

Primljen / Received: 25.6.2016.

Ispravljen / Corrected: 2.9.2017.

Prihvaćen / Accepted: 30.10.2017.

Dostupno online / Available online: 10.1.2018.

Prijedlog seizmičke procjene pravilnih AB okvira

Autori:



Dr.sc. **Szabolcs Varga**, dipl.ing.građ.
V&V Projekt srl, Rumunjska
varga.szabolcs@vvp.ro



Prof.dr.sc. **Cosmin G. Chiorean**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Cluj-Napoca, Rumunjska
cosmin.chiorean@mecon.utcluj.ro

Pregledni rad

Szabolcs Varga, Cosmin G. Chiorean

Prijedlog seizmičke procjene pravilnih AB okvira

Nelinearni dinamički proračun s primjenom vremenskog zapisa, često vrlo dugo traje i nije praktičan. U radu se predlaže nova računalna metoda razvijena u okviru Eurokoda 8. Metoda se temelji na određivanju kapaciteta konstrukcije pomoću metode postupnog guranja, i seizmičkog zahtjeva primjenom nelinearnog dinamičkog proračuna s vremenskim zapisom za sustav s jednim stupnjem slobode. Posebno se razmatra utjecaj raspodjele horizontalnog opterećenja na određivanje kapaciteta, te utjecaj histereznih modela na odgovor sustava pri određivanju seizmičkog zahtjeva.

Ključne riječi:

metoda postupnog guranja, histerezni modeli, neelastični spektar kontinuirane čvrstoće, neelastični spektar kontinuirane duktilnosti

Subject review

Szabolcs Varga, Cosmin G. Chiorean

Refined NSA approach for seismic assessment of regular RC frames

The nonlinear time-history analysis is often a time-consuming and impractical procedure. A new computer method, developed in the framework of the Eurocode 8 is proposed in this paper. It is based on the determination of both structural capacity - using pushover analysis - and seismic demand - using nonlinear time-history analysis of a single-degree-of-freedom system. An emphasis is placed on the effect of different lateral load distribution on capacity determination, and on the effect of hysteretic models on the determination of seismic demand.

Key words:

pushover analysis, hysteretic models, constant strength inelastic spectrum, constant ductility inelastic spectrum

Übersichtsarbeit

Szabolcs Varga, Cosmin G. Chiorean

Vorschlag für eine seismische Beurteilung von vorschriftsmäßigen Stahlbetonrahmen

Die nichtlineare dynamische Berechnung mit Aufzeichnung des zeitlichen Ablaufs, dauert oft sehr lange und ist nicht praktisch. In der Arbeit wird eine neue Rechenmethode vorgeschlagen, die im Rahmen von Eurocode 8 entwickelt wurde. Sie beruht auf der Festlegung der Konstruktionskapazitäten anhand der Pushover-Methode und der seismischen Anforderungen anhand einer nichtlinearen dynamischen Berechnung mit Aufzeichnung des zeitlichen Ablaufs für Systeme mit einem Freiheitsgrad. Insbesondere wird die Auswirkung der Verteilung der horizontalen Belastung auf die Festlegung der Kapazität erwogen sowie der Einfluss der Hysterese-Modelle auf die Antwort des Systems bei der Festlegung der seismischen Anforderungen.

Schlüsselwörter:

Pushover-Analyse, Hysterese-Modelle, unelastisches Modell der kontinuierlichen Festigkeit, unelastisches Modell der kontinuierlichen Duktilität

1. Uvod

1.1. Sadašnje metode za provedbu nelinearnog statičkog proračuna

U potresnom je inženjerstvu dobro poznato da se nelinearnim proračunima s vremenskim zapisom (eng. *nonlinear time-history analysis* - NTHA) općenito dobivaju realni numerički modeli za određivanje nelinearnog odziva konstrukcija podložnih jakim seizmičkim utjecajima. Teoretski gledano, moglo bi se očekivati da se takvim metodama postižu pouzdanije procjene seizmičkog ponašanja nego kod drugih pristupa kao što su to metode nelinearnog statičkog proračuna (eng. *nonlinear static analysis* - NSA). Nelinearni proračuni s vremenskim zapisom mogli bi ipak biti prikladni za ocjenjivanje seizmičkog ponašanja, iako zbog svoje složenosti i velikog broja parametara koji se koriste kao ulazni podaci, ovaj pristup obično nadilazi mogućnosti praktične primjene te se čini da je pogodan samo u znanstvenoistraživačkom radu. Osim toga, rezultati koji se tako dobivaju nisu uvijek pouzdaniji zbog nesigurnosti ulaznih podataka. Primjena nelinearnih proračuna s vremenskim zapisom na velikim građevinskim konstrukcijama još uvijek je povezana s poteškoćama i to bez obzira na razvoj računalne tehnologije, jer je za te postupke potreban niz brižljivo odabranih podataka o gibanju tla. Osim toga, kako je znanje o seizmičnosti potresnih područja još uvijek prilično ograničeno, teško se može odrediti varijabilnost seizmičkih zahtjeva zbog rizika i nesigurnosti u pogledu intenziteta gibanja tla, što proizlazi iz učestalosti i trajanja gibanja tla određenog intenziteta. Nadalje, na točnost nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom bitno utječe i model matematičkog predstavljanja stvarnog ponašanja konstrukcija te parametri za modeliranje kao što su neelastično (histerežno) ponašanje na razinu vlakna presjeka, detalj modela na razini presjeka, nelinearni konstitutivni odnosi naprezanja i deformacije za (neovijeni i ovijeni) beton i armaturu, prigušenje, raspodjela masa itd. Važno je naglasiti da se u valjanoj nelinearnoj neelastičnoj analizi armiranobetonskih okvirnih konstrukcija treba u obzir uzeti pristup baziran na raspodijeljenoj plastičnosti, a ne pristup s koncentriranom plastičnosti (plastični zglobovi) [1, 2] i to zbog naglašene raspodjele plastičnosti po obujmu elemenata. Pri tome složenost proračuna bitno raste zbog potrebe praćenja histereznog ponašanja na razini vlakana, tj. mogu se uočiti – sa stajališta proračuna – određena ograničenja u analizi stvarnih velikih građevina. Još jedan aspekt koji se odnosi na pouzdanost primjene nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom u ocjeni seizmičkog ponašanja odnosi se na utjecaje dinamičkog djelovanja između tla i konstrukcije te nelinearnog ponašanja okolnog tla. Utjecaj međudjelovanja tla i konstrukcije na ocjenu seizmičkog ponašanja konstrukcija u novije se vrijeme izučava s posebnom pažnjom. Tako je ustanovljena važnost primjene složenih modela u kojima se u obzir uzima potpuno

nelinearno ponašanje tla i konstrukcije, naročito u slučaju konstrukcija temeljenih na tlima koja su podložna znatnim deformacijama te gdje se očekuje likvefakcija tla [3]. Stoga bi se moglo zaključiti da izuzetno složeno matematičko modeliranje nije opravdano u nelinearnoj analizi konstrukcija ako se u obzir ne uzme međudjelovanje tla i konstrukcije, te da se stoga u nekim naprednijim pristupima mogu kriti vrlo ozbiljni i nepredvidivi nedostaci.

Uzimajući u obzir sve spomenute elemente koji se odnose na primjenu nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom na ocjenjivanju ponašanja postojećih velikih AB konstrukcija, posljednjih se desetak godina sve više usmjerava na istraživanje nelinearne statičke analize (eng. *nonlinear static analysis* - NSA) kako bi se razvio praktičan ali i točan alternativni pristup kao pandan ekvivalentnom elastičnom seizmičkom pristupu koji se primjenjuje u vodećim seizmičkim normama i pristupima baziranim na nelinearnom proračunu s vremenskim zapisom za seizmičko projektiranje konstrukcija. Sadašnje metodologije nelinearnog statičkog proračunavanja u svrhu seizmičkog ocjenjivanja pravilnih AB okvirnih konstrukcija, primjenjuju se za određivanje pokazatelja seizmičkog ponašanja koji su po kvaliteti usporedivi s kompleksnijim nelinearnim proračunima s vremenskim zapisom, naročito kada se radi o konstrukcijama koje dominantno vibriraju u prvom vlastitom obliku. Zbog njihove jednostavnosti i lakšega izračunavanja, smatra se da takvi postupci mogu uspješno pridonijeti razvoju novih i boljih metoda za ocjenjivanje seizmičkog ponašanja postojećih velikih okvirnih konstrukcija. Međutim, unatoč značajnim naporima koji se posljednjih godina ulažu u razvoj sofisticiranih nelinearnih statičkih pristupa kako bi se poboljšao odnos između rezultata nelinearnih statičkih proračuna i nelinearnih proračuna s vremenskim zapisom, ipak treba reći da statički postupci nikad neće moći zamijeniti dinamičke analize. Zapravo, čak i kada se nelinearni statički postupak ne smatra prikladnim za potpunu analizu ponašanja, nelinearne statičke analize ostat će učinkovito proračunsko sredstvo za određivanje onih aspekata analitičkog modela i nelinearnog odziva koji se teško mogu odrediti nelinearnim dinamičkim proračunom [4]. Na primjer, nelinearni statički proračun može biti koristan za:

- provjeru i otklanjanje pogrešaka kod sofisticiranih nelinearnih proračunskih modela složenih građevina
- pronalaženje osnovnih mehanizama popuštanja i deformacije (zahtjeva duktilnosti) konstrukcija te za određivanje nekih nedostataka neprikladno projektiranih građevina
- provedbu parametarskih studija i analiza osjetljivosti raznih parametara kojima se definiraju materijalna i geometrijska svojstva konstrukcije te način na koji ti parametri utječu na lokalno i globalno ponašanje konstrukcija.

Konstruktori su se sve više počeli služiti postupcima nelinearnog statičkog proračuna nakon što su uvedeni u propise/norme o projektiranju (ATC-40 [5] FEMA 358 [6] i 440 [7] te Eurokod 8 (EC 8) [8]), a i zbog sve veće dostupnosti naprednih osobnih računala. Ti su postupci spona između linearnih metoda i

složenijih nelinearnih proračuna s vremenskim zapisom, a u ovom se trenutku smatraju proračunski najučinkovitijim rješenjima. Zbog toga se mogu koristiti za dovoljno precizno određivanje neelastičnih pomaka novih ili postojećih građevina. Kao što je već spomenuto, za razliku od nelinearnih proračuna s vremenskim zapisom, u nelinearnim statičkim proračunima nije potrebno složeno unošenje podataka niti su potrebnidugotrajni proračuni.

Prvi korak u nelinearnom statičkom proračunu je metoda postupnog guranja u okviru koje se na konstrukciju nanose varijabilne ili nevarijabilne horizontalne sile i to u svakom koraku opterećenja. Rezultat analize je krivulja kapaciteta (ili krivulja postupnog guranja) u kojoj su sažete sposobnosti horizontalnog deformiranja konstrukcijskog sustava s više stupnjeva slobode. Osim kod izuzetaka kao što su ATC40 ili FEMA356, u nelinearnim statičkim proračunima baziranim na normama o projektiranju, kao što je npr. Eurokod EC 8, preporučuje se korištenje nevarijabilne fiksne i trokutaste raspodjele horizontalnog opterećenja.

