

Primljen / Received: 6.5.2020.

Ispravljen / Corrected: 31.5.2021.

Prihvaćen / Accepted: 27.7.2021.

Dostupno online / Available online: 10.9.2021.

Scenarij postupnog rušenja čeličnih konstrukcija s nepravilnostima po visini

Autori:



Ali Esfandiari Fard, dipl.ing.građ.

Islamsko sveučilište Azad, Chalous, Iran
Odjel za građevinarstvo, Podružnica u Chalousu
Esfandiari.a.879@gmail.com



Doc.dr.sc. **Heydar Dashti Nasserabadi**, dipl.ing.građ.

Islamsko sveučilište Azad, Chalous, Iran
Odjel za građevinarstvo, Podružnica u Chalousu
heidardashti843@gmail.com

Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Morteza Biklaryan**, dipl.ing.građ.

Islamsko sveučilište Azad, Chalous, Iran
Odjel za građevinarstvo, Podružnica u Chalousu
M.biklaryan@iauc.ac.ir

Prethodno priopćenje

Ali Esfandiari Fard, Heydar Dashti Nasserabadi, Morteza Biklaryan

Scenarij postupnog rušenja čeličnih konstrukcija s nepravilnostima po visini

Naglo uklanjanje nosivih elemenata kao što su stupovi s inženjerskih konstrukcija, te nedovoljna sposobnost preuzimanja dodatnih opterećenja zabilježenih nakon uklanjanja takvih elemenata, može nanijeti oštećenje i uzrokovati postupno rušenje takvih konstrukcija. U ovom radu istražen je učinak naglog uklanjanja stupova te konstrukcijski kapacitet srednje visokih i visokih građevina u različitim situacijama postupnog rušenja. Nepravilnosti po visini uvelike utječu na bočno ponašanje konstrukcija i na projektiranje poprečnih presjeka. Istraživani su različiti scenariji naglog uklanjanja stupova kod čeličnih konstrukcija s nepravilnostima po visini ili bez njih. Kako bi se procijenio utjecaj naglog uklanjanja stupa, primjenjene su metoda alternativnih putova prijenosa opterećenja (APM) i nelinearna dinamička analiza (NDA). Osim toga, provedena je i nelinearna statička analiza (NSA) kako bi se istražio kapacitet konstrukcija s obzirom na pojavu postupnog rušenja. Programom OpenSees analizirane su konstrukcije od 10, 15 i 20 katova s tri različite vrste nepravilnosti, a prema četiri različita scenarija uklanjanja stupova. Rezultati su prikazani u obliku statičkih i dinamičkih nelinearnih krivulja. Dobiveni rezultati pokazuju da geometrijske nepravilnosti po visini u slučaju scenarija naglog uklanjanja stupa mogu uzrokovati smanjenje kapaciteta i povećanje konstrukcijskog odziva u usporedbi s konstrukcijama bez nepravilnosti po visini. Uz to, kapacitet konstrukcija se povećava, a dinamički se odziv smanjuje s povećanjem broja elemenata u konstrukcijama.

Ključne riječi:

postupno rušenje, čelične konstrukcije, nepravilnost po visini, nelinearna statička analiza, nelinearna dinamička analiza

Research Paper

Ali Esfandiari Fard, Heydar Dashti Nasserabadi, Morteza Biklaryan

Progressive collapse scenario in steel structures with irregularity in height

Sudden removal of load-bearing elements such as columns in engineering structures, and lack of sufficient capacity to withstand the overload caused by removal of these elements can cause damage and Progressive Collapse (PC) in structures. Therefore, the effect of sudden column removal and structural capacity against PC scenarios in medium and high-rise buildings is investigated in this study. The irregularity in height has a great influence on lateral behaviour of structures and it affects the design of cross-sections. Various sudden column removal scenarios are investigated in this research for steel structures with and without irregularity in height. To assess the effects of sudden column removal, the Alternate load Path Method (APM) and Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) are utilized. In addition, a Nonlinear Static Analysis (NSA) is performed to investigate the capacity of structures against the PC phenomenon. Using OpenSees software, 10-, 15- and 20-storey structures with three distinct irregularity types are analysed during four different column removal scenarios. The results are presented in the form of static and dynamic nonlinear curves. The results indicate that making geometric irregularity in height in the sudden column removal scenario can cause the reduction of capacity and growth of the structural response in comparison to the structure with regularity in height. Moreover, the capacity of structures increases and the dynamic response declines by increasing the number of elements in the structures.

