

# RAZŠIRJENA N2-METODA Z UPOŠTEVANJEM VPLIVOV VIŠJIH NIHAJNIH OBLIK

## THE EXTENDED N2 METHOD CONSIDERING HIGHER MODE EFFECTS

dr. Maja Kreslin, univ. dipl. inž. grad.  
akad. prof. dr. Peter Fajfar, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo  
Jamova 2, 1000 Ljubljana  
maja.kreslin@ikpir.fgg.uni-lj.si  
pfajfar@ikpir.fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek

UDK: 624.042.7

**Povzetek** | Prikazana je razširitev poenostavljene nelinearne metode (znane pod imenom N2-metoda) za analizo (srednje) visokih in/ali nesimetričnih stavb v tlorisu pri potresni obtežbi. Pri omenjenih vrstah stavb so lahko pomembni vplivi višjih nihajnih oblik v tlorisu in/ali po višini, ki jih z osnovno različico N2-metode ne moremo zajeti. Razširitev N2-metode temelji na predpostavki, da je nelinearni vpliv pomemben pri osnovni nihajni obliki, medtem ko je obnašanje v višjih nihajnih oblikah pretežno elastično. Vplivi višjih nihajnih oblik se določijo s standardno modalno analizo s spektri odziva in se v obliki korekcijskih faktorjev uporabijo za korekcijo rezultatov iz potisne (pushover) analize, ki predstavljajo neelastični odziv stavbe v osnovni nihajni obliki. V prispevku so podani teoretične osnove metode in prikaz postopka računa ter uporaba metode na testnem primeru, ki ga predstavlja 8-etažna armiranobetonska stavba.

**Summary** | The extended N2 method has been developed taking into account higher mode effects both in plan and in elevation. The extension is based on the assumption that the structure remains in the elastic range when vibrating in higher modes. Higher mode effects are determined by the standard elastic modal analysis. They are applied in terms of correction factors, which are used for the adjustment of results obtained by the usual pushover analysis. In the paper, first, the background of the approximate approach is explained. The computational procedure is then summarized, and applied to a test building. An actual 8-storey RC frame building has served as a test example.

### 1 • UVOD

Nelinearne metode omogočajo realnejšo in zanesljivejšo oceno obnašanja stavb pri močni potresni obtežbi kot metode, ki temeljijo na rezultatih linearne analize. Načeloma je za račun potresnega odziva najprimernejša nelinearna dinamična analiza, ki pa je za vsakodnevno praktično uporabo še vedno pre-

zahtevna oziroma neprimerna (večji računski čas, zahtevnejši in težje dostopni podatki, težja obdelava podatkov in večja možnost napak kot pri standardnih metodah). Kot alternativa se že nekaj časa razvijajo t. i. poenostavljene nelinearne metode za seizmično analizo konstrukcij, ki zagotavljajo dragocene

informacije o neelastičnem odzivu konstrukcij, zaradi svoje enostavnosti pa so primerne tudi za praktično uporabo.

Ena izmed takšnih metod je N2-metoda (Fajfar, 2000, 2002), ki je bila razvita v IKPIR-u. Metoda temelji na nelinearni statični analizi modela konstrukcije z več prostostnimi stopnjami (MDOF) in na pretvorbi tega modela na ekvivalentni model z eno prostostno stopnjo (SDOF). Zahteve potresa se določijo z nelinearnimi spektri odziva. Opisana metoda je

vključena v nov evropski in slovenski standard za potresno odporno gradnjo Evrokod 8 ali krajše EC8 (SIST EN 1998-1, 2005), uporabljajo pa se tudi zunaj Evrope.

Osnovna predpostavka N2-metode kot tudi drugih metod, ki temeljijo na nelinearni statični potisni (»pushover«) analizi, je, da konstrukcija niha pretežno v osnovni nihajni obliki. Ta predpostavka ni izpolnjena zlasti pri nesimetričnih konstrukcijah v florisu in pri visokih stavbah. V literaturi so predlagane številne metode za upoštevanje višjih nihajnih oblik v florisu kot tudi po višini stavbe ((Antoniu, 2004), (Aydinoğlu, 2003), (Aydinoğlu, 2010), (Bento, 2008), (Chopra, 2002); (Chopra, 2004a), (Chopra, 2004b), (Reyes, 2010)). Nekateri iz-

med predlaganih poenostavljenih pristopov so že tako zahtevni (komplicirani) za uporabo, da je boljše in lažje uporabiti natančnejše metode (na primer nelinearno dinamično analizo).

Osnovna ideja pri razširitvi polja uporabnosti N2-metode za stavbe, pri katerih so pomembne višje nihajne oblike, je bila, da naj bo metoda enostavna, a hkrati še vedno dovolj natančna. Razširitev temelji na predpostavki, da je nelinearni vpliv pomemben pri osnovni nihajni obliki, medtem ko je obnašanje v višjih nihajnih oblikah pretežno elastično. Postopek za analizo nesimetričnih stavb v florisu, pri katerih so pomembne višje nihajne oblike v florisu, je bil predlagan v članku (Fajfar, 2005), v zadnjem času pa je bil

razvit še postopek za analizo visokih stavb ((Kreslin, 2010); (Kreslin 2011)), pri katerih so pomembne višje nihajne oblike po višini stavbe. Oba postopka sta združena v t. i. razširjeno N2-metodo, ki je primerna za analizo praktično povsem splošnih konstrukcij stavb. V članku je najprej opisano teoretično ozadje metode, sledita opis računskega postopka in uporaba metode na konkretnem primeru. Testno stavbo predstavlja obstoječa 8-etažna armiranobetonska stavba, projektirana v skladu s predstandardom EC8. Vsi koraki metode so prikazani na opisanem testnem primeru. Končni rezultati razširjene N2-metode so prikazani v obliki pomikov in zamikov (etažni pomik/etažna višina).

## 2 • OSNOVNE PREDPOSTAVKE

V elastičnem (linearnem) območju se za določitev potresnega odziva konstrukcij, pri katerih so pomembne višje nihajne oblike, najpogosteje uporablja modalna analiza s spektri odziva (Fajfar, 1984), za katero bomo v tem članku uporabili oznako RSA (ang. response spectrum analysis). Pri tej metodi izračunamo odziv konstrukcije za vsako nihajno obliko, ločeno za obe smeri obremenjevanja. Končne vrednosti določimo s kombinacijo vplivov nihajnih oblik in kombinacijo rezultatov zaradi smeri vzbujanja. Najpogosteje se uporablja SRSS-kombinacija (kvadratni koren vsote kvadratov) oziroma CQC (popolna kvadratna kombinacija), če imajo nihajni časi posameznih oblik približno enake vrednosti.

V neelastičnem območju superpozicija teoretično ni mogoča. Ker v splošnem potresni odziv konstrukcij določa osnovna nihajna oblika (v dveh vodoravnih smereh), so originalne poenostavljene metode, ki uporabljajo nelinearno statično potisno analizo, med njimi tudi N2-metoda, temeljile na predpostavki, da konstrukcija niha pretežno v osnovni nihajni obliki in da se deformacijska oblika, s tem pa tudi razporeditev (oblika) horizontalne obtežbe ne spreminjata s časom. Ta predpostavka omogoča pretvorbo sistema z

več prostostnimi stopnjami na ekvivalenten sistem z eno prostostno stopnjo, ne omogoča pa upoštevanja višjih nihajnih oblik. Številni avtorji po svetu so predlagali različne poenostavljene postopke za upoštevanje vplivov višjih nihajnih oblik in jih verificirali s primerjavo približnih rezultatov z rezultati nelinearnih dinamičnih analiz NRHA (ang. non-linear response history analysis). Med drugim je bilo ugotovljeno (Chopra, 2004b), da je povezava med nihanjem v različnih nihajnih oblikah v neelastičnem območju običajno šibka (v elastičnem območju te povezave ni) in da zato lahko, kot približek, uporabimo neki način superpozicije tudi v neelastičnem območju. Običajno v računih ni bila analizirana odvisnost rezultatov NRHA od intenzitete potresne obtežbe. Nekatere študije so pokazale, da so rezultati NRHA v veliki meri odvisni od velikosti plastičnih rotacij, ki naraščajo z intenziteto potresne obtežbe ((Peruš, 2005), (Marušić, 2005), (Kreslin, 2011)). Vplivi višjih nihajnih oblik, izračunani z NRHA, se z večanjem intenzitete v splošnem zmanjšujejo tako v florisu kot po višini. Tako je težko razviti relativno enostaven postopek, s katerim bi lahko z zadostno natančnostjo določili odziv stavbe pri poljubni jakosti potresne obtežbe, ki se lahko zgodi v življenjski dobi konstrukcije.

Poenostavljene metode, še posebno tiste, ki so vključene v različne standarde po svetu, so načeloma konservativne. Rezultati študij so pokazali ((Fajfar, 2005), (Kreslin, 2010)), da lahko pri nelinearnih metodah konservativno oceno vplivov višjih nihajnih oblik dobimo z elastično analizo. V tistih delih stavbe, kjer imajo višje nihajne oblike pomemben vpliv (na primer zgornji del visokih stavb, podajni rob nesimetričnih konstrukcij v florisu, togi rob torzijsko podajnih konstrukcij), ustrezno normirani rezultati elastične analize v večini primerov predstavljajo ovojnico (zgornjo mejo) rezultatov, ki pripadajo različnim jakostim potresne obtežbe. Na podlagi teh ugotovitev je bila predlagana razširitev N2-metode. Predpostavili smo, da s kombinacijo rezultatov potisne analize in normiranih rezultatov elastične modalne analize dobimo »varno« oceno za razporeditev potresnih zahtev po konstrukciji (po višini in v florisu). Absolutne vrednosti potresnih zahtev pa so odvisne tudi od določitve ciljnega pomika, ki ga lahko določimo z N2-metodo ali s katero drugo metodo iz literature.