Kao što je već spomenuto, ako se smatra da su horizontalne sile nepromjenjive, rezultati će biti točni samo ako na odziv konstrukcije ne utječu viši vlastiti oblici vibriranja te ako konstrukcija ima samo jedan mehanizam popuštanja [9]. Kako je u normama o projektiranju usvojena nevarijabilna raspodjela horizontalnih sila, oblik deformacije konstrukcije je nepromjenjiv. Na primjer, za dva potresa različitih frekvencija koji rezultiraju istim ciljanim pomakom, nelinearnim statičkim proračunom s nevarijabilnom raspodjelom horizontalnih sila dobiva se isto stanje naprezanja. To ograničenje, uvjetovano statičkom prirodom ove metode, dobro je poznato i prihvaćeno.

Usvajajući prethodni aspekt, neki su istraživači razvili nevarijabilne raspodjele sila za više oblike vibriranja [10-12], isto kao i adaptivne raspodjele sila, pri čemu se koriste neki od postupaka kombinacije vlastitih oblika (SRSS/CQC) [13-15].

Napredne adaptivne raspodjele sila razvijene su tek u novije vrijeme. Pomoći njih se mogu ukloniti pogreške zbog "uvijek pozitivnog" karaktera postupno promjenjivih bočnih sila, a zbog korištenja modalnih kombinacija pomoću metode kvadratnog korijena iz sume kvadrata (eng. *square root of the sum of squares*, SRSS) [16, 17].

Drugi korak u nelinearnom statičkom proračunu sastoji se u određivanju neelastičnog seizmičkog zahtjeva, ciljanog pomaka na globalnoj razini, katnog pomaka, te rotacija na lokalnoj razini. U skladu s EC8, nakon iscrtavanja krivulje kapaciteta, primjenom nelinearnog statičkog proračuna izračunavaju se izglađeni proračunski spektri, a za to se koriste jednostavni empirijski odnosi $R_p - \mu - T$. Također treba napomenuti da se u postupcima nelinearnog statičkog proračuna koriste izglađeni proračunski spektri za određivanje neelastičnog seizmičkog zahtjeva, te za određivanje neelastičnog pomaka. Dakle, unutar okvira norme o projektiranju, konstrukter nema priručnu i jednostavnu analitičku metodu koja bi omogućila brzo određivanje nelinearnog ponašanja konstrukcije za niz potresnih zapisa [18]. Prema inovativnom pristupu koji se predlaže i ocjenjuje u ovom

radu, kapacitet konstrukcija određuje se metodom postupnog guranja, a seizmički zahtjev izračunava se kroz analizu odziva sustava s jednim stupnjem slobode. Neki istraživači [19] također predlažu primjenu nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom u okviru metode spektra kapaciteta (eng. *Capacity Spectrum Method - CSM*) [20] za analizu ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode, iako to ipak izgleda kontradiktorno uzimajući u obzir statički karakter metode spektra kapaciteta. S tim u vezi, u radu [15] spominje se da, zahvaljujući sadašnjem stupnju razvoja opreme i računalne tehnologije, nelinearni proračun s vremenskim zapisom sustava s jednim stupnjem slobode "može se provesti u djeliću sekunde"; za razliku od nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom za sustave s više stupnjeva slobode gdje proračun traje duže.

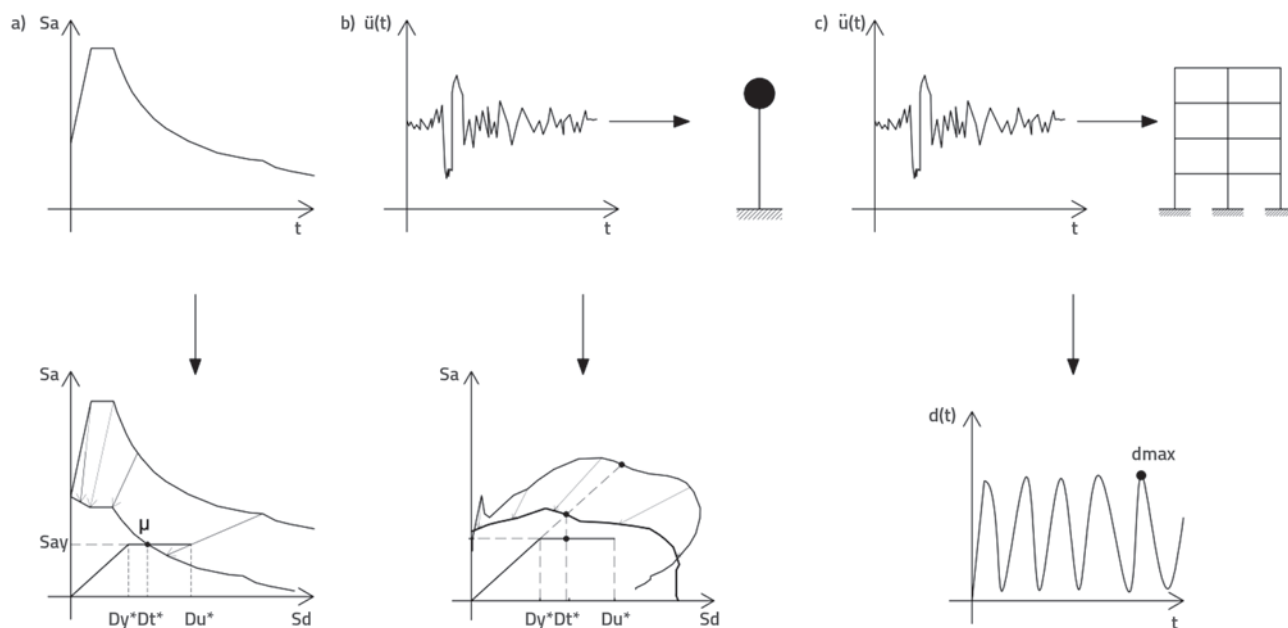
Neke odlike metode koja se predlaže u ovom radu analiziraju se i u radovima [1, 2]. U radu [1] naglašava se važnost strogo naprednog nelinearnog proračuna u određivanju krivulje kapaciteta primjenom metoda nelinearnog statičkog proračuna. Naglašava se utjecaj primjene nelinearnih materijalnih i geometrijskih efekata kroz uvođenje naprednog algoritma za provedbu nelinearnog statičkog proračuna, kako je to detaljnije opisano u radu [1]. Predložena metoda potvrđena je i u drugim istraživanjima te također u radu [2] gdje se naglasak stavlja na utjecaj oblika krivulje kapaciteta, koji u najvećoj mjeri ovisi o modeliranju i raspodjeli bočnog opterećenja, na definiranje seizmičkog ponašanja.

Što se tiče prethodnih radova autora [1, 2] u kojima se ocjenjuje utjecaj nelinearnog modeliranja na metodu postupnog guranja, u ovom se radu naglasak stavlja na nelinearno histerežno modeliranje koje se koristi u određivanju neelastičnog odziva primjenom predloženog inovativnog postupka. Objasneni su utjecaji četiri tipa histereznih modela na određivanje zahtjeva za sustav s jednim stupnjem slobode, te su detaljno opisani proračuni za određivanje zahtjeva u neelastičnom području.

1.2. Razlike i sličnosti između predloženog postupka i drugih vrsta seizmičkih proračuna

Razlike u koncepciji između predložene metode (b) i nelinearnog statičkog proračuna definiranog normom (a) i nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom (c) prikazane su na slici 1. U nelinearnom proračunu s vremenskim zapisom (c) sustav konstrukcije s više stupnjeva slobode podvrgnut je opterećenju predstavljenom pomoću stvarnog vremenskog zapisa potresa (akcelerograma). Zapravo, nelinearni proračun s vremenskim zapisom smatra se najzahtjevnijom analizom u smislu potrebe za proračunavanjem, pa stoga u većini slučajeva nije prikladan za svakodnevnu upotrebu. U ovom se radu nelinearni proračun s vremenskim zapisom za sustave s više stupnjeva slobode koristi samo za potrebe uspoređivanja.

Prvi korak nelinearnog statičkog proračuna, isto kao i metode predložene u ovom radu, sastoji se u određivanju krivulje kapaciteta primjenom metode postupnog guranja. Kod nelinearnog statičkog proračuna definiranog normom (EC8),



Slika 1. Usporedba načela za određivanje seizmičkih pomaka konstrukcija prema: a) nelinearnom statičkom proračunu; b) predloženoj metodi; c) nelinearnom proračunu s vremenskim zapisom

seizmički zahtjev u neelastičnom području određuje se pomoću empirijskih formula $R_{\mu}-\mu-T$, dok se predloženoj metodom to određuje primjenom nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom uz korištenje sustava s jednim stupnjem slobode, te kroz prikaz neelastičnog spektra kontinuirane duktilnosti. Stoga se može reći da je u pogledu ljudskog ili računalnog angažmana predložena metoda vrlo slična nelinearnom statičkom proračunu, ali uzima u obzir stvaran sadržaj frekvencije svakog seizmičkog zapisa [1].

Određivanje neelastičnog spektra izravno iz akcelerograma u kombinaciji s metodom postupnog guranja koristi se i u metodi "spektara točke popuštanja" (eng. *Yield Point Spectra - YPS*) [22]. U toj metodi, krivulja kapaciteta u bilinearnom obliku unosi se zajedno sa spektrima konstantne duktilnosti za nekoliko vrijednosti duktilnosti za razmatrani potresa. S konceptijskog stajališta, predložena je metoda slična metodi YPS, osim što se određivanje zahtjeva u neelastičnom području provodi izravnije, kroz numerički proračun, bez grafičkih ili analitičkih aproksimacija. Ta nova odlika metode detaljno je opisana u poglavlju 2. Osim toga, metoda YPS predstavlja neelastične spektre u formatu: seizmički koeficijent – pomak uslijed popuštanja $C_v - D_v^*$, dok je u predloženoj metodi usvojen uobičajeni format: spektralna akceleracija – spektralni pomak $S_a - S_d$.

Osim toga, predložena se metoda nadovezuje na dobro poznatu metodu N2 [23] u vezi s određivanjem dijagrama kapaciteta za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode, ali se neelastični spektri generirani iz akcelerograma koriste umjesto neelastičnog spektra dobivenog iz projektnog spektra pri čemu se koriste empirijske formule [1].

Stoga se korištena metoda može smatrati nastavkom metodologije predložene u EC8 u slučaju izravno

generiranog neelastičnog spektra. Uz to, predložena metoda predstavlja ekvivalent i alternativu za metodu YPS, ali se osnovna prednost sastoji u izravnom izračunavanju neelastičnog spektra kontinuirane duktilnosti te u činjenici da nije potrebna grafička i analitička aproksimacija, kao što je gore navedeno.

