

NEKE ANALIZE KONSTRUKCIJA BETONSKIH ZGRADA NA SEIZMIČKA DEJSTVA

Radomir Folić*, Đorđe Lađinović*, Boris Folić**

* *Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, e-mail: ladjin@uns.ac.rs*

** *Državni univerzitet u Novom Pazaru*

REZIME

U radu se analiziraju metode proračuna perioda vibracija višespratnih betonskih zgrada. Pri tome komentarisane su preporuke Evropskih normi EN 1998-Deo 1 i neki literaturni podaci. Komentarisani su različiti koncepti projektovanja seizmički otpornih betonskih konstrukcija, uključivši korišćenje metode pritisnutih štapova i zatega. Analizirani su različiti tipovi konstrukcija: okvirne, kao i zgrade sa nosećim zidovima sa i bez otvora. Na jednom primeru višespratne zgrade sa regularnom i neregularnom konfiguracijom data je uporedna analiza rezultata proračuna. Pokazano je da približne metode (metoda ekvivalentnih bočnih sila) po pravilu daju znatno veće vrednosti uticaja u konstrukciji nego tačnije metode (multimodalna spektralna). Iz uporedne analize proistekle su odgovarajuće preporuke za primenu metoda proračuna konstrukcija zgrada, zavisno od njihove regularnosti.

KLJUČNE REČI: Analiza, približne metode, period vibracija, uporedna analiza, multimodalna spektralna analiza

SOME ANALYSES OF STRUCTURES OF CONCRETE BUILDINGS UNDER SEISMIC ACTION

ABSTRACT

The paper analyses methods of computing vibration periods of high-rise concrete buildings. Therefore, the recommendations of European norms EN 1998-Part 1 are commented as well as some literature data. Different concepts of designing seismically resistant concrete structures are discussed including the application of the ties - strut method. Different types of structures are analysed: frames, and buildings with bearing walls with and without openings. A comparative analysis of the calculation results is given on an example of a high-rise building with regular and irregular configuration. It is shown that approximate methods (the method of equivalent lateral forces) as a rule give higher values of influences in the structure than more accurate methods (the multimodal spectral method). From the comparative analyses arise corresponding recommendations on the implementation of methods for the calculation of structures of buildings, depending on their regularity.

KEY WORDS: Analysis, approximate methods, vibration period, comparative analysis, multimodal spectral analysis

UVOD

Iskustva sa ponašanjem objekata posle jakih zemljotresa, praćena često velikim razaranjem mogu imati katastrofalne posledice naročito ako su njihove konstrukcije neadekvatno projektovane i građene. Uobičajeno se u seizmičkim aktivnim područjima zaštita objekata reguliše odgovarajućim tehničkim propisima [3], ali se u ovoj oblasti posebno intenzivno istražuje njihovo ponašanje posle snažnih zemljotresa. Katastrofalne posledice nedavnih zemljotresa su bitno uticale na promenu postupaka proračuna, kao i na konceptualnu fazu projektovanja. Naime, pokazalo se da se dobro koncipirani objekti (u normama nazvani regularni) znatno povoljnije ponašaju od neregularnih objekata. Tako se npr. u EN 1998 [1] za neregularne konstrukcije zahteva znatno kompleksnija analiza nego za regularne. U tom smislu postoje mnoge preporuke za izbor konstrukcije u smislu rasporeda vertikalnih nosećih elemenata u osnovi i po visini, a pri tome se postavlja zahtev da međuspratne konstrukcije budu krute u svojoj ravni.

Poslednjih godina razvija se jedan novi pristup koji nije zasnovan na silama već se zasniva na deformacijama i kontroli oštećenja [6]. Prednost ovog pristupa je mogućnost procene seizmičkih performansi objekata, kao kombinacije ponašanja noseće konstrukcije i nenosećih elemenata, o čemu se takođe mora voditi računa. Naime, u nekim zemljotresima oštećenje nenosećih elemenata je izazivalo takva oštećenja da je to uslovljavalo neracionalne sanacije (kao npr. Hotel Internacional u Budvi 1979. g.).

Za izbor adekvatne konstrukcije/koncepta potrebne su neke približne analize koje prethode detaljnim proračunima pa je od značaja i analiza mogućnosti i ograničenja pojedinih proračunskih modela radi njihove adekvatnije primene. Za analizu uticaja u konstrukciji izazvanih zemljotresima, potrebno je usvojiti odgovarajući dinamički model [11] i definisati pobudu u zavisnosti od načina prikaza seizmičkog dejstva [4]. Seizmička analiza uslovljava proračun dinamičkih karakteristika konstrukcije, određivanja seizmičkih sila na osnovu karakteristika konstrukcije objekta i pomeranja tla. Takođe je od značaja je uporedna analiza regularnih i neregularnih konstrukcije zgrada da bi se u njihovoj analizi primenila i dala što realniju sliku ponašanja pod seizmičkim dejstvima [5]. Zbog toga je u ovom radu dat pregled preporuka za približnu i tačnije metode date u Evropskim normama, kao i preporukama Novog Zelanda, SAD i dr.