Načeloma višje nihajne oblike vplivajo na vse potresne količine, ki so pomembne za projektiranje konstrukcij. Torzijski zasuki vplivajo na pomike in posledično na zamike ter druge lokalne količine. Na drugi strani pa so rezultati raziskav pokazali (Kreslin, 2010), da imajo višje nihajne oblike po višini konstrukcije zane-marljiv vpliv na pomike, večji pa je njihov vpliv pri zamikih in drugih lokalnih količinah.

## 3 • POSTOPEK RAČUNA

Osnovna različica N2-metode temelji na predpostavki, da konstrukcija niha pretežno

v osnovni nihajni obliki. Pri konstrukcijah, kjer imajo višje nihajne oblike pomembno

vlogo (v florisu ali po višini), je treba uporabiti določene korekcije. Razširitev N2-metode za nesimetrične stavbe v florisu, kjer so pomembne višje nihajne oblike v florisu, in visoke stavbe, kjer so pomembne višje nihajne oblike po višini, je bila narejena ob

predpostavki, da konstrukcija pri nihanju v višjih nihajnih oblikah ostane v elastičnem območju in da se končni rezultati lahko določijo kot kombinacija rezultatov potisne analize (pri katerih ni upoštevan vpliv višjih nihajnih oblik) in ustrezno normiranih rezultatov standardne modalne analize (ki vključujejo vplive višjih nihajnih oblik). Vplivi višjih nihajnih oblik določimo s standardno elastično modalno analizo s spektri odziva in z njimi korigiramo rezultate potisne analize, ki ponazarjajo neelastični odziv konstrukcije pri nihanju v osnovni nihajni obliki. Pri visokih stavbah rezultati potisne analize narekujejo obnašanje v tistem delu stavbe, kjer se elementi bolj plastificirajo, medtem ko elastični rezultati narekujejo potresne zahteve v delih, kjer so pomembne višje nihajne oblike. Vplivi v florisu in po višini se lahko upoštevajo hkrati z dvema skupinama korekcijskih faktorjev. V nadaljevanju so podani glavni koraki razširjene N2-metode. Za podrobnejši opis in razumevanje posameznega koraka glej poglavja 5, 6 in 7, kjer je metoda prikazana na konkretnem primeru.

1. Račun po osnovni različici N2-metode ((Fajfar, 2002), (SIST EN 1998-1, 2005)). V primeru nesimetrične konstrukcije v florisu lahko uporabimo ravninski 2D-model (za posamezno horizontalno smer) ali prostorski 3D-model. Izvedemo nelinearno statično potisno analizo, neodvisno v obeh horizontalnih smereh. Horizontalno obtežbo definiramo v masnih središčih posameznih etaž. Vektor obtežbe upoštevamo s pozitivnim (+) in negativnim (-) predznakom. Določimo ciljni pomik v središču mas (CM) za obe obravnavni smeri (večja izmed vrednosti, izračunanih s predznakoma + in - obtežbe). Predpostavljeno je, da je vpliv višjih nihajnih oblik na ciljni pomik zanemarljiv.

2. Elastična modalna analiza s spektri odziva (Fajfar, 1984). Izvedemo elastično modalno analizo 3D-modela, neodvisno v obeh obravnavanih smereh, in kombiniramo rezultate s SRSS-pravilom. Za kombinacijo nihajnih oblik v posamezni smeri prav tako uporabimo SRSS-pravilo oziroma CQC-pravilo, če so nihajni časi posameznih oblik podobni. V vsaki smeri je treba upoštevati vse nihajne oblike, ki pomembno vplivajo na globalni odziv. V obeh smereh uporabimo isti elastični spekter kot za določitev ciljnega pomika v koraku 1. Zamike v središču mas (CM) po etažah in pomike na vrhu stavbe za različne lokacije v florisu, kjer se nahajajo posamezni okviri ali stene, normiramo tako, da je pomik na vrhu stavbe v CM, ki izhaja iz modalne analize, enak ciljnemu pomiku, izračunanemu z osnovno različico N2-metode (korak 1).

3. Določitev potresnih zahtev v obliki pomikov in zamikov s kombinacijo rezultatov, izračunanih v korakih 1 in 2. To lahko dosežemo z uporabo dveh skupin korekcijskih faktorjev. S prvo skupino upoštevamo vplive višjih nihajnih oblik v florisu – korekcijske faktorje  $c_T$  izračunamo iz pomikov na vrhu stavbe v različnih lokacijah v florisu. Z drugo skupino pa upoštevamo vplive višjih nihajnih oblik po višini – korekcijske faktorje  $c_E$  izračunamo iz zamikov po višini v CM. Skupino korekcijskih faktorjev  $c_T$  uporabimo za pomike kot tudi za zamike, medtem ko faktorje  $c_E$  uporabimo samo za korekcijo zamikov (vplive višjih nihajnih oblik po višini na pomike lahko v večini primerov zanemarimo). Pri zamikih je tako rezultirajoči korekcijski faktor za izbrano etažo in lokacijo v florisu določen s produktom korekcijskih faktorjev  $c_T \cdot c_E$ . Korekcijske faktorje definiramo za posamezno smer posebej. Uporabimo jih za korekcijo rezultatov potisne analize, ki pripadajo ciljnemu pomiku.

3.a Korekcijski faktorji za upoštevanje višjih nihajnih oblik v florisu ( $c_T$ ). Korekcijski faktor  $c_T$  je definiran kot razmerje med normiranimi pomiki na vrhu, dobljenimi z modalno analizo, in pomiki na vrhu, dobljenimi s potisno analizo. Normirani pomik predstavlja pomik točke na izbrani lokaciji v florisu, deljen s pomikom v središču mas. Če je normirani pomik iz modalne analize manjši od 1.0, se upošteva vrednost 1.0. Na ta način upoštevamo samo neugodne torzijske vplive, medtem ko ugodne vplive zanemarimo. Faktor  $c_T$  se spreminja glede na lokacijo v florisu, medtem ko se po višini ne spreminja.

3.b Korekcijski faktorji za upoštevanje višjih nihajnih oblik po višini ( $c_E$ ). Korekcijski faktor  $c_E$  je definiran kot razmerje med normiranimi zamiki po višini iz modalne analize in absolutnimi zamiki iz potisne analize. Podobno kot pri torziji se ugodni vplivi zanemarijo. Če je razmerje manjše od 1.0, je korekcijski faktor enak vrednosti 1. Faktor  $c_E$  se spreminja po višini stavbe, medtem ko se ne spreminja glede na lokacijo v florisu.

4. Druge količine. Enake korekcijske faktorje kot za zamike (produkt  $c_T \cdot c_E$ ) uporabimo za druge lokalne deformacijske količine. Dokler ostanejo deformacije v elastičnem območju, uporabimo enake faktorje tudi za notranje sile. V neelastičnem območju notranje sile določimo iz ustreznih zvez med deformacijami in notranjimi silami.

Razširjena N2-metoda je sestavljena iz dveh ločenih delov. Prvi del predstavlja določitev ciljnega pomika, drugi del pa razporeditev potresnih zahtev po konstrukciji. Zaradi tega lahko postopek za upoštevanje višjih nihajnih oblik (korak 3) uporabimo v kombinaciji s poljubno metodo za določitev ciljnega pomika iz literature.

Masa celotne stavbe je enaka 3677 ton. Masa ( $m$ ) in masni vztrajnostni moment ( $MMI$ ) posameznih etaž znašata 481 ton in 46200 ton $\cdot$ m $^2$  za spodnji dve etaži oziroma 453 ton in 43500 ton $\cdot$ m $^2$  za druge etaže. Masni vztrajnostni moment predstavlja produkt mase etaže in kvadrata vztrajnostnega polmera ( $MMI = m \cdot r^2$ ), pri čemer  $r^2$  izračunamo po enačbi  $r^2 = (I_x + I_y)/A$ , kjer sta  $I_x$  in  $I_y$  vztrajnostna momenta florisu,  $A$  pa površina florisu. Potresna obtežba je podana z idealiziranim spektrom po EC8. Upoštevan je maksimalni pospešek tal  $a_g = 0,4$  g, vrsta tal B in 5-odstotno dušenje. Spekter je prikazan na sliki 3.