2. Prijedlog metode za određivanje neelastičnih seizmičkih pomaka

2.1. Određivanje krivulje postupnog guranja i ekvivalenta s jednim stupnjem slobode

U poglavlju 3.3 prikazani su ključni aspekti određivanja krivulje postupnog guranja u predloženoj metodi. Može se primijeniti svaka strogo definirana krivulja postupnog guranja. Preporučuje se prikladno modeliranje materijalnih i geometrijskih nelinearnosti [1, 2]. Korisnik također treba obratiti pažnju na odabir raspodjele horizontalnog opterećenja.

Transformacija krivulje kapaciteta iz sustava s više stupnjeva slobode u bilinearni dijagram kapaciteta sustava s jednim stupnjem slobode provedena je prema načelima metode N2 (EC8).

2.2. Neelastični odziv sustava s jednim stupnjem slobode

Određivanje zahtijevane duktilnosti na temelju karakteristika seizmičkog zapisa i ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode smatra se jednom od ključnih značajki predložene metode [1].

Odziv u nelinearnoj domeni modelira se pomoću histerezisnih modela, kojima se određuje odziv sustava s jednim stupnjem slobode ovisno o njegovom periodu vibracija, pomaku i sili popuštanja. Nelinearni odziv sustava s jednim stupnjem slobode dobiva se rješavanjem jednadžbe (1). Kako funkcija $f_s(u(t), \dot{u}(t))$ ima opći oblik, diferencijalna se jednadžba može riješiti u tom općem obliku.

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2 u_y \tilde{f}_s(u(t), \dot{u}(t)) = -\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

$$\tilde{f}_s(u(t), \dot{u}(t)) = \frac{f_s(u(t), \dot{u}(t))}{f_y} \quad (2)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (4)$$

gdje je $f_s(u(t), \dot{u}(t))$ sila povezana s kapacitetom sustava s jednim stupnjem slobode, dok je $\tilde{f}_s(u(t), \dot{u}(t))$ idealizirana varijanta $f_s(u(t), \dot{u}(t))$ povezana sa silom popuštanja f_y (izraz (2)); ω_n je vlastita kružna frekvencija (izraz (3)), dok ξ označava bezdimenzijski koeficijent prigušenja.

2.3. Određivanje neelastičnog spektra konstantne čvrstoće

U postupku rješavanja nelinearnih jednadžbi gibanja mogu se za odabir sile popuštanja sustava s jednim stupnjem slobode primijeniti različite metode. Pomoću tih metoda mogu se dobiti razne vrste neelastičnog spektra kao što je primjerice neelastični spektar konstantne duktilnosti ili neelastični spektar konstantne nosivosti [25].

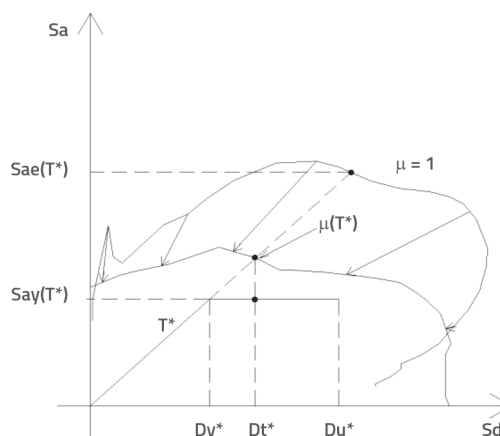
Faktor smanjenja elastične sile R_μ služi za određivanje zahtjeva duktilnosti sustava s jednim stupnjem slobode. Vrijednost R_μ je odnos između elastičnog ubrzanja $S_{ae}(T)$ i kapaciteta popuštanja S_{ay} iskazano u ubrzanju ekvivalentnog bilineariziranog sustava s jednim stupnjem slobode. U izrazu (5) T^* predstavlja period ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode, definiran, kao i bilinearizirani dijagram kapaciteta, pomoću pravila N2 metode (EC8). Elastični spektar $S_{ae}(T)$ može se izračunati pomoću linearnog proračuna s vremenskim zapisom sustava s jednim stupnjem slobode, za razmatrani akcelerogram.

Neke nesigurnosti, kao na primjer određivanje zahtjeva duktilnosti za zamjenski sustav s jednim stupnjem slobode, eliminirane su primjenom nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom sustava s jednim stupnjem slobode. S druge strane, kod metode N2, zahtjev duktilnosti izračunava se primjenom empirijskih formula.

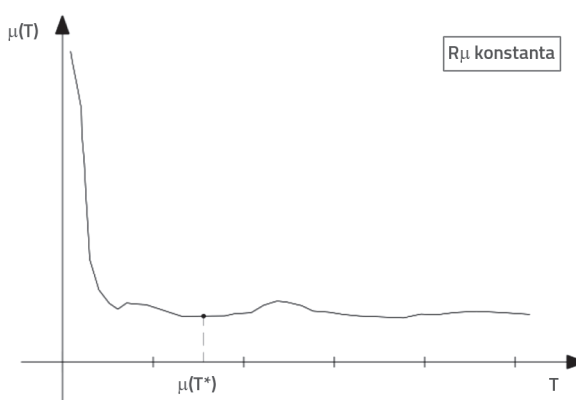
Primjer elastičnog spektra ($S_{ae}(T)$, $\mu=1$) ucrtanog na bilinearom dijagramu kapaciteta iskazan je na slici 2., gdje se lako može uočiti značenje faktora smanjenja elastične sile R_μ .

$$R_\mu = \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}} \quad (5)$$

Zahtjev duktilnosti μ uključen u zahtjev nosivosti R_μ lako se može odrediti pomoću nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom za sustav s konstantnom čvrstoćom R_μ , koji se provodi za razmatrani akcelerogram [1]. Spektri konstantne nosivosti R_μ pokazuju zahtjev duktilnosti $\mu(T)$ za sve sustave s jednim stupnjem slobode ovisno o periodu T (slika 3.). Traženi zahtjev duktilnosti istovjetan je duktilnosti pomaka postignutom pomoću sustava nosivosti R_μ perioda T^* ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode, kao što je prikazano na slici 3.



Slika 2. Grafička interpretacija određivanja ciljanog pomaka primjenom predložene metode [1]



Slika 3. Određivanje zahtjeva duktilnosti $\mu(T)$ pomoću spektra konstantne nosivosti R_μ [1]

2.4. Određivanje neelastičnog spektra konstantne duktilnosti

Za izračunavanje ciljanog pomaka mogu se koristiti grafički prikazi za iskazivanje neelastičnog spektra konstantne duktilnosti povezanog s prethodno određenom vrijednošću duktilnosti μ . Ako se provode analitički proračuni, tada se treba odrediti samo vrijednost duktilnosti μ za period T^* , a ne za čitav interval perioda.

Za razliku od metoda CSM i N2 koje se primjenjuju u neelastičnim zaglađenim proračunskim spektrima, dijagram kapaciteta ne presijeca dijagram zahtjeva kod grafičke interpretacije predložene metode.

Međutim, ako se uzlazni dio bilinearne idealiziranog dijagrama produži do sjecišta s neelastičnim spektrom konstantne duktilnosti, dobiva se ciljni pomak D_t^* ekvivalentnog sustava (slika 2.). Kao alternativa, nakon određivanja zahtjeva duktilnosti prema poglavlju 2.3 ovog rada, analitički se može odrediti ciljni pomak D_t sustava s više stupnjeva slobode pomoću izraza (6), isto kao i kod N2 metode:

$$D_t = \Gamma \cdot \mu \cdot D_v^* \tag{6}$$

gdje produkt $\mu \cdot D_v^*$ predstavlja ciljni pomak D_t^* sustava s jednim stupnjem slobode, isto kao i sjecište uzlaznog dijela bilinearnog dijagrama kapaciteta i neelastičnih spektara konstantne duktilnosti [1].

3. Numerički rezultati

3.1. Sažeti prikaz primjene predložene metode

Osnovni koraci predložene metode opisani su u prethodnom radu autora [1]. Radi jezovitosti, ovdje se sažeto prikazuju ti koraci:

1. Pomoću metode postupnog guranja odrediti krivulje kapaciteta za analiziranu konstrukciju.
2. Linearne idealizirati krivulju kapaciteta i izračunati osnovne karakteristike ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode: period T^* , ubrzanje pri popuštanju S_{av} , pomak pri popuštanju D_v^* i granični pomak D_v^* . Ovaj korak sličan je metodologiji usvojenoj u EC8 (metoda N2). Primjer koji udovoljava zahtjevima N2 i predložene metode prikazan je u poglavljima 3.3, 3.4 i 3.5 ovog rada.
3. Odrediti elastični spektar $S_{ae}(T)$ za svaki seizmički zapis pomoću odziva sustava s jednim stupnjem slobode.
4. Izračunati zahtjev nosivosti R_{μ} , za svaki akcelorogram i bilinearni dijagram kapaciteta, kako je to opisano u točki 2.3, izraz (5).
5. Izračunati zahtjev duktilnosti povezan s ekvivalentnim sustavom s jednim stupnjem slobode uz pomoć spektra zahtjeva konstantne nosivosti R_{μ} , kako je to opisano u poglavlju 2.4. Primjena različitih histereznih modela može

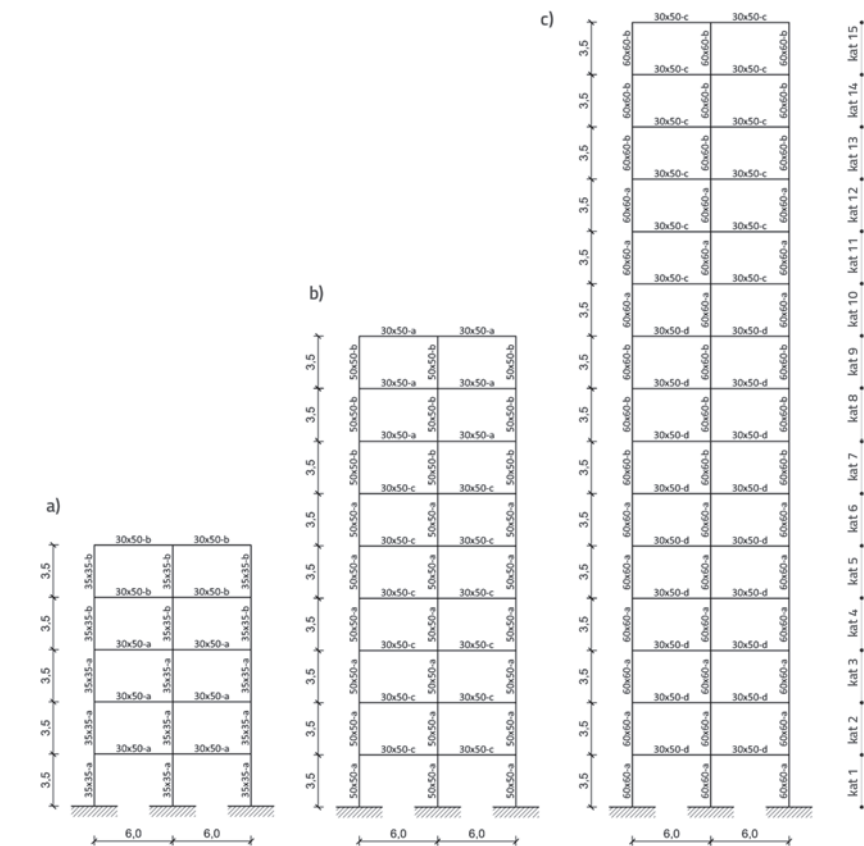
dovesti do različitih zahtjeva duktilnosti sustava s jednim stupnjem slobode.