Key words:

progressive collapse, steel structures, irregularity in height, nonlinear static analysis, nonlinear dynamic analysis

1. Uvod

Postupno rušenje (eng. *Progressive Collapse* - PC) je lančana reakcija potaknuta početnim lokalnim popuštanjem elemenata, a dovodi do rušenja bilo čitave konstrukcije ili nerazmjerno velikog dijela te konstrukcije [1-3]. Sigurnost konstrukcija uvijek je bila glavna preokupacija inženjera i stručnjaka odgovornih za projektiranje građevinskih zahvata [4-7]. Jedan od mehanizama otkazivanja konstrukcije kojemu se u posljednjih nekoliko desetljeća posvećuje sve veća pažnja naziva se postupnim rušenjem. U slučaju naglog popuštanja jednog ili više elemenata konstrukcije, preraspodjela opterećenja može dovesti do popuštanja ostalih konstrukcijskih elemenata te u konačnici do potpunog uništenja građevine. U SAD-u je "General Services Administration" (GSA) [8] predložila praktične kriterije za smanjenje opasnosti od postupnog rušenja javnih građevina. Dokument "Unified Facilities Criteria" kojeg je objavilo Ministarstvo obrane SAD-a (UFC-DoD) [9] donosi kriterije za projektiranje postojećih građevina. Kim i Kim [10] istražili su konstrukcijski kapacitet čeličnih okvirnih konstrukcija na postupno rušenje. U tom se istraživanju koriste linearni i nelinearni modeli tj. statičke i dinamičke analize koje se temelje na smjernicama GSA i UFC-DoD-a. Rezultati istraživanja pokazuju da se nelinearnom dinamičkom analizom može vrlo precizno ocijeniti potencijal konstrukcija na postupno rušenje. Kim i Dawoon [11] istražili su otpornost čeličnih okvirnih konstrukcija na lančane reakcije koje dovode do postupnog rušenja. Nelinearne statičke analize (eng. *Nonlinear Static Analysis* - NSA) i nelinearne dinamičke analize (eng. *Nonlinear Dynamic Analysis* - NDA) provedene su na modelima šesterokatnica i trokatnica s vezovima i bez vezova pomoću metode alternativnih putova prijenosa opterećenja (eng. *Alternate load Path Method* - APM) koja je predložena u smjernicama GSA. Rezultati pokazuju da je krivulja smanjenja otpornosti (eng. *push down curve*) dobivena uzimajući u obzir utjecaj lančane reakcije, te izrađena u okviru analize NSA, viša nego u slučaju kada se lančana reakcija zanemari. Usefi i dr. [2] i Kim i Hong [12] ocijenili su otpornost na PC nepravilnih višekatnica pomoću metoda NDA i NSA te su ustanovili da su konstrukcije s više elemenata otpornije na postupno rušenje. Mashhadiali i Kheyrodi [13] analizirali su na modelima građevine od 48 katova opasnost od rušenja pri naglom uklanjanju nosivih elemenata u uglovima na najprijem katu, i u tu su svrhu koristili analize NSA i NDA. Jalalilarjani [14] se koristio linearnom statičkom analizom (LSA) kako bi ocijenio utjecaj uklanjanja stupova s konstrukcija koje su imale različite vezne sustave. Mahmoud i dr. [15] analizirali su mogućnost postupnog rušenja uslijed seizmičkih opterećenja okvira otpornih na savijanje (eng. *Moment Resisting Frames* - MRF) i okvira s vezovima, projektiranih prema egipatskim normama. Autori su koristili smjernice UFC-DoD-a metodom APM za simuliranje potencijala postupnog rušenja. Rahnavard i dr. [16] analizirali su mogućnost postupnog rušenja visokih spregnutih građevina čelik-beton i za te su potrebe primijenili nelinearnu analizu. Ustanovili su da je uklanjanje bočnih i središnjih elemenata veza MRF opasnije i destruktivnije od uklanjanja