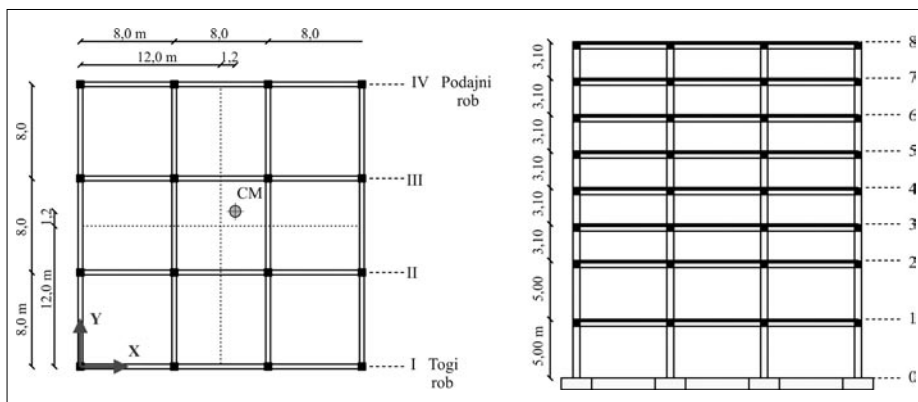
## 4 • TESTNI PRIMER

### 4.1 Opis stavbe in potresne obtežbe

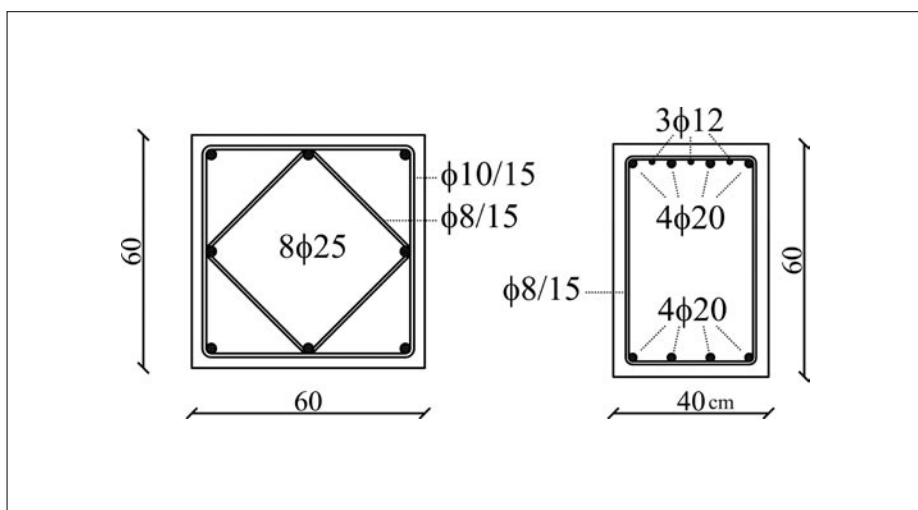
Testni primer predstavlja idealizirana obstoječa 8-etažna armiranobetonska stavba, ki se nahaja na Reki (Čaušević, 2010). Konstrukcija stavbe je sestavljena iz po štirih okvirov v vsaki od obeh vodoravnih smeri. Tloris in prerez stavbe sta prikazana na sliki 1. Nepravilnost stavbe po višini izhaja iz višjih spodnjih dveh etaž v primerjavi z drugimi. Tlorisno nesimetričnost smo vpeljali s t. i. masno

ekscentričnostjo, ki znaša 5 % florisne dimenzije v obeh obravnavanih smereh. Upoštevano ekscentričnost bi lahko opisali kot slučajno ekscentričnost.

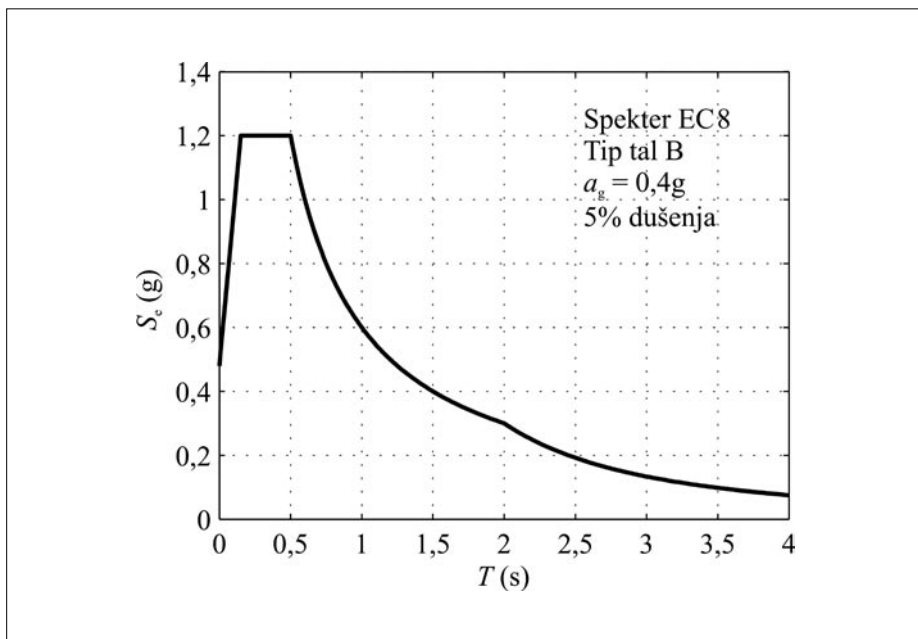
Uporabljena sta bila beton C25/30 in jeklo B500. Dimenzije konstrukcijskih elementov (stebrov in gred) in količina ter razporeditev armature so enaki za vse stebre oziroma grede v stavbi (glej sliko 2). Sodelujoče širine v gredah nismo upoštevali.



Slika 1 • Tloris in prerez testne stavbe z označenimi etažami in osmi (I, II, III, IV). Označeni so središče mas (CM) ter togi in podajni rob



Slika 2 • Dimenzije konstrukcijskih elementov ter količina in razporeditev armature



Slika 3 • Elastični spekter odziva po EC8

## 4.2 Matematični model

Za analize smo uporabili psevdotridimenzionalni model, pri katerem je prostorska konstrukcija sestavljena iz ravninskih okvirov. Vsak stebel je modeliran neodvisno v obeh vodoravnih smereh in lahko prenaša obtežbo le v svoji ravnini. Kompatibilnost osnih sil v stebrih, ki so skupni dvema ortogonalnima okviroma, ni zagotovljena. Zanimarjena je torzijska togost vseh elementov.

Model je sestavljen iz po štirih ravninskih okvirov v vzdolžni smeri x in v prečni smeri y. Vsi okviri so med seboj povezani s ploščami. Predpostavili smo, da so plošče neskončno toge v svoji ravnini in povsem podajne zunaj svoje ravnine. Vsak konstrukcijski element je modeliran z enim samim linijskim elementom. Mase in masne vztrajnostne momente smo koncentrirali na osmih višinskih nivojih v centrih mas. V matematičnem modelu za potresne analize je treba v skladu z EC8 upoštevati razpokane prereze. Če ne naredimo natančne analize, lahko za elastično upogibno in strižno togost upoštevamo polovično vrednost ustrezne togosti nerazpokanih elementov. To možnost smo uporabili v obravnavanem primeru. V modelu nismo upoštevali togih odsekov v vozliščih in P-delta vpliva.

Pri nelinearnih analizah je treba matematični model, ki ga uporabljamo pri linearni elastični analizi, dopolniti tako, da vključuje nosilnost elementov nosilne konstrukcije in njihovo obnašanje v nelinearnem območju. V ta namen smo na koncih vseh linijskih elementov (stebrov in gred) namestili t. i. plastične členke. Za vsak členek smo določili bilinearni odnos med momentom in rotacijo brez utrjevanja. Predpostavili smo neomejeno duktilnost elementov. Maksimalni moment  $M_u$  smo izračunali z analizo prečnih prerezov. V stebrih smo upoštevali osne sile, ki izhajajo iz vertikalne obtežbe. Za stebre, ki imajo simetrično armaturo, smo v obeh obravnavanih smereh uporabili simetrično obliko ovojnice, pri gredah, kjer je armatura nesimetrična, pa smo nelinearni odnos med momentom in rotacijo upoštevali z nesimetrično ovojnico. Predpostavili smo, da je strižna kapaciteta elementov zadostna in da ni strižnih porušitev.

Za vse analize smo uporabili program PERFORM-3D (CSI, 2006).

## 5 • ELASTIČNA ANALIZA

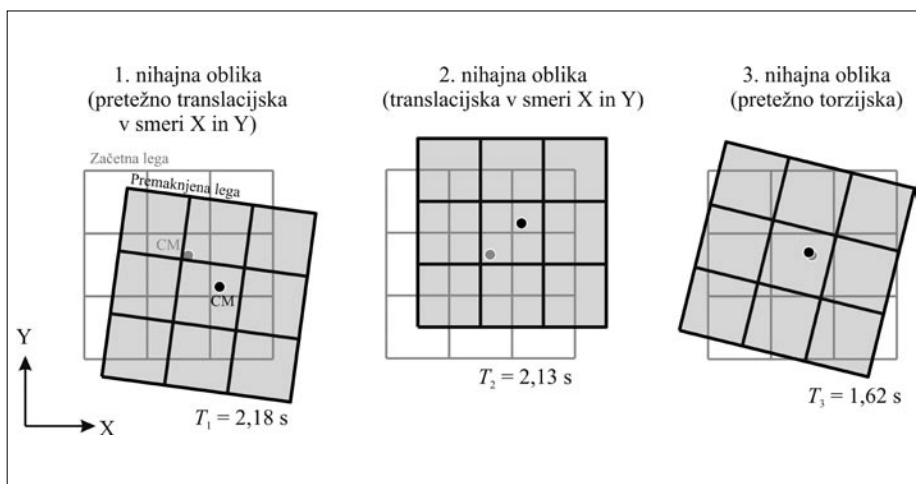
Bistveni rezultati analize lastnega nihanja so zbrani v preglednici 1. Nihajni časi za prve tri nihajne oblike (ob upoštevanju razpokanosti prerezov) znašajo 2,18, 2,13 in 1,63 sekunde. Efektivne modalne mase kažejo, da sta prva in druga nihajna oblika pretežno translacijski v diagonalni smeri. Pri prvi nihajni obliki sodeluje 42 % celotne mase v smeri x in 42 % v smeri y. Pri drugi nihajni obliki pa efektivni masi znašata  $M_{\text{eff},X} = M_{\text{eff},Y} = 45\%$ . Tretja nihajna oblika je pretežno torzijska. Na sliki 5a je prikazana x-komponenta deformacijske linije prve nihajne oblike, ki je uporabljena pri določitvi vektorja horizontalne obtežbe za nelinearno statično potisno analizo. Ker sta prva in druga nihajna oblika sestavljeni iz enakega deleža translacije v dveh pravokotnih smereh, je y-komponenta prve nihajne oblike enaka x-komponenti prve nihajne oblike (slika 5a) kot tudi x- in y-komponenti druge nihajne oblike.

