područje parametra	područje parametra
male štete	$IDR \leq 0.005$ i $0,5 < \text{ŠP} < 0,8 \text{mm}$	$IDR \leq 0.25$
umjerene štete	$0.005 \leq IDR \leq 0.015$ i $MDR \leq 1$	$0.0025 \leq IDR \leq 0.005$
ozbiljne štete	$0.015 \leq IDR \leq 0.025$ i $MDR > 1$	$0.005 \leq IDR \leq 0.015$
rušenje elemenata	$0.025 \leq IDR$	$0.015 \leq IDR$
IDR - relativni pomak kata/visina kata; MDR - pomak krova/visina objekta; ŠP - širina pukotina		

### Granično uporabno stanje

Konstrukcija mora biti upotrebljiva, bez većih popravaka, odmah nakon manjih potresa koji se mogu očekivati nekoliko puta tijekom uporabe objekta. Konstruktivni element ne smije doći u stanje tečenja niti nekonstruktivni elementi smiju biti oštećeni. Relativni međukatni pomak ograničava se na 1/200 pri djelovanju projektnog opterećenja i on je najčešće mjerodavan za dimenzioniranje. To odgovara MDR od 0,75%, a izračunava se primjenom nelinearne statičke analize i uz realistične pretpostavke o krutosti elemenata uz inkrementalno rastuće horizontalno opterećenje. Nekonstruktivni elementi ispune mogu se smatrati potpuno uništenima pri relativnim katnim pomacima većim od 1,5% kod lakih pregradnih stijena te 0,5% u slučaju krutih nekonstruktivnih elemenata (cigla i cigleni blokovi).

### Krajnje granično stanje

Konstrukcija mora biti u mogućnosti uporabe, čak i uz znatne popravke, nakon potresa većeg intenziteta koji se može dogoditi jednom u tijeku uporabe građevine. Iskazuje se kroz IDR od 1/100 do 1/150 odnosno MDR od 1,5% do 1%. Eksperimentalna iskustva pokazuju da kod dobro detaljiranih konstrukcija MDR mora biti  $< 2,5\%$  da bi se nelinearne deformacije još uvijek mogle rasporediti po visini konstrukcije. Uz dobro detaljiranje konstruktivnih elemenata može se očekivati da stupovi imaju na raspolaganju duktilitet od 2 do 5 (za prvi i posljednji kat) te da grede imaju duktilitet  $> 10$ . Na osnovi eksperimentalnih rezultata iz SAD-a i Japana mogu se postaviti kriteriji za ocjenu nivoa oštećenja elemenata prikazani su u tablici 3.

Rezultati odgovora modela za sve potrese i obje seizmičke zone dani su u tablicama 4. do 7. te na slikama 7. do 10.

Na slikama 7.-10. prikazane su maksimalne komponente odgovora za sva tri potresa i za tri modela dimenzionirana po HRP i EC8 normama.

Tablica 4. Karakteristične vrijednosti odgovora na projektne potrese za VIII. potresnu zonu

Norma	Fh [kN]	Fh/W	Qu [kN]	Bar N-S BS [kN]	SR	Pet N-S BS [kN]	SR	ElCentroB S [kN]	SR
<b>Model 1</b>									
HRP	810	0,040	2650	1922	0,095	1863	0,092	2051	0,101
EC8-HD	1470	0,081	3450	2629	0,145	2459	0,135	2534	0,140
<b>Model 2</b>									
HRP	1317	0,065	3200	3716	0,183	3816	0,188	4191	0,207
EC8-HD	1815	0,100	2950	3474	0,191	3756	0,207	4357	0,240
<b>Model 3</b>									
HRP	1317	0,065	12260	6422	0,317	8742	0,431	7726	0,381
EC8-HD	2505	0,138	8800	5602	0,309	11772	0,648	8162	0,450

Fh - projektna poprečna sila pri osloncu; W - težina objekta za g + p/2; Qu - poprečna sila za MDR - 1,4%;  
BS - izračunata maksimalna poprečna sila; SR - odnos između izračunate maksimalne poprečne sile i težine objekta