KONSTRUKCIJSKI SISTEMI ZGRADA

Betonske zgrade se, u EN 1998 svrstavaju u neku od sledećih vrsta konstrukcijskih sistema:

- a) okvirni sistem;
- b) dvojni sistem (sa dominantnim okvirima ili ekvivalentnim zidovima);
- c) duktilni sistem zidova (povezani ili nepovezani);
- d) sistem velikih lako armiranih zidova;
- e) sistem obrnutog klatna;
- f) torziona fleksibilni sistem.

Potrebna nosivost prema aktuelnom konceptu seizmičke zaštite, određuje se za uticaje u konstrukciji usled seizmičkih sila koje odgovaraju tzv. projektom nivou (povratni period $T_r \approx 500$ god.). Ove sile određuju se primenom faktora redukcije koji se usvaja u zavisnosti od pretpostavljenog kapaciteta deformisanja konstrukcije. Konstrukcija koja je projektovana na ovakav način po pravilu može bez rušenja da izdrži zemljotresno dejstvo, pod uslovom da stvarne karakteristike dogođenog zemljotresa odgovaraju usvojenom seizmičkom hazardu. Nedostatak ovog koncepta ogleda se u tome što se na osnovu sprovedenog proračuna nema uvid u veličinu oštećenja noseće konstrukcije [2]. Iskustva iz dogođenih zemljotresa ukazuju da ovakvo projektovanje ne obezbeđuje uniformni rizik jer različite

konstrukcije mogu imati različito ponašanje i veoma različit stepen oštećenja u toku istog zemljotresa. Zbog toga je za brže procene od značaja izbor približnih modela koji mogu dati dovoljno podataka za bržu procenu seizmičke otpornosti konstrukcije. Za tačnije analize koriste se metode propisane u EN 1998, a to su N2 –metoda i spektralno multimodalna analiza opisana u [1]. Ovde je sažeto prikazan postupak N2 metode po «koracima» koji prikazuju i postupnost analize. Interakcija konstrukcija-temelj-tlo za značajnije objekte fundiranih na loše nosivom tlu mora biti uzeta u obzir [7].

PERIODI SOPSTVENIH VIBRACIJA-PRIBLIŽNI PRORAČUN

Veličina svojstvene periode $T_i = T$ koristi se kao kriterijum klasifikacije zgrade sa aspekta krutosti [8]:

- Krute $T < 0.3s$
- Srednje krutosti $T = 0.3 - 0.7s$
- Vitke konstrukcije $T = 0.7 - 1.5s$
- Veoma vitke $T > 1.5s$

Zgrade sa periodom većim od 2–3s treba izbegavati.

Za armiranobetonske (AB) zgrade $T = (0.07 - 0.09) N$ (1)

Za krute okvire sa $N > 5$ koristi se izraz $T = 0.1N$, a za ravne okvire sa $N \leq 5$ koristi se izraz:

$$T = 0.3 + 0.05N \quad (2)$$

Za okvire ukrućene zidom sa $N \leq 10$ koristi se $T = 0.05N$, a za $N > 10$ izraz $T = 0.07 \frac{H}{\sqrt{B}}$ (3)

H - je visina zgrade u m merena od temelja do vrha zgrade, a B -širina u osnovi u pravcu dejstva sila.

Za prostorne okvira $T = 0.5 \sqrt{N} - 0.4$ (4)

Svojstveni period $T_0 = 0.1 \frac{h}{\sqrt{L}}$ (5)

Procena osnovnog perioda vibracija prema EN 1998-1:2004 [1] obavlja se na sledeći način:

Za zgrade visine do 40m vrednost T_1 (u s) aproksimativno se sračunava prema izrazu:

$$T_1 = C_t \cdot H^{3/4} \quad (6)$$

gde se: za C_t uzimaju sledeće vrednosti:

- 0,075 za prostorne betonske okvire otporna na savijanje;
- 0,050 za sve ostale konstrukcije.

vrednost H je visina zgrade u m , mereno od temelja ili od vrha krute podzemne etaže.