Elastično modalno analizo s spektri odziva 3D-modela smo izvedli neodvisno v obeh vodoravnih smereh (x in y). V analizi smo upoštevali prvih šest nihajnih oblik, katerih vsota efektivnih mas znaša 95 % celotne mase v smereh x in y (preglednica 1). Tako za kombinacijo nihajnih oblik v posamezni smeri kot tudi za kombinacijo rezultatov zaradi smeri vzbujanja smo uporabili SRSS-pravilo (kvadratni koren vsote kvadratov). Spekter, prikazan na sliki 3, je bil uporabljen pri vzbujanju v obeh smereh.

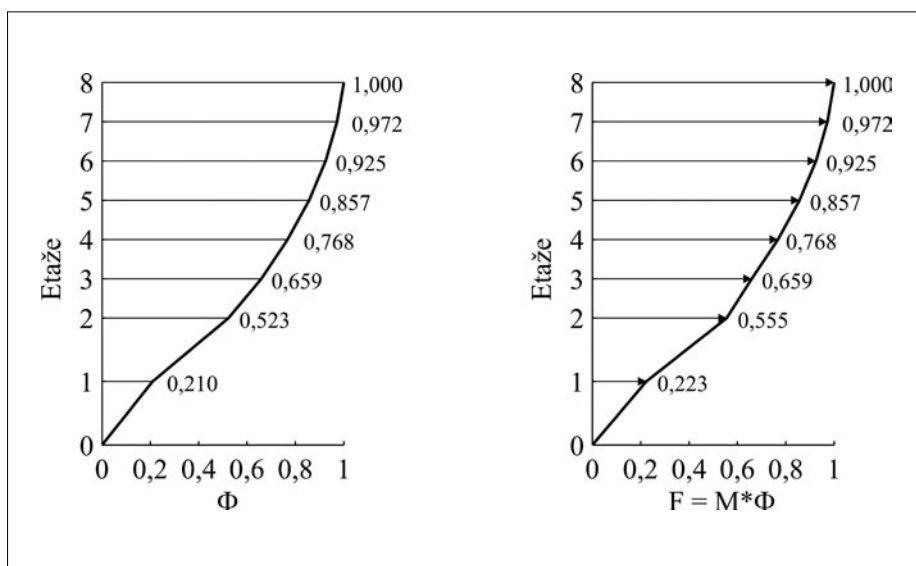
Rezultate, izračunane z elastično modalno analizo, smo uporabili za določitev vplivov višjih nihajnih oblik po višini kot tudi v tlorisu. Upoštevajo se samo neugodni vplivi, ugodni vplivi pa se zanemarijo.

Mode	$T$ (s)	$M_{\text{eff},UX}$ (%)	$M_{\text{eff},UY}$ (%)	$\Sigma M_{\text{eff},UX}$ (%)	$\Sigma M_{\text{eff},UY}$ (%)
1	2,18	42	42	42	42
2	2,13	45	45	87	87
3	1,62	2	2	89	89
4	0,63	3	3	92	92
5	0,61	3	3	95	95
6	0,47	0	0	95	95

Preglednica 1 • Nihajni časi in efektivne modalne mase ( $M_{\text{eff},X}$  in  $M_{\text{eff},Y}$ ) obravnavane stavbe



Slika 4 • Prve tri nihajne oblike konstrukcije (tlorisni pogled)



Slika 5 • (a) Prva in druga nihajna oblika konstrukcije (x- in y-komponenta)  
(b) Razporeditev normiranih horizontalnih sil pri nelinearni statični analizi

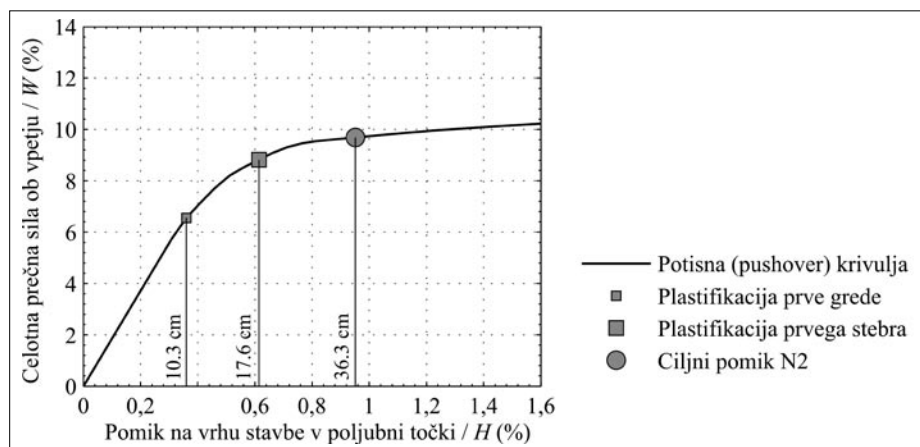
## 6 • OSNOVNA N2-ANALIZA

V tem poglavju je potresni odziv stavbe ocenjen z osnovno različico N2-metode. Vpliv višjih nihajnih oblik je zanemarljiv v tlorisu kot tudi po višini stavbe.

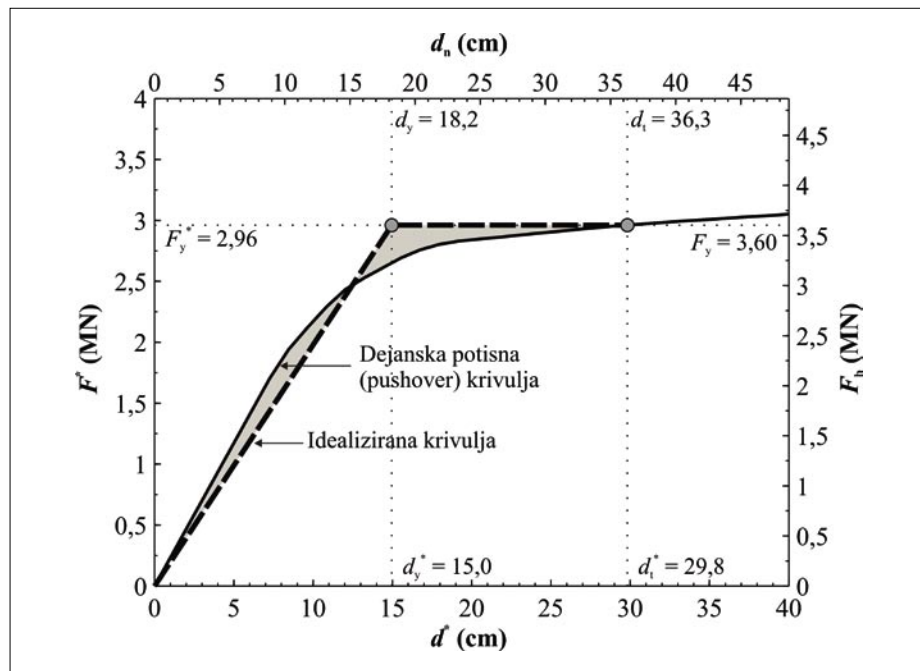
### 6.1 Nelinearna statična analiza

Nelinearno statično potisno analizo 2D- ali 3D-modela naredimo neodvisno v obeh vodoravnih smereh. Obravnavana stavba ima

enake karakteristike v obeh vodoravnih smereh, zato smo nelinearno statično analizo izvedli le v eni smeri. Uporabili smo 2D-model, kjer so izključeni torzijski vplivi, kar pomeni, da so vsi normirani pomiki na vrhu stavbe enaki 1.0 (slika 10). Za nelinearno statično analizo smo uporabili razporeditev horizontalnih sil, ki temelji na osnovni nihajni obliki konstrukcije. Vrednost horizontalne obtežbe v izbrani etaži



Slika 6 • Odnos med normirano celotno prečno silo ob vpetju ( $F_b/W$ ) in normiranim pomikom na vrhu stavbe ( $d_i/H$ ). Teža celotne stavbe znaša  $W = 3677 \text{ ton} \cdot g$ , višina stavbe pa  $H = 28,6 \text{ m}$ . Na sliki so označeni ciljni pomik  $d_i$  in pomika, pri katerih se plastificirata prva greda in prvi stebel



Slika 7 • Potisna krivulja in bilinearni idealizirani odnos med silo in pomikom za MDOF- (odnos med  $F_b$  in  $d_n$ ) in SDOF-sistem ( $F^*$  in  $d^*$ ). Na sliki so podane vrednosti za nosilnost in pomik na meji tečenja ter ciljni pomik

(slika 5b) je določena kot produkt osnovne nihajne oblike (slika 5a) in mase etaže. Potisna krivulja (odnos med normirano celotno prečno silo ob vpetju in normiranim pomikom na vrhu v CM) je prikazana na sliki 6. Prikazana krivulja predstavlja rezultate za smeri x in y kot tudi za pozitivno in negativno smer obremenjevanja. Nosilnost stavbe v horizontalni smeri znaša 10 % celotne teže konstrukcije. (Masa celotne stavbe znaša 3677 ton).