Tablica 5. Karakteristične vrijednosti odgovora na projektne potrese za VIII. potresnu zonu

Norma	Qy/dy [kN/cm]	Bar N-S BS [N]	MDR [%]	IDR [%]	Pet N-S BS [kN]	MDR [%]	IDR [%]	El Centro BS [kN]	MDR [%]	IDR [%]
<b>Model 1</b>										
HRP	1750/7,4	1922	0,69	1,00	1863	0,57	1,02	2051	0,57	0,82
EC8-HD	2145/8,1	2629	0,82	1,19	2459	0,62	0,98	2534	0,52	0,82
<b>Model 2</b>										
HRP	2870/5,5	3716	0,87	1,11	3816	0,61	0,90	4191	0,56	0,71
EC8-HD	2870/6,1	3474	0,81	0,97	3756	0,52	0,81	4357	0,54	0,91
<b>Model 3</b>										
HRP	7150/7,0	6422	0,15	0,18	8742	0,60	0,75	7726	0,39	0,47
EC8-HD	8350/6,5	5602	0,08	0,09	11772	0,72	0,83	8162	0,24	0,27

Qy/dy - poprečna sila i pomak krova pri početku tečenja; BS - poprečna sila pri osloncu; MDR - pomak krova/visina objekta u %; IDR - relativni pomak kata/visina kata u %

Tablica 6. Karakteristične vrijednosti odgovora na projektne potrese za IX. potresnu zonu

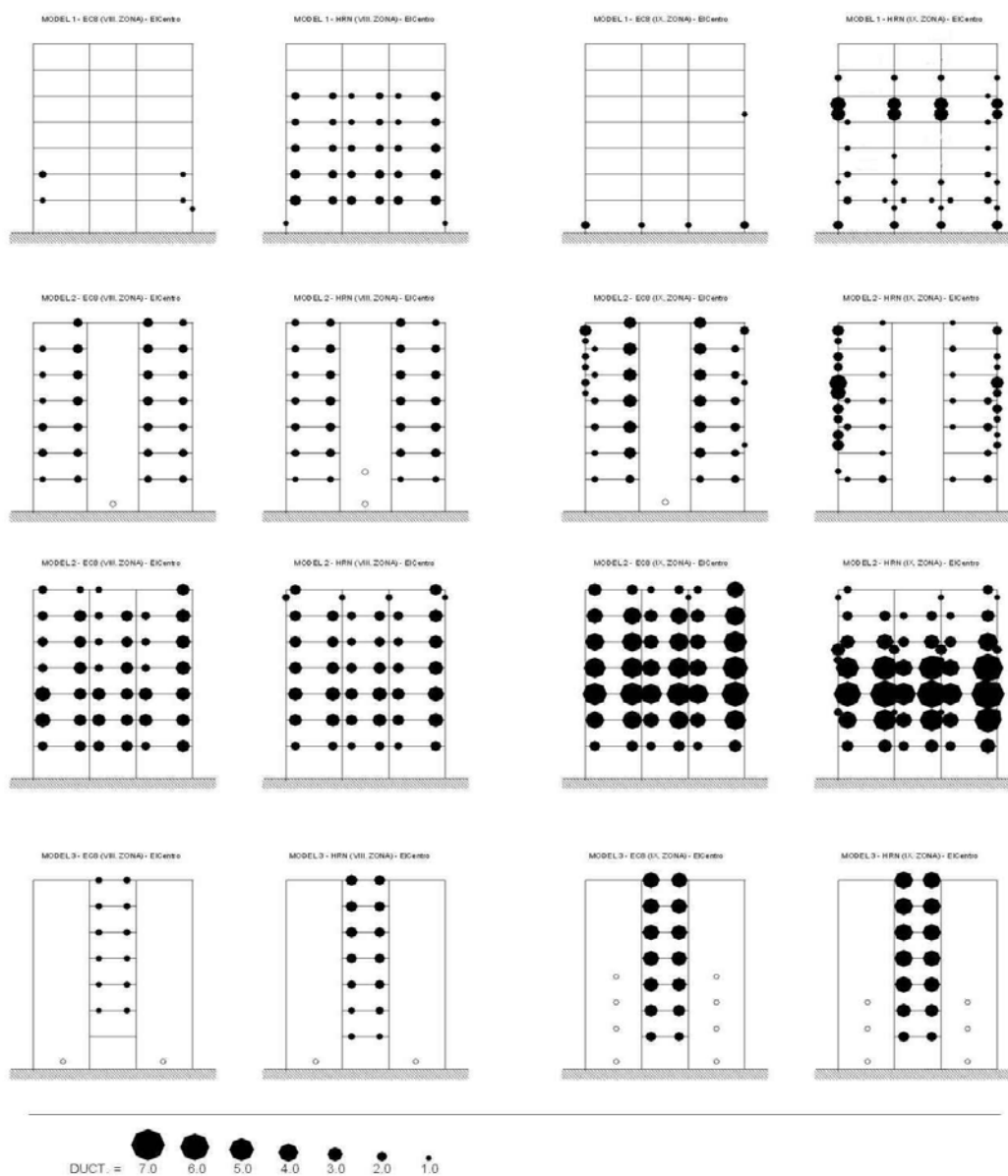
Norma	Qy/dy [kN/cm]	Bar N-S BS [kN]	MDR [%]	IDR [%]	Pet N-S BS [kN]	MDR [%]	IDR [%]	El Centro BS (kN)	MDR [%]	IDR [%]
<b>Model 1</b>										
HRP	2450/8,25	3203	1,06	1,68	2750	0,78	1,51	2969	0,81	1,39
EC8-HD	3450/10,0	5367	1,32	2,08	4325	0,76	1,09	4676	0,80	1,40
<b>Model 2</b>										
HRP	3610/6,6	4936	1,31	2,60	4709	0,67	1,41	5171	0,93	1,60
EC8-HD	4050/7,5	5795	1,31	1,86	5277	0,74	1,06	6428	0,89	1,24
<b>Model 3</b>										
HRP	7150/7,0	7622	0,32	0,37	8470	0,73	1,07	8956	0,67	0,80
EC8-HD	9200/7,8	9598	0,20	0,23	12258	0,68	0,78	12180	0,59	0,71