6. Odrediti zahtijevani neelastični pomak bilo analitički ili grafički, kako je prikazano u poglavlju 2.4.
7. Provesti postupak postupnog guranja sve do ciljanog pomaka; odrediti unutarnje sile, pomake i rotacije na lokalnoj razini.

3.2. Konstrukcije, materijali i opterećenja

Za analizu su predložena tri armiranobetonska okvira različitih visina (5, 9 i 15 katova). Ti se okviri u daljnjem tekstu spominju kao konstrukcije 1, 2 i 3 (slika 4.). Svaki okvir ima dva raspona duljine 6 m s pripadajućih 6 m u okomitom smjeru. Stalno opterećenje, uključujući i monolitnu AB ploču, iznosi 8 kN/m². Za korisno opterećenje usvojena je vrijednost od 4 kN/m² [1].

Projektiranje se provodi u skladu s kriterijima visoke kategorije duktilnosti (eng. *Ductility Class High* - DCH) definirane u EC8. Čvrstoća odabranog betona iznosi C20/25. Granica popuštanja armature iznosi $f_{yk} = 345$ N/mm², što je karakteristično za armaturu koja je korištena prije stupanja na snagu Eurokoda 2. Poprečni presjeci konstrukcijskih elemenata prikazani su na slici 5. Za niže i više katove ne koristi se isti raspored armature.



Slika 4. Geometrijska svojstva analiziranih konstrukcija: a) peterokatna konstrukcija; b) deveterokatna konstrukcija; c) petnaesterokatna konstrukcija [1]

Tip konstrukcije		Konstrukcija 1		Konstrukcija 2		Konstrukcija 3	
		Stup	Greda	Stup	Greda	Stup	Greda
Gornji katovi	Prikaz						
	Veličina	35 x 35-b	30 x 50-b	50 x 50-b	30 x 50-a	60 x 60-b	30 x 50-c
	Armatura	8φ14	3φ14 (gornja zona) + 2φ14 (donja zona)	8φ16	4φ14 (gornja zona) + 2φ16 (donja zona)	8φ20	4φ20 (gornja zona) + 4φ14 (donja zona)
	Kat	3 - 5		7 - 9		10 - 15	
Donji katovi	Prikaz						
	Veličina	8φ16	4φ14 (gornja zona) + 2φ16 (donja zona)	12φ20	4φ20 (gornja zona) + 4φ14 (donja zona)	12φ20	4φ25 (gornja zona) + 4φ20 (donja zona)
	Armatura	35 x 35-a	30 x 50-a	50 x 50-a	30 x 50-c	60 x 60-b	30 x 50-d
	Kat	1 - 3		1 - 6		1 - 9	

Slika 5. Presjeci armiranobetonskih greda i stupova, [1]

3.3. Grafičko prikazivanje i bilinearna idealizacija krivulja postupnog guranja

Kao što je već spomenuto, osnovna se razlika između predložene metode i nelinearnog statičkog proračuna odnosi na određivanje zahtjeva u području neelastičnog odziva. Kada se govori o ekvivalentnosti kapaciteta konstrukcija s jednim stupnjem slobode i s više stupnjeva slobode (bilinearizacija dijagrama kapaciteta), u predloženoj se metodi prihvaćaju pojednostavljena metode N2, pa se stoga iste krivulje kapaciteta i tehnike bilinearizacije mogu koristiti kada se predložena metoda uspoređuje s nelinearnim statičkim proračunima. Stoga se u poglavljima 3.3, 3.4 i 3.5 ovog rada detaljno opisuju proračuni koji se trebaju provesti za nelinearni statički proračun, za metodu N2, te za predloženu metodu.

Krivulje kapaciteta određene su pomoću programskog paketa SeismoStruct [26]. U obzir su uzete dvije vrste raspodjela horizontalnog opterećenja. Prva je nepromjenjiva trokutasta raspodjela opterećenja, a druga je adaptivna raspodjela sila, pri čemu je primjenjena adaptivna metoda postupnog guranja bazirana na pomaku [16]. Navedene raspodjele sila su odabrane u skladu s prijedlogom prema [16, 17, 27], a u kontekstu naprednih metoda postupnog guranja.

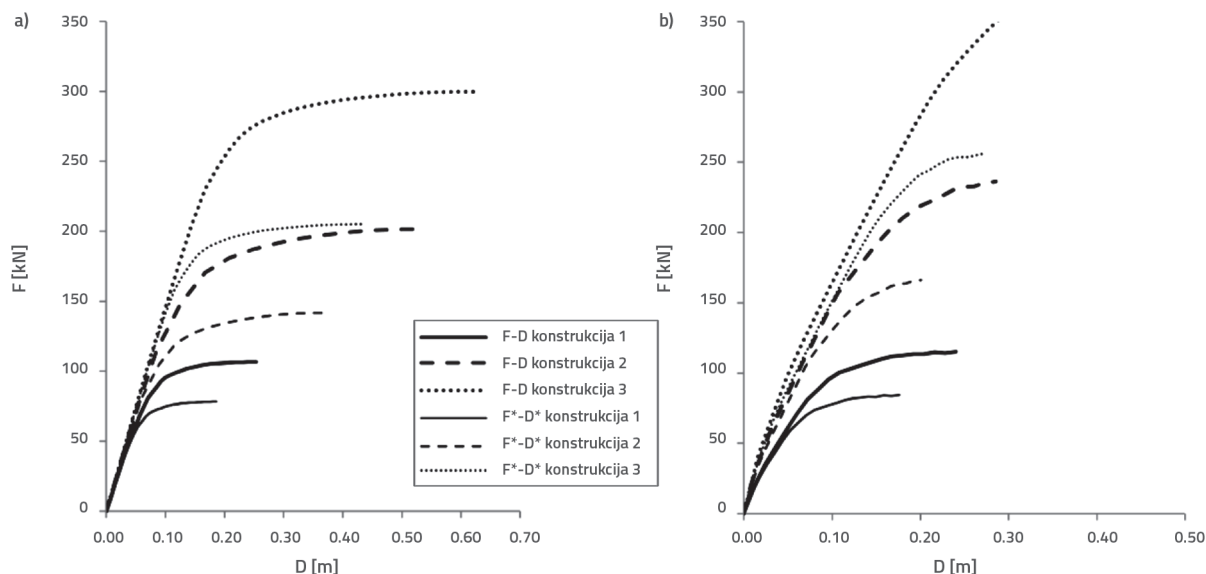
Dobivene krivulje kapaciteta (slika 6.) prikazane su u formatu sila-pomak za obje vrste raspodjele horizontalnih sila. Na slici 6., F-D označava odnos sila-pomak za sustav s više

stupnjeva slobode, a F^*-D^* označava odnos u ekvivalentnom sustavu s jednim stupnjem slobode. Kako bi se odredile karakteristike sustava s jednim stupnjem slobode, a to su period T^* i pomak pri popuštanju $D_{v,}^*$, krivulja kapaciteta u formatu $F^* - D^*$ bilinearno je idealizirana primjenom načela o jednakosti energije. Suma područja može se izračunati integriranjem produkta S_a i D^* . Uvjetovanjem jednakosti između ubrzanja pri popuštanju i graničnog ubrzanja ($S_{av} = S_{av,}$), analitički se može izračunati pomak pri popuštanju $D_{v,}^*$ ekvivalentnog sustava pomoću izraza (7), slika 7. Nakon određivanja pomaka pri popuštanju $D_{v,}^*$, može se izračunati i ekvivalentni period T^* : definiran nagibom uzlaznog dijela bilinearnog sustava pomoću jednadžbe (8) [1].

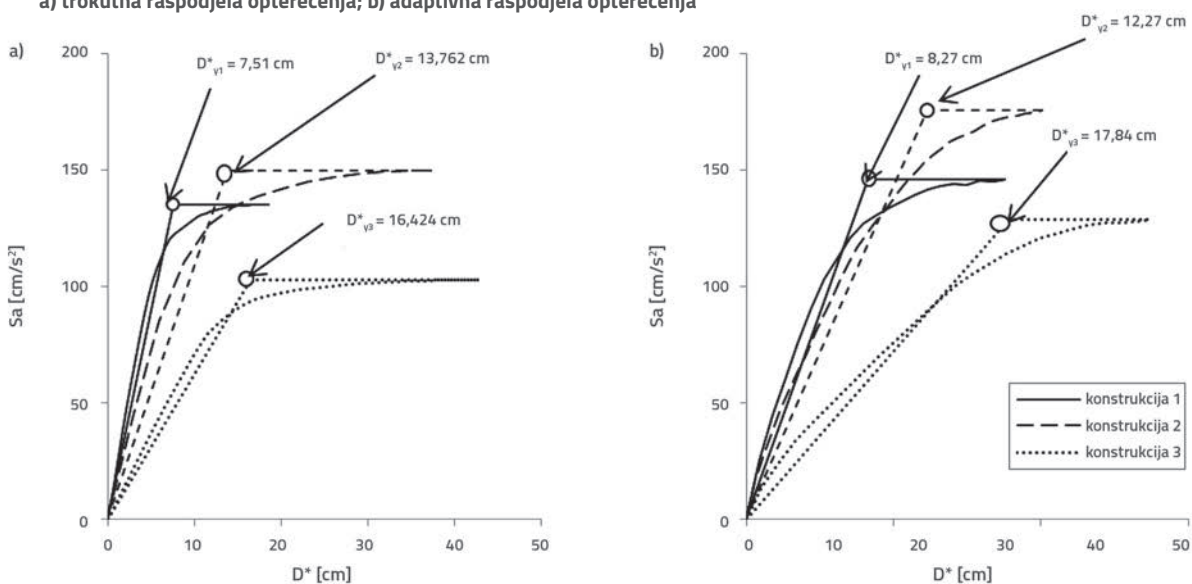
Rezultati koji se odnose na pomak pri popuštanju $D_{v,}^*$, ubrzanje pri popuštanju S_{av} i disipacija energije E_m^* (za tri analizirane konstrukcije i za dvije raspodjele horizontalnih sila) prikazani su u tablicama 1. i 2. Kao alternativa, grafički su također određeni i ciljani pomaci pomoću nelinearnog statičkog proračuna (slika 8.).