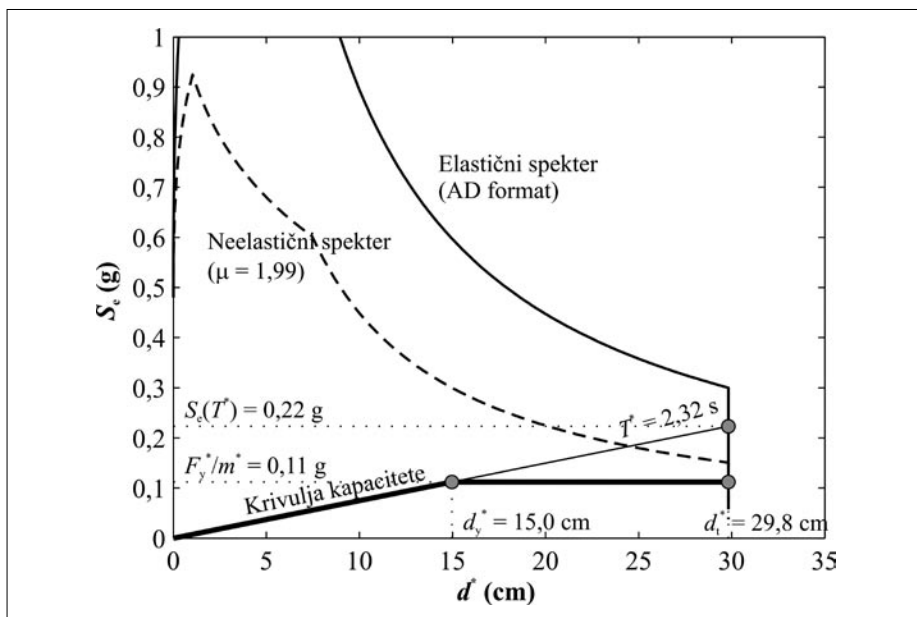
### 6.2 Določitev ciljnega pomika

Postopek za določitev ciljnega pomika  $d_i$  je opisan v (Fajfar, 2002) in v dodatku B standarda EC8-1 (SIST EN 1998-1, 2005). Isti postopek je uporabljen v osnovni in v razširjeni različici N2-metode. Potresna obtežba je definirana z idealiziranim spektrom po EC8 (slika 3).

V nadaljevanju bomo določili ciljni pomik za obravnavano stavbo. Uporabljene oznake parametrov so enake oznakam v (SIST EN 1998-1, 2005, Dodatek B). Pri vsakem parametru je v oklepaju podan sklic na enačbo v Dodatku B standarda EC8-1, po kateri je bila posamezna količina izračunana. Za podrobnejšo razlago postopka in posameznih parametrov glej (Fajfar, 2002).

V prvem koraku potisno krivuljo sistema z več prostostnimi stopnjami (MDOF), ki predstavlja odnos med celotno prečno silo ob vpetju  $F_b$  in pomikom na vrhu v središču mas  $d_n$ , transformiramo na ekvivalenten sistem z eno prostostno stopnjo (SDOF). Parametri SDOF-sistema so v nadaljevanju besedila označeni z \*. Masa ekvivalentnega SDOF sistema znaša  $m^* = 2697 \text{ ton}$  (enačba B.2, Dodatek B, EC8-1), faktor transformacije pa  $\Gamma = 1,22$  (enačba B.3, Dodatek B, EC8-1). Na sliki 7 ista krivulja prikazuje odnos med celotno prečno silo ob vpetju ( $F_b$ ) in pomikom na vrhu v centru mas ( $d_n$ ), ki velja za MDOF-sistem, kot tudi odnos med silo ( $F^*$ ) in pomikom ( $d^*$ ), ki velja za ekvivalenten SDOF-sistem, le merilo na oseh je različno. Faktor med obema meriloma je enak faktorju transformacije  $\Gamma = 1,22$ . Sila  $F^*$  in pomik  $d^*$  sta določena z enačbama B.4 in B.5 iz Dodatka B v EC8-1.

Potisno krivuljo v skladu z EC8 idealiziramo z bilinearnim diagramom (brez utrjevanja) ob upoštevanju enakosti ploščin pod dejansko in idealizirano krivuljo. Pri tem je najprej treba določiti mejni pomik ( $d_m^*$ ) (glej sliko B.1 v Dodatku B standarda EC8-1). Po EC8 je to bodisi pomik, pri katerem se tvori plastični mehanizem, ali pa pomik, določen z iteracijo, pri čemer je druga možnost večinoma korektnjša. V našem primeru smo uporabili



Slika 8 • Elastični in neelastični spekter v AD-formatu ter krivulja kapacitete

iteracijski postopek (SIST EN 1998-1, 2005, Dodatek B). Idealiziran odnos med obtežbo in deformacijo je prikazan na sliki 7. Sila in pomik na meji tečenja idealiziranega SDOF-sistema znašata  $F_y^* = 2,96$  MN (rezultat potisne analize) in  $d_v^* = 15,0$  cm (enačba B.6, Dodatek B, EC8-1), nihajni čas idealiziranega

sistema pa  $T^* = 2,32$  s (enačba B.7, Dodatek B, EC8-1).

Krivuljo kapacitete, ki predstavlja odnos med pomikom in pospeškom SDOF-sistema, določimo tako, da idealizirano silo SDOF-sistema ( $F^*$ ) delimo z ekvivalentno maso  $m^*$ . Pospešek na meji tečenja znaša  $F_y^*/m^* = 0,11$  g.

$m^*$ (t)	2697	$S_e(T^*)$	0,22 g
$\Gamma$	1,22	$F_y^*/m^*$	0,11 g
$F_y^*$ (kN)	2961	$q_u = \mu$	1,99
$d_v^*$ (cm)	15,0	$d_{et}^* = d_t^*$ (cm)	29,8
$T^*$ (s)	2,32	$d_t$ (cm)	36,3

$m^*$  (t) ... masa ekvivalentnega SDOF-sistema,  $\Gamma$ ... transformacijski faktor,  $F_y^*$  ... nosilnost idealiziranega SDOF-sistema,  $d_v^*$  ... pomik na meji tečenja idealiziranega SDOF-sistema,  $T^*$  ... nihajni čas idealiziranega SDOF-sistema,  $F_y^*/m^*$  ... pospešek neelastičnega SDOF-sistema,  $S_e(T^*)$  ... pospešek SDOF-sistema z neomejenim elastičnim obnašanjem,  $q_u$  ... redukcijski faktor,  $\mu$  ... duktilnost konstrukcije,  $d_{et}^*$  ... ciljni pomik SDOF-sistema z neomejenim elastičnim obnašanjem,  $d_t^*$  ... ciljni pomik neelastičnega SDOF-sistema,  $d_t$  ... ciljni pomik neelastičnega MDOF-sistema

Preglednica 2 • Povzetek rezultatov osnovne N2-metode

## 7 • RAZŠIRJENA N2 – VPLIV VIŠJIH NIHAJNIH OBLIK V TLOORISU IN PO VIŠINI

V poglavju 7 bomo rezultate osnovne N2-metode (poglavje 6) korigirali zaradi vplivov višjih nihajnih oblik. Omejili se bomo na pomike in zamike (etažni pomik/etažna višina). Pri

tem bomo uporabili dve skupini korekcijskih faktorjev, skupino  $c_e$  za upoštevanje višjih nihajnih oblik po višini stavbe in skupino  $c_t$  za upoštevanje torzijskih vplivov.

Zahteve potresa so definirane z idealiziranim spektrom po EC8 za tla B ( $a_g = 0,4$  g, 5 % dušenje), ki je na sliki 8 prikazan v AD-formatu. Karakteristični nihajni čas spektra znaša  $T_c = 0,5$  s. Ta nihajni čas je pomemben parameter v N2-metodi, saj omejuje območje, kjer velja enakost pomikov.

Primerjava zahtev potresa in kapacitete konstrukcije je prikazana na sliki 8. Če bi se konstrukcija obnašala elastično, bi točka na presečišču elastičnega spektra in radialne linije, ki predstavlja nihajni čas, predstavljala potresne zahteve. Pospešek in pomik, ki bi ga morala prenesti SDOF-konstrukcija, če bi hotela ostati v elastičnem območju, znašata  $S_e(T^*) = 0,22$  g (vrednost pospeška v elastičnem spektru pri idealiziranem nihajnem času  $T^*$ ) in  $d_{et}^* = 29,8$  cm (enačba B.8, Dodatek B, EC8-1). Slika 8 kaže, da je nihajni čas idealizirane konstrukcije v območju, kjer so vrednosti v elastičnem spektru pomikov konstantne.