Alternativno za konstrukcije sa smičućim zidovima od AB i zidarije vrednost C_t u izrazu (6) se uvode prema izrazu:

$$T = 0.075 \sqrt{A_c} \quad (7)$$

gde je: $A_c = \sum [A_i (0.2 + (\ell_{wi} / H))^2]$ (8)

a A_c – ukupna efektivna (aktivna) površina smičućih zidova u prvoj etaži zgrade, u m^2 ;

A_i - efektivna površina površine poprečnog preseka smičućih zidova i u prvoj etaži zgrade, u m^2 ;

H -kao ranije uz izraz (6);

ℓ_{wi} - dužina smičućeg zida i u prvoj etaži zgrade u pravcu paralelno dejstvu sile, u m ,

uz uslov da vrednost $\frac{\ell_{wi}}{H}$ ne sme biti veće od 0,9.

Alternativno, za procenu vrednosti T_i (u s) može se koristiti:

$$T_1 = 2\sqrt{d} \quad (9)$$

gde je: d -elastično horizontalno pomeranje vrha zgrade, u m , usled gravitacionog opterećenja nanetog u horizontalnom pravcu.

PRORAČUNSKI MODELI, METODE ANALIZE I NEKI REZULTATI

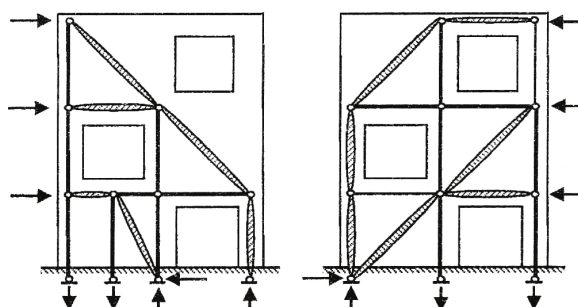
Prema EN 1998 projekat betonske zgrade otporne na zemljotres treba da obezbedi odgovarajući kapacitet konstrukcije za disipaciju energije bez značajnijeg umanjenja ukupne nosivosti na uticaje horizontalnih i vertikalnih opterećenja. Odgovarajuća nosivost svih konstrukcijskih elemenata treba da bude obezbeđena za kombinaciju uticaja sa dejstvom zemljotresa, dok nelinearne deformacije u kritičnoj oblasti treba da obezbede globalnu duktilnost usvojenu u proračunu. Betonske zgrade se proračunavaju za nisku duktilnost, primenjujući samo pravila EN 1992 za seizmičke proračunske situacije. To su konstrukcije nazvanu klasom L (niska duktilnost). Ukupno duktilno ponašanje se obezbeđuje ako se zahtevi duktilnosti uvedu globalno za celu konstrukciju obuhvaćajući različite elemente i raspored (lokaciju) za sve etaže. Mora se obezbediti duktilni lom (savijanjem), a sprečiti krti lom (smicanjem, ili gubitak sidrenja) sa dovoljnom pouzdanošću.

Betonske zgrade proračunate prema [1], se klasifikuju u dve klase duktilnosti: DC" M " (srednja duktilnost) i DC" H " (visoka duktilnost), zavisno od njihovog kapaciteta histerezisne disipacije energije. Obe klase korespondiraju za proračun, dimenzionisanje i oblikovanje detalja konstrukcije zgrada prema posebnim odredbama za projektovanje seizmičke otpornosti, omogućujući da konstrukcija razvije stabilne mehanizme sposobne za disipaciju znatne količine histereziske energije pod ponovljenim opterećenjem. Da bi obezbedili odgovarajući iznos duktilnosti klase M i H, sa posebnim odredbama za sve konstrukcijske elemente mora biti zadovoljen uslov za svaku od klasa. U skladu sa različitim raspoloživom duktilnošću, za obe klase duktilnosti koriste se različite vrednosti faktora ponašanja q dati u [1] i [5].