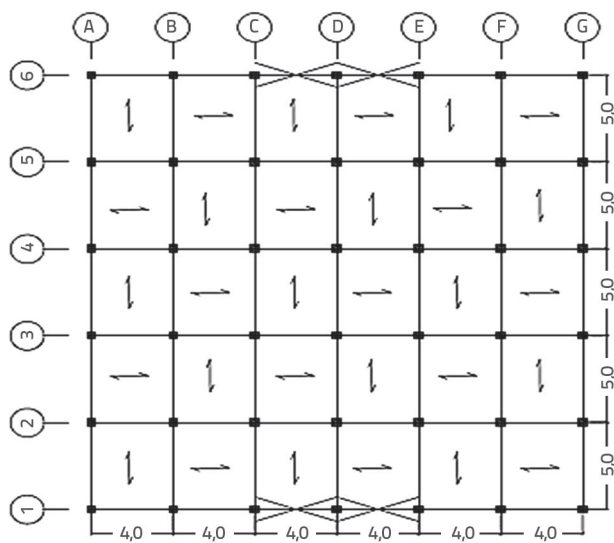
elemenata u uglovima. Kordbaghi i Mohammadi [17] analizirali su utjecaj razine seizmičke aktivnosti i visine građevina na otpornost čeličnih okvirnih konstrukcija na postupno rušenje. Kiakojuri i dr. [18] istraživali su postupno rušenje čeličnih krutih okvira pomoću statičkih i dinamičkih inkrementnih analiza.

Iako su do sada za različite građevine provedena brojna istraživanja o mogućnostima postupnog rušenja, može se reći da su neke teme ipak zanemarene, a jedna od njih je i utjecaj nepravilnosti po visini u ocjenjivanju mogućnosti potpunog rušenja srednje visokih i visokih građevina. Imajući to na umu, u ovom se radu prikazuje detaljno istraživanje utjecaja naglog uklanjanja stupova, i to na temelju nelinearnih statičkih i dinamičkih analiza smanjenja otpornosti (eng. *push down analysis*). U poglavljima koja slijede prikazuju se istraženi slučajevi, metode analize i rezultati postignuti tijekom tih analiza.

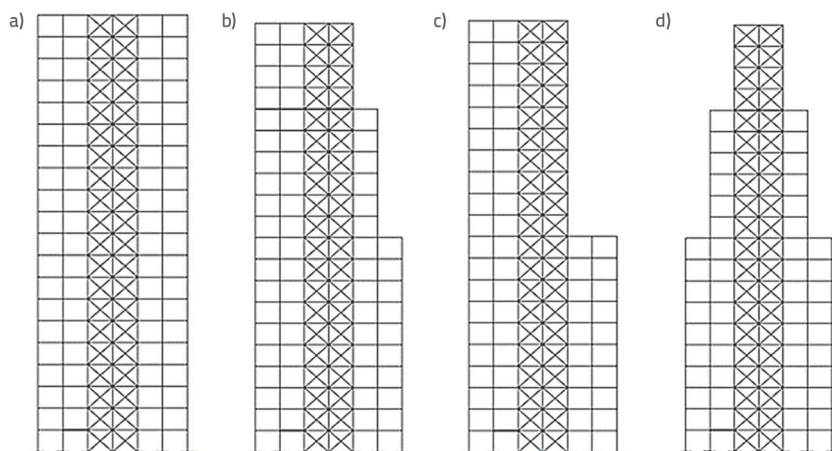
2. Modeliranje i analiza

2.1. Modeliranje i projektiranje

Budući da je cilj ovog istraživanja ocijeniti utjecaj naglog uklanjanja stupova uzimajući u obzir nepravilnosti po visini srednje visokih i visokih konstrukcija, u radu je najprije provedeno trodimenzionalno linearno modeliranje i projektiranje konstrukcija s 10, 15 i 20 katova. Spomenute konstrukcije projektirane su pomoću programa SAP2000 [19]. Nakon linearnog modeliranja, na građevine je nanoseno gravitacijsko opterećenje u skladu s iranskim normama za nanošenje opterećenja. Spektralna dinamička analiza korištena je za nanošenje bočnog opterećenja i za statički proračun u skladu s normom Buildings Standard - 2800 [20]. Za potrebe nanošenja bočnog opterećenja, pretpostavljeno je da građevine leže na "tlu tipa 3" te da je razina seizmičke opasnosti "visoka". Usvojeno je da visina pojedinačnih katova iznosi tri metra. U smjeru x, građevine imaju šest 4-metarskih raspona, a u smjeru y pet 5-metarskih raspona. kao što je to prikazano na slici 1.