BS - poprečna sila pri osloncu; TD - pomak krova; MDR - prosj. pomak/visina objekta u %

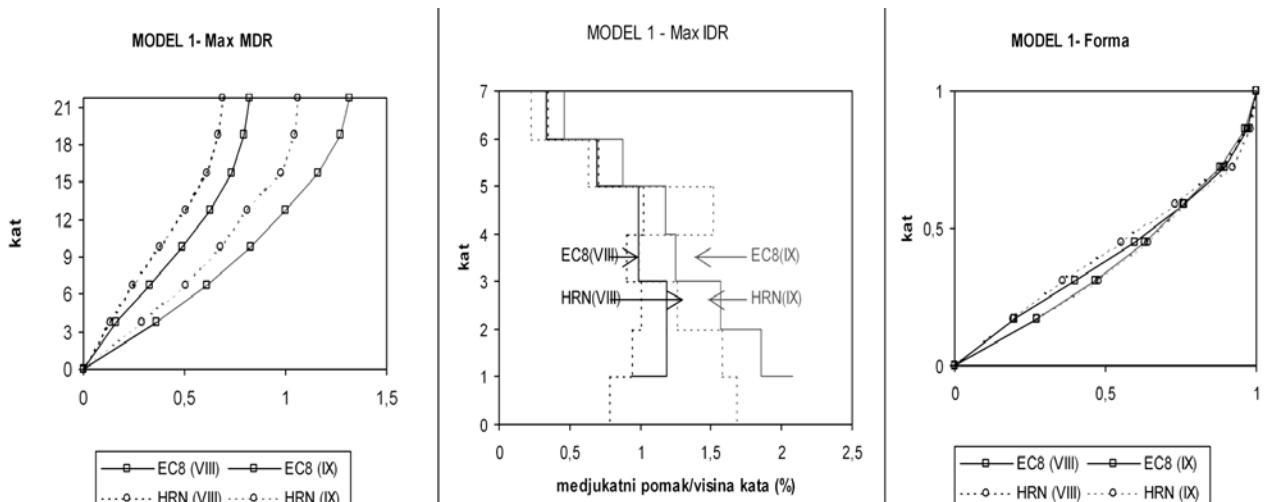


Tablica 7. Karakteristične vrijednosti odgovora na projektne potreze za IX. potresnu zonu