Nelinearna statička analiza kao deo metode N2 koja je uvrštena u [1], sastoji se od sledećih koraka: Korak1 – Ulazni podaci su zavisnosti sila-deformacija za sve elemente konstrukcije. Seizmičko dejstvo se prikazuje putem elastičnog spektra ubrzanja za usvojeni projektni nivo seizmičkog hazarda (uobičajeno se uzima povratni period zemljotresa od $T_r = 475$ god.). Korak 2 – Spektar zahteva (zavisnost spektralnog ubrzanja i pomeranja). Za neelastične spektre kriste se faktori redukcije. Korak 3 – Push-Over (nelinearna statička analiza) koristi se za određivanje zavisnosti sile i pomeranja kod višespratne konstrukcije (MDOF sistema). Prema EC8 proračun se sprovodi za "ravnomernu" i "modalnu" raspodelu poprečnog opterećenja. Kod ravnomerne raspodele seizmičke sile u pojedinim nivoima su proporcionalne spratnim masama, dok su kod modalne raspodele one raspodeljene prema istom zakonu koji je usvojen u elastičnoj analizi. Usvojena raspodela poprečnog opterećenja ostaje konstantna tokom celokupne analize. U koraku 4 – koristi se ekvivalentni SDOF model. Njegove karakteristike (sila F i pomeranje d) određuju se na osnovu karakteristika MDOF sistema. U koraku 5 određuju se seizmički zahtevi za SDOF sistem. U koraku 6 određuju se globalni seizmički zahtevi za MDOF sistem. Maksimalno pomeranje ekvivalentnog SDOF modela S_d transformiše se u maksimalno pomeranje vrha zgrade. U koraku 7, lokalni seizmički zahtevi za MDOF sistem (maksimalna relativna spratna pomeranja, rotacije poprečnih preseka na krajevima štapova i sl.) određuju se na osnovu nelinearne statičke analize (NSA) za MDOF sistem, pri čemu je potrebno realizovati maksimalno pomeranje vrha zgrade D_i određeno u prethodnom koraku. U poslednjem 8. koraku procenjuju se

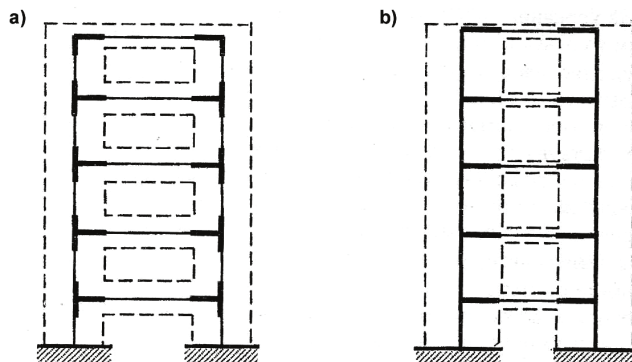
seizmičke performanse razmatrane konstrukcije kroz upoređenje veličine seizmičkih zahteva određenih u koraku 7 i raspoloživog kapaciteta konstrukcije. Ova provera se uobičajeno sprovodi i na globalnom i na lokalnom nivou, a detaljan opis metode dat je u [5].

Modeliranje konstrukcija zgrada analizirano je u radovima [2], [6], [10], [11] i [13]. Jedan od približnih modela koje se može koristiti i za seizmičku analizu je model pritisnutih kosnika i zatega (tie-strut method), što je za zid sa otvorima, prikazano na slici 1. Kad su otvori simetrično postavljeni, kao što je pokazano na slici 2. onda se mogu koristiti proračunski modeli za statički analizu. Od značaja je visina, tj. krutost veznih greda što se može sagledati iz raspodele momenata savijanja spojenih zidova (slika 3). Prikazani su dijagrami momenata savijanja pre i posle preraspodele što je važno uvažavati pri dimenzionisanju ovih konstrukcija [10].



Štapni model za analizu zida sa neregularnim otvorima
Tie - strut model for analysis of walls with iregular openings

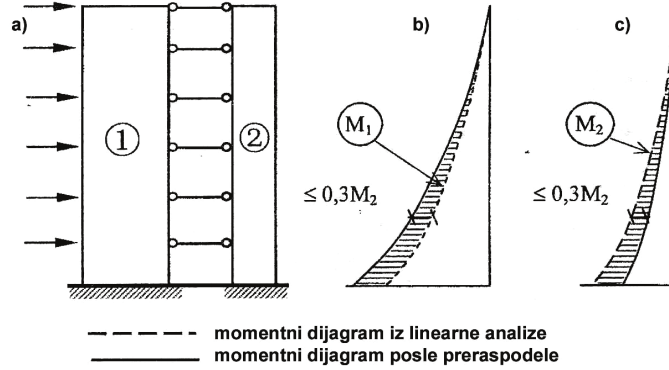
Slika 1. Modeli za približni proračun zida sa otvorima [10]
Fig. 1. Models for approximate analysis walls with openings



Slika 2. Modeliranje zidova s otvorima povezani gredama različite krutosti; a) visoke grede; b) niske grede
Fig. 2. Models of sapling walls connected with beams different stiffness; a) depth beam; b) low beam