Slika 1. Osnovni tlocrt katova konstrukcije



Slika 2. Prikaz pravilnih i nepravilnih modela po visini za model konstrukcije s 20 katova: a) pravilni model; b) nepravilni model (slučaj br. 1); c) nepravilni model (slučaj br. 2); d) nepravilni model (slučaj br. 3)

Kako bi se razmotrili utjecaji geometrijskih nepravilnosti po visini konstrukcija, pretpostavljeno je da su konstrukcije po visini uvučene i to u tri pojedinačna slučaja. Za konstrukciju su usvojena tri stanja nepravilnosti.

Modeli nepravilnih konstrukcija s 20 katova prikazani su na slici 2. Prilikom odabiranja utjecaja nepravilnosti, nastojali su se utjecaji geometrijske nepravilnosti uzeti u obzir istovremeno sa smanjivanjem mase gornjih katova. U svim modelima građevina s 10, 15 i 20 katova, u slučaju br. 1 postupno se u najprijem koraku odstranjuje jedan raspon. U slučaju br. 2 postupno se odstranjuju dva raspona na jednoj strani gornjih katova, a u slučaju br. 3 postupno se odstranjuju jedan i dva raspona na obje strane po visini građevine.

Na slici 5. (poglavlje 2.2.) prikazano je smanjenje raspona građevine s petnaest katova. Iako je glavna svrha ove slike prikazani model konačnih elemenata u programu OpenSees, na njoj se vrlo lako može uočiti i smanjenje raspona kako bi se postigla nepravilnost. Na modelu je to provedeno na devetom i trinaestom katu. Na građevini s deset katova, smanjenje raspona ostvareno je na šestom i osmom katu.

U projektiranju građevina primjenjena je metoda projektiranja bazirana na faktoru otpornosti na opterećenje (eng. *Load Resistance Factor Design* - LRFD). Usvojeno je da se za projektiranje građevina koristi čelik klase ST37 (AISC360) [21]. Tablica 1. prikazuje linearne parametre i vrijednosti opterećenja koji su potrebni za modeliranje i projektiranje konstrukcija analiziranih u ovom istraživanju. U spektralnoj dinamičkoj analizi odabran je spektar koji se temelji na standardnom spektru za projektiranje prema normativnom dokumentu 2800. U nelinearnom projektiranju i modeliranju konstrukcija, za sve su modele konstrukcija usvojene jednake vrijednosti stalnog i korisnog opterećenja. Pretpostavljeno je da je stalno i korisno opterećenje na krovu građevine jednako onom na ostalim razinama građevine.

U projektiranju i modeliranju krova građevine, za opterećenje snijegom usvojena je vrijednost od $1,5 \text{ kN/m}^2$.

Nakon modeliranja i analize, projektirane su konstrukcije s 10, 15 i 20 katova. Konstrukcije projektirane u smjeru x imaju dvostruki centrični vezni sustav koji se iskazuje izrazitom duktilnošću, a u smjeru y kruti okvir koji je također izrazito duktilan. U ovom radu, profili stupova razmatraju se kao kvadratni šuplji cijevni, nosači su simetrični I-profilima, a vezovi su standardni UNP profili. Odabrani profili prikazani su u tablici 2. U toj tablici, h_w-t_w predstavlja dimenzije hrpta dok b_f-t_f označava dimenzije pojasnica u I-profilima grede. Dimenzije profila iskazane su u milimetrima (mm).

Tablica 1. Parametri za modeliranje i projektiranje

Parametar	Vrijednost	Jedinica
Stalno opterećenje	6	kN/m^2
Korisno opterećenje	2	kN/m^2
Granica popuštanja	$2,4 \cdot 10^5$	kN/m^2
Očekivana granica popuštanja	$2,88 \cdot 10^5$	kN/m^2
Modul elastičnosti, E	$2 \cdot 10^8$	kN/m^2
Poissonov koeficijent	0,3	-
Masa po jedinici obujma	8	kN/m^3