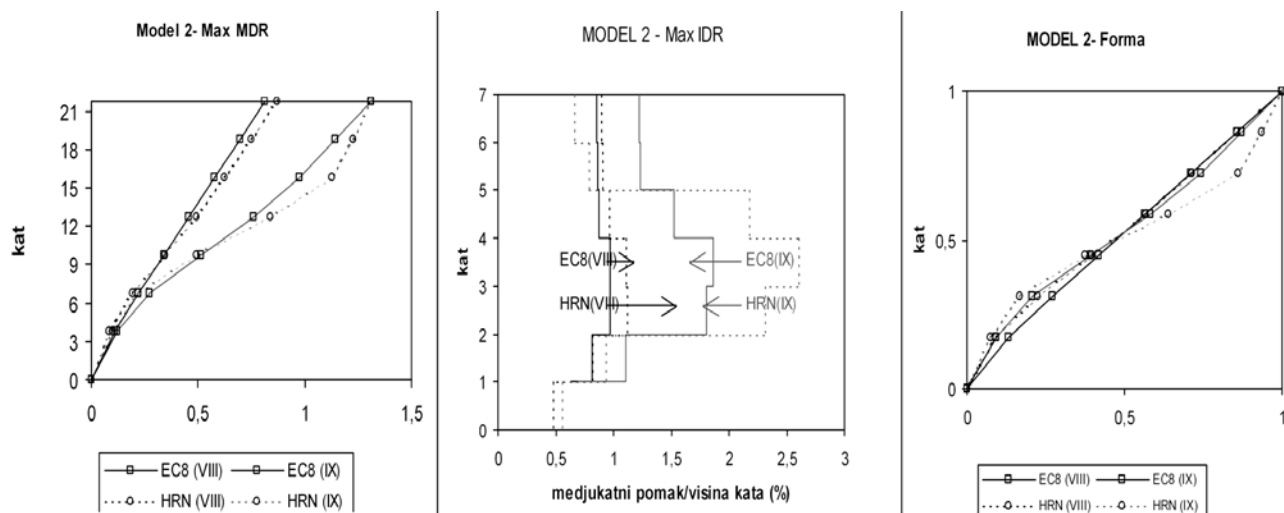
Norma	Fh [kN]	Fh/W	Qu [kN]	Bar N-S BS [Kn]	SR	Pet N-S BS [kN]	SR	ElCentro BS [kN]	SR
<b>Model 1</b>									
HRP	1621	0,080	3650	3203	0,158	2750	0,136	2969	0,147
EC8-HD	2941	0,162	5700	5367	0,296	4325	0,238	4676	0,258
<b>Model 2</b>									
HRP	2634	0,130	4900	4936	0,244	4709	0,232	5171	0,255
EC8-HD	3631	0,200	5870	5795	0,319	5277	0,291	6428	0,354
<b>Model 3</b>									
HRP	2634	0,130	8800	7622	0,376	8470	0,418	8956	0,442
EC8-HD	5011	0,276	13000	9598	0,529	12258	0,675	12180	0,671