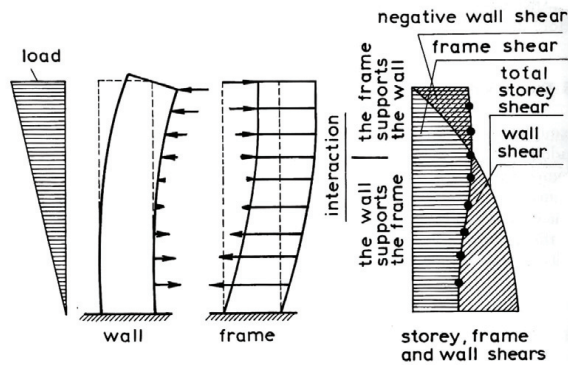
Interakcija okvira i smičućeg zida prikazana je na slici 4. Karakteristika za ovu kombinaciju je da donji spratovi zidova podupiru okvir, a u gornjim spratovima okvir sprečava velika pomeranja zidova. Kao rezultat toga je da se javljaju male promene spratnih smičućih sila V između prvog i poslednjeg sprata. Međutim, dijagram momenata stubova su antisimetrični sa malim promenama od sprata do sprata. Zbog toga se dozvoljava se simulacija sprežanja dvojnog sistema sa okvirom i zidom samo na vrhu zgrade. Osnovni zaključak ove analize dvojnog sistema je da funkcija zida liči na gredu uklještenu na donjem kraju i elastično oslonjena na vrhu. Momenat uklještenja je, ipak, manji od

momenta konzole [12]. Takođe se javljaju značajne razlike u odgovoru konstrukcije kada se ispuna AB okvira uzme u obzir ili se izostavi (sl. 5).



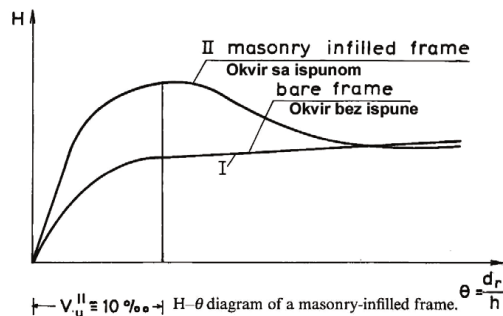
Slika 3. Preraspodela momenata savijanja između dva visoka zida različite krutosti $EI_1 > EI_2$; M_1 -momenat savijanja u zidu 1; M_2 -momenat savijanja u zidu 2 [10]

Fig. 3. Redistribution of bending moment between two slender walls with different stiffness $EI_1 > EI_2$; M_1 -momenat diagram in wall 1; M_2 - moment diagram in wall 2.



Slika 4. Interakcija okvira i smičućeg zida (dvojni sistem) pod bočnim opterećenjem [12]

Fig. 4. Interaction between frame and shear wall in a dual system under lateral load



Uporedni dijagram hor. sila H - međuspratno relativno pomeranje

Slika 5. Zidovi sa i bez ispune [12]

Fig. 5. Walls with and without infill

ANALIZA REGULARNE I NEREGULARNE OKVIRNE KONSTRUKCIJE ZGRADE

Metoda ekvivalentnih bočnih sila može da se primeni na zgrade koje mogu da se analiziraju sa dva ravanska modela i čiji odgovor ne zavisi bitno od uticaja viših svojstvenih oblika slobodnih vibracija. To su zgrade koje zadovoljavaju kriterijume regularnosti po visini i čiji je osnovni period vibracija T_1 manji i od $4T_C$ i od 2,0 s. Seizmička smičuća sila u osnovi F_b za svaki horizontalan pravac za koji se zgrada analizira, treba da se odredi prema sledećem izrazu:

$$F_b = m S_d(T_1) \lambda \quad (10)$$

gde je m ukupna masa zgrade iznad temelja ili iznad vrha krutog podruma, T_1 je osnovni period slobodnih vibracija za posmatrani horizontalan pravac, $S_d(T_1)$ je ordinata projektnog spektra za period T_1 , dok je λ korekcionni faktor, čija je vrednost jednaka $\lambda = 0,85$ ako je $T_1 \leq 2T_C$ i zgrada ima više od dva sprata, odnosno $\lambda = 1,0$ u svim drugim slučajevima.

Uticaji od seizmičkog dejstva određuju se tako što se u svakom od dva ravanska modela zgrade apliciraju horizontalne spratne sile F_i :

$$F_i = F_b \frac{m_i \cdot s_{i1}}{\sum m_j \cdot s_{j1}} \quad (11)$$

gde je F_i horizontalna sila koja deluje na sprat i , F_b je seizmička sila u osnovi zgrade u skladu sa izrazom (10), s_{i1} i s_{j1} su amplitude pomeranja masa m_i i m_j u osnovnom svojstvenom obliku, a m_i i m_j su spratne mase.

Slično kao u našem Pravilniku, u [1] je dopušteno da se osnovni svojstveni oblik aproksimira horizontalnim pomeranjima koja se linearno povećavaju po visini, pa se raspodela horizontalnih sila po visini zgrade određuje prema izrazu:

$$F_i = F_b \frac{m_i \cdot z_i}{\sum m_j \cdot z_j} \quad (12)$$

gde su z_i i z_j visine masa m_i i m_j iznad nivoa temelja ili vrha krutog podruma.

