

ANALIZA MEHANIZAMA LOMA ZGRADA RAZMATRANJEM STATIČKE NEODREĐENOSTI I KINEMATIČKE STABILNOSTI

ANALYSIS OF THE FAILURE MECHANISMS OF BUILDINGS CONSIDERING THE STATIC INDETERMINACY AND KINEMATIC STABILITY



UDC:
Originalni naučni rad

Mr Mladen ČOSIĆ, dipl. inž. građ.¹⁾
Prof. dr Stanko BRČIĆ, dipl. inž. građ.²⁾

REZIME

U radu je prikazan koncept analize mehanizama loma zgrada bazirajući se na osnovnim stavovima iz statike konstrukcija, razmatrajući statičku neodređenost i kinematičku stabilnost. Istraživanje je sprovedeno modelirajući mehanizme loma koji se uobičajeno javljaju kod zgrada izloženih dejstvu zemljotresa: prema metodi programiranog ponašanja (CDM – Capacity Design Method), “jaki stubovi – slabe grede”, “slabi stubovi – jake grede”, “meki sprat”, “fleksibilno prizemlje”, “diskontinuitet krutosti”, uticaj krutog parapeta, sistem sa konzolnim delom, sistemi neregularni po visini, sistem ukrućen vertikalnim armiranobetonskim zidom i sa izmeštenim delom zida u prizemlju. Takođe, razmatrani su i složeni mehanizmi loma koji se javljaju kao kombinacija čistih ili parcijalno razvijenih više prethodno nabrojanih mehanizama loma.

Cljučne reči: zgrade, mehanizmi loma, statička neodređenost, kinematička stabilnost, zemljotres

SUMMARY

This paper presents a concept of analysis of the failure mechanisms of buildings based on basic principles of the statics, considering the static indeterminacy and kinematic stability. The research was conducted by modeling the failure mechanisms which commonly occur in buildings exposed to the earthquake: according to the Capacity Design Method (CDM), “strong columns – weak beams”, “weak columns – strong beams”, “soft storey”, “flexible ground storey”, “discontinuity of stiffness”, the influence of the rigid parapet, system with cantilevers, irregular systems in elevation, system stiffened with vertical reinforced concrete wall and displaced part of the wall on the ground floor. Also, the complex failure mechanisms are considered due to the combination of a single or partially developed more previously mentioned failure mechanisms.

Key words: buildings, failure mechanisms, static indeterminacy, kinematic stability, earthquake

1. UVOD

Proračun zgrada za dejstvo zemljotresa zasniva se na primeni ekvivalentne statičke ili spektralno-modalne analize, dok se proračun statičkih uticaja sprovodi primenom linearne elastične analize po metodi konačnih elemenata (FEM – *Finite Element Method*). Dimenzionisanje se sprovodi za idealizovane dijagrame napon-dilatacija betona i armature. Prilikom selekcije seizmičkog zahteva koji konstrukcija treba da ispuni, redukuje se

spektar odgovora faktorom ponašanja q i na taj način se utiče na projektni nivo ukupne seizmičke sile [7]. Sa druge strane, prilikom dimenzionisanja prema EC propisima bira se klasa duktilnosti sistema, od niske DCL preko srednje DCM pa sve do visoke klase duktilnosti DCH [6], [7]. U saglasnosti sa izabranom klasom duktilnosti potrebno je obezbediti niz zahteva koji su definisani u propisima, a u cilju obezbeđenja adekvatne duktilnosti na nivou poprečnog preseka i duž štapa. Na taj način se obezbeđuje i odgovarajuća duktilnost na nivou kompletne zgrade. Jedan od parametara koji se razmatra prilikom dimenzionisanja armiranobetonskih zgrada, kada se teži duktilnijem ponašanju, je selekcija graničnih dilatacija. Ovde postoji mogućnost da se armiranobetonski preseki dimenzionišu za jednu dostignutu graničnu dilataciju po armaturi ili po betonu ili simultanom dostizanju granič-

Adresa autora: ¹⁾ Marka Milanovića 17, 15300 Loznica, doktorant na Građevinskom fakultetu, Univerzitet u Beogradu
E-mail: mladen.cosic@ymail.com

²⁾ Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd
E-mail: stanko@grf.bg.ac.rs

nih dilatacija i po armaturi i po betonu. Povoljnija opcija je da se dostignu granične dilatacije po armaturi, a da se za beton dilatacije određuju proračunom. Međutim, prilikom proračuna ne može se aktivno pratiti razvoj dilatacija u inkrementalnim situacijama, već se na osnovu merodavne kombinacije opterećenja, za određeni poprečni presek, mogu odrediti vrednosti dilatacija. Ovako određene dilatacije mogu da ukažu na to da li je za armaturu ili beton ispunjen zahtev za duktilno ponašanje, ali se kompletniji odgovor dobija ukoliko se razmatraju plastične rotacije na nivou poprečnog preseka. Mehanizam loma na nivou poprečnog preseka je lokalni mehanizam loma, dok je mehanizam loma na nivou cele zgrade globalni mehanizam loma. Pitanje globalnog mehanizma loma zgrade je znatno kompleksniji problem, jer u konstruktivnom sistemu zgrade participira veći broj greda i stubova, pa samim tim i veliki broj poprečnih preseka koji se razmatraju. Sa druge strane, kod jedne zgrade je moguće formirati veći broj mehanizama loma, jer je moguće realizovati veliki broj kombinacija plastifikacije u presecima. S'obzirom da su projektni spektri odgovora prema propisima definisani na osnovu obimnih statistički analiza i dodatnim osrednjavanjem, to je varijacija u nelinearnom odgovoru zgrade i formiranom mehanizmu loma znatno smanjena. Kada se za analizu primene akceleroگرامи, broj mehanizama loma zgrade se proporcionalno povećava broju akceleroگرامа koji se primenjuju. Za procenu realnog ponašanje jedne zgrade se ne može koristiti jedan akceleroگرام, već je potrebno uzeti u obzir veći broj akceleroگرامа. Veći broj akceleroگرامа je, između ostalog, potreban i u cilju što kvalitetnije analize mogućih mehanizama loma zgrade. Akceleroگرامе je prehodno potrebno skalirati prema projektnom spektru odgovora, nekom od tehnika za skaliranje akceleroگرامа. Dakle, razlika je evidentna u metodama za analizu konstrukcija kod sagledavanja mehanizama loma zgrada. Razmatranje mehanizma loma zgrada na globalnom nivou može se sprovesti primenom inkrementalnih analiza, kao što je nelinearna statička *pushover* analiza (NSPA – *Nonlinear Static Pushover Analysis*) ili nelinearna dinamička analiza (NDA – *Nonlinear Dynamic Analysis*) sa akceleroگرامима, s'tim što se tada razmatra jedan nivo seizmičkog zahteva. Ukoliko se žele razmatrati nivoi seizmičkog zahteva do kolapsa, tada je potrebno primeniti inkrementalnu nelinearnu dinamičku analizu (INDA – *Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*).

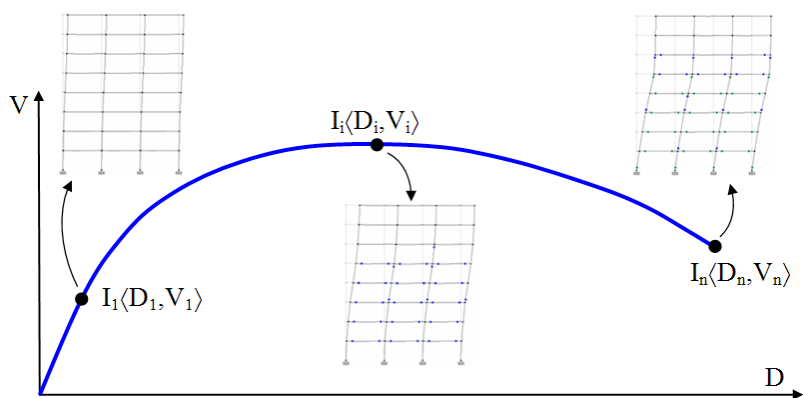
Dosadašnja istraživanja na temu analize mehanizama loma zgrada sprovedena su primenom: simplifikovanih analiza, analitičkih procedura, energetskih kriterijuma, indeksa oštećenja (*damage index*), proračuna performansi sistema plastičnom analizom (PBPD – *Performance-Based Plastic Design*), krivih osetljivosti (*fragility curve*), numeričkih jednokoračnih analiza (*one step solution*), inkrementalno-iterativnih analiza, NSPA analize, NDA analize i INDA analize. U velikom broju slučajeva se direktno ne razmatra sam mehanizam loma zgrade, već se indirektno uspostavlja veza sa drugim odgovarajućim parametrima preko kojih se utvrđuje stanje loma zgrade. Takođe, numeričkom simulacijom prema

nelinearnoj FEM metodi moguće je, u određenim softverima, vizuelno prikazati mehanizam loma zgrade, ali je sama interpretacija mehanizama loma znatno kompleksniji problem. S'obzirom na zahteve moderne arhitekture i sve većoj mogućnosti da se u softverima modelira, analizira i razmatra nelinearan odgovor kompletnih 3D modela zgrada, to je potreba za analizom mehanizama loma još veća. Sa druge strane, rešavanje ovakvih pitanja predstavlja kompleksan matematičko-inženjerski problem. U tom cilju su dosadašnja istraživanja sprovedena analizirajući mehanizme loma indirektnim metodama i parametrima, kao što je globalni indeks oštećenja [18], [8]. Unapređeni indeks oštećenja 2D modela zgrada prezentovan je u [11], dok je u [9] prikazan indeks oštećenja za 3D modele zgrada. Kontrola kolapsa konstrukcije se može razmatrati faktorom sigurnosti sprata (*story-safety factor*) [4] ili faktorom koncentracije međuspratnog drifta (*drift concentration factor*) [15]. Razmatranje mogućnosti razvoja različitih mehanizama loma okvirnih sistema zgrada (MRF – *moment resisting frame*), od spratnog do kombinovanog, prikazano je u radu [16], dok je u radovima [1], [2] izvršena identifikacija kolapsnog mehanizma loma sistema na osnovu spektra kapaciteta kolapsa (*collapse capacity spectra*). U radu [12] su prikazani primeri zgrada kod kojih su usled dejstva zemljotresa razvijeni spratni (lokalni) mehanizmi loma sa i bez potpunog kolapsa. Takođe, ukazano je i na formiranje mehanizma loma po svim spratovima (globalnog), bez potpunog kolapsa zgrade. U istraživanju [17] iniciranje mehanizma kolapsa zgrada i globalne dinamičke nestabilnosti (*global dynamic instability*) sistema je razmatrano u funkciji međuspratnog drifta i spektralnih akceleracija, a primenom INDA analize. U [10] je primenom NDA analize identifikovan spratni kvazi-smičući mehanizam loma (*quasi-shear band*) 3D okvirnog modela zgrade.

Koncept analize mehanizama loma zgrada primenom statičke i kinematičke klasifikacije sistema predstavljen je u daljem delu teksta rada. Ovaj koncept se primenjuje u analizi konstrukcija u cilju klasifikacije i identifikacije tipa konstrukcije, dok je njena primena moguća i u analizi mehanizama loma zgrada po inkrementalnim nelinearnim situacijama.