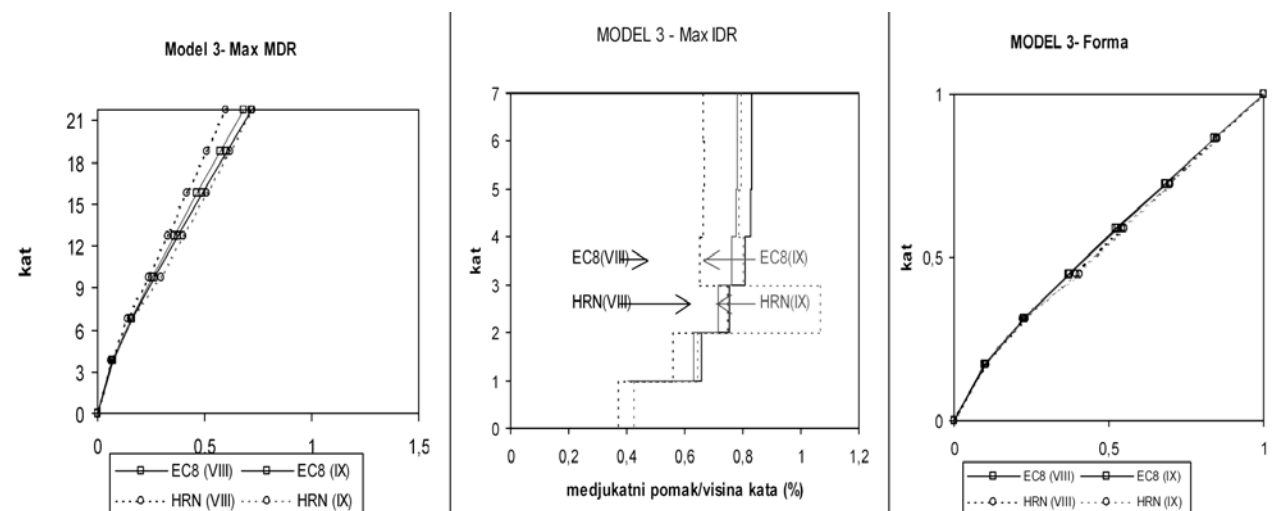
Slika 7. Plastični zglobovi i potrebni duktilitet modela EC8 i HRP za VIII. i IX. potresnu zonu (El Centro N-S)



Slika 8. Maksimalni pomaci kata, relativni katni pomaci i forma odgovora modela M1 iz odgovora na tri potresa



Slika 9. Maksimalni pomaci kata, relativni katni pomaci i forma odgovora modela M2 iz odgovora na tri potresa



Slika 10. Maksimalni pomaci kata, relativni katni pomaci i forma odgovora modela M3 iz odgovora na tri potresa

U nastavku će biti prikazane karakteristike odgovora pojedinih modela.

#### 4.1 Model 1

Prelaskom na dimenzioniranje iz HRP u EC8 potrebno je 1,37 do 1,70 puta više armature unutar iste potresne zone. Naročito je povećan udio poprečne armature koja služi za sprečavanje neduktilnih lomova unutar čvorova.

Za odgovor Modela 1 na registracije mogućih potresa karakteristično je sljedeće:

- Ovojnice maksimalnih pomaka katova su slične za HRP i EC8 konstrukcije. U formi odgovora (pomak kata normiran na pomak krova/visina kata normirana na visinu konstrukcije) vidi se veća krutost konstrukcija za IX. potresnu zonu te sličnost forma za HRP i EC8 objekte.
- IDR iznosi od 0,82 do 1,00 za VIII. i od 1,39 do 1,68 za IX. potresnu zonu za HRP objekte. Nivo oštećenja je takav da su svi nekonstruktivni elementi pretrpjeli ozbiljne štete, a konstruktivni umjerene štete do ozbiljne štete; MDR je 0,69 i 1,06 za VIII. i IX. potresnu zonu što je na granici prihvatljivog ponašanja. IDR iznosi od 0,82 do 1,19 i od 1,09 do 2,08 za VIII. i IX. potresnu zonu za EC8 objekte. MDR je 0,82 i 1,32 za VIII. i IX. potresnu zonu. Oštećenja su slična kao i za HRP objekte.
- Intenzitet oštećenja povezan je sa intenzitetom potresa; količina ugrađene armature u pojedine elemente ne utječe na reguliranje nivoa oštećenja (naročito nekonstruktivnih elemenata).
- HRP modeli ne sprječavaju nastajanje zglobova u stupovima i nastajanje katnog mehanizma gubitka nosivosti. To naročito vrijedi za okvire u IX. potresnoj zoni gdje je došlo do povećanja armature greda, a u propisima ne postoji jasan uvjet za provjeru i pre-dimenzioniranje ostvarene nosivosti greda i stupova koji se sastaju u čvoru.
- SR za HRP objekte iznosi 0,10 za VIII. i 0,16 za IX. potresnu zonu. Za EC8 SR je 0,145 i 0,30 za VIII. i IX. potresnu zonu. Obje su konstrukcije u svom odgovoru ušle u neelastično područje (prosječni duktilitet je 2 odnosno 2,2 za HRP i EC8 konstrukcije); maksimalne izračunane poprečne sile su do 2 puta veće nego projektno horizontalno opterećenje.