Ako su horizontalna krutost i masa simetrično raspoređeni u osnovi zgrade i ako slučajni ekscentricitet nije uzet u obzir nekim tačnijim postupkom, slučajni torzioni efekti mogu da se uzmu u obzir tako što se uticaji u pojedinim nosećim elementima množe faktorom δ :

$$\delta = 1 + 0,6 \cdot x / L_e \quad (13)$$

gde je x rastojanje posmatranog nosećeg elementa od centra mase zgrade u osnovi, mereno upravno na pravac zemljotresnog dejstva koje se analizira, a L_e rastojanje između dva međusobno najudaljenija noseća elementa u osnovi, mereno upravno na pravac zemljotresnog dejstva koje se analizira.

Multimodalna spektralna analiza se primenjuje na zgrade koje ne zadovoljavaju uslove regularnosti u osnovi i/ili po visini. Pri primeni ove metode mora da se uzme u obzir uticaj svih svojstvenih oblika slobodnih vibracija koji značajno doprinose globalnom odgovoru zgrade. Ovaj zahtev se smatra zadovoljenim ako zbir efektivnih modalnih masa za razmatrane svojstvene oblike vibracija iznosi najmanje 90% od ukupne mase konstrukcije ili ako su uzeti u obzir svi tonovi sa efektivnim modalnim masama koje su veće od 5% ukupne mase konstrukcije. Kada se koristi prostorni proračunski model, navedeni uslovi moraju da se provere za svaki relevantni pravac.

Ukupna smičuća sila u osnovi zgrade F_{bk} određuje se posebno za svaki razmatrani ton vibracija k , prema izrazu:

$$F_{b(k)} = m_{k,ef} S_d(T_k) \quad (14)$$

gde je T_k period slobodnih vibracija u tonu k za posmatrani horizontalan pravac, $S_d(T_k)$ je ordinata projektnog spektra za period T_k , a $m_{k,ef}$ efektivna tonska masa koja odgovara svojstvenom obliku vibracija k , koja predstavlja deo mase koji odgovara učešću svakog pojedinačnog tona u generisanju ukupne seizmičke sile. Efektivna tonska (modalna) masa određuje se preko svojstvenih vektora s_k :

$$m_{k,ef} = \frac{\left(\sum m_i \cdot s_{i(k)}\right)^2}{\left(\sum m_i \cdot s_{i(k)}^2\right)} \quad (15)$$

gde su s_{ik} amplitude pomeranja masa m_i u osnovnom svojstvenom obliku vibracija k . Nakon određivanja ukupne smičuće sile u osnovi zgrade $F_{b(k)}$ u tonu k , može se odrediti i vektor sila za svaki razmatrani ton vibracija:

$$F_{i(k)} = F_{b(k)} \frac{m_i \cdot s_{i(k)}}{\sum m_j \cdot s_{j(k)}} \quad (16)$$

gde se indeks k odnosi na ton vibracija, a indeks i na sprat. Sa poznatim silama $F_{i(k)}$ mogu se odrediti i maksimalni uticaji u konstrukciji za svaki ton vibracija, a time i ukupan odgovor konstrukcije, pri čemu se mora voditi računa da se maksimalni uticaji za pojedine tonove javljaju u različitim trenucima vremena. Zbog toga se ekstremna vrednost bilo kojeg uticaja E_E od seizmičkog dejstva, određuje na osnovu SRSS pravila, kao kvadratni koren zbira kvadrata pojedinih modalnih odgovora:

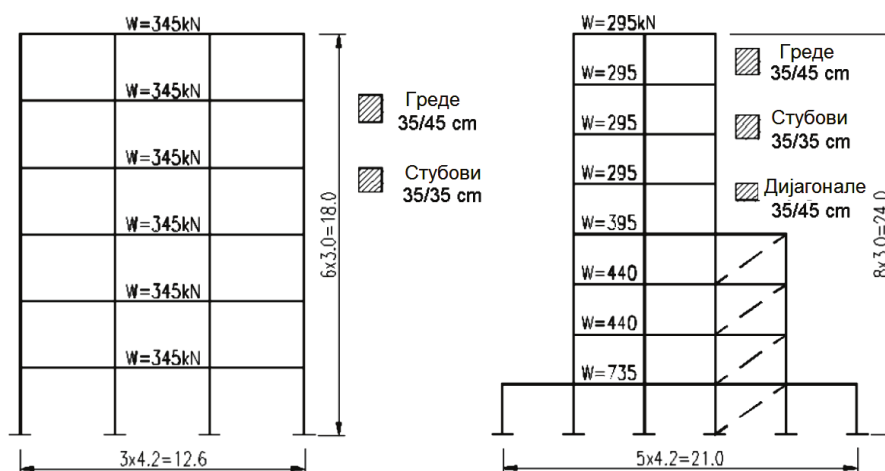
$$E_E = \sqrt{\sum E_{Ek}^2} \quad (17)$$