$$D_y^* = 2 \cdot \left(D_u^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) \tag{7}$$

$$T^* = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m^* \cdot D_y^*}{F_y^*}} \tag{8}$$



Slika 6. Krivulje kapaciteta (postupno guranje) za sustav s više stupnjeva slobode i za ekvivalentne sustave s jednim stupnjem slobode: a) trokutna raspodjela opterećenja; b) adaptivna raspodjela opterećenja



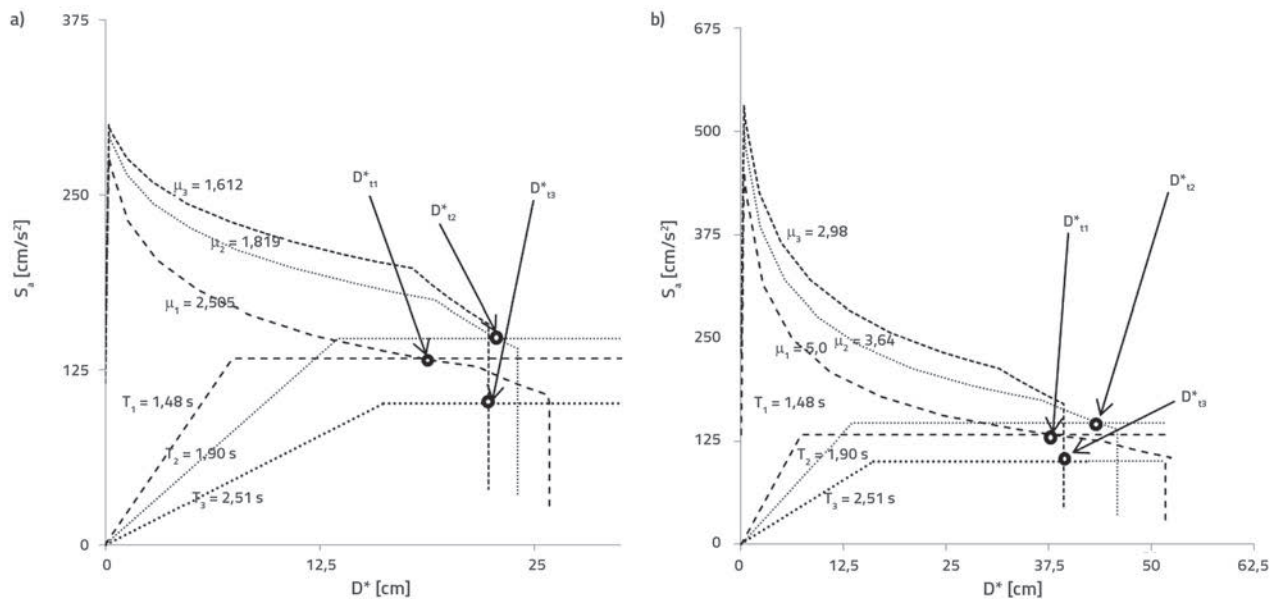
Slika 7. Bilinearni dijagrami kapaciteta za ekvivalentne sustave s jednim stupnjem slobode: a) trokutna raspodjela opterećenja; b) adaptivna raspodjela opterećenja

Tablica 1. Sažeti prikaz rezultata za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode – trokutna raspodjela opterećenja

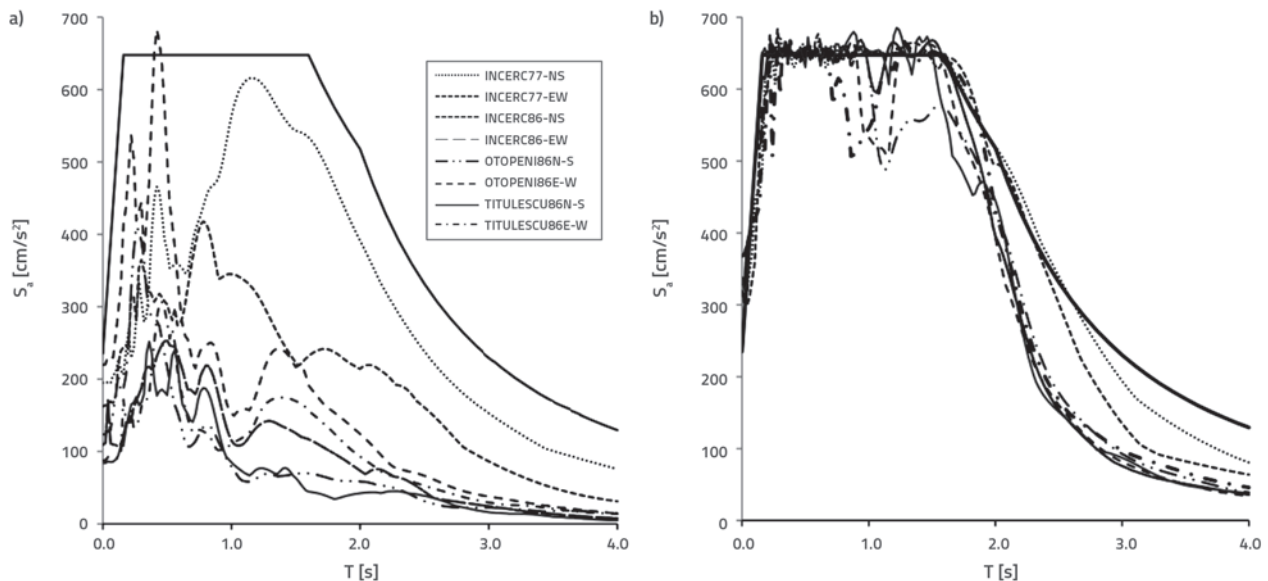
Tip konstrukcije Parametri	Konstrukcija s 5 katova	Konstrukcija s 9 katova	Konstrukcija s 15 katova
T [s]	1,480	1,900	2,512
Γ [-]	1,364	1,422	1,463
S_{ay} [cm/s ²]	135,334	149,799	102,755
D_v^* [cm]	7,514	13,762	16,434
E_m^* [kNcm]	1157,54	4310,42	7145,34

Tablica 2. Sažeti prikaz rezultata za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode – adaptivna raspodjela opterećenja

Tip konstrukcije Parametri	Konstrukcija s 5 katova	Konstrukcija s 9 katova	Konstrukcija s 15 katova
T [s]	1,494	1,659	2,338
Γ [-]	1,364	1,422	1,463
S_{ay} [cm/s ²]	146,157	175,779	108,619
D_v^* [cm]	8,272	12,272	17,84
E_m^* [kNcm]	1137,3	2314,4	4744,88



Slika 8. Određivanje ciljanog pomaka pomoću grafičkog postupka (EC8) za proračunske spektre s vrijednostima; a) PGA 0,12g; b) PGA 0,24g



Slika 9. Elastični spektar razvijen iz: a) neizmijenjenih seizmičkih zapisa; b) zapisa usklađenih s proračunskim spektrom

3.4. Određivanje seizmičkog zahtjeva u području neelastičnosti

Odabrani su seizmički zapisi snažnih potresa žarišta srednje dubine koji su pogodili područje županije Vrancea (Rumunjska), za koje su karakteristične uskopojasne i širokopojasne frekvencije.

Za ovu se namjenu korišteni seizmički podaci potresa s većom dubinom žarišta, koji su prilagođeni intenzitetu (vršnom ubrzanju tla) spektara definiranih normom.

Osam akceleroograma usklađeno je s proračunskim spektrom prema rumunjskom zakonu o projektiranju. Tako usklađeni akceleroگرامи generirani su pomoću programa SeismoMatch

[28], a u skladu s pravilima koja su formilirana u točki 3.2.3.1.2 Eurokoda 8 (EC8). Zaglađeni elastični proračunski spektar i elastični spektri dobiveni iz originalnih i usklađenih akceleroگرامа grafički su prikazani na slici 9. [1].

Potrebno je napomenuti da je skaliranje akceleroگرامа izvedeno samo zato da bi se olakšala usporedba predložene metode s metodom definiranom u seizmičkoj normi, u kojem se koriste zaglađeni proračunski spektri. Ovaj korak nije potreban za opću upotrebu predložene metode. Analizirani se pristup može primijeniti na svaki pojedini akceleroگرام, bez potrebe usklađivanja ili skaliranja akceleroگرامа. To je jedna od prednosti predložene metode u usporedbi s nelinearnim statičkim proračunom, jer se kod tog proračuna trebaju koristiti

akcelerogrami koji su kompatibilni s izgladenim spektrom [23]. Za tri analizirane konstrukcije provedena su ukupno 384 nelinearna proračuna s vremenskim zapisom na modelima s jednim stupnjem slobode. Taj broj proračuna opravdava se zasebnim proračunima koji su potrebni za dvije vrste raspodjela horizontalnog opterećenja kod postupnog guranja, potrebom korištenja osam različitih akcelerograma podešenih na dva intenziteta, te potrebom izrade četiri vrste histereznihih modela. Vrijednost od pet posto usvojena je za viskozno prigušivanje, a isti je postotak usvojen i u području očvršćavanja nakon popuštanja.

Neelastični spektri konstantne duktilnosti generirani su pomoću četiri vrste histereznihih modela: bilinearnoelastični model, bilinearnoplastični model s očvršćivanjem, Cloughov model s degradacijom krutosti, te modificirani Cloughov model (slika 10.). Za grafičko prikazivanje zahtjeva duktilnosti, generirani su elastični i neelastični spektri za periode od 0,1 s do 5 s.

Histerezni modeli prikazani na slici 10. razlikuju se po definiciji ciklusa opterećenje-rasterećenje: (a) zanemaruju se utjecaji degradacije krutosti, dok se u (b-d) uzimaju u obzir utjecaji degradacije krutosti.

Važno je naglasiti da ovdje uključeni model (a) obično opisuje neelastično ponašanje nelinearno elastičnih materijala definiranih istim ciklusom opterećenja i rasterećenja (tj. preostala deformacija jednaka je nuli). Taj je model uključen u grupu ovdje razmatranihih histereznihih modela zbog svoje jednostavnosti pri modeliranju neelastičnosti, a i zato što jasnije pokazuje na važnost i utjecaj naprednijih histereznihih modela usvojenih za modeliranje stvarnog cikličnog ponašanja u neelastičnom području svojstvenom za armiranobetonske elemente. Neka ispitivanja osjetljivosti koja se odnose na utjecaj raznih histereznihih modela razmatrat će se u poglavlju 4 i 5 ovog rada.