Nosivost EC8 objekta je ravnomjernije raspodijeljena po visini konstrukcije. Kod HRP objekta otvara se puno više plastičnih zglobova zbog manje krutosti objekta te potrebnoga većeg prosječno potrebna duktilnost kod HRP modela oko 2, EC8 model duktiliteta elemenata. Dok je se ponaša gotovo elastično. U slučaju eventualnog pot-

resa, kod HRP modela su neophodni znatni popravci konstruktivnog sustava nakon potresa.

#### 4.2 Model 2

Unutar iste potresne zone prelaskom na dimenzioniranje iz HRP u EC8 potrebno je ukupno 1,15 do 1,18 puta više armature.

Karakteristike odgovora Modela 2 na registracije potresa su:

- Ovojnice maksimalnih pomaka katova slične su za HRP i EC8 konstrukcije u oba potresna područja. Kod HRP modela u IX. potresnoj zoni djelovanje okvira je predominantno u gornjoj trećini objekta. U formi odgovora vidi se dominantno međusobno djelovanje između okvira i zida (zid dominira u donjoj polovini, a okvir u gornjoj polovini visine objekta) kod HRP objekata. Kod EC8 objekta zid određuje formu odgovora konstrukcije (naročito u IX. potresnoj zoni).
- IDR je koncentriran u prvom katu za VIII. potresnu zonu, te u prvom i u srednja 3 kata (3., 4., 5.) za IX. potresnu zonu. Oblik deformiranja pokazuje neravnomjernu raspodjelu krutosti kod HRP objekta te problematično područje u kome dolazi do raspodjele nosivosti između zida i okvira.
- IDR iznosi od 1,11 za VIII. i 2,60 za IX. potresnu zonu za HRP objekte. Nivo oštećenja je takav da su svi nekonstruktivni elementi pretrpjeli ozbiljne štete, a konstruktivni ozbiljne štete do rušenja; MDR je 0,81 i 1,31 za VIII. i IX. potresnu zonu što je na granici prihvatljivog ponašanja. IDR iznosi od 0,97 i 1,86 za VIII. i IX. potresnu zonu za EC8 objekte. MDR je 0,87 i 1,31 za VIII. i IX. potresnu zonu. Ne-konstruktivni elementi su pretrpjeli ozbiljne štete, a konstruktivni umjerene do ozbiljne. Do urušavanja nije došlo.
- Intenzitet oštećenja povezan je s intenzitetom potresa. Međusobno djelovanje zida i okvira pridonosi koncentriranju oštećenja u srednjim katovima objekta u kojima IDR prelazi u područje ozbiljnih šteta i kod HRP objekta vjerojatno dolazi do rušenja objekta u tim katovima.
- Maksimalni SR za HRP objekte iznosi 0,21 za VIII. i 0,25 za IX. potresnu zonu. Za EC8 SR je 0,24 za VIII. i 0,35 za IX. potresnu zonu. Obje su konstrukcije ušle u neelastično područje.

Ponašanje Modela 2 konstrukcija po EC8 je znatno regularnije i povoljnije nego HRP model. Pomaci mješovitog sustava (zid + okvir) slični su za oba objekta (HRP i EC8). Zahtijevani duktilitet greda je kod oba objekta oko 2. U odgovoru konstrukcije, iako je zid dominantan, sudjelu-

ju i okviri i to do 40%. Zid u HRP objektu nije dovoljno osiguran na posmične sile te je vjerojatan njegov gubitak nosivosti na posmik.

#### 4.3 Model 3

Unutar iste potresne zone prelaskom na dimenzioniranje iz HRP u EC8 potrebno je ukupno 1,31 do 1,46 puta više armature.