gde je E_E posmatrani seizmički uticaj (npr. sila, pomeranje itd.), a E_{Ek} vrednost posmatranog uticaja u svojstvenom obliku broj k . Primena jednačine (17) neophodna je za izračunavanje svake statičke ili deformacijske veličine posebno, odnosno dozvoljeno je kombinovati samo konačne vrednosti uticaja.

Uzimajući rezultate multimodalne analize kao referentne, određeni su seizmički uticaji u 2D regularnom i neregularnom okviru (sl. 6), koji se dobijaju primenom približnih metoda i na osnovu multimodalne analize. Spratne mase su koncentrisane u nivou pojedinih spratova, a seizmičko dejstvo je dato projektnim spektrom ubrzanja za srednje tlo (kategorija tla B, faktor tla $S = 1,2$) i projektno ubrzanje tla $a_g = 0,2g$, sa vrednostima faktora ponašanja $q = 5$ za regularnu i $q = 4$ za neregularnu konstrukciju.

U multimodalnoj analizi (MMA) prvo su za svaki ton vibracija k određene smičuće sile u osnovi $F_{b(k)}$ prema izrazu (14), a nakon toga i spratne sile $F_{i(k)}$ prema izrazu (16). U analizi je uzet uticaj svih tonova vibracija na ukupni odgovor konstrukcije, pri čemu je on određen na osnovu srednje kvadratne vrednosti, tj. jednačine (17). U približnoj analizi uzet je uticaj samo osnovnog tona vibracija, pri čemu je ukupna smičuća sila u osnovi određena na osnovu izraza (10). Raspodela seizmičkih sila po visini zgrade je određena prema prvom svojstvenom obliku vibracija (MA1) – izraz (11), odnosno na osnovu raspodele koja se koristi kod metode bočnih sila (MBS) – izraz (12).

Za regularnu konstrukciju (sl. 6a) karakteristični rezultati proračuna, tj. ukupna smičuća sila F_b i moment preturanja u osnovi zgrade M_b , maksimalne vrednosti momenta savijanja u stubovima M_s i gredama M_g , maksimalno pomeranje vrha zgrade d_n i maksimalni relativni spratni otklon d_r ($d_r = (d_{si} - d_{si-1}) / h_i$), dati su u tabeli 1. Kod neregularne zgrade (sl. 6b), analiza je sprovedena sa dva proračunska modela, pri čemu prvi (Okvir 1) predstavlja konstrukciju sa umerenom promenom krutosti po visini zgrade, dok drugi (Okvir 2 - sa dijagonalama) reprezentuje zgradu sa izrazitom promenom krutosti, a karakteristični rezultati proračuna su prikazani u tabeli 2.



Slika 7 – Regularna i neregularna okvirna konstrukcija
Figure 7 – Regular and non-regular frame structure

Približne metode po pravilu daju znatno veće vrednosti uticaja u konstrukciji, što je posledica, pre svega, veće smičuće sile u osnovi zgrade. Ove razlike su posebno izražene kod neregularnih konstrukcija, kod kojih je procena uticaja u konstrukciji putem približnih postupaka svakako neprihvatljiva (u analiziranim primerima razlike su od 50 do 95%).

U slučaju regularnih konstrukcija, približnom metodom, generalno, mogu se preceniti uticaji multimodalne analize, ali s obzirom da se od približnih metoda očekuju konzervativni rezultati, kao i da razlika u veličini uticaja nije izrazita u odnosu na multi-modalnu analizu, te da je približna metoda znatno jednostavnije za upotrebu, može se opravdati njena primena u svakodnevnoj projektantskoj praksi.

Kod neregularnih konstrukcija, međutim, dobijene razlike su znatno veće i rastu sa porastom "neregularnosti" konstrukcije. Dobijene razlike su takvog reda veličine da se primena približnih metoda kod neregularnih konstrukcija ne može opravdati, čak ni kao približna procena, čime je potvrđena ispravnost stava Evrokoda 8 koji približne metode analize dozvoljava samo kod regularnih konstrukcija.