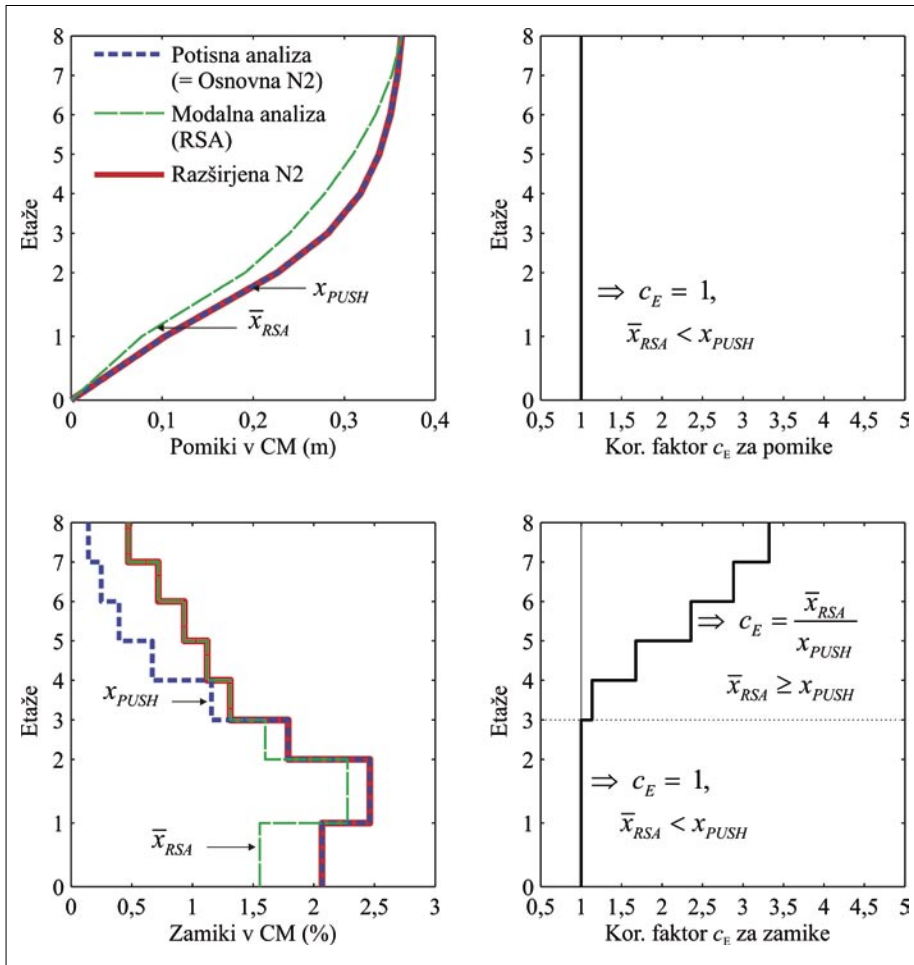
Za konstrukcijo z omejeno nosilnostjo, ki se med potresom deformira v neelastično področje, zahteve potresa določa presečišče med krivuljo kapacitete in neelastičnim spektrom. Ker je nihajni čas ekvivalentnega sistema v obeh obravnavanih smereh večji od karakterističnega časa tal  $T_c = 0,5$  s, velja pravilo o enakosti pomikov. V tem primeru je pomik neelastičnega SDOF-sistema enak pomiku elastičnega sistema  $d_t^* = d_{et}^*$  (enačba B.12, Dodatek B, EC8-1), faktor duktilnosti konstrukcije  $\mu$  pa je enak redukcijskemu faktorju  $q_u = 1,99$  (enačba B.11, Dodatek B, EC8-1). Grafični prikaz služi le za boljše razumevanje, saj je zahteve mogoče izračunati, ne da bi konstruirali neelastične spektre.

V zadnjem koraku izračunamo ciljni pomik MDOF-sistema ( $d_t$ ) tako, da pomik SDOF-sistema ( $d_t^*$ ) pomnožimo s faktorjem transformacije  $\Gamma$  (enačba B.13, Dodatek B, EC8-1). Ciljni pomik znaša  $d_t = 36,3$  cm. Povzetek rezultatov osnovne različice N2-metode je prikazan v preglednici 2.

Rezultati potisne analize (pomiki in zamiki), ki pripadajo izračunanemu ciljnemu pomiku (to so rezultati osnovne N2-metode), so prikazani na slikah 11 in 12.

### 7.1 Določitev korekcijskih faktorjev za vplive višjih nihajnih oblik po višini ( $c_e$ )

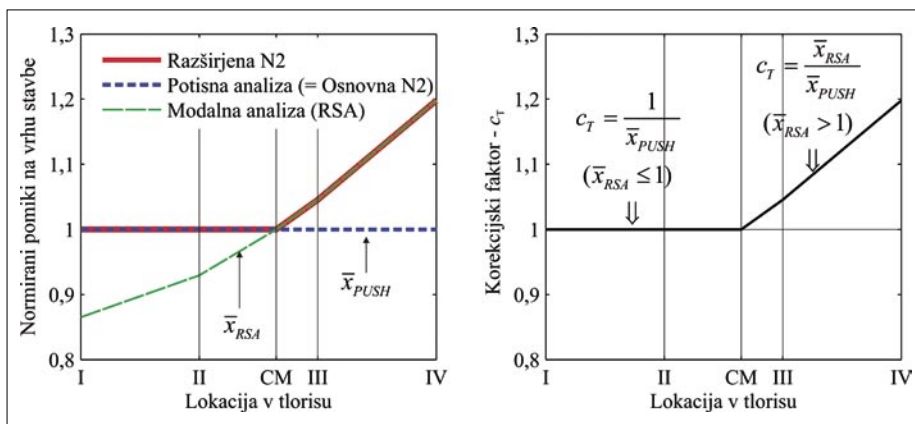
Za račun korekcijskih faktorjev  $c_e$ , s katerimi upoštevamo vplive višjih nihajnih oblik po višini, so potrebni pomiki in zamiki po višini v središčih mas (CM), izračunani z elastično modalno analizo in potisno analizo pri ciljnem pomiku  $d_t$ . Slednji so enaki rezultatom os-



Slika 9 • Določitev korekcijskih faktorjev  $c_E$  za upoštevanje vplivov višjih nihajnih oblik po višini stavbe, ločeno za pomike in zamike

novne N2-metode. Pri računu  $c_E$  uporabimo absolutne vrednosti pomikov in zamikov iz potisne analize, medtem ko rezultate iz modalne analize normiramo tako, da je normiran pomik na vrhu v CM iz modalne analize enak ciljnemu pomiku, izračunanemu z osnovno različico N2-metode ( $d_f = 36,3$  cm). V skladu s

to predpostavko pomike in zamike v CM iz modalne analize pomnožimo s faktorjem  $c_{NORM}$ . Faktor za normiranje znaša  $c_{NORM} = 36,3$  cm /  $35,5$  cm = 1,02, kjer vrednost 36,6 cm pripada ciljnemu pomiku, izračunanemu z N2-metodo, 35,5 cm pa je absolutna vrednost pomika na vrhu v CM iz elastične modalne analize.



Slika 10 • Določitev korekcijskih faktorjev  $c_T$  za upoštevanje vplivov višjih nihajnih oblik v tlorisu

Absolutne vrednosti (potisna analiza) in normirane vrednosti (modalna analiza) pomikov in zamikov v CM so prikazane na sliki 9.

Korekcijski faktorji  $c_E$  so definirani kot razmerje med normiranimi količinami (pomiki oziroma zamiki) iz modalne analize in absolutnimi količinami iz potisne analize. Če je razmerje večje od 1,0, je faktor  $c_E$  enak temu razmerju, sicer zavzame vrednost 1,0. Korekcijski faktorji se spreminjajo po višini. Na sliki 9 so za obravnavani testni primer prikazani korekcijski faktorji, ločeno za pomike in zamike. Izkaže se, da je vpliv višjih nihajnih oblik na pomike zanemarljiv ( $c_E = 1$  po celotni višini stavbe). Višje nihajne oblike po višini stavbe imajo pomemben vpliv na zamike v zgornjem delu stavbe. Korekcijski faktorji se gibljejo v območju med 1,00 in 3,32.

V razširjeni N2-metodi je predpostavljeno, da je vpliv višjih nihajnih oblik po višini v izbrani etaži konstanten, tj. je neodvisen od lokacije v tlorisu. Tako lahko isti faktor  $c_E$  uporabimo za korekcijo rezultatov potisne analize v poljubni lokaciji v tlorisu.

### 7.2 Določitev korekcijskih faktorjev za vplive višjih nihajnih oblik v tlorisu ( $c_T$ )

Za oceno korekcijskih faktorjev  $c_T$ , s katerimi upoštevamo vplive višjih nihajnih oblik po tlorisu (torzijske vplive), so potrebni pomiki na vrhu stavbe na različnih lokacijah v tlorisu, izračunani z elastično modalno analizo in potisno analizo pri ciljnem pomiku  $d_f$ . Pomike obeh analiz (elastične modalne in potisne analize) dodatno normiramo tako, da pomik na izbrani lokaciji v tlorisu delimo s pomikom v središču mas (CM). Normirani pomiki so prikazani na sliki 10.

Korekcijski faktorji  $c_T$  so definirani kot razmerje med normiranimi pomiki iz modalne analize in normirani pomiki iz potisne analize. Če je normiran pomik iz modalne analize manjši od 1,0, upoštevamo vrednost 1,0. Pri 2D-modelu, ki smo ga uporabili v obravnavanem primeru, so torzijski zasuki izključeni, kar pomeni, da so normirani pomiki enaki 1,0. V tem primeru so vrednosti torzijskih faktorjev enake normiranim pomikom iz modalne analize, pri čemer se upoštevajo samo neugodni vplivi, ugodni vplivi pa se zanemarijo (tj., če je normiran pomik iz modalne analize manjši od 1,0, upoštevamo vrednost 1,0).