2. KONCEPT STATIČKE I KINEMATIČKE KLASIFIKACIJE MECHANIZAMA LOMA ZGRADA

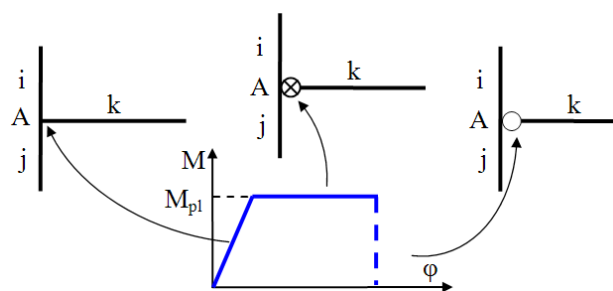
Koncept statičke i kinematičke klasifikacije mehanizma loma zgrada razmatran je na 2D modelima zgrada, a isti princip se može primeniti i kod mehanizama loma 3D modela zgrada dekompozicijom. Da bi se uspešno primenio ovakav koncept analize mehanizama loma, kod analize seizmičkih performansi konstrukcija (PBSD – *Performance-Based Seismic Design*), potrebno je odgovor konstrukcije razmatrati ili u vremenskom ili u kapacitativnom domenu. Ukoliko se razmatranje mehanizama loma sprovodi u vremenskom domenu primenom NDA analize, tada se mogu dati odgovori za jedan nivo seizmičkog zahteva. Ukoliko se razmatranje mehanizama loma sprovodi u kapacitativnom domenu primenom NSPA analize, tada se mogu dati odgovori za veći broj



Slika 1. Pushover kriva i mehanizmi loma višespratnog okvira prikazani kroz inkrementalni razvoj nelinearnih deformacija

nivoa seizmičkog zahteva. Razmatrani mehanizmi loma višespratnog okvira prikazani kroz inkrementalni razvoj nelinearnih deformacija u kapacitativnom domenu prikazani su na slici 1. Pushover kriva je prikazana u funkciji inkrementalnog pomeranja najvišeg sprata objekta D i ukupne smičuće sile u osnovi objekta V . Inkrementalne situacije su prikazane preko diskretnih uređenih parova $I_1 \langle \dot{D}_1, V_1 \rangle, I_2 \langle \dot{D}_2, V_2 \rangle, \dots, I_n \langle \dot{D}_n, V_n \rangle$. Diskretnom uređenom paru $I_1 \langle \dot{D}_1, V_1 \rangle$ odgovara linearno elastično ponašanje, tako da na sistemu nije nastupilo formiranje mehanizma loma, dok diskretnom uređenom paru $I_n \langle \dot{D}_n, V_n \rangle$ odgovara izraženo nelinearno ponašanje i evidentno formiran mehanizam loma. Diskretnom uređenom paru $I_n \langle \dot{D}_n, V_n \rangle$ odgovara kolapsno stanje i odgovarajući kolapsni mehanizam loma okvira. Pitanje fenomena kolapsa je kompleksno, tako da se mora razmatrati sa više aspekata. Istraživanje prikazano u ovom radu razmatra mehanizme loma u nelinearnom domenu i za pretkolapsno stanje, kako bi se ukazalo na potencijalan kolapsni mehanizam loma.

Statička i kinematička klasifikacija se zasniva na analizi sistema formiranih iz niza štapova međusobno povezanih krutim i zglobnim vezama. Kod višespratnih armiranobetonskih zgrada zglobne veze su znatno manje prisutne, osim kada se u određenim slučajevima ove veze baš kao takve i projektuju. Tada se one u analizi i moraju uvoditi kao idealno zglobne veze ili sa određenim stepenom rotacione elastične krutosti. Međutim, kod standardnih višespratnih zgrada sve veze su gotovo krute, pa se kao takve i razmatraju u ovom radu. Sa druge strane, pošto se razmatra sistem koji je izložen nelinearnom po-



Slika 2. Veza momenta savijanja M i ugla rotacije φ u plastičnom zglobu

našanju, tada se određeni poprečni preseći plastifikuju. Razmatranje koncentrisane plastifikacije na sistemu sprovodi se primenom plastičnih zglobova (*plastic hinge*). Za potrebe ovog istraživanja plastifikacija u jednom plastičnom zglobu se razmatra kao idealna elastoplastična deformacija. Na slici 2 je prikazana veza momenta savijanja M i ugla rotacije φ u plastičnom zglobu. U fazi linearnog elastičnog ponašanja sistema, tri štapa i, j i k su međusobno kruto vezani u čvoru A . U nekom narednom stanju je došlo do formiranja plastifikacije kraja štapa k , odnosno do formiranja plastičnog zgloba pri čemu je znatno redukovana rotaciona krutost. U narednom inkrementalnom stanju nastupa totalni gubitak rotacione krutosti i kraj štapa k prelazi u idealni zglob kod koga je omogućena potpuna rotacija. Ukoliko je deo $M-\varphi$ krive nakon dostizanja momenta plastičnosti horizontalan, tada će rotaciona krutost k_φ biti jednaka nuli, pa će za infinitezimalni priraštaj momenta savijanja rotacije postati velike. Ovakvo ponašanje se takođe može okarakterisati kao rotacija kod zglobne veze. U svim razmatranjima sistema podrazumeva se da su plastični zglobovi plastifikovani tako da omogućavaju idealnu rotaciju, pa su samim time identični idealnim zglobnim vezama.

Postupak formiranja mehanizma loma za n puta statički neodređen sistem zasniva se na primeni procedure tipa korak po korak (*step by step analysis*), dok se za pojedinačno stanje sistema koristi termin korak (*step*) analize. U sistemu se iz početnog stanja statičke neodređenosti, kroz razvoj nelinearnih deformacija, postepeno redukuje statička neodređenost prelazeći tako u mehanizam loma zgrade. U proizvoljnom i -tom koraku analize sistema koji je m puta statički neodređen nastupa preraspodela statičkih uticaja usled razvoja nelinearnih deformacija u određenim presećima. Naponsko-deformacijsko stanje u preseku nije određeno konačnom vrednošću, već se analizira u inkrementalnim situacijama, usled čega preseći na konstrukciji dostižu različita naponsko-deformacijska stanja. Pri formiranju većeg broja plastičnih zglobova ponašanje sistema se znatno menja u odnosu na početno stanje, tako da se mogu uspostaviti zakonitosti na osnovu kojih sistem postepeno prelazi u mehanizam. Raspored plastičnih zglobova i naponsko-deformacijsko stanje u svakom plastičnom zglobu definiše moguće mehanizme loma sistema, a sa druge strane mehanizam loma zavisi od geometrijskih karakteristika sistema i položaja opterećenja. Višespratne okvirne zgrade su višestruko statički neodređene i kinematički stabilni sistemi, a što im omogućava određene povoljnosti u odnosu na statički određene sisteme. U određenim situacijama se može dogoditi da sistem iz statičke neodređenosti ne pređe postepeno u statičku određenost, već da direktno postane mehanizam loma.

Statičku i kinematičku klasifikaciju sistema je moguće razmatrati kao spoljašnju i unutrašnju na sistemu

formiranom od štapova ili se na ovom sistemu mogu identifikovati krute ploče. Statička klasifikacija sistema se utvrđuje razmatranjem statičke određenosti, neodređenosti ili preodređenosti, dok se kinematička klasifikacija sistema utvrđuje ispitivanjem da li je sistem kinematički prosto stabilan, višestruko stabilan ili labilan. U slučaju sistema formiranog od štapova, ispitivanje spoljašnje statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti se sprovodi primenom izraza [5]:

$$R_{s,1} = Z_s + Z_k + Z_o + Z_u - 2K \quad (1)$$

gde je Z_s broj štapova, Z_k broj krutih uglova, Z_o broj reakcija oslonaca, Z_u broj uklještenja i K broj čvorova. Ukoliko je $R_{s,1} = 0$, tada je sistem spoljašnje statički određen i kinematički prosto stabilan, a ukoliko je $R_{s,1} > 0$, tada je sistem spoljašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan, pri čemu je $R_{s,1}$ broj statičke neodređenosti. U slučaju da je $R_{s,1} < 0$, tada je sistem spoljašnje statički preodređen i kinematički labilan. Ispitivanje unutrašnje statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti, kod sistema formiranog od štapova, sprovodi se primenom izraza:

$$R_{s,2} = Z_s + Z_k - (2K - 3) \quad (2)$$

Ukoliko je $R_{s,2} = 0$, tada je sistem unutrašnje statički određen i kinematički prosto stabilan, a ukoliko je $R_{s,2} > 0$, tada je sistem unutrašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan, pri čemu je $R_{s,2}$ broj statičke neodređenosti. U slučaju da je $R_{s,2} < 0$, tada je sistem unutrašnje statički preodređen i kinematički labilan.

U slučaju sistema formiranog od krutih ploča, ispitivanje spoljašnje statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti se sprovodi primenom izraza:

$$R_{p,1} = Z_o + Z_u + 2Z_z - 3Z_p \quad (3)$$

gde je Z_z broj zglobnih veza, Z_p broj krutih ploča. Ukoliko je $R_{p,1} = 0$, tada je sistem spoljašnje statički određen i kinematički prosto stabilan, a ukoliko je $R_{p,1} > 0$, tada je sistem spoljašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan, pri čemu je $R_{p,1}$ broj statičke neodređenosti. U slučaju da je $R_{p,1} < 0$, tada je sistem spoljašnje statički preodređen i kinematički labilan. Ispitivanje unutrašnje statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti, kod sistema formiranog od krutih ploča, sprovodi se primenom izraza:

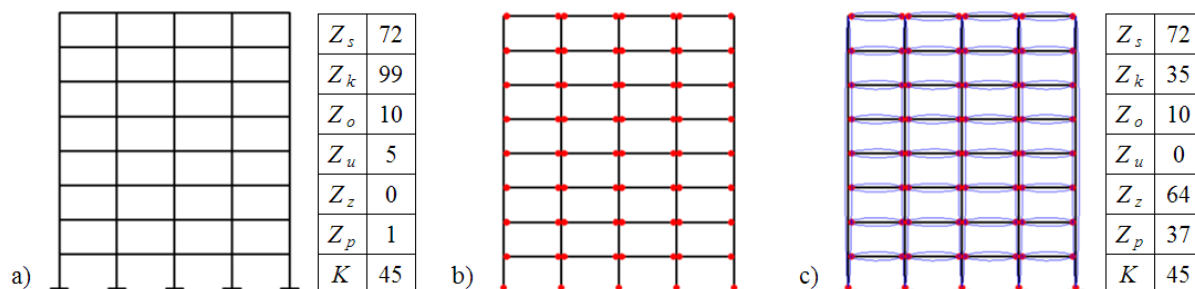
$$R_{p,2} = 2Z_z - (3Z_p - 3) \quad (4)$$

Ukoliko je $R_{p,2} = 0$, tada je sistem unutrašnje statički određen i kinematički prosto stabilan, a ukoliko je $R_{p,2} > 0$, tada je sistem unutrašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan, pri čemu je $R_{p,2}$ broj statičke neodređenosti. U slučaju da je $R_{p,2} < 0$, tada je sistem unutrašnje statički preodređen i kinematički labilan.