Modeli (a-c) dobro su poznati, a model (d) izmijenjen je tako da se "pokuša ostvariti realnije ponašanje pri rasterećenju" [29]. Isto kao i model (c), i ovaj model pokazuje nedostatke pri ponovnom opterećenju [30]. Kod modificiranog Cloughovog modela, a prilikom ponovnog opterećenja, odziv je usmjeren prema pomaku postignutom u prethodnom ciklusu opterećenja. Za svaki je slučaj određen zahtjev konstantne nosivosti R_{μ} , koji je povezan s ubrzanjem pri popuštanju / graničnim ubrzanjem $S_{ay} = S_{au}$ iz bilinearnog dijagrama kapaciteta, i s periodom T

za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode. Zatim je zahtjev duktilnosti μ izračunan pomoću nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom za sustav s jednim stupnjem slobode, a karakterizira ga period T^* i zahtjev konstantne nosivosti R_{μ} , kako je također opisano u poglavljima 2.3 i 2.4. Spektri konstantne nosivosti i konstantne duktilnosti razvijeni su pomoću programa Bispec [25].

3.5. Određivanje ciljanihih pomaka

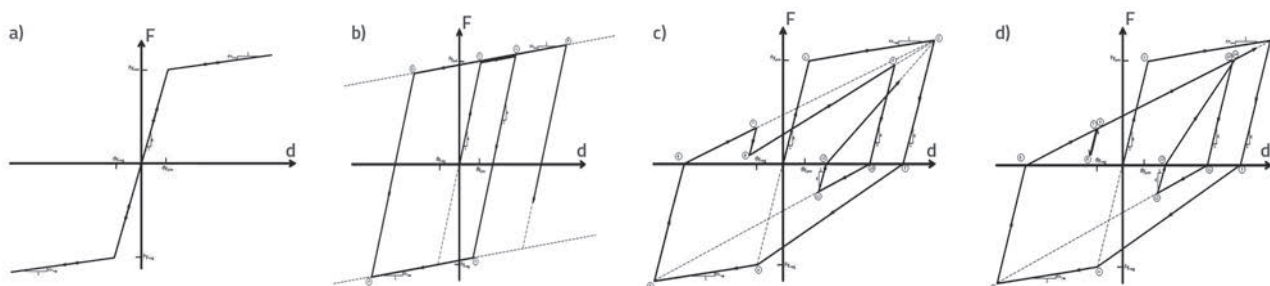
U sklopu primjene predložene metode analitički se pomoću izraza (6) izračunava ciljani pomak D_c sustava s više stupnjeva slobode, i to kao produkt pomaka pri popuštanju sustava s jednim stupnjem slobode, zahtjeva duktilnosti μ , i faktora udjela prvog oblika Γ . Kao što je već prikazano, moguće je i grafički prikaz i grafičko određivanje ciljanihih pomaka i neelastičnog spektra konstantne duktilnosti (slika 2.). Iste krivulje postupnog guranja mogle bi se koristiti za određivanje ciljanihih pomaka pomoću nelinearnog statičkog proračuna, kao i u slučaju predložene metode [1]. Bilinearno idealizirane krivulje kapaciteta i karakteristike ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode prikazane su na slici 7. te u tablicama 1. i 2.

U nelinearnom statičkom proračunu, za određivanje zahtjeva duktilnosti povezanog sa zagladihim proračunskim spektrima korištene su jednađbe (9) i (10) koje predlažu Vidič, Fajfar i Fischinger [31].

$$R_{\mu} = \mu \quad T \geq T_c \quad (9)$$

$$\mu = (R_{\mu} - 1) \frac{T_c}{T} + 1 \quad T < T_c \quad (10)$$

U nastavku su u tablicama 3. i 4. prikazani zahtjevi nosivosti R_{μ} , zahtjevi duktilnosti μ , i (ciljani) pomaci gornjih katova dobiveni za nelinearni statički proračun za vršno ubrzanje tla (engl. peak ground acceleration - PGA) od 0,12 g i 0,24 g. Kao što je već spomenuto, lako se može odrediti ciljani pomak D_c^* sustava s jednim stupnjem slobode, te ciljani pomak D_c sustava s više stupnjeva slobode. To je produkt pomaka pri popuštanju D_v^* sustava s jednim stupnjem slobode, zahtjeva duktilnosti μ te faktora udjela prvog oblika vibracija Γ , izraz (6). Na slici 8. vidimo grafički prikaz ciljanihih pomaka dobivenih nelinearnim statičkim proračunom.



Slika 10. Primijenjeni histerezni modeli: a) bilinearnoelastični model; b) bilinearnoplastični model s očvršćavanjem; c) Cloughov model; d) modificirani Cloughov model [25]

Tablica 3. Sažeti prikaz vrijednosti karakteristika dobivenih nelinearnim statičkim proračunom, PGA = 0,12g

Tip konstrukcije Parametri	Konstrukcija s 5 katova	Konstrukcija s 9 katova	Konstrukcija s 15 katova
T [s]	0,751	1,109	1,835
T* [s]	1,480	1,900	2,512
Γ [-]	1,364	1,422	1,463
$S_{ae}(T^*)$ [cm/s ²]	323,700	272,600	165,700
S_{av} [cm/s ²]	135,334	149,799	102,755
R_{μ} [-]	2,391	1,819	1,612
μ [-]	2,505	1,819	1,612
D_v^* [cm]	7,514	13,762	16,434
D_t^* [cm]	18,822	25,033	26,492
D_t [cm]	25,670	35,596	38,757

Tablica 4. Sažeti prikaz vrijednosti karakteristika dobivenih nelinearnim statičkim proračunom, PGA = 0,24g

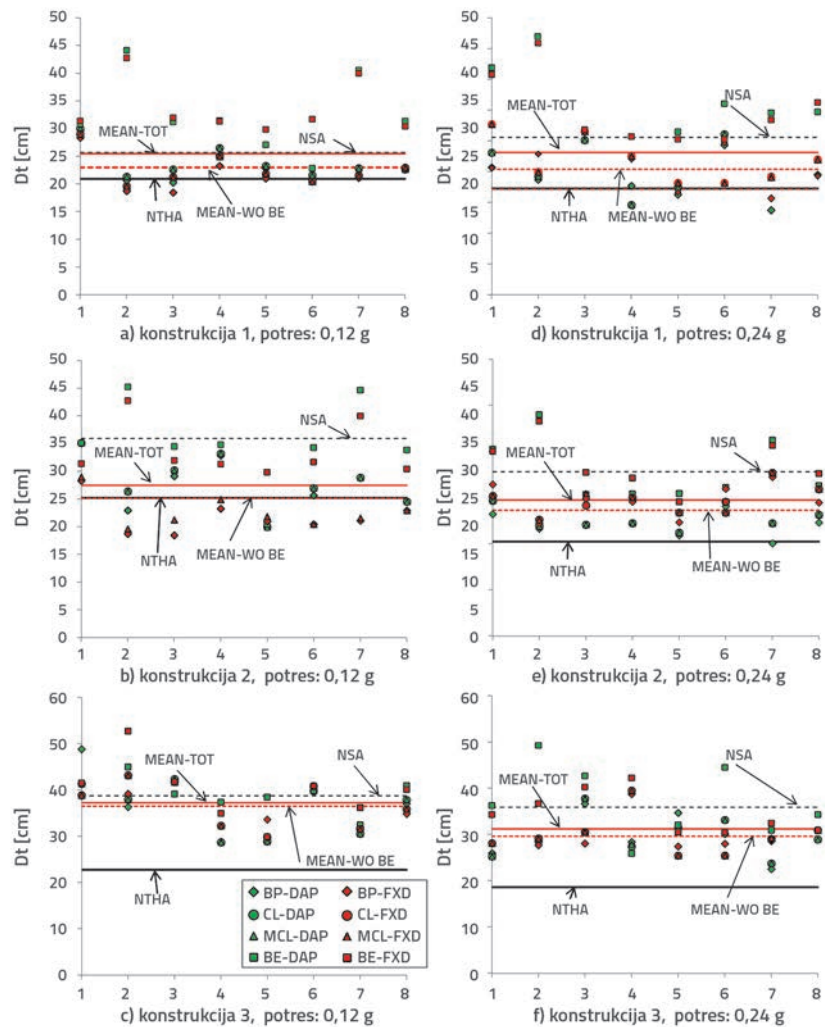
Tip konstrukcije Parametri	Konstrukcija s 5 katova	Konstrukcija s 9 katova	Konstrukcija s 15 katova
T [s]	0,751	1,109	1,835
T* [s]	1,480	1,900	2,512
Γ [-]	1,364	1,422	1,463
$S_{ae}(T^*)$ [cm/s ²]	647,500	545,200	306,500
S_{av} [cm/s ²]	135,334	149,799	102,755
R_{μ} [-]	4,784	3,640	2,983
μ [-]	5,091	3,640	2,983
D_v^* [cm]	7,514	13,762	16,434
D_t^* [cm]	38,253	50,09	49,020
D_t [cm]	52,177	71,22	71,71

4. Analiza rezultata i usporedba s drugim vrstama seizmičkih analiza

4.1. Pomaci na gornjim katovima

Pojedinačni i srednji pomaci gornjih katova, izračunani na temelju predložene metode, iskazani su na slici 11. za svaki od osam potresa i histereznih modela sustava s jednim stupnjem slobode. Kao što je navedeno, seizmički zahtjevi predstavljeni su proračunskim spektrom za slučaj nelinearnog statičkog proračuna, tj. s ukupnim seizmičkim zapisima usklađenima s proračunskim spektrom za predloženu metodu i za nelinearni proračun s vremenskim zapisom.

Nelinearni proračuni s vremenskim zapisom sustava s više stupnjeva slobode provedeni su radi usporedbe s istim akcelerogramima, i to samo kako bi se uočile razlike u odnosu na predloženu metodu u kojoj se koristi nelinearni proračun s vremenskim zapisom sustava s jednim stupnjem slobode. Razlika između predložene metode i nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom prikazana je na slici 2.b i 2.c. Kod općenite primjene predložene metode, nelinearni proračun s vremenskim zapisom sustava s više stupnjeva slobode nije potreban. Točnost predložene metode analizirana je uspoređivanjem pomaka na gornjim



Slika 11. Pomaci gornjih katova dobiveni pomoću predložene metode, nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom i nelinearnog statičkog proračuna: za okvirne konstrukcije s: a) 5 katova; b) 9 katova; c) 15 katova; seizmički zapisi s vršnim ubrzanjem tla od 0,12 g, te za okvirne konstrukcije s: d) 5 katova; e) 9 katova; f) 15 katova; seizmički zapisi s vršnim ubrzanjem tla od 0,24 g

katovima ("MEAN-TOT" na slici 11. određenim pomoću predložene metode, sa srednjim pomakom gornjih katova dobivenih na temelju nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom i nelinearnog statičkog proračuna.