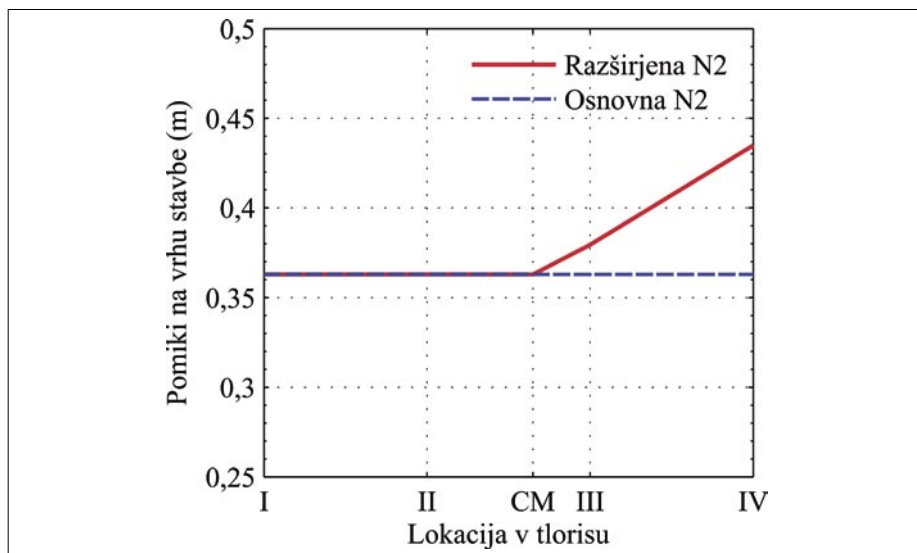
Faktorji  $c_T$  se spreminjajo glede na lokacijo v tlorisu. Enake vrednosti uporabimo za pomike in zamike. Vrednosti  $c_T$  so za obravnavan testni primer prikazane na sliki 10. Nahajajo se med  $c_T = 1,00$  in 1,20. Največje vrednosti se pojavijo na podajnem robu (v okviru IV).



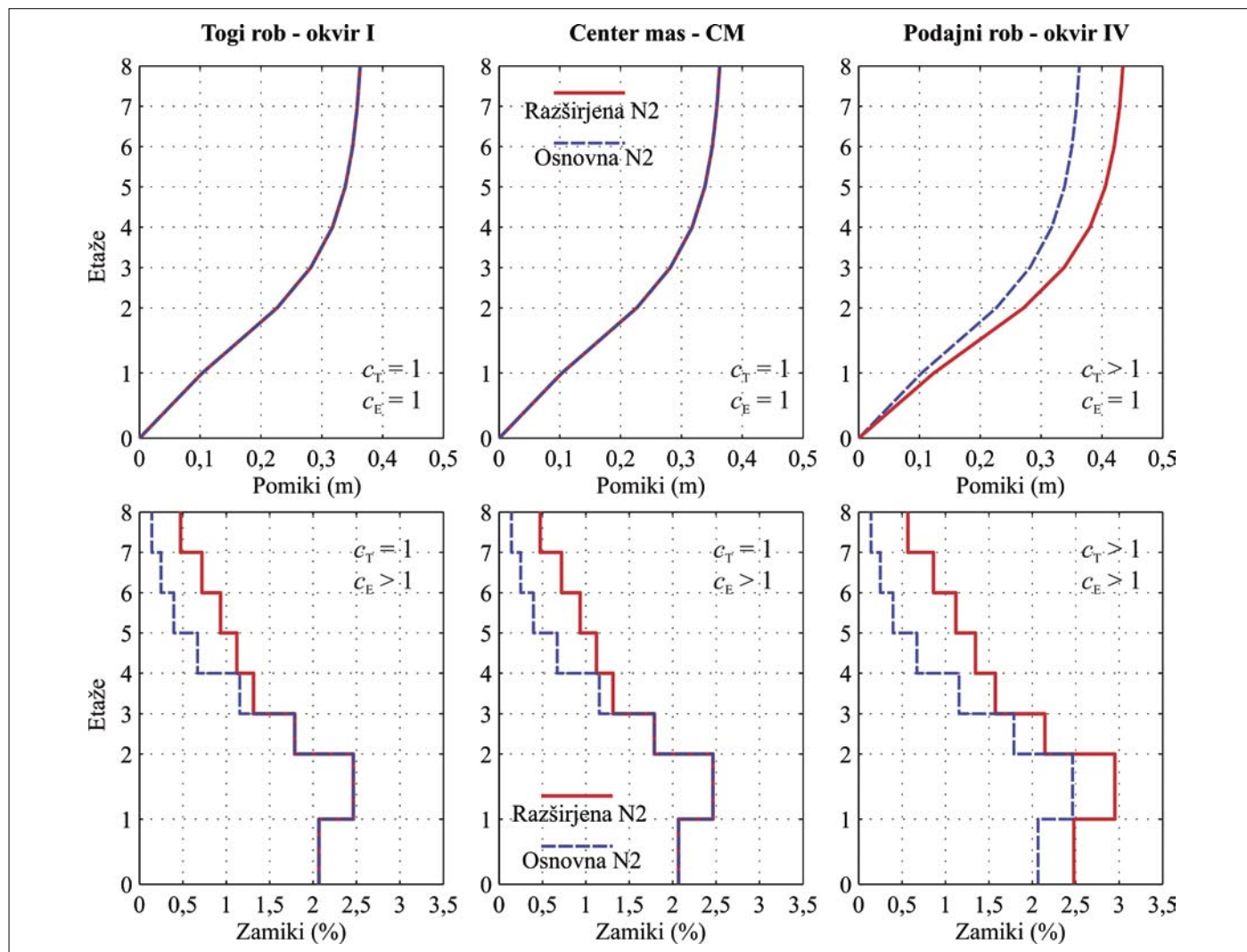
Določitev korekcijskih faktorjev  $c_T$  za upoštevanje vplivov višjih nihajnih oblik v florisu (torzijskih vplivov) temelji na pomikih na vrhu stavbe na različnih lokacijah v florisu. V razširjeni N2-metodi je predpostavljeno, da se korekcijski faktorji  $c_T$  spreminjajo po florisu, medtem ko po višini ohranjajo konstantno vrednost. Na izbrani lokaciji v florisu lahko isto vrednost  $c_T$  uporabimo za korekcijo rezultatov potisne analize po celotni višini stavbe.

### 7.3 Končni rezultati v obliki pomikov in zamikov

V razširjeni N2-metodi končne vrednosti pomikov in zamikov izračunamo tako, da vrednosti iz potisne analize pri ciljnem pomiku, ki predstavljajo rezultate osnovne N2-metode, pomnožimo s pripadajočimi korekcijskimi faktorji, s katerimi upoštevamo vplive višjih nihajnih oblik v florisu in/ali po višini. Rezul-



Slika 11 • Absolutni pomiki na vrhu stavbe na različnih lokacijah v florisu, izračunani z osnovno in razširjeno različico N2-metode



Slika 12 • Razporeditev pomikov in zamikov (etažni pomik/višina etaže v %) po višini stavbe v CM ter na togem in podajnem robu, izračunana z osnovno in razširjeno različico N2-metode

tati, izračunani z razširjeno N2-metodo, so prikazani v obliki:

- pomikov na vrhu stavbe na različnih lokacijah v florisu (slika 11) in
- razporeditve pomikov in zamikov po višini stavbe v CM in na podajnem (okvir IV) ter togem robu (okvir I) (slika 12).

V splošnem je treba N2-količine izračunati za dve vodoravni smeri. V vsaki smeri upoštevamo ovojnico rezultatov za pozitivno in negativno smer obremenjevanja. V obravnavanem primeru so rezultati enaki za oba predznaka obtežbe, tako v smeri x kot v smeri y.

Potresne zahteve določimo tako, da vrednosti iz potisne analize pri ciljnim pomiku pomnožimo s pripadajočimi korekcijskimi faktorji  $c_e$  (slika 9) in  $c_t$  (slika 10). Na primer: zamik vrhne etaže na podajnem robu znaša  $0,14 \cdot 3,32 \cdot 1,20 = 0,57\%$ , kjer je  $0,14\%$  zamik na isti lokaciji iz potisne analize (brez upoštevanja višjih nihajnih oblik),  $c_t = 1,20$  in  $c_e = 3,32$ .

Absolutni pomiki na vrhu stavbe, izračunani v skladu z razširjeno N2-metodo, so prikazani na sliki 9. Upoštevajo se samo vplivi višjih nihajnih oblik v florisu ( $c_t$  ni enak 1), medtem ko je za višje nihajne oblike po višini privzeto, da imajo zanemarljiv vpliv na pomike na vrhu stavbe ( $c_e = 1$ ). Končne pomike določimo kot produkt vrednosti iz potisne analize in korekcijskih faktorjev  $c_t$ , ki se gibljejo med 1,00 in 1,20. Normirani pomiki na vrhu stavbe, izračunani z razširjeno N2-metodo, predstavljajo ovojnico normiranih pomikov iz modalne in potisne analize (slika 10).

Na sliki 12 je prikazana razporeditev pomikov in zamikov po višini stavbe za različne lokacije v florisu (CM, podajni rob – okvir IV, togi rob – okvir I). Ker smo izvedli ravninsko potisno analizo (tj. z izključitvijo torzijskih zasukov), so rezultati osnovne N2-metode (brez korekcij zaradi višjih nihajnih oblik) enaki na vseh lokacijah. Zaradi višjih nihajnih oblik po višini se na vseh lokacijah posameznih etaž povečajo zamiki v zgornjem delu stavb,

medtem ko pomiki ostanejo nespremenjeni ( $c_e = 1$ ). Zaradi torzijskih vplivov (višje nihajne oblike v florisu) se povečajo pomiki kot tudi zamiki, vendar le na podajnem delu stavbe. Na togem delu velja  $c_t = 1$ .

Pomiki in zamiki po višini stavbe v CM (v obravnavanem primeru tudi na togem delu stavbe) predstavljajo ovojnico normiranih rezultatov iz modalne analize in absolutnih vrednosti rezultatov iz potisne analize (slika 9). Slika 9 jasno nakazuje, da elastična analiza narekuje potek zamikov v zgornjem delu stavbe, potisna analiza pa daje relevantne količine za spodnji del.