3. ANALIZA MEHANIZAMA LOMA ZGRADA PREMA METODI PROGRAMIRANOG PONAŠANJA

Koncept metode programiranog ponašanja (CDM – *Capacity Design Method*) u analizi zgrada razvijen je u cilju optimalnog razvoja mehanizma loma sistema [13]. Za projektni nivo seizmičkog hazarda CDM metodom se obezbeđuje da konstrukcija razvije takav mehanizam loma da se mora obezbediti zaštita života ljudi u zgradi, ali ne sme nastupiti potpuni kolaps. CDM je metoda projektovanja u kome se biraju elementi konstrukcijskog sistema koji se na odgovarajući način projektuju i oblikuju za disipaciju energije pri velikim deformacijama, dok su ostali konstrukcijski elementi obezbeđeni sa dovoljnom nosivošću, tako da može da se ostvari izabrani način disipacije energije [7]. Ti elementi se namerno dimenzionišu tako da se prvi plastificiraju, a istovremeno su detalji njihovog izvođenja takvi da omogućavaju što veću disipaciju energije. Ostalim elementima obezbeđuje se dovoljno velika nosivost, tako da se mogu programirani mehanizmi absorpcije u potpunosti prihvatiti. Kod višespratnih okvirnih zgrada zone spojeva greda-stub, odnosno krajevi greda i stubova su mesta gde se razvijaju plastične deformacije i na ova mesta treba računati u analizi mehanizma loma. Za gredne elemente je dominantna plastifikacija usled momenata savijanja, dok se kod stubova odvija plastifikacija pri interakciji momenta savijanja i normalne sile. Razmatranje koncepta CDM metode moguće je sprovesti na nivou odnosa nosivosti “jačih” i “slabijih” elemenata. Stubovi su “jači” elementi, a čije bi rušenje moglo ugroziti globalnu stabilnost okvirnih zgrada. Grede su “slabiji” elementi kod kojih redukcija nosivosti u manjoj meri može ugroziti globalnu stabilnost okvirnih zgrada i za koje je moguće obezbediti dovoljan duktilitet.

Na slici 3a je prikazan višespratni okvirni sistem kod koga je $R_{s,1} = 96$, $R_{s,2} = 84$, $R_{p,1} = 12$ i $R_{p,2} = 0$. Razmatrajući ovaj sistem formiran od štapova može se



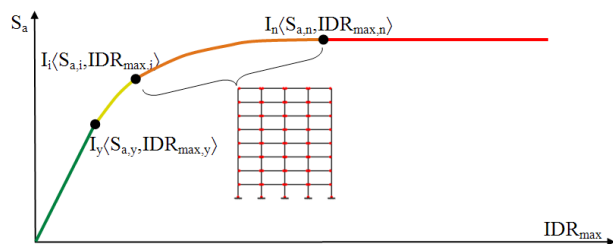
Slika 3. a) višespratni okvirni sistem, b) mehanizam loma formiran prema CDM metodi, c) identifikacija krutih ploča kod mehanizma loma formiranog prema CDM metodi

konstatovati da je spoljašnje i unutrašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan, a razmatrajući ga preko ploča sistem je spoljašnje kinematički višestruko stabilan i unutrašnje prosto stabilan. Poželjan (optimalan) mehanizam loma ovog sistema, prema CDM metodi, prikazan je na slici slici 3b. U ovom slučaju omogućena je plastifikacija krajeva greda i stubova samo na mestima uklještenja. Svaka greda pojedinačno formira jednu krutu ploču, dok stubovi jedne vertikale formiraju jednu krutu ploču (slika 3c). Kod ovakvog sistema je $R_{s,1} = 27$, $R_{s,2} = 20$, $R_{p,1} = 27$ i $R_{p,2} = 20$. Razmatrajući ovaj sistem formiran od štapova ili ploča može se konstatovati da je spoljašnje i unutrašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan. U odnosu na inicijalni sistem, kod mehanizma loma prema CDM metodi redukovan je broj spoljašnje i unutrašnje statičke neodređenosti, ali je povećan broj spoljašnje i unutrašnje kinematičke stabilnosti, pošto se na sistemu formira veliki broj plastičnih zglobova. Na taj način se kontrolisanim razvojem nelinearnih deformacija na sistemu sprečava da isti dođe u stanje potpunog kolapsa.

Oblast nelinearnog odgovora u kojoj je potrebno da se razvije mehanizam loma prema CDM metodi može se razmatrati tako što se na abscisi prikažu vrednosti maksimalnog međuspratnog drifta IDR_{max} , a na ordinati vrednosti spektralnog ubrzanja S_a (slika 4). U intervalu od $I_1(S_{a,i}, IDR_{max,i})$ do $I_n(S_{a,n}, IDR_{max,n})$ nastupa omekšavanje sistema, posle čega nastupa pretkolapsno, odnosno kolapsno stanje. U uslovima realnog ponašanja sistema nije uvek moguće da se na svim gredama razviju plastični zglobovi, međutim bitno je da se ne razviju plastični zglobovi na krajevima stubova, osim na mestima uklještenja. Sa druge strane, u radu [3] je prikazana razvijena metoda kontrolisanog mehanizma loma zgrada zasnovana na nelinearnoj statičkoj *pushover* analizi (NSPA-DMBD – *Nonlinear Static Pushover Analysis – Damage Mechanisms-Based Design*). Optimalan mehanizam loma zgrade se određuje na osnovu rešenja CDM metode, a odgovor zgrade se razmatra u inkrementalnim situacijama. Selekcijom, monitoringom i kontrolom optimalnog mehanizma loma sistema i razvijenom NSPA-DMBD metodom kontroliše se globalni mehanizam loma zgrada i povećava nivo otpornosti na rani kolaps.

4. ANALIZA SPECIFIČNIH MEHANIZAMA LOMA ZGRADA

Posledice razornih dejstava zemljotresa se kod konstrukcija ogledaju u razvoju različitih mehanizma loma,

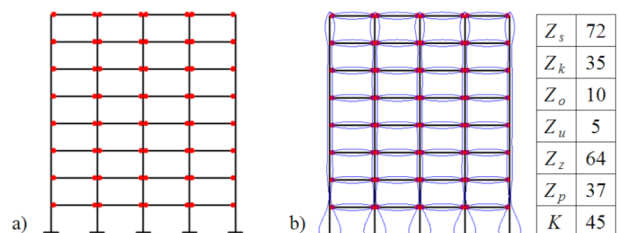


Slika 4. Identifikacija oblasti nelinearnog odgovora u kojoj je potrebno da se razvije mehanizam loma prema CDM metodi

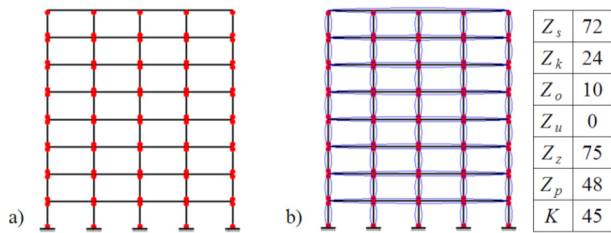
ali se kod određenih konstrukcija, projektovanih prema različitim propisima i čak u različitim vremenskim periodima, može ustanoviti ponavljanje karakterističnih mehanizama loma. Ovi mehanizmi loma se, u najčešćem broju slučajeva, razvijaju kod zgrada koje su projektovane sa mekim spratom ili diskontinuitetom krutosti, fleksibilnim prizemljem, prevelike neregularnosti u osnovi, po visini ili kombinovano, izraženim konzolnim delovima zgrade, izraženim nepravilnim rasporedom masa po visini konstrukcije, smanjenom duktilnosti i sl.

Razvoj mehanizma loma “jaki stubovi – slabe grede” (*strong column – weak beam*) sličan je mehanizmu loma prema CDM metodi, samo što se u ovom slučaju razvijaju plastični zglobovi na krajevima svih greda, dok stubovi ostaju neplastifikovani. Ovakav mehanizam loma pripada takođe grupi poželjnih mehanizama loma. Na slici slici 5a je prikazan mehanizam loma “jaki stubovi – slabe grede” višespratnog okvirnog sistema, dok su na slici 5b prikazane identifikovane krute ploče. Svaka greda pojedinačno formira jednu krutu ploču, dok stubovi jedne vertikale formiraju jednu krutu ploču. Kod ovog mehanizma loma je $R_{s,1} = 32$, $R_{s,2} = 20$, $R_{p,1} = 32$ i $R_{p,2} = 20$. U odnosu na mehanizam loma prema CDM metodi, povećana je spoljašnja statička neodređenost i kinematička stabilnost, dok je identična unutrašnja statička neodređenost i kinematička stabilnost. Formiranje ovakvog mehanizma loma može prethoditi mehanizmu loma prema CDM metodi, pošto je veoma bitan i raspored formiranja plastičnih zglobova po inkrementalnim situacijama. To znači da bi prvo trebalo da se razviju plastični zglobovi u gredama, pa tek onda u stubovima. Na taj način identifikacija ovakvog mehanizma loma kod nelinearnog odgovora konstrukcije može ukazivati na mehanizam loma koji posle njega sledi, a to bi trebalo da je mehanizam loma prema CDM metodi.

Razvoj mehanizma loma “slabi stubovi – jake grede” (*weak column – strong beam*) karakteriše formiranje plastičnih zglobova na krajevima stubova, dok grede ostaju neplastifikovane. U odnosu na poželjan prethodni mehanizam loma i mehanizam loma prema CDM metodi, ovaj mehanizam loma pripada grupi nepoželjnih mehanizama loma. Formiranje ovakvog mehanizma loma karakteristično je kod zgrada projektovanih prema starijim propisima samo za uticaje gravitacionog opterećenja, gde nije bila implementirana analiza lateralnog seizmičkog dejstva. Na slici slici 6a je prikazan mehanizam loma “slabi stubovi – jake grede” višespratnog okvirnog



Slika 5. a) mehanizam loma “jaki stubovi – slabe grede”, b) identifikacija krutih ploča kod mehanizma loma “jaki stubovi – slabe grede”



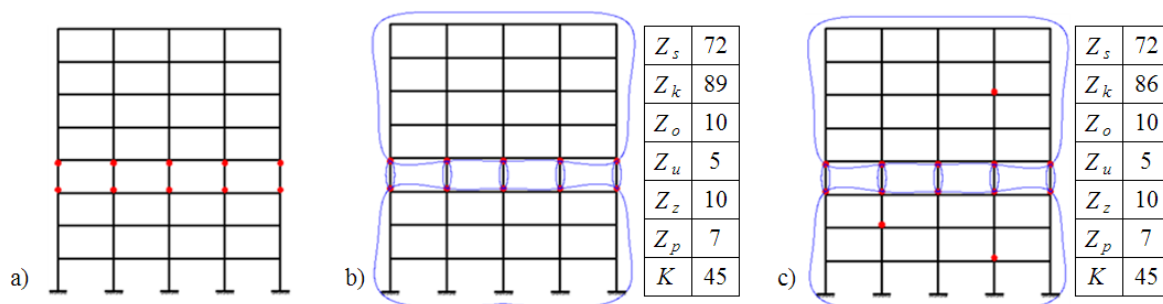
Slika 6. a) mehanizam loma "slabi stubovi – jake grede", b) identifikacija krutih ploča kod mehanizma loma "slabi stubovi – jake grede"

sistema, dok su na slici 6b prikazane identifikovane krute ploče. Svaki stub pojedinačno formira jednu krutu ploču, dok grede jednog sprata formiraju jednu krutu ploču. Kod ovog mehanizma loma je $R_{s,1} = 16$, $R_{s,2} = 9$, $R_{p,1} = 16$ i $R_{p,2} = 9$. U odnosu na prethodni mehanizam loma i mehanizam loma prema CDM metodi, redukovana je spoljašnja i unutrašnja statička neodređenost i kinematička stabilnost. U čvorovima spoljašnjih stubova se spajaju tri štapa. Međutim, pri ovako formiranom mehanizmu loma dva štapa imaju formirane zglobove, a kod čvorova sa tri povezana štapa dovoljno je da dva budu zglobno povezana tako da svi štapovi imaju rotaciju. Pošto su ovako formirani zglobovi po stubovima jedne vertikale na jednom pravcu, tada se može govoriti o kritičnoj konfiguraciji, kod koje je minimalno potrebno da tri zgloba budu na jednom pravcu. Dakle, ovakav mehanizam loma karakteriše kritična konfiguracija sistema.