Karakteristike odgovora Modela 3 na registracije mogućih potresa su:

- Ovojnice maksimalnih pomaka katova su slične za HRP i EC8 konstrukcije u oba potresna područja. Pritom su pomaci EC8 konstrukcija uvijek manji za nekoliko postotaka. Forma odgovora pokazuje dominantni odgovor konzolnog zida (1. ton osciliranja) kod svih objekata uz malo fleksibilniji sistem kod HRP objekata.
- Intenzitet oštećenja je povezan s intenzitetom potresa. Oštećenja su koncentrirana u višim katovima.
- IDR iznosi od 0,75 za VIII. i 0,73 za IX. potresnu zonu za HRP objekte. Nivo oštećenja je takav da su nekonstruktivni elementi pretrpjeli ozbiljne štete, a konstruktivni umjerene štete. Pritom su kod HRP objekata moguće i koncentracije oštećenja u pojedinim katovima. MDR je 0,60 i 0,73 za VIII. i IX. potresnu zonu što je na granici prihvatljivog ponašanja. IDR iznosi od 0,72 i 0,78 za VIII. i IX. potresnu zonu za EC8 objekte. MDR je 0,72 i 0,68 za VIII. i IX. potresnu zonu. Nekonstruktivni elementi su pretrpjeli ozbiljne štete, a konstruktivni umjerene.
- Maksimalni SR za HRP objekte jest 0,43 za VIII. i 0,44 za IX. potresnu zonu. Za EC8 SR je 0,65 za VIII. i 0,67 za IX. potresnu zonu. Obje konstrukcije ušle su u neelastično područje i došlo je do otvaranja momentnih zglobova u prvim nekoliko katova objekta. Pritom je maksimalna nosivost na poprečne sile HRP objekata približna raspoloživoj nosivosti, dok je za EC8 objekata koeficijent sigurnosti na smičući gubitak nosivosti  $>2$ .

Pomaci i ostvarene duktilnosti u sustavu s nosivim zidovima su manji kod modela EC8. To je uglavnom posljedica veće krutosti zidova (zidovi u EC8 su 40 cm u odnosu prema 25 cm kod HRP).

#### ZAHVALA

*Istraživanje je sprovedeno uz potporu Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske u sklopu projekta "Usporedba seizmičkog izračuna objekata prema HRN i EC8" na čemu se zahvaljujemo.*

#### LITERATURA

[1] Sugano, S.: *An empirical evaluation of inelastic behaviour of structural elements in r/c frames subjected to lateral forces*, V WCEE, Rome 1964.

#### 5 Zaključak

Tip konstrukcije i geometrija elemenata utječu više na nelinearni odgovor konstrukcije negoli količina ugrađene armature. Povećana armatura u presjeku ne pridonosi smanjenju pomaka (oštećenja), nego služi povećanju sigurnosti od nastanka neduktilnog loma u elementima.

EC8 osigurava ravnomjerniju raspodjelu krutosti, preraspodjelu nelinearnosti, uz aktiviranje više konstruktivnih elemenata u preuzimanju opterećenja, te sprječava nastajanje katnog mehanizma gubitka nosivosti (koncentraciju oštećenja u predjelu jednog kata). Takav gubitak nosivosti kod HRP konstrukcija nije spriječen i pojavljuje se u odgovoru Modela 1 i 2. Izračunane seizmičke sile su 2 do 4 puta veće od projektnih, što je u području koeficijenta redukcije opterećenja  $q$ . Čisti konstruktivni sustavi (samo okviri ili samo zidovi) imaju predvidljivo ponašanje i jednostavniji su za precizno dimenzioniranje i obradu detalja. Mješoviti sustavi, iz razloga međusobnog djelovanja pojedinih sustava, teži su za definiranje kontroliranog mehanizma gubitka nosivosti.