Na slikah 11 in 12 so prikazani tudi rezultati osnovne N2-metode (brez upoštevanja vplivov višjih nihajnih oblik). Rezultati kažejo, da z razširitvijo N2-metode dosežemo bistveno izboljšanje ocene potresnih zahtev na mestih, kjer imajo višje nihajne oblike pomemben vpliv (tj. količine na podajnem robu stavbe in zamiki v zgornjem delu stavbe na različnih lokacijah v florisu).

## 8 • N2 IN EC8

V standardu EC8 je kot metoda za račun, ki temelji na nelinearni statični analizi, uporabljena osnovna različica N2-metode, to je različica, ki ne zajema vpliva višjih nihajnih oblik niti po florisu niti po višini stavb. V času, ko se je zaključevalo delo pri standardu EC8-1, še ni bila dokončno izdelana dopolnitev N2-metode, ki omogoča upoštevanje vpliva torzije, vendar so preliminarni rezultati omogočili, da smo rešitev problema nakazali v obliki, ki je vključena v členu 4.3.3.4.2.7 (Postopek za oceno torzijskih vplivov) v EC8-1 (SIST EN 1998-1, 2005). Ta člen se (v skrajšani obliki) glasi:

»(1)P Nelinearna statična analiza (...) lahko pomembno podceni pomike na togih/močni strani torzijsko podajne kon-

strukcije, to je konstrukcije, kjer je osnovna nihajna oblika pretežno torzijska. (...) Pri takšnih konstrukcijah je treba pomike na togih/močni strani povečati v primerjavi s tistimi pri pripadajoči simetrični konstrukciji.

- (2) Upošteva se, da je zahteva, določena v (1) tega podčlena, izpolnjena, če je faktor amplifikacije, uporabljen za pomike na togih/močni strani, določen na podlagi elastične modalne analize prostorskega modela.«

V EC8-3 (CEN, 2005), ki je bil končan nekoliko kasneje kot EC8-1, je v členu 4.4.4.5 določen postopek za oceno vpliva torzijskih in višjih nihajnih oblik:

- (1) Za oceno torzijskih vplivov se uporablja postopek, opisan v EC8-1.
- (2) V stavbah, ki ne izpolnjujejo kriterijev, podanih v EC8-1 (stavbe z visokimi nihajnimi časi in stavbe nepravilne po višini), je treba upoštevati vpliv višjih nihajnih oblik po višini. To je mogoče narediti z uporabo posebnih verzij metod za nelinearno statično analizo, ki upoštevajo vpliv višjih nihajnih oblik na globalne parametre odziva (kot se medetažni pomiki), ki jih je mogoče nato prevesti na lokalne zahteve potresa (kot so rotacije elementov konstrukcije). Nacionalni dodatek lahko vsebuje informacijo o takšnih postopkih.

Razširjena N2-metoda, ki upošteva vplive višjih nihajnih oblik v florisu (torzijski vpliv) in po višini, je v celoti skladna z zahtevami EC8 in se lahko uporablja za analizo stavb v skladu z EC8.

## 9 • SKLEP

Prikazana je razširjena N2-metoda za analizo konstrukcij, kjer so pomembne višje nihajne oblike v florisu in/ali po višini stavbe. Metoda temelji na predpostavki, da so vplivi višjih nihajnih oblik v neelastičnem območju enaki

kot v elastičnem. Izračunamo jih z elastično modalno analizo. Za določitev vplivov višjih nihajnih oblik je potrebna le ena sama dodatna analiza (poleg osnovne N2-analize), s katero lahko hkrati določimo vplive

višjih nihajnih oblik po višini in po florisu. Postopek je relativno preprost in transparenten. Ustreza zahtevam Evrokoda 8. Potrebni analizi znotraj postopka razširjene N2-metode, nelinearna statična (potisna) analiza in elastična modalna analiza s spektri odziva, sta vključeni v večino komercialnih programov, kar precej olajša uporabo.

Poenostavljene metode običajno temeljijo na številnih predpostavkah. Ob uporabi teh metod je obvezno treba upoštevati njihove omejitve. Ne moremo pričakovati, da bi s pomočjo poenostavljenih metod lahko natančno napovedali odziv različnih konstrukcij pri poljubni potresni obtežbi. Omejitve, ki se nanašajo na osnovno N2-metodo, kot tudi na druge metode, ki temeljijo na potisni analizi, so zbrane v člankih (Krawinkler, 1998, 2006). Seveda so vse te omejitve prisotne tudi pri razširjeni N2-metodi. Dodatna predpostavka razširjene N2-metode, da konstrukcija pri nihanju v višjih nihajnih oblikah ostane v elastičnem območju, v večini

analiziranih primerov (Kreslin, 2010) uvaja dodatno varnost, ki narašča z večanjem plastičnih deformacij.

Kljub številnim poenostavitvam in omejitvam poenostavljenih nelinearnih metod, tako N2 kot drugih, ki temeljijo na potisni analizi, nam te nudijo številne pomembne informacije o odzivu konstrukcij pri potresni obtežbi. Priporočeno jih je uporabljati kot dopolnilo k standardni elastični modalni analizi in ne kot njeno nadomestilo. Večina poenostavljenih nelinearnih metod namreč omogoča grafični prikaz potresnega odziva konstrukcij od majhnih obremenitev, pri katerih konstrukcija ostane v elastičnem območju, do obremenitev, ki

povzročijo znatno plastifikacijo (poškodbe) elementov. S tem predstavljajo zelo uporabno orodje za razumevanje osnovnega obnašanja konstrukcij pri potresni obtežbi. V primerjavi z nelinearno dinamično analizo, ki običajno zagotavlja najnatančnejše rezultate, so poenostavljene nelinearne metode veliko enostavnejše in preglednejše. Z njihovo pomočjo smo sposobni odkriti najkritičnejše dele konstrukcije. Zavedati pa se moramo, da natančnost teh metod morda ne bo zadostna za projektiranje in oceno pomembnih objektov, ki zahtevajo natančnejše analize, na primer nelinearno dinamično analizo.

## 10 • ZAHVALA

Članek je rezultat raziskav, ki jih je financirala Agencija za raziskovalno delo Slovenije (ARRS). K razvoju N2-metode so v

zadnjih 25 letih poleg avtorjev tega članka pomembno prispevali doktorski študenti in raziskovalci v IKPIR FGG, med njimi

zlasti M. Fischinger, T. Vidic, P. Gašperšič, V. Kilar, I. Peruš, D. Marušič, T. Isaković in M. Dolšek.

## 11 • LITERATURA

- Antoniou, S., Pinho, R., Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure, *Journal of Earthquake Engineering* 8, 5: 643–661, 2004.
- Aydinoğlu, M. N., An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation, *Bulletin of Earthquake Engineering* 1, 1: 3–36, 2003.
- Aydinoğlu, M. N., Önem, G., Evaluation of analysis procedures for seismic assessment and retrofit design, In: Garevski M, Ansal A (eds) *Earthquake Engineering in Europe, Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering* 17, 2010.
- Bento, R., Pinho, R., (eds), *3D Pushover 2008 – Proceedings of nonlinear static methods for design/assessment of 3D structures*, IST Press, Portugal, Lisbon, 2008.
- CEN, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, European standard EN 1998-3, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- Chopra, A. K., Goel, R. K., A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 3, 3: 561–582, 2002.
- Chopra, A. K., Goel, R. K., Chintanapakdee, C., Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands, *Earthquake Spectra* 20, 3: 757–778, 2004a.
- Chopra, A. K., Goel, R. K., A modal pushover procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 33, 8: 903–927, 2004b.
- CSI, *PERFORM-3D Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures*, Computers & Structures Inc, ZDA, Kalifornija, Berkeley, 2006.
- Čaušević, M., Mitrović, S., Comparison between non-linear dynamic and static seismic analysis of structures according to European and US provisions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, doi: 10.1007/s10518-010-9199-1, 2010.
- Fajfar, P., *Dinamika gradbenih konstrukcij*, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1984.
- Fajfar, P., Poenostavljena nelinearna analiza konstrukcij pri potresni obtežbi, *Gradbeni vestnik* 51, 11: 302–315, 2002.
- Fajfar, P., A nonlinear analysis method for performance-based seismic design, *Earthquake Spectra* 16, 3: 573–592, 2000.
- Fajfar, P., Marušič, D., Peruš, I., Torsional effects in the pushover-based seismic analysis of buildings, *Journal of Earthquake Engineering* 9, 6: 831–854, 2005.

- Krawinkler, H., Seneviratna, G. D. P. K., Pros and cons of a pushover analysis for seismic performance evaluation, *Engineering Structures* 20, 4–6: 452–464, 1998.
- Krawinkler, H., Importance of good nonlinear analysis, *Structural Design of Tall and Special Building* 15, 5: 515–531, 2006.
- Kreslin, M., Vpliv višjih nihajnih oblik pri nelinearni potresni analizi konstrukcij stavb, Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2010.
- Kreslin, M., Fajfar, P., The extended N2 method taking into account higher mode effects in elevation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, submitted, 2011.
- Marušić, D., Fajfar, P., On the inelastic seismic response of asymmetric buildings under bi-axial excitation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 34, 8: 943–963, 2005.
- Peruš, I., Fajfar, P., On the inelastic torsional response of single-storey structures under bi-axial excitation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 34, 8: 931–941, 2005.
- Reyes, J. C., Chopra, A. K., Three-dimensional modal pushover analysis of buildings subjected to two components of ground motion, including its evaluation for tall buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, doi: 10.1002/eqe.1060, 2010.
- SIST-EN 1998-1, Evrokod 8, Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošni vplivi, potresni vplivi in pravila za stavbe, 2005.