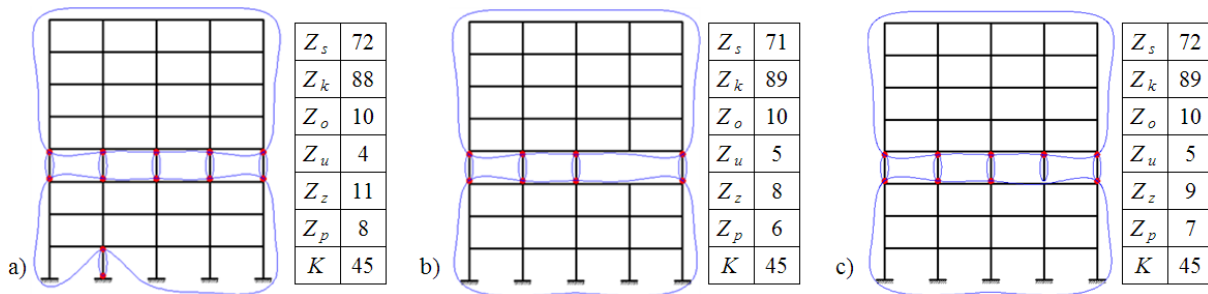
Razvoj mehanizma loma identifikovan kao "meki sprat" (*soft storey*) karakteriše formiranje plastičnih zglobova na stubovima jednog sprata, uz eventualno učešće razvoja plastičnih zglobova u nekim gredama. U ovom slučaju se usled prevelike krutosti gornjih i donjih spratova disipacija histerezisne energije odvija u stubovima kritičnog sprata. Kada se prekorači granična nosivost na savijanje u interakciji sa aksijalnom silom, nastupa kolaps kritičnog sprata, pri čemu spratovi iznad i ispod kritičnog sprata mogu ostati znatno manje oštećeni. U konstrukciji nastupa lokalni kolaps kritičnog "mekog sprata", ali globalna stabilnost ne mora biti dovedena u pitanje. Funkcionalnost i upotrebljivost viših spratova zgrade ne treba dodatno razmatrati, pošto se, između ostalog, fizički prekida veza između spratova iznad i ispod "mekog sprata". Faktori koji utiču na formiranje mehanizma loma "mekog

sprata" mogu biti različiti, a između ostalih se izdvaja prevelika razlika krutosti gornjih i donjih spratova u odnosu na "meki sprat". Na slici 7a je prikazan mehanizam loma identifikovan kao "meki sprat" višespratnog okvirnog sistema, dok su na slici 7b prikazane identifikovane krute ploče. Svaki pojedinačni stub "mekog sprata" formira po jednu krutu ploču, dok spratovi iznad i ispod "mekog sprata" formiraju po jednu krutu ploču. Kod ovog mehanizma loma je $R_{s,1} = 86$, $R_{s,2} = 74$, $R_{p,1} = 14$ i $R_{p,2} = 2$. U odnosu na prethodna dva mehanizma loma i mehanizam loma prema CDM metodi, redukovana je spoljašnja i unutrašnja statička neodređenost i kinematička stabilnost, kada se sistem razmatra da je formiran od štapova. Međutim, statička neodređenost i kinematička stabilnost je znatnije redukovana, kada se sistem razmatra da je formiran od krutih ploča. I pored toga što je sistem unutrašnje kinematički stabilan, ovakvi sistemi su sa nepravilnim rasporedom elemenata. Ukoliko se na spratovima iznad i ispod "mekog sprata" formiraju i dodatni zglobovi, tada se samo redukuje spoljašnja i unutrašnja statička neodređenost i kinematička stabilnost, kada se sistem razmatra da je formiran od štapova. Na slici 7c je prikazan ovakav mehanizam loma kod koga je $R_{s,1} = 83$, $R_{s,2} = 71$, $R_{p,1} = 14$ i $R_{p,2} = 2$.

Dodatno ispitivanje na temu razvoja mehanizma loma identifikovanog kao "meki sprat" sprovedeno je uzimajući u obzir da se u nekim narednim inkrementalnim situacijama dodatno plastifikuju preseki i formiraju zglobovi. Na slici 8a je prikazan mehanizma loma "meki sprat" sa dodatno formiranom nezavisnom krutom pločom u prizemlju, kod koga je $R_{s,1} = 84$, $R_{s,2} = 73$, $R_{p,1} = 12$ i $R_{p,2} = 1$, dok je na slici 8b je prikazan mehanizma loma "meki sprat" sa dodatno eliminisanim stubom "mekog sprata", kod koga je $R_{s,1} = 85$, $R_{s,2} = 73$, $R_{p,1} = 13$ i $R_{p,2} = 1$. Uporednom analizom ovako formiranih mehanizama loma sa mehanizmom loma čistog "mekog sprata", može se konstatovati da je redukovana i spoljašnja i unutrašnja statička neodređenost i kinematička stabilnost sistema. Ukoliko se na jednom stubu "mekog sprata" potpuno eliminiše veza pri plastifikaciji i za momenat savijanja i za transversalnu silu kraja stuba, tada je $R_{s,1} = 86$, $R_{s,2} = 74$, $R_{p,1} = 12$ i $R_{p,2} = 0$ (slika 8c). Broj ploča ovako formiranog mehanizma loma identičan je mehanizmu loma identifikovanog kao "meki sprat", dok je ovakav mehanizam loma unutrašnje kinematički prosto stabilan, kada se sistem razmatra da je formiran od krutih ploča.



Slika 7. a) mehanizam loma identifikovan kao "meki sprat", b) krute ploče kod mehanizma loma identifikovanog kao "meki sprat", c) krute ploče kod mehanizma loma identifikovanog kao "meki sprat" sa dodatno formiranim zglobovima



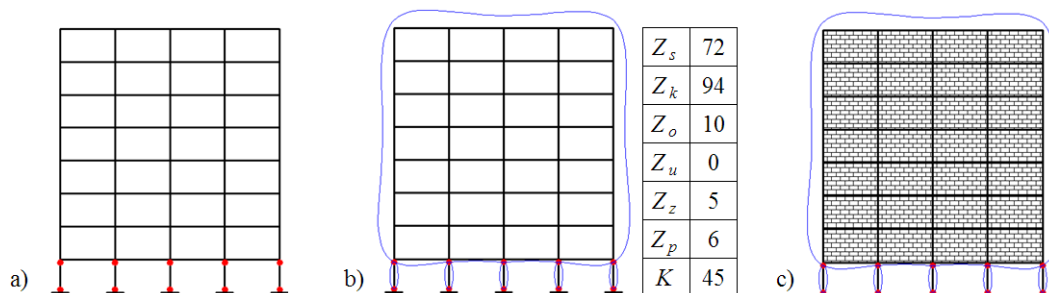
Slika 8. Krute ploče kod mehanizma loma identifikovanog kao “meki sprat”: a) dodatno formirana kruta ploča u prizemlju, b) eliminisan stub “mekog sprata”, c) eliminisana veza jednog stuba “mekog sprata”

Razvoj mehanizma loma identifikovanog kao “fleksibilno prizemlje” karakteriše formiranje plastičnih zglobova na stubovima prizemlja, uz eventualno učešće razvoja plastičnih zglobova u nekim gredama [14]. U ovom slučaju se usled prevelike krutosti viših spratova disipacija histerezisne energije odvija u stubovima kritičnog sprata, slično kao kod mehanizma loma identifikovanog kao “meki sprat”. Tipičani mehanizam loma “fleksibilnog prizemlja” se može sresti kod zgrada kod kojih je u prizemlju fasada od stakla, dok je ispunjena fasadnih zidova viših spratova od pune opeke. Na slici 9a je prikazan mehanizam loma identifikovanog kao “fleksibilno prizemlje”, dok su na slici 9b prikazane identifikovane krute ploče. Svaki pojedinačni stub “fleksibilnog prizemlja” formira po jednu krutu ploču, dok viši spratovi formiraju jednu krutu ploču. Kod ovog mehanizma loma je $R_{s,1} = 86$, $R_{s,2} = 79$, $R_{p,1} = 2$ i $R_{p,2} = -5$. Negativna vrednost parametra $R_{p,2}$ ukazuje na unutrašnju statičku preodređenost i kinematičku labilnost sa pet stepeni slobode pomeranja, kada se sistem razmatra da je formiran od krutih ploča. Iako je sistem spoljašnje statički neodređen, unutrašnja kinematička labilnost ukazuje na potencijalni kolapsni mehanizam loma zgrade.

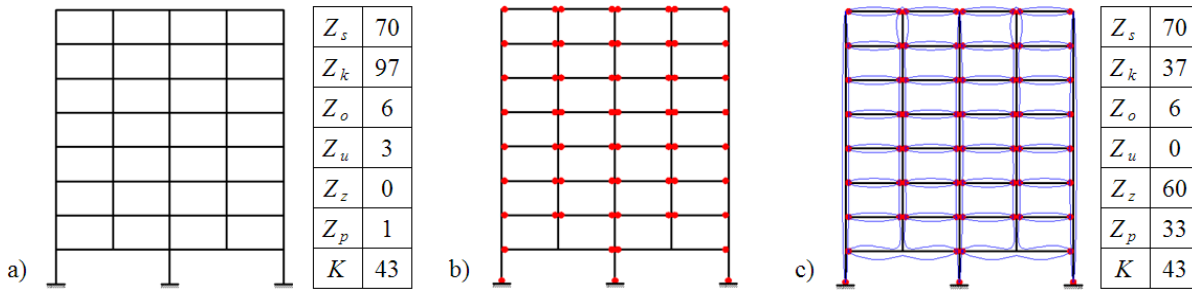
Na slici 9c je dat ilustrativni prikaz razlike u krutosti prizemlja i viših spratova kod mehanizma loma identifikovanog kao “fleksibilno prizemlje”. U klasičnim inženjerskim proračunima se ne računa eksplicitno na krutost ispune pri numeričkom modeliranju zgrada, ali ponašanje ovakvih objekata u uslovima dejstva snažnih zemljotresa ukazuje na mehanizam loma identifikovanog kao “fleksibilno prizemlje”. Pored toga što se kod ovakvih

konstrukcija ne mora uvek dogoditi kolaps, vrednost međuspratnog drifta prizemlja je izuzetno velika, tako da se objekat ne može ni naknadnim sanacionim merama vratiti u prvobitno stanje funkcionalnosti i upotrebljivosti. Cela zgrada se ponaša kao sistem sa jednom masom koncentrisanom u težištu gornjeg dela zgrade [14]. Dobar proračun će pokazati da se vrlo teško mogu ostvariti vrlo veliki zahtevani duktiliteti pri rotaciji krajeva stubova. Čak i da se tako visoki duktiliteti mogu ostvariti, oni dovode do velikih horizontalnih pomeranja, a ovi do uticaja drugog reda izazvanih težinom gornjeg masivnog dela zgrade. Tako se osetljivost zgrade sve više povećava, a oštećenja prizemlja sve više rastu, pa zgrada više ne može da povratu stabilnost i nastupa kolaps.