Na slici 11. jasno se mogu uočiti značajna odstupanja kod pomaka određenih pomoću bilinearne elastičnog modela. Kada se rezultati dobiveni pomoću navedenog modela isključe iz mase rezultata (opisano s "MEAN-WO BE"), tada dolazi do znatnog smanjenja srednjih relativnih pogrešaka: 1,13 ; 1,33 umjesto 1,23 ; 1,42 za peterokatnu konstrukciju i 1,33 ; 1,45 umjesto 1,42 ; 1,61 za deveterokatnu konstrukciju. Što se tiče standardne devijacije pomaka gornjih katova određene pomoću predložene metode, postignuta je vrijednost od 2,95 ; 7,35 cm umjesto 5,80 ; 11,81 cm za konstrukciju 1 tj. 4,79 ; 7,30 cm umjesto 6,57 ; 11,68 cm za konstrukciju 2 kada su iz analize izuzeti rezultati dobiveni pomoću bilinearne elastičnog modela. Svaka dva broja odijeljena oznakom točka zarez predstavljaju srednje relativne pogreške do kojih dolazi za odabrani set potresa s ubrzanjima od 0,12 g te 0,24 g.

Stoga, kada se odbace rezultati bilinearne elastičnog modela, predloženom metodom se dobije najbolja procjena vrijednosti određenih na temelju nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom, tj. u svim se slučajevima postižu rezultati točniji od rezultata nelinearnog statičkog proračuna.

Sličan se zaključak može donijeti i za svaki primijenjeni histerezni model [1]: predloženom metodom bitno se ne poboljšavaju predviđanja neelastičnih pomaka za konstrukcije s petnaest katova.

Kao što je već spomenuto, u ovom se radu koriste seizmički zapisi snažnih potresa sa srednjom dubinom žarišta i s niskim i visokim frekvencijama, koji su pogodili područje županije Vrancea u Rumunjskoj. Ovdje predstavljena metoda već je prije korištena na drugom tipu seizmičkog gibanja, tj. na plitkom potresu koji je 1976. godine pogodio područje Furlanije. Zapis je tada definiran prema spektrima EC8 (tip A), a korištene su tri razine intenziteta: 0,36g, 0,42 g i 0,48g. Slično kao i kod ovog istraživanja, rezultati pokazuju da se ovom metodom postižu rezultati bolji od onih dobivenih nelinearnim statičkim proračunom, a pomaci su gornjih katova bili uglavnom u skladu s rezultatima nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom [32].

4.2. Bočni katni pomaci

Ciljani pomak izračunan je pomoću nelinearnog statičkog proračuna, a zatim je konstrukcija gurnuta do definirane točke (pomak gornjih katova) kako bi se izračunali zahtjevi i pomaci konstrukcije, u ovom slučaju je to profil katnog pomaka. U poglavlju 4.1 zorno je prikazan način na koji usvojeno histerezno modeliranje kod sustava s jednim stupnjem slobode utječe na vrijednost ciljanog pomaka. Također se može uočiti da se u ovom slučaju bolje procjene ciljanog pomaka dobivaju sofisticiranim histereznim modeliranjem. Kod proračuna profila katnog pomaka nelinearnim statičkim proračunom, a i kod metode predložene u ovom radu, za "guranje" konstrukcije do

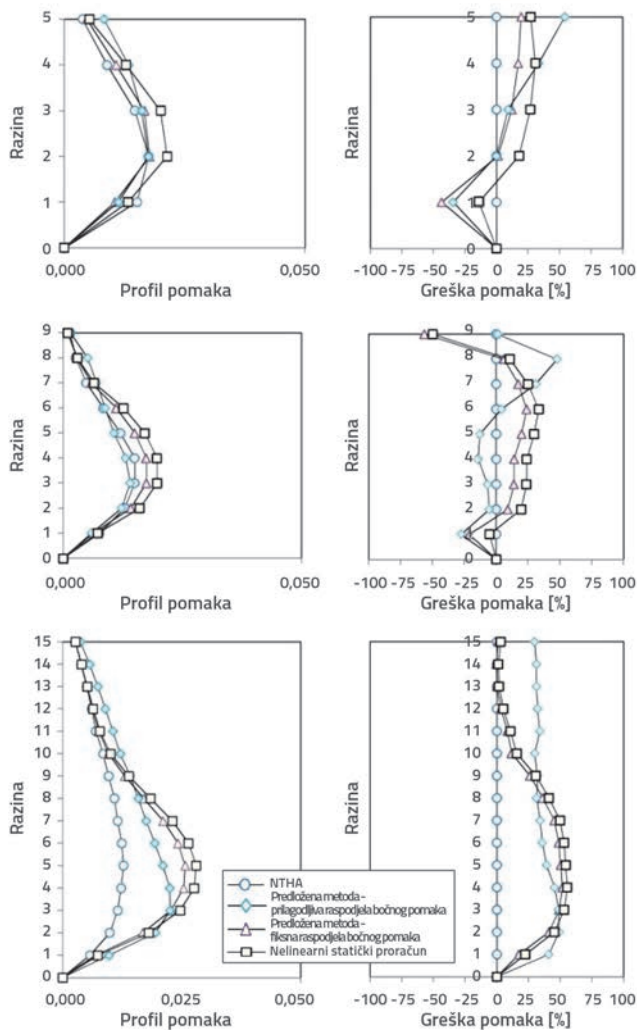
unaprijed definirane vrijednosti ciljanog pomaka primjenjuje se metoda postupnog guranja. Kao što je poznato i iz literature, vršni pomaci (opisani krivuljom postupnog guranja) koji odgovaraju vrijednostima pri slomu zapravo su "(jednoznačne) determinističke vrijednosti jer te metode ne uzimaju u obzir specifičnosti gibanja tla" [27]. Stoga, kada se konstrukcija pomakne u položaj unaprijed definiranog (ciljanog) pomaka, utjecaj histereznog modeliranja sustava s jednim stupnjem slobode (ali i aproksimacije kao što je transformacija iz jednog stupnja slobode u više stupnjeva slobode primjenom prvog oblika vibracije) reflektira se u samo jednoj vrijednosti, a to je prethodno izračunani ciljani pomak. Taj nedostatak je jedno od dobro poznatih (većih) ograničenja metode, a uzrokovan je "statičkim" obilježjima metode. Kao posljedica, u nelinearnom statičkom proračunu, na procjenjene vrijednosti katnog pomaka najviše utječe nelinearno modeliranje elemenata i raspodjela horizontalnog opterećenja. Važnost nelinearnog modeliranja elemenata konstrukcije općenito se podcjenjuje pri provedbi nelinearnog statičkog proračuna. Autori potvrđuju važnost takvog modeliranja u [1, 2], a također i u ovom radu. Što se tiče raspodjele horizontalnog opterećenja, neki istraživači smatraju da se točna reprodukcija odziva dinamičke analize ne može postići ni adaptivnim ni neadaptivnim guranjem" [33]; a "u neelastičnom području, tako se pretjerane vrijednosti sila na mjestima plastičnih zglobova te se na tim katovima podcjenjuju/precjenjuju vrijednosti pomaka. Na taj se način ne mogu točno reproducirati karakteristike lokalnog dinamičkog odziva zgrada, naročito u području omekšavanja".

U tom se kontekstu u ovom radu prikazuje komparativna analiza raspodjele (maksimalnog) katnog pomaka, pri čemu se predložena metoda uz primjenu metode postupnog guranja s nepromjenjivim i adaptivnim opterećenjem uspoređuje s nelinearnim statičkim proračunima i s nelinearnim proračunom s vremenskim zapisom. Utjecaj pojedinačnih histereznih modela unutar predložene metode analizira se u odnosu na [1]. Profili katnog pomaka, s odgovarajućom srednjom pogreškom, prikazani su na slikama 12. i 13. za niz od osam potresa skaliranih na dvije razine intenziteta.

Srednje vrijednosti katnog pomaka određene pomoću predložene metode uspoređene su s rezultatima nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom za odabrane seizmičke zapise, i prikazane na slikama 12. i 13. gdje su također prikazani i profili katnih pomaka određeni na temelju nelinearne statičke metode.

Iste su konstrukcije analizirane i u [1], također na bazi napredne metode guranja NEFCAD [21]. Analize su provedene u dvije varijante: s utjecajem i bez utjecaja geometrijske nelinearnosti, a horizontalna su opterećenja bila trokutasta i nevarijabilna. U radu [1], za određivanje neelastičnih spektara korišten je samo Clough-ov histerezni model s degradacijom krutosti.

U ovom se istraživanju ocjenjuje primjena četiri histerezna modela, što je i prikazano na Slici 10. Na slikama 12. i 13. prikazane su procjene horizontalnog pomaka za srednju ciljanu vrijednost pomaka određenu za odabrani niz zapisa potresa



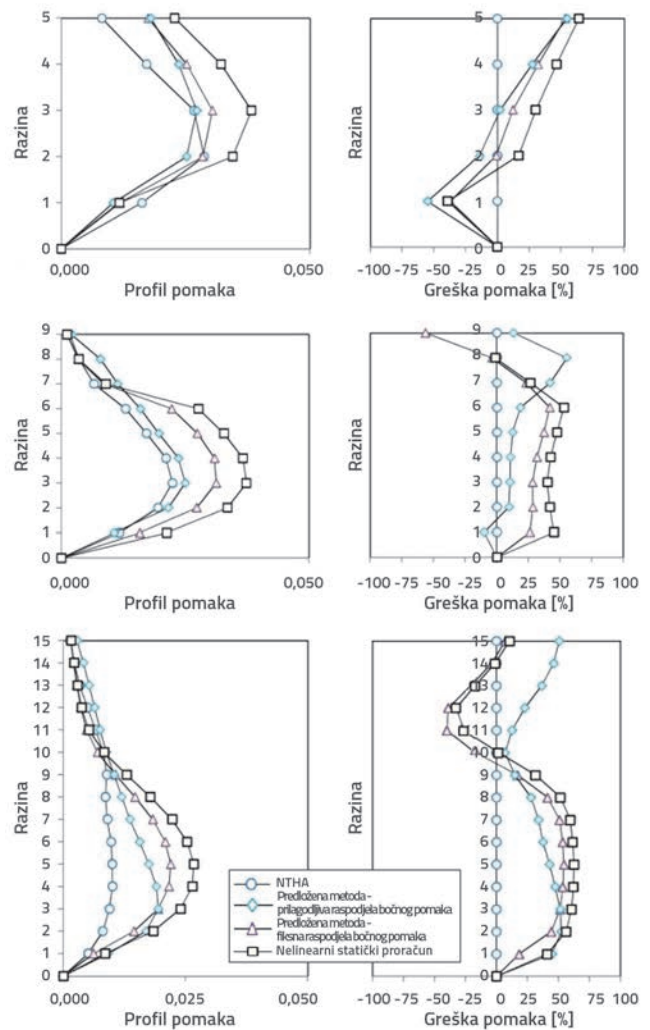
Slika 12. Profili pomaka i pogreške izračunane za osam seizmičkih zapisa za okvirne konstrukcije s: a) pet katova; b) devet katova; c) 15 katova; PGA = 0,12g

(neelastični spektri), što je grafički predloženo u ovisnosti o histereznim modelima.