Elementi bitni u projektiranju konstrukcija visokogradnje su sigurnost da će konstrukcija pri djelovanju potresa doseći manji ili jednak granični stadij (uporabljivosti ili nosivosti) te da će cijena koja se za dosegnuti stupanj mora platiti biti razumna. Stupanj sigurnosti od dosegnja graničnog stadija nosivosti se uporabom EC8 povećava jer su u njega unesene najnovije spoznaje istraživača uz izmijenjeni pristup seizmičkom projektiranju. Pritom se potrošnja materijala (armature) povećava za 20% do 30%, ali se povećava i nivo sigurnosti od neduktilnog loma i gubitka nosivosti. Nivo oštećenja nekonstruktivnih elemenata sličan je za modele dimenzionirane po oba propisa jer su izračunani MDR i IDR slični i više ovise o karakteristikama konstrukcije i potresa negoli o nosivosti pojedinih konstrukcija. Metode dimenzioniranja bazirane na osnovi reguliranja očekivanog ponašanja (pomaka) tijekom potresa, koje je lakše povezati s nivoom oštećenja nego sile, već ulaze u nove propise (ATC-40, FEMA-273 i 274, novi japanski propisi i dr.). Dimenzioniranje na sile uz osiguranje poželjnog gubitka nosivosti (kapacitivno dimenzioniranje) uz kontrolu linearno izračunanih pomaka pomnoženih s faktorom duktiliteta (kao što je sadržano u EC8) ne jamči reguliranje nivoa oštećenja kod eventualnih potresa nego samo osigurava od dosezanja graničnog stanja nosivosti.

- [3] *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima*, HRN 31/81
- [4] Sigmund V., Yoshimura M., Okamoto S.: *A SDOF Model to Analyze Earthquake Response of a Full Scale VII Story Structure*, 17. Joint Meeting of US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, Tsukuba, Japan, 1985. str. 230.-240.
- [5] *Pravilnik o tehničkim propisima za beton i armirani beton ("PBAB")*, HRN 11/87
- [6] Sigmund, V.: *Strong column-weak beam design methodology for r/c frames*, IX ECEE, Moscow, 1989.
- [7] Lopez, R., Sozen, M. A.: *LARZWD and LARZWS Computer Programs for Nonlinear Analysis of Planar Reinforced Concrete Structures Incorporating Frame and Walls*, University of Illinois, Urbana, 1988. and 1992.
- [8] Inada, Y.: *Force displacement models for solid shear walls of reactor buildings*, Earthquake resistance of reinforced concrete structures, Tsuneo Okada editor, University of Tokyo, 1993.
- [9] ENV-Eurocode 2, Design of concrete structures, 1992.
- [10] *ENV-Eurocode 8*, Structures in seismic regions- Part 1, 2 and 3, Brussels, 1994.
- [11] Sigmund, V., Guljaš, I., Klečina-Bošnjak, M.: *Comparison of the seismic design according to HRN and EC8*, XI European Conference on Earthquake Engineering, September 6.-11. 1998.
- [12] Sigmund, V., Bošnjak-Klečina, M., Guljaš, I., Stanić, A.: *Usporedba primjene hrvatskih propisa i Eurokoda 8*, Građevinar 52 (2000) 7, 379.-389.
- [13] Sigmund, V., Brana, P., Herman, K.: *Two methods for estimating nonlinear characteristics of r/c frame members*, the Third Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering, February 21.-25., 2000., Istanbul, Vol. 1, str. 87.-98.
- [14] Sigmund V., Herman, K., Guljaš, I.: *An evaluation of the displacement controlled design procedures*, 12 World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- [15] Sigmund, V., Matošević, Đ., Brana, P.: *Possibilities for evaluating seismic drift by linear and non-linear methods*, the Third Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering, February 21-25, 2000, Istanbul, Vol. 1, str. 273.-282.
- [16] Sigmund, V., Guljaš, I., Matošević, Đ., Stanić, A., Bošnjak-Klečina, M.: *Analiza značenja primjene EC8 u Republici Hrvatskoj*, V opći sabor DGKH, Brijuni, 26.-28. 4. 2001.
- [17] Sigmund, V., Guljaš, I., Matošević, Đ.: *Modeliranje odgovora a-b zida na seizmičku pobudu*, V opći sabor DGKH, Brijuni, 26.-28. 4. 2001.