Razvoj mehanizma loma koji nastaje usled “diskontinuiteta krutosti” karakteriše formiranje plastičnih zglobova na gredama i stubovima prizemlja [14]. Tipičani mehanizam loma “diskontinuiteta krutosti” se može sresti kod zgrada kod kojih se u prizemlju javlja potreba za povećanjem slobodnog prostora na račun redukcije broja stubova. Stub koji nosi težinu gornjih spratova je prekinut u prizemlju i oslonjen na gredu. Nema nikakve sumnje da se takva greda može napraviti dovoljno jakom da prihvati sa sigurnošću sva statička opterećenja. Međutim, kada je u pitanju zemljotres, situacija postaje mnogo nesigurnija. Dodatne aksijalne sile u stubu, izazvane seizmičkim uticajima, mogu vrlo lako preopteretiti gredu koja ga nosi i dovesti do neželjenih posledica. Uticaj vertikalne komponente ubrzanja, koja se obično zanemaruje, ovde može biti vrlo značajna. Na slici 10a je prikazan višespratni okvirni sistem sa diskontinuitetom



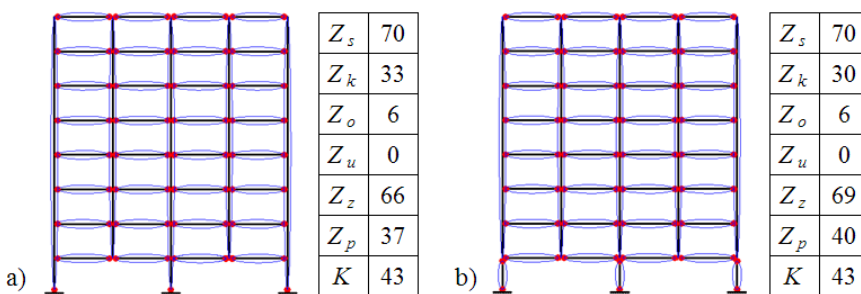
Slika 9. a) mehanizam loma identifikovanog kao “fleksibilno prizemlje”, b) krute ploče kod mehanizma loma identifikovanog kao “fleksibilno prizemlje”, c) ilustrativni prikaz razlike u krutosti prizemlja i viših spratova kod mehanizma loma identifikovanog kao “fleksibilno prizemlje”



Slika 10. a) višespratni okvirni sistem sa diskontinuitetom krutosti, b) mehanizam loma formiran prema CDM metodi, c) identifikacija krutih ploča kod mehanizma loma formiranog prema CDM metodi

krutosti kod koga je $R_{s,1} = 90$, $R_{s,2} = 84$, $R_{p,1} = 6$ i $R_{p,2} = 0$. Razmatrajući ovaj sistem formiran od štapova može se konstatovati da je spoljašnje i unutrašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan, a razmatrajući ga preko ploča sistem je spoljašnje kinematički višestruko stabilan i unutrašnje prosto stabilan. Poželjan (optimalan) mehanizam loma ovog sistema, prema CDM metodi, prikazan je na slici 10b. U ovom slučaju omogućena je plastifikacija krajeva greda, osim krajeva greda u prizemlju gde su ukinutu stubovi. Takođe, omogućena je plastifikacija krajeva stubova samo na mestima uklještenja. Svaka greda pojedinačno formira jednu krutu ploču, dok stubovi jedne vertikale formiraju jednu krutu ploču (slika 10c). Grede prizemlja i stubovi vertikale, na mestu gde su ukinutu stubovi prizemlja, formiraju po jednu krutu ploču. Kod ovakvog sistema je $R_{s,1} = 27$, $R_{s,2} = 24$, $R_{p,1} = 27$ i $R_{p,2} = 24$. Razmatrajući ovaj sistem formiran od štapova ili ploča može se konstatovati da je spoljašnje i unutrašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan. U odnosu na inicijalni sistem, kod mehanizma loma prema CDM metodi redukovana je broj spoljašnje i unutrašnje statičke neodređenosti.

Dodatno ispitivanje na temu razvoja mehanizma loma, koji nastaje usled “diskontinuiteta krutosti”, sprovedeno je uzimajući u obzir da se u nekim narednim inkrementalnim situacijama dodatno plastifikuju preseči i formiraju zglobovi. Na slici 11a je prikazan mehanizam loma koji nastaje usled “diskontinuiteta krutosti” sa dodatno formiranim plastičnim zglobovima u gredama prizemlja, kod koga je $R_{s,1} = 23$, $R_{s,2} = 20$, $R_{p,1} = 27$ i $R_{p,2} = 24$, dok je na slici 11b je prikazan ovaj mehanizam loma

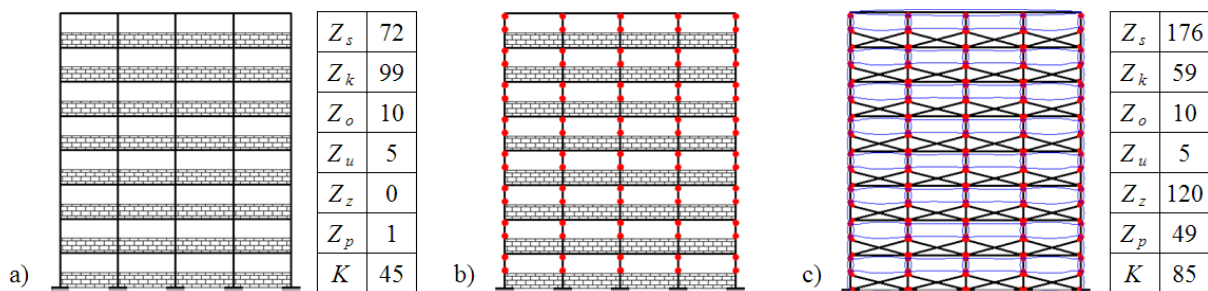


Slika 11. Krute ploče kod mehanizma loma koji nastaje usled “diskontinuiteta krutosti”, a) definisane prema CDM metodi: a) dodatno formirani plastični zglobovi u gredama prizemlja, b) dodatno formirani plastični zglobovi u gredama i stubovima prizemlja

sa dodatno dodatno formiranim plastičnim zglobovima u gredama i stubovima prizemlja, kod koga je $R_{s,1} = 20$, $R_{s,2} = 17$, $R_{p,1} = 24$ i $R_{p,2} = 21$. Uporednom analizom ovako formiranih mehanizama loma sa mehanizmom loma koji nastaje usled “diskontinuiteta krutosti”, može se konstatovati da je redukovana i spoljašnja i unutrašnja statička neodređenost i kinematička stabilnost sistema. Sistemi sa ovako formiranim mehanizmima loma ukazuju na statičku neodređenost i kinematičku stabilnost, ali su njihove konfiguracije veoma bliske kolapsnim stanjima. Ukoliko ne ukazuju direktno na kolapsno stanje, onda mogu ukazivati na stanja veoma blisko kolapsnom stanju.

Razvoj mehanizma loma koji nastaje usled uticaja krutog parapeta, na primer, od betonskih blokova u cementnom malteru ili jakom produžnom malteru, karakteriše formiranje plastičnih zglobova na stubovima spratova [14]. Ovakvi zidovi skraćuju stubove pretvarajući ih u toliko nepoželjne kratke stubove izložene velikim transverzalnima silama koje oni ne mogu da prime. Na slici 12a je prikazan višespratni okvirni sistem sa krutim parapetom kod koga je $R_{s,1} = 96$, $R_{s,2} = 84$, $R_{p,1} = 12$ i $R_{p,2} = 0$. Pri numeričkom modeliranju konstrukcija parapet se ne uvodi direktno u numerički model, niti se na njega računa prilikom dimenzionisanja stubova i greda. Tako se i prilikom određivanja statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti računalo samo na čist okvirni sistem. Međutim, ukoliko se uvede uticaj krutog parapeta pri analizi statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti, tada mehanizam loma izgleda kao na slici 12b. Usled velike krutosti parapeta na krajevima stubova se formiraju plastični zglobovi, dok se parapet, greda i deo stubova do visine parapeta ponaša kao kruta ploča.

Uvođenje zidane ispune pri modeliranju i proračunu konstrukcija može se sprovesti primenom “X” dijagonala, mada u ovom slučaju ovakav princip modeliranja nije baš najadekvatniji, ali se prikazuje radi analize statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti. Dijagonale, kojima se uvodi uticaj parapeta, su povezane zglobnim vezama sa ostalim čvorovima okvira, ali nisu međusobno povezane. Svaki kratki stub pojedinačno



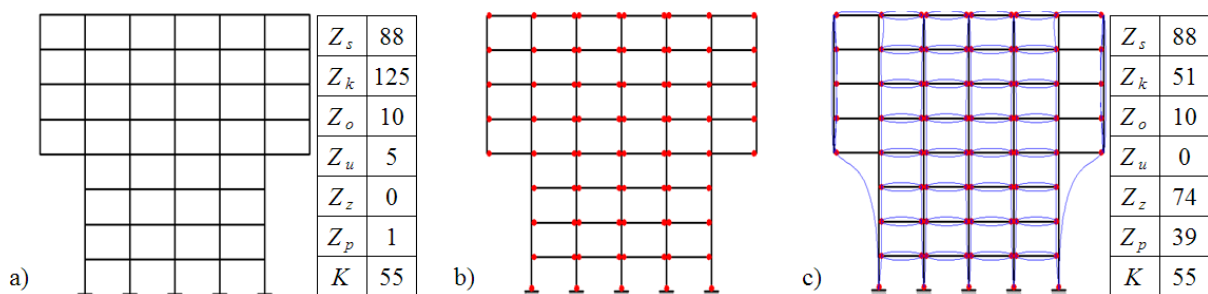
Slika 12. a) višespratni okvirni sistem sa parapetom, b) mehanizam loma višespratnog okvirnog sistema sa krutim parapetom, c) identifikacija krutih ploča i kratkih stubova kod mehanizma loma višespratnog okvirnog sistema sa krutim parapetom

formira jednu krutu ploču, dok grede, “X” dijagonale i stubovi jednog sprata do visine parapeta formiraju krutu ploču (slika 12c). Kod ovakvog sistema je $R_{s,1} = 80$, $R_{s,2} = 60$, $R_{p,1} = 108$ i $R_{p,2} = 96$. Razmatrajući ovaj sistem formiran od štapova ili ploča može se konstatovati da je spoljašnje i unutrašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan. Međutim, kratki stubovi svakog sprata formiraju mehanizam loma identičan mehanizmu loma koji je identifikovan kao “meki sprat”, a za koji važi da je sistem sa nepravilnim rasporedom elemenata. Ukoliko se ne uvode zamenjujuće “X” dijagonale, već se računa baš sa parapetom, tada je smanjena unutrašnja kinematička stabilnost sistema na $R_{p,2} = 16$.