U odnosu na nelinearni statički proračun, profili pomaka određeni na temelju predložene metode predstavljaju – za konstrukcije s 5 i 9 katova – bolje aproksimacije profila pomaka određenih nelinearnim proračunom s vremenskim zapisom.

S jedne strane, osnovni razlog za to navedeno poboljšanje proizlazi iz primjene adaptivne raspodjele horizontalnih sila, koja preciznije opisuje pojavu elastoplastičnih deformacija u konstrukciji. S druge strane, razlog tome je i predložena stroža definicija neelastičnih zahtjeva, u kojoj se u obzir uzima stvarna frekvencija potresa. Usporedno, kod nelinearnog statičkog proračuna, za dva potresa različitog frekvencijskog sastava dobiveni su jednaki ciljani pomaci.

U slučaju petnaestokatne konstrukcije, predloženom metodom s adaptivnom raspodjelom sila ostvaruje se bolja procjena pomaka na nižim katovima, u usporedbi s analizom pomoću nepromjenjive raspodjele sila. Ovo je još izraženije u slučaju



Slika 13. Profili pomaka i pogreške izračunane za osam seizmičkih zapisa za okvirne konstrukcije s: a) pet katova; b) devet katova; c) 15 katova; PGA = 0,24g

seizmičkog zapisa od 0,24 g, kada su pomaci u neelastičnom području još veći. Što se tiče gornjih katova, dobiveni pomaci su precijenjeni kada se primjenjuje predložena metoda s adaptivnom raspodjelom sila. Situacija je međutim drugačija kada se radi o predloženoj metodi s nepromjenjivom raspodjelom sile, gdje se u tom katnom području ostvaruje bolja procjena.

5. Zaključak

U ovom je radu prikazana nova računalna metoda za vrlo brzo i dovoljno točno određivanje pomaka viših katova pravilnih AB okvirnih konstrukcija za niz seizmičkih zapisa, primjenom metode guranja sustava s više stupnjeva slobode te nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom sustava s jednim stupnjem slobode. Ako se usporedi s nelinearnim proračunom s vremenskim zapisom sustava s više stupnjeva slobode, osnovne prednosti predložene metode sastoje se u brzini, ponovljivosti i mogućnosti grafičkog prikazivanja seizmičkog kapaciteta i

zahtjeva kroz format spektralnog ubrzanja – pomaka. Ova se metoda može primijeniti u okviru postupka nelinearnog statičkog proračuna koji se predlaže u Eurokodu 8.

Spomenutom se metodom za niske i srednje visoke građevine dobivaju realne procjene pomaka gornjih katova dobivene nelinearnim proračunom s vremenskim zapisom. U usporedbi s nelinearnim statičkim proračunom, procjene pomaka gornjih katova u svim slučajevima bolje ako se primjenjuje predložena metoda.

U odnosu na bilinearni elastični model, model s degradacijom krutosti, i bilinearni plastični histerezni modeli – korišteni pri određivanju zahtjeva duktilnosti – pokazali su se boljima u ocjeni pomaka gornjih katova.

U ovoj primjeni, histerezno modeliranje sustava s jednim stupnjem slobode utječe samo na katni pomak. Što se tiče oblika profila katnog pomaka, može se uočiti prevladavajući utjecaj modeliranja nelinearnosti i raspodjele krutosti (horizontalno opterećenje). Drugim riječima, histereznim modeliranjem sustava s jednim stupnjem slobode ne može se promijeniti profil katnog pomaka, tj. ono ima tek neznatan utjecaj na vrijednost katnog pomaka. Katni pomak izračunan primjenom nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom ne može se realno procijeniti čak ni primjenom bilo koje od varijanata predložene metode,

kada se radi o konstrukciji s petnaest katova. Stoga se u pogledu određivanja katnog pomaka ovom metodom ne mogu izbjeći ograničenja na koja upozoravaju neki autori [16, 17, 27, 33].

U Eurokodu 8, u provedbi proračuna postupnog guranja preporučuju se nepromjenjive raspodjele opterećenja. Međutim, predloženom metodom – uz upotrebu adaptivne raspodjele sila – postižu se bolje procjene pomaka gornjih katova i međukatnih pomaka. To se poboljšanje ostvaruje iako u adaptivnom postupnom guranju deformirani oblik nije konstantan u razdoblju analize, pa transformacije s jednog na više stupnjeva slobode nisu konceptijski točne.

Analize provedene u ovom radu pokazuju da se predloženom metodom postižu bolji rezultati pri procjeni pomaka gornjih katova kada se radi o niskim i srednje visokim konstrukcijama, dok se u slučaju visokih konstrukcija procjene bitno ne razlikuju u usporedbi s nelinearnim statičkim proračunom. Dakle, najbolji rezultati postignuti su za konstrukcije na koje dominantno utječe prvi vlastiti oblik vibracija. U daljnjem istraživanju više će se usmjeriti na definiranje postupaka koji omogućuju određivanje ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode i bilinearizacije krivulje kapaciteta, pri čemu se u obzir neće uzimati samo faktor sudjelovanja prvog vlastitog oblika vibracija već i utjecaj viših vlastitih oblika.

LITERATURA

- [1] Varga, S., Chiorean G.C.: A Computer Method for Advanced Pushover Analysis of Reinforced-Concrete Frameworks, in Proceedings of the 15th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Prague, 2015.
- [2] Varga, S., Chiorean G.C.: Seismic Assessment of Reinforced Concrete Frameworks Through Advanced Pushover Analysis and Nonlinear Response of A SDOF Oscillator, Journal Procedia Engineering, 161 (2016), pp. 332–336.
- [3] Fatahi, B., Hamid Reza, S.: Fully nonlinear versus equivalent linear computation method for seismic analysis of midrise buildings on soft soils." International Journal of Geomechanics, 14 (2013) 4, pp. 401–416.
- [4] Deierlein, G.G., Reinhorn, A.M., Willford, M.R.: Nonlinear structural analysis for seismic design. NEHRP seismic design technical brief, 4 (2010), pp.1–36. 2010.
- [5] ATC, ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Redwood City, CA: Applied Technology Council, 1996.
- [6] FEMA, Report FEMA 356: Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [7] FEMA, Report FEMA 440: Improvement of nonlinear static analysis procedures. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2005.
- [8] CEN, EN 1998-1: Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance; Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: Comite Europeen de Normalisation, 2004.
- [9] Krawinkler, H., Seneviratna, G.D.P.K.: Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation, Engineering Structures, 20 (1998) 1, pp. 452–464, [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00092-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8)
- [10] Chopra, A.K., Goel, R.K.: A modal pushover analysis procedure for estimating demands for buildings: Theory and Preliminary Evaluation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31 (2002) 3, pp. 561–582, <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.144>
- [11] Paret, T.F., Sasaki, K.K., Eilbeck, D.H.: Approximate inelastic procedures to identify failure mechanism from higher mode effects, in Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, vol. 2, Paper no. 966. Acapulco, Mexico, 1996,
- [12] Balić, I., Mihanović, A., Trogljić, B.: Target acceleration in multimodal pushover method for R/C frames, Građevinar, 65 (2013) 4, pp. 305–318.
- [13] Bracci, J.M., Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M.: Seismic Performance and Retrofit Evaluation of RC Structures, Journal of Structural Engineering, 123 (1997) 1, pp. 3–10, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:1\(3\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:1(3))
- [14] Requena; M., Ayala, G.A.: Evaluation of a simplified method for the determination of the nonlinear seismic response of RC frames, in Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- [15] Gupta, B., Kunnath, S.K.: Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures, Earthquake Spectra, 16 (2000) 2, pp. 367–391, <http://dx.doi.org/10.1193/1.1586117>

- [16] Antoniou, S., Pinho, R.: Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure, *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (2004) 5, pp. 497-522, <http://dx.doi.org/10.1080/13632460409350504>
- [17] Shakeri, K., Shayanfar, M.A., Kabeyasawa, T.: A story shear-based adaptive pushover procedure for estimating seismic demands of buildings," *Engineering Structures*, 32 (2010) 1, pp. 174-183, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.09.004>
- [18] Varga, S.: An Alternative Method For The Determination of Inelastic Displacements Using Pushover Analysis and Directly Generated Inelastic Spectra, *Acta Tehnica Napocensis*, 57 (2014) 1, [http://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng/download/atn/ATN2014\(1\)_8.pdf](http://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng/download/atn/ATN2014(1)_8.pdf)
- [19] Genkturk, B., Elnashai, A.S.: Development and application of an advanced capacity spectrum method, *Engineering Structures*, 30 (2008), pp. 3344-3354.
- [20] Freeman, S.A.: Prediction of Response of Concrete Buildings to Severe Earthquake Motion, *ACI Special Publication* 55, 1978.
- [21] Chiorean, C.G.: A computer method for nonlinear inelastic analysis of 3D composite steel-concrete frame structures," *Engineering Structures*, 57 (2013), pp. 125-152.
- [22] Aschheim, M., Black, E.F.: Yield point spectra for seismic design and rehabilitation, *Earthquake Spectra*, 16 (2000) 2, pp. 317-336, <http://dx.doi.org/10.1193/1.1586115>
- [23] 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>
- [24] Chopra, A.K.: *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 4th ed.: Prentice Hall/Pearson Education, 2012.
- [25] Hachem, M.M.: BISPEC. Interactive software for the computation of unidirectional and bidirectional nonlinear earthquake spectra, version 2.20, 2012, Help manual. <http://www.eqsols.com/Pages/Bispec.aspx>
- [26] SeismoSoft. (2014) *SeismoStruct – A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures* (Help file), (online),: <http://www.seismosoft.com>.
- [27] Ferracuti, B., Pinho, R., Savoia, M., Francia, R.: Verification of displacement-based adaptive pushover through multi-ground pushover analyses, *Engineering Structures*, 8 (2009) 31, pp.1789-99, <http://10.1016/j.engstruct.2009.02.035>
- [28] SeismoSoft. (2013), *SeismoMatch*, version 2.0.0, http://www.seismosoft.com/en/download_details.aspx?ID_Download=6.
- [29] Otani, S.: Hysteresis models of reinforced concrete for earthquake response analysis. *Journal of Faculty of Engineering*, 36 (1981) 2, pp.407-441.
- [30] JC Esquivel, Influence of some parameters on the inelastic earthquake response using different hysteretic models for reinforced concrete, 10th WCEE, Balkema, Rotterdam, 1992.
- [31] Vidič, T., Fajfar, P., Fischinger, M.: Consistent inelastic design spectra: strength and displacement, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23 (1994) 5, pp. 507-521, <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.4290230504>
- [32] Varga, S.: An alternative method for the determination of inelastic displacements using pushover analysis and directly generated inelastic spectra, *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, 57 (2014) 1, pp. 66-74.
- [33] Antoniou, S., Rui, P.: Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures. *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (2004) 4, pp. 497-522.