Tabela 1 – Karakteristični uticaji za regularnu konstrukciju
Table 1 – Characteristic effects for regular structure

Uticaj		MMA	MBS	Δ [%]	MA1	Δ [%]
F_b	kN	207,79	211,14	1,61	211,14	1,61
M_b	kNm	2633,52	2744,73	4,22	2702,29	2,61
M_g	kNm	98,24	100,47	2,27	100,70	2,50
M_s	kNm	105,13	106,90	1,68	107,00	1,77
d_n	cm	1,25	1,31	4,62	1,29	2,98
d_r	–	1/1027	1/1005	2,17	1/1001	2,57

Tabela 2 – Karakteristični uticaji za neregularnu konstrukciju
 Table 2 – Characteristic effects for non-regular structure

Uticaj		Okvir 1					Okvir 2				
		MMA	MBS	Δ [%]	MA1	Δ [%]	MMA	MBS	Δ [%]	MA1	Δ [%]
F_b	kN	239,1	362,5	51,7	362,5	51,7	248,1	362,5	46,1	355,4	46,1
M_b	kNm	3603,5	5721,8	58,8	5857,9	62,6	3769,3	5721,8	51,8	6706,0	81,5
M_g	kNm	117,5	182,1	54,9	187,6	59,6	119,1	159,8	34,3	219,0	87,6
M_s	kNm	98,9	152,9	54,6	158,4	60,2	109,9	149,5	36,1	200,6	86,2
d_n	cm	4,16	6,57	57,8	6,74	61,9	2,51	3,42	36,2	4,62	87,9
d_r	–	1/445	1/284	56,8	1/275	62,4	1/458	1/342	34,0	1/235	94,8

ZAVRŠNE NAPOMENE

Pored preporučenih multimodalne i N2 metode za proračun seizmički otpornih konstrukcija se mogu koristiti i uprošćene metode u slučaju regularnih i konstrukcija sa blago izraženom neregularnošću. Primeri analize regularnih i neregularnih zgrada ukazuju na neopravdanost korišćenja uprošćenih metoda proračuna, kao npr. ekvivalentne statičke metode, pri projektovanju neregularnih konstrukcija. Za neregularne konstrukcije u osnovi zgrade, mora se primeniti prostorni proračunski model i multi modalna analiza da bi se na adekvatan način obuvatili nepovoljni torzioni efekti. Parametarska analiza uticaja torzije je pokazalo da se približnim postupkom kod zgrada sa slabo izraženom neregularnošću, koji je predviđen u EC8, na zadovoljavajući način može proceniti uticaj torzije. Međutim, razlika rezultata ovde prikazane analize u odnosu na analizu prema Predstandardu EC 8 u analizirane u [5] su znatno manje. Rezultati nekih tačnijih analiza prikazani su u radu [9].

Zahvalnica

Rad je nastao kao deo istraživanja na TR Projektu 1607 koje finansira Ministarstvo za nauku i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] CEN-EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2004. Prevod GF, Beograd 2008.
- [2] Dorick, D. Earthquake risk reduction, Wiley, 2005.
- [3] Earthquake Resistant Regulations, A World List - 2004, IAEE.
- [4] Fardis, M. et al. *Designers' Guide to EN 1998-1 and EN 1998-5*, Telford, 2005.
- [5] Folić R., Lađinović, Đ.: Upporedna analiza Evrokoda 8 za projektovanje seizmički otpornih konstrukcija sa nekim nacionalnim odredbama. Građevinski kalendar 2003, SDGITJ, str. 429-485.
- [6] Folić, R.: Stanje i trendovi u zemljotresnom inženjerstvu- Novi i postojeći objekti, Uvodni referat U7, septembar, V. Banja, 2006, Knj. 1. str. 115-130.
- [7] Folić, B. Interakcija konstrukcija – tlo objekata fundiranih na šipovima, Tehnika-NG, br. 3, 2008
- [8] Folić R.: Neke metode dinamike konstrukcija i njihova primena u seizmičkoj analizi konstrukcija građevinskih objekata, Građevinski kalendar 2007, SDGITS, str. 143-233.
- [9] Folić R., Lađinović, Đ.: Projektovanje seizmički otpornih zgrada-Uvodni referat, TEIK, GF, Niš, 2010.
- [10] Gančeva, R.Č.: Proektiranje na stomanobeonni konstrukcii za seizmični vozdejstvia, UASG, 2007.
- [11] Lađinović Đ., Folić R.: Comparative analysis of mathematical models for design of tall buildings. Bulletin for Applied Mathematics, BAM-1060/94, TU of Budapest, 1994., pp. 161-176.
- [12] Panelis, G., Kappos, A. Earthquake-Resistance Concrete Structures, Spon, London, 1997.
- [13] Paulay T., Priestley M.J.N.: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons, Inc., 1992.