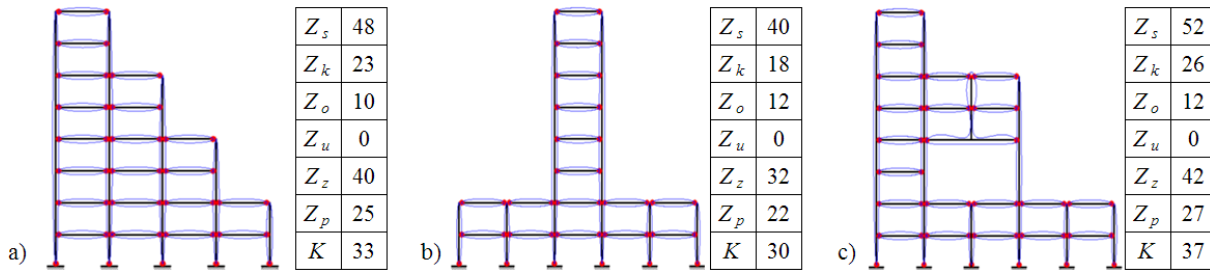
Savremene arhitektonske forme zgrada često ističu neregularnost, kako u osnovi tako i po visini, pri čemu je jedan takav višespratni okvirni sistem sa konzolnim delovima u višim spratovima prikazan na slici 13a, kod koga je $R_{s,1} = 118$, $R_{s,2} = 106$, $R_{p,1} = 12$ i $R_{p,2} = 0$. Opšti princip konstruisanja zgrada je da nije poželjno smanjenje krutosti po visini, pošto stalno povećanje prepusta čini zgradu znatno osetljivijom na oscilovanje, nego što je to slučaj kod prizmatičnih zgrada [14]. Međutim, ukoliko se ovakve zgrade i projektuju, onda se i uticaj vertikalne komponente ubrzanja mora uzeti u obzir. Ploče konzolnih delova su, pored savijanja dodatno opterećene i na membranske sile (zatezanje u gornjim pločama, a pritisak u donjim pločama), pa je adekvatnije ovakve ploče modelirati kao ljuske. Poželjan (optimalan) mehanizam loma ovog sistema, prema CDM metodi, prikazan je na slici 13b. U ovom slučaju omogućena je plastifikacija svih krajeva greda, osim kod greda konzolnih delova koje su povezane sa stubovima koji polaze od ukļešte-

nja. Takođe, omogućena i plastifikacija stubova samo na mestima uklještenja. Svaka greda pojedinačno formira jednu krutu ploču, dok unutrašnji stubovi jedne vertikalne formiraju jednu krutu ploču (slika 13c). Ivični stubovi zajedno sa gredama konzolnih delova formiraju po jednu krutu ploču, tako da je kod ovakvog mehanizma loma $R_{s,1} = 39$, $R_{s,2} = 32$, $R_{p,1} = 41$ i $R_{p,2} = 34$. Razmatrajući ovaj sistem formiran od štapova ili ploča može se konstatovati da je spoljašnje i unutrašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan. U odnosu na inicijalni sistem, kod mehanizma loma prema CDM metodi redukovana je broj spoljašnje i unutrašnje statičke neodređenosti, ali je povećan broj spoljašnje i unutrašnje kinematičke stabilnosti, pošto se na sistemu formira veliki broj plastičnih zglobova. Na taj način se kontrolisanim razvojem nelinearnih deformacija na sistemu sprečava da isti dođe u stanje potpunog kolapsa.

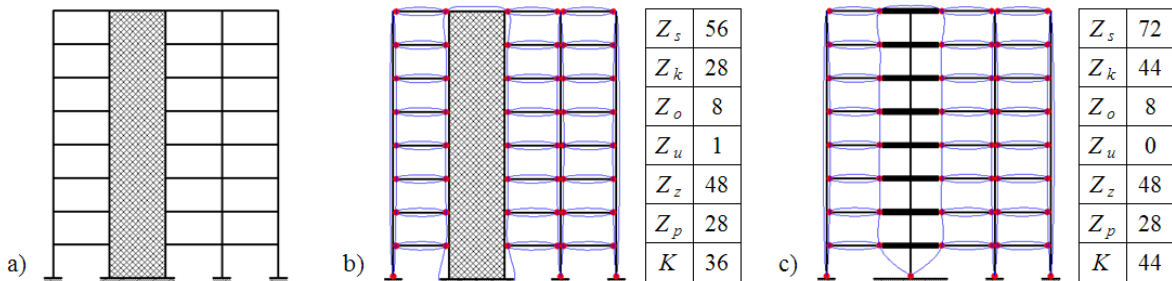
Sažimanje zgrade po visini treba da bude u okviru preporuka koje su definisane propisima, pošto svaka nesimetrična promena po visini dovodi do neželjenih torzionih momenata. Mehanizmi loma kod zgrada koje su neregularne po visini su znatno kompleksniji, u odnosu na zgrade bez nagle promene krutosti i masa. Na slici 14a je prikazan višespratni okvirni sistem kod koga postoji sažimanje po visini, pri čemu je $R_{s,1} = 15$, $R_{s,2} = 8$, $R_{p,1} = 15$ i $R_{p,2} = 8$. U odnosu na ovaj model zgrade, gde je izvršeno postepeno sažimanje po visini, kod modela prikazanog na slici 14b napravljen je nagli prelaz od nižih ka jednom visokom centralnom segmentu zgrade, kod koga je $R_{s,1} = 10$, $R_{s,2} = 1$, $R_{p,1} = 10$ i $R_{p,2} = 1$. Razmatrajući ovaj sistem formiran od štapova ili ploča može se konstatovati da je spoljašnje i unutrašnje statički neodređen



Slika 13. a) višespratni okvirni sistem sa konzolnim delom, b) mehanizam loma formiran prema CDM metodi, c) identifikacija krutih ploča kod mehanizma loma formiranog prema CDM metodi



Slika 14. a) mehanizam loma višespratnog okvirnog sistema sa postepenim sažimanjem spratova po visini formiran prema CDM metodi, b) mehanizam loma višespratnog okvira sa naglim prelazom od nižih ka jednom visokom centralnom segmentu zgrade formiran prema CDM metodi, c) mehanizam loma višespratnog okvira neregularnog po visini i koji ima prekid stubova na dva sprata formiran prema CDM metodi



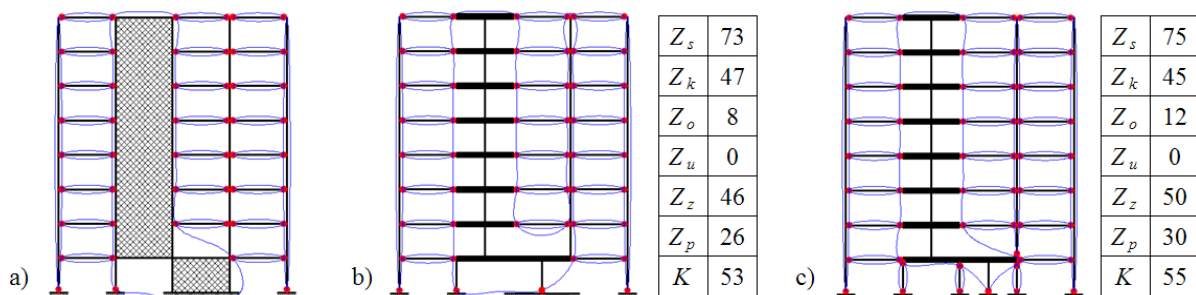
Slika 15. a) višespratni okvirni sistem ukrućen vertikalnim armiranobetonskim zidom, b) identifikacija krutih ploča kod mehanizma loma formiranog prema CDM metodi, c) identifikacija krutih ploča kod mehanizma loma formiranog prema CDM metodi za slučaj da se vertikalni armiranobetonski zid razmatra preko niza linijskih vertikalnih štapova

i kinematički višestruko stabilan. Međutim, broj unutrašnje kinematičke stabilnosti je nizak, tako da se prelazak u kolapsni mehanizam loma može očekivati uzimajući u obzir stohastičko dejstvo zemljotresa. U ovom slučaju je preporučljivo da se, usled razlike krutosti i nejednakog sleganja, zgrada dilatira (razdvoji na dva dela). Sa druge strane, dilatacionu razdelnicu mora biti dovoljno široka da bi se izbeglo međusobno sudaranje zgrada i sprečilo formiranje novih mehanizama loma, a na koje se nije ni računalo u fazi proračuna i dimenzionisanja. Treći model višespratnog okvira, koji je neregularan po visini i ima prekid stubova na dva sprata, prikazan je na slici 14c. Kod ovog okvira je $R_{s,1} = 16$, $R_{s,2} = 7$, $R_{p,1} = 15$ i $R_{p,2} = 6$. Razmatrajući ovaj sistem formiran od štapova ili ploča može se konstatovati da je spoljašnje i unutrašnje statički neodređen i kinematički višestruko stabilan. Međutim kritičan mehanizma loma, za deo konstrukcije od drugog sprata ka višim spratovima, bi bio da se formiraju dodatni plastični zglobovi dvospratnog stuba i grede koja nosi stubove četvrtog i petog sprata.

Prethodno su prikazani i razmatrani modeli okvirnih zgrada, ali u zavisnosti od konstruktivnog i arhitektonskog rešenja zgrade se dodatno ukrućuju vertikalnim armiranobetonskim zidovima. Na slici 15a je prikazan model višespratnog okvira ukrućen armiranobetonskim vertikalnim zidom koji je višestruko statički neodređen i kinematički stabilan, dok su na slici 15b prikazane identifikovane krute ploče i mehanizam loma formiran prema CDM metodi, kod koga je $R_{s,1} = 21$, $R_{s,2} = 15$, $R_{p,1} = 21$ i $R_{p,2} = 15$. Grede pojedinačno formiraju po jednu krutu ploču, dok stubovi svake vertikale formiraju po jednu

krutu ploču. Vertikalni armiranobetonski zid se može razmatrati, takođe, kao kruta ploča. Međutim, pošto se najveći deo lateralnog seizmičkog opterećenja prima vertikalnim armiranobetonskim zidom, a koji "radi" na savijanje, to se kod ovog zida može računati na formiranje plastičnog zgloba na mestu uklještenja. Sa druge strane, vertikalni armiranobetonski zid je površinski nosač koji je dominantno opterećen membranskim silama, ali se može aproksimirati nizom linijskih vertikalnih štapova koji su preko krutih elemenata spojeni za okvirni sistem. U ovom slučaju takođe se može računati da se ceo vertikalni armiranobetonski zid ponaša kao kruta ploča, samo što je sada zglobno povezan za nepokretni oslonac. Na slici 15c je prikazan višespratni okvirni sistem ukrućen vertikalnim armiranobetonskim zidom sa identifikovanim krutom pločama i mehanizmom loma formiranim prema CDM metodi, kod koga je $R_{s,1} = 36$, $R_{s,2} = 31$, $R_{p,1} = 20$ i $R_{p,2} = 15$. Broj unutrašnje kinematičke stabilnosti, kada se sistem razmatra preko krutih ploča, je ostao nepromenjen, ali je broj povećan, u slučaju razmatranja sistema preko štapova.

Primer diskontinuiteta krutosti kod zgrada ukrućenih vertikalnim armiranobetonskim zidovima može se sresti pri izmeštanju ovih zidova u prizemlju ili podrumu [14]. Opšta krutost zgrade ovim nije bitno promenjena, jer je najniži deo zida samo izmešten. Na slici 16a su prikazane identifikovane krute ploče mehanizma loma formiranog prema CDM metodi, vertikalnog armiranobetonskog zida sa izmeštenom delom zida u prizemlju. Model vertikalnog armiranobetonskog zida aproksimiranog linijskim vertikalnim štapovima, koji su preko krutih



Slika 16. a) identifikacija krutih ploča mehanizma loma formiranog prema CDM metodi kod višespratnog okvirnog sistema ukručenog vertikalnim armiranobetonskim zidom sa izmeštenim delom zida u prizemlju, b) identifikacija krutih ploča kod mehanizma loma formiranog prema CDM metodi za slučaj da se vertikalni armiranobetonski zid razmatra preko niza linijskih vertikalnih štapova, c) korekcija krutih ploča kod mehanizma loma formiranog prema CDM metodi za slučaj da se vertikalni armiranobetonski zid razmatra preko niza linijskih vertikalnih štapova

elementa spojeni za okvirni sistem, je prikazan na slici 16b, kod koga je $R_{s,1} = 22$, $R_{s,2} = 17$, $R_{p,1} = 22$ i $R_{p,2} = 17$. Transverzalna sila sa viših delova zida se može lako preneti na niži izmešteni deo zida. Međutim, momenat savijanja, koji zid ima na nivou izmeštaja, ne može se preneti na izmešteni zid, već se mora primiti spregom aksijalnih sila u stubovima na koje se zid oslanja. Ove sile mogu biti vrlo velike, pa mogu dovesti do nedozvoljenih napona pritiska u stubu uz opasnost od krugog loma. Sa druge strane, armatura u ovim stubovima može biti vrlo velika i zbog velikih zatežućih sila. Deformacioni rad aksijalnih sila u stubovima, ovde obično nije zanemarljiv, što dovodi do rotacija gornjeg dela zida kao krutog tela, a time i do smanjenja njegove krutosti. Na taj način se umanjuje ukupna efikasnost zida uz povećani opšti rizik, jer su kritično opterećeni stubovi koji i inače predstavljaju najosetljiviji deo konstrukcije. Iz prethodno navedenih razloga model zida je dodatno korigovan i prikazan na slici 16c, tako da je sada $R_{s,1} = 22$, $R_{s,2} = 13$, $R_{p,1} = 22$ i $R_{p,2} = 13$. Dodatno su modelirani stubovi kod zida u prizemlju, iako je kod prethodnog modela zamenjen zid jednim vertikalnim štapom, pošto se u velikom broju slučajeva ovi zidovi projektuju sa poprečnim presekom oblika slova "I". Dakle, sada je smanjena unutrašnja kinematička stabilnost konstrukcije, uzimajući u obzir sva prethodna razmatranja koja se javljaju kod ovakvog problema. Takođe, uvedeni su plastični zglobovi stubova prizemlja u okolini zida koji je izmešten, jer će se, kao što je već objašnjeno, ovi stubovi zasigurno plastifikovati pri snažnom seizmičkom dejstvu.

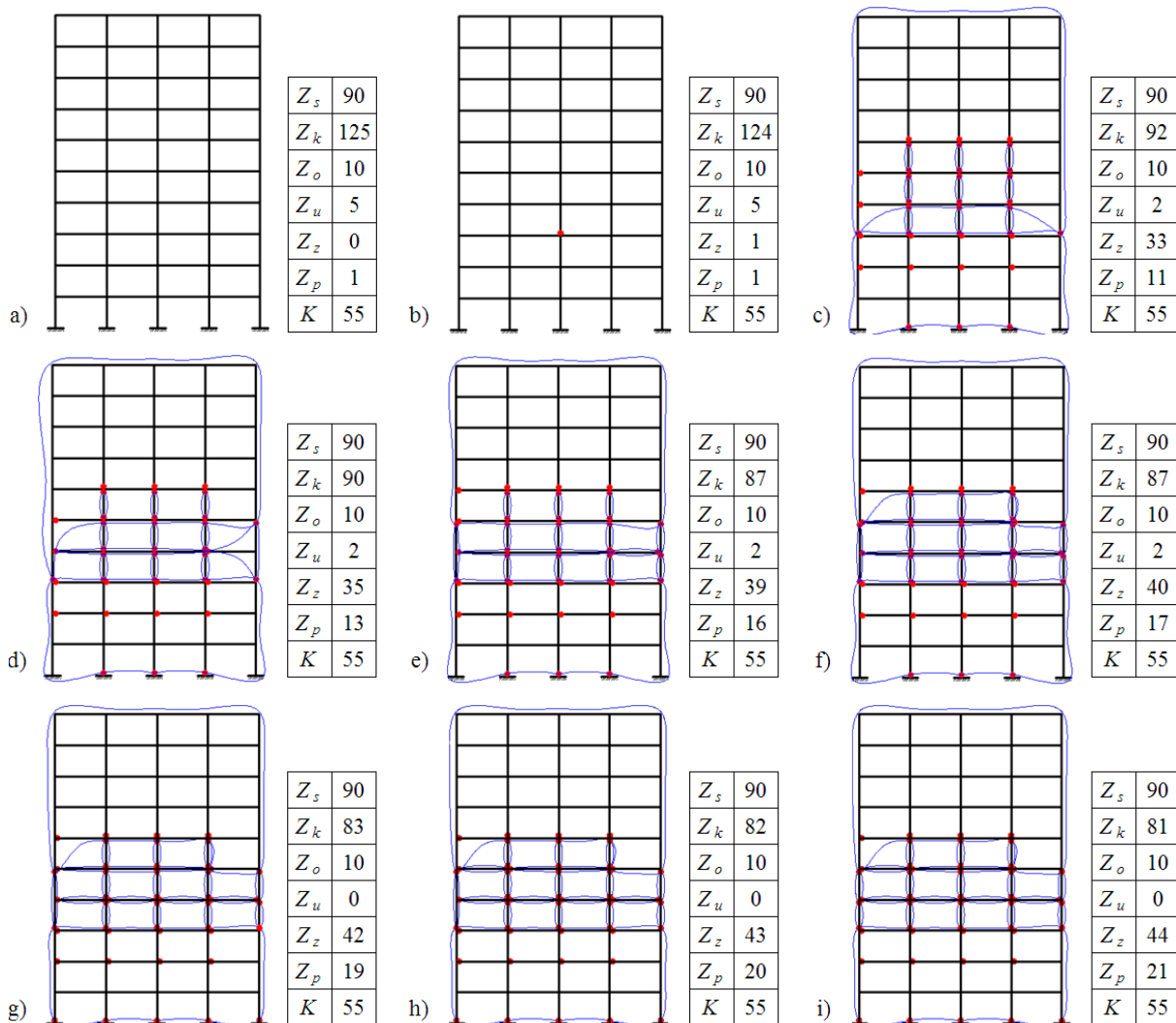
5. ANALIZA SLOŽENIH MEHANIZAMA LOMA ZGRADA

U odnosu na prethodno prikazane mehanizme loma zgrada koji su klasifikovani u grupe identifikujući njihove fenomene nastanka, kod zgrada se mogu razviti složeni mehanizmi loma. Ovi mehanizmi loma se formiraju iz dva ili više jednostavnijih mehanizama loma koji ne moraju uvek da se razviju prema CDM metodi. Zgrade bi trebalo da se i projektuju prema optimalnom mehanizmu loma, a koji je definisan CDM metodom, međutim praksa pokazuje da zgrade mogu razviti mehanizam loma

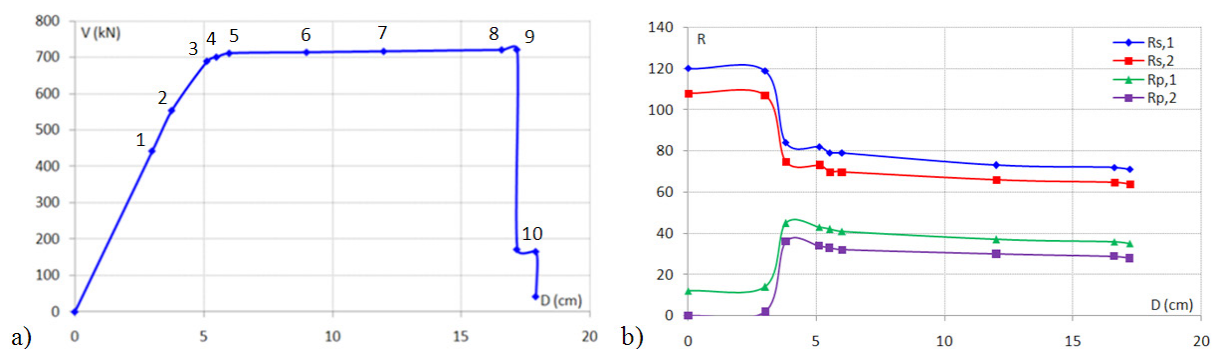
koji značajno odstupa od optimalnog. Dakle, treba praviti razliku između mehanizma loma na koji se konstrukcija proračunava prema propisima i realizovanog mehanizma loma koji se dokazuje NSPA ili NDA analizom. Broj mogućih kombinovanih mehanizama loma zgrada može biti znatan, pa je potrebno voditi računa o odnosu rada unutrašnjih i spoljašnjih sila.

U cilju identifikacije, monitoringa i analize složenih mehanizama loma, sprovedena je NSPA analiza višespratnog okvira kog koga se plastični zglobovi mogu formirati na krajevima svih štapova za simulaciju opšteg mehanizma loma. Na slici 17 su prikazani razvijeni mehanizmi loma za određene nivoe pomeranja D po fazama inkrementalnog priraštaja lateralnog seizmičkog opterećenja. Razmatrajući sve mehanizme loma identifikovan je veći broj jednostavnijih mehanizama loma, međutim povećanjem nivoa nelinearnog pomeranja postepeno se razvija spratni mehanizam loma. Ovaj mehanizam loma je zapravo smičući mehanizam loma trećeg i četvrtog sprata, kod koga se formiraju plastični zglobovi na krajevima svih greda i svih stubova ovih spratova. Sličan mehanizam loma "meki sprat" je prethodno objašnjen, s tim što se u ovom slučaju dodatno formiraju i nepotpuni mehanizmi loma. Razvojem smičućeg mehanizma loma kolaps zgrade je neizbežan, mada ne mora uvek nastupiti potpun kolaps zgrade, već samo određenih spratova. Na slici 18a je prikazana NSPA *pushover* kriva i odgovarajuće inkrementalne proračunske situacije $I_1^d D_p V_i^{\dot{n}}$, dok su na slici 18b prikazane krive proračunatih $R_{s,1}$, $R_{s,2}$, $R_{p,1}$ i $R_{p,2}$ parametara. Ove krive su određene u funkciji nelinearnog pomeranja D , tako da se lako može pratiti promena ovih koeficijenata prema inkrementalnim proračunskim situacijama $I_1^d D_p V_i^{\dot{n}}$.

Prelaskom u nelinearan domen sistem naglo gubi spoljašnju i unutrašnju statičku neodređenost, razmatrajući ga preko štapova. Trend opadanja parametara $R_{s,1}$ i $R_{s,2}$ se dalje nastavlja, ali znatno blaže, sve do nivoa pomeranja $D = 17.6\text{cm}$. Na NSPA *pushover* krivi se pri ovom nivou pomeranja identifikuje nagla redukcija kapaciteta nosivosti sistema, pri čemu sistemu preostaje rezidualna nosivost. Ovakva nagla redukcija kapaciteta nosivosti i identifikacija rezidualne nosivosti ukazuje na kolapsno



Slika 17. a) inkrementalni priraštaj 1, $D = 3\text{cm}$, b) inkrementalni priraštaj 2, $D = 3.8\text{cm}$, c) inkrementalni priraštaj 3, $D = 5.1\text{cm}$, d) inkrementalni priraštaj 4, $D = 5.5\text{cm}$, e) inkrementalni priraštaj 5, $D = 6\text{cm}$, f) inkrementalni priraštaj 7, $D = 12\text{cm}$, g) inkrementalni priraštaj 8, $D = 16.6\text{cm}$, h) inkrementalni priraštaj 9, $D = 17.2\text{cm}$, i) inkrementalni priraštaj 10, $D = 17.2\text{cm}$



Slika 18. a) NSPA pushover kriva, b) krive $R_s,1$, $R_s,2$, $R_p,1$ i $R_p,2$ parametara

ponašanje. Sa druge strane, na sistemu nije potpuno redukovana statička neodređenost, a takođe i unutrašnja i spoljašnja kinematička stabilnost su relativno visoke. Smičućim mehanizmom loma trećeg i četvrtog sprata zgrada je dovedena u stanje kolapsa, ali ne potpunog, već kolapsa od trećeg do najvišeg sprata. Uzimajući u obzir

ovakvu analizu sistema preko mehanizama loma, može se napraviti strategija potrebnih mera za sanaciju zgrade ili se doneti odluka o potpunom rušenju zgrade. Jedna od opcija bi bila i da se ukolne spratovi od trećeg ka višim i da se niži spratovi saniraju. Utvrđivanje stanja ovih nižih spratova se može sprovesti NSPA analizom, s'tim što bi

kontrolni čvor za monitoring nelinearnih deformacija bio na trećem spratu. Ovakvom novom analizom bi se mogao uzeti u obzir i uticaj postojećeg mehanizma loma prva tri sprata, kako bi se što kvalitetnije opisao nelinearan model ponašanja oštećene zgrade.

U cilju identifikacije i analize složenih mehanizama loma, sprovedena je komparacija višespratnog okvira čiji je mehanizam loma modeliran na četiri različita načina:

– I – plastični zglobovi se mogu formirati na krajevima svih štapova u cilju simulacije opšteg mehanizma loma,

– II – plastični zglobovi se mogu formirati na krajevima greda i na krajevima stubova na mestima uklještenja u cilju simulacije optimalnog mehanizma loma prema CDM metodi,

– III – plastični zglobovi se mogu formirati na krajevima greda u cilju simulacije mehanizma loma “jaki stubovi – slabe grede”,

– IV – plastični zglobovi se mogu formirati na krajevima stubova u cilju simulacije mehanizma loma “slabi stubovi – jake grede”.

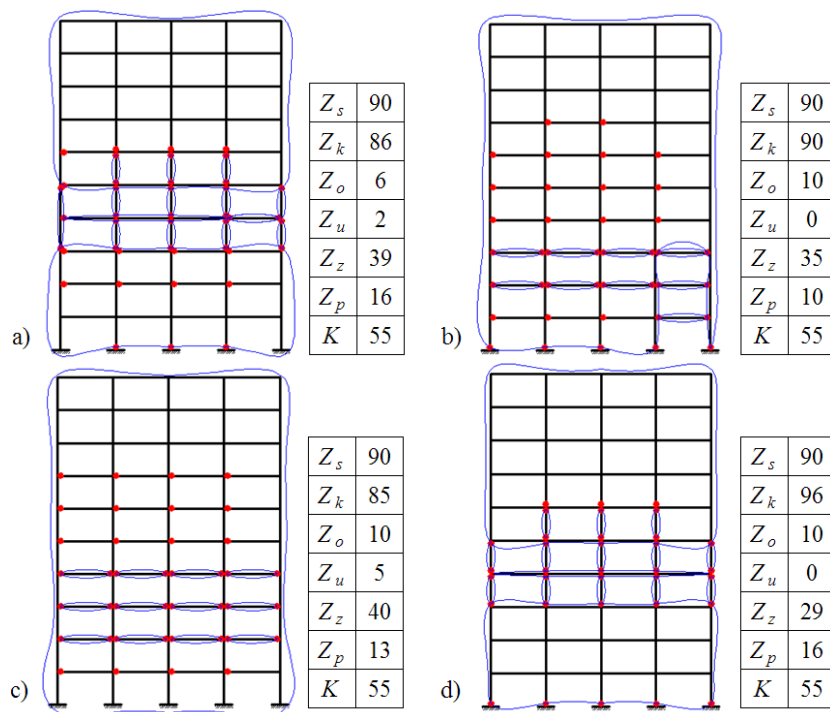
Sprovedene su NSPA analize za svaki okvir pojedinačno, a zatim su razmatrane nelinearne deformacije za vrednost drifta $DR = 0.5\%$. Pošto su svi okviri nelinearno deformisani do istog nivoa drifta, moguće je sprovesti komparaciju mehanizama loma. Na slici 19 su prikazani formirani mehanizmi loma pri nivou drifta $DR = 0.5\%$

za sve razmatrane aspekte modeliranja plastifikacije. Odgovarajuće vrednosti parametara statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti su: $R_{s,1} = 74$, $R_{s,2} = 69$, $R_{p,1} = 38$ i $R_{p,2} = 33$ za model I, $R_{s,1} = 80$, $R_{s,2} = 73$, $R_{p,1} = 50$ i $R_{p,2} = 43$ za model II, $R_{s,1} = 80$, $R_{s,2} = 68$, $R_{p,1} = 56$ i $R_{p,2} = 44$ za model III i $R_{s,1} = 86$, $R_{s,2} = 79$, $R_{p,1} = 20$ i $R_{p,2} = 13$ za model IV. Najniža vrednost parametra $R_{s,1} = 74$ je realizovana kod modela I, a što ukazuje na to da se, pri dozvoljenom formiranju mehanizma loma po svim gredama i stubovima, dobija najniža spoljašnja statička neodređenost sistema, kada se sistem razmatra preko štapova. Najniže vrednosti parametara $R_{p,1} = 20$ i $R_{p,2} = 13$ su realizovane kod modela IV, a što ukazuje na to da se, pri formiranju mehanizma loma “slabi stubovi – jake grede”, dobija najniža spoljašnja u unutrašnja statička neodređenost i kinematička stabilnost sistema, kada se sistem razmatra preko krutih ploča. Sa druge strane, kod ovog mehanizma loma sistema spoljašnja statička neodređenost, kada se sistem razmatra preko štapova, je najveća, u odnosu na sve ostale mehanizme loma. Najveća vrednost parametra $R_{p,2} = 44$ je realizovana kod dozvoljenog formiranja mehanizma loma po svim gredama, dok je re-

alizovana nešto niža vrednost ovog parametra $R_{p,2} = 43$ kod dozvoljenog mehanizma loma prema CDM metodi. Ovakvu razliku je i realno moguće očekivati, pošto se kod dozvoljenog mehanizma loma prema CDM metodi mogu formirati dodatno i plastični zglobovi na krajevima stubova na mestima uklještenja.

6. ZAKLJUČAK

Koncept analize mehanizama loma zgrada, prikazan u ovom radu, bazira se na razmatranju statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti. Numerički modeli zgrada se kreiraju tako da se plastifikacija odvija u plastičnim zglobovima, dok se proračun konstrukcije sprovodi primenom NSPA ili NDA analize. Formiran mehanizam loma se razmatra za jednu inkrementalnu nelinearnu situaciju. Istraživanje je sprovedeno modelirajući mehanizme loma koji se uobičajeno javljaju kod zgrada izloženih dejstvu zemljotresa, a zatim identifikujući krute ploče na sistemu. Generalni zaključak o promeni statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti sistema koji je nelinearno deformisan nije moguće izvesti, pošto je svaki slučaj mehanizma loma “problem” za sebe. Kod određenih mehanizama loma, kao što je “fleksibilno prizemlje”, utvrđivanjem unutrašnje kinematičke stabilnosti može se veoma pouzdano pokazati da je to baš kolapsni mehanizam loma. Takođe, primenom ovako razmatranog



Slika 19. Formirani mehanizmi loma pri nivou drifta $DR = 0.5\%$ za modele: a) I – plastični zglobovi se mogu formirati na krajevima svih štapova u cilju simulacije opšteg mehanizma loma, b) II – plastični zglobovi se mogu formirati na krajevima greda i na krajevima stubova na mestima uklještenja u cilju simulacije optimalnog mehanizma loma prema CDM metodi, c) III – plastični zglobovi se mogu formirati na krajevima greda u cilju simulacije mehanizma loma “jaki stubovi – slabe grede”, d) IV – plastični zglobovi se mogu formirati na krajevima stubova u cilju simulacije mehanizma loma “slabi stubovi – jake grede”

postupka moguće je sprovesti monitoring mehanizama loma zgrada koje su izložene dejstvu zemljotresa. Kritičan mehanizam loma sistema može nastupiti i kada nije iscrpljena statička neodređenost, niti kinematička stabilnost, a što se pokazalo kod visokih zgrada. U ovom slučaju se može dogoditi mehanizam loma koji izaziva parcijalni, ali ne i uvek totalni kolaps zgrade.

Zahvalnost

Rad je urađen u okviru projekta TR 36043 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoje R. Srbije, na čemu se drugi autor posebno zahvaljuje.

Literatura

- [1] Adam C., Jager C.: Dynamic Instabilities of Simple Inelastic Structures Subjected to Earthquake Excitation, *Advanced Dynamics and Model-Based Control of Structures and Machines*, Springer, pp. 11-18, 2012.
- [2] Adam C., Jager C.: Seismic Induced Global Collapse of Non-deteriorating Frame Structures, M. Papdrakakis et al. (eds.): *Computational Methods in Earthquake Engineering*, Springer, pp. 21-40, 2012.
- [3] Ćosić M., Brčić S.: The Development of Controlled Damage Mechanisms-Based Design Method for Nonlinear Static Pushover Analysis, *Facta Universitatis (u postupku publikovanja)*, 2014.
- [4] Dinh T., Ichinose T., Marubashi N.: Collapse Control of Irregular Wall Buildings Using Story-Safety Factor, *The 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1340, Vancouver, Canada, pp. 1-14, 2004.
- [5] Đorđević R.: *Statika konstrukcija*, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 1998.
- [6] Eurocode 2, *Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2003.
- [7] Eurocode 8, *Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [8] Ghobarah A., Abou-Elfath H., Biddah A.: *Response-Based Damage Assessment of Structures*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, Iss. 1, pp. 79-104, 1999.
- [9] Jeong S., Elnashai A.: Analytical and Experimental Seismic Assessment of Irregular RC Buildings, *The 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 113, Vancouver, Canada, pp. 1-15, 2004.
- [10] Krishnan S., Muto M.: Mechanism of Collapse of Tall Steel Moment Frame Buildings Under Earthquake Excitation, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 138, Iss. 11, pp. 1361-1387, 2012.
- [11] Ladjinovic Dj., Folic R.: Application of Improved Damage Index for Designing of Earthquake Resistant Structures, *The 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 2135, Vancouver, Canada, pp. 1-15, 2004.
- [12] Lieping Y., Zhe Q.: Failure Mechanism and Its Control of Building Structures Under Earthquakes Based on Structural System Concept, *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 3, Iss. 4, pp. 249-259, 2009.
- [13] Paulay T., Priestley M.: *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1992.
- [14] Petrović B.: *Odabrana poglavlja iz zemljotresnog građevinarstva*, Građevinska knjiga, Beograd, Srbija, 1989.
- [15] Qu Z., Ye L., Wada A.: Seismic Damage Mechanism Control of RC Ductile Frames From a Stiffness Point of View, *The 8th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, pp. 1-5, 2011.
- [16] Takada T., Nakano T.: Seismic Load Effect Directly Linked to Specified Collapse Mechanisms in Ultimate Limit State Design, *The 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 2560, Auckland, New Zealand, pp. 1-9, 2000.
- [17] Vamvatsikos D., Cornell A.: *Seismic Performance, Capacity and Reliability of Structures as Seen Through Incremental Dynamic Analysis*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No. 151, USA, 2005.
- [18] Williams M., Sexsmith R.: Seismic Damage Indices for Concrete Structures: A State-of-the-Art Review, *Earthquake Spectra*, Vol 11, Iss. 2, pp. 319-349, 1995.