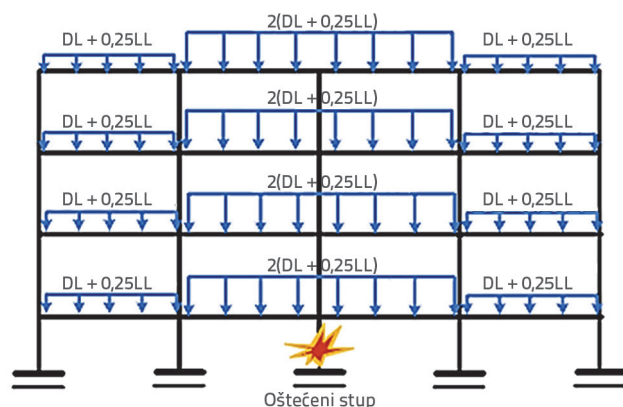
2.2. Scenarij naglog uklanjanja stupova

Složeno ciklično ponašanje nije potrebno za modeliranja PC-a [22]. Dva pitanja se nameću prilikom razmatranja naglog uklanjanja stupa i scenarija PC-a. Najprije se pitanje odnosi na lokaciju uklonjenog stupa, a drugo na uvjete opterećenja te na način naglog uklanjanja stupova. Danas su dostupne različite metode za provođenje statičkog proračuna za naglo uklanjanje stupova [23]. Za analizu ponašanja konstrukcija u slučaju postupnog rušenja obično se koristi nelinearna statička analiza smanjenja otpornosti (eng. *Nonlinear Static Pushdown Analysis* - NSPA). Prema tom pristupu, dotični se stup najprije uklanja iz konstrukcije primjenom metode APM, a nakon toga se nanosi gravitacijsko opterećenje prema GSA standardnom opterećenju [24]. Analiza se nastavlja u uvjetima kontroliranog pomaka, a vertikalni pomak oštećene točke iskazuje se krivuljom smanjenja otpornosti na bazi faktora gravitacijskog opterećenja (odnos nanesenog opterećenja prema stvarnom opterećenju konstrukcije), kao što je to prikazano na slici 3. Prema nelinearnoj statičkoj analizi smanjenja otpornosti, faktor opterećenja dobiva se prema statičkoj metodi smanjenja otpornosti podjelom

Tablica 2. Karakteristike profila

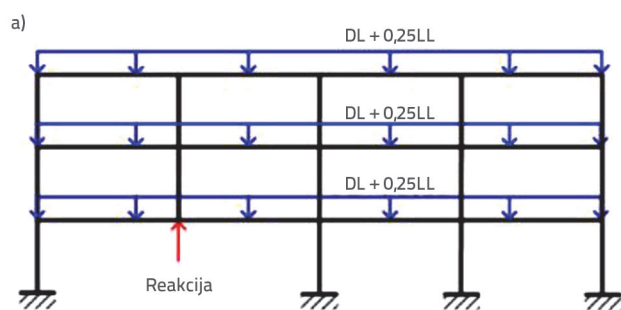
20 katova				20 katova, slučaj br. 1			
Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)	Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)
1-4	box 500-20	2UNP200	400-12 / 250-20	1-2	box 500-20	2UNP200	400 / 12-250-2
5-8	box 450-15	2UNP160	400-12 / 250-20	3-8	box 450-15	2UNP160	400 / 12-250-2
9-12	box 400-15	2UNP100	400-12 / 250-20	9-12	box 400-10	2UNP100	400 / 12-250-2
13-16	box 400-10	2UNP100	350-8 / 250-15	13-16	box 400-10	2UNP100	400-8 / 200-10
17-20	box 250-10	2UNP100	300-8 / 200-12	17-20	box 250-10	2UNP100	300-8 / 200-12
20 katova, slučaj br. 2				20 katova, slučaj br. 3			
Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)	Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)
1-2	box 500-20	2UNP200	400-12 / 250-20	1-2	box 450-20	2UNP200	400-10 / 250-1.5
3-8	box 450-12	2UNP160	400-12 / 250-20	3-8	box 400-15	2UNP160	400-10 / 250-1.5
9-12	box 400-10	2UNP100	400-12 / 250-20	9-12	box 400-10	2UNP100	400-8 / 200-10
13-16	box 400-10	2UNP100	400-8 / 200-10	13-16	box 350-10	2UNP100	400-8 / 200-10
17-20	box 250-10	2UNP100	300-8 / 200-12	17-20	box 250-8	2UNP100	300-8 / 200-12
15 katova				15 katova, slučaj br. 1			
Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)	Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)
1-2	box 450-20	2UNP200	400-8 / 200-20	1-2	box 450-20	2UNP200	400-8 / 200-20
2-4	box 400-15	2UNP160	400-8 / 200-20	2-4	box 400-15	2UNP160	400-8 / 200-20
5-8	box 400-10	2UNP100	400-8 / 200-20	5-8	box 400-10	2UNP100	400-8 / 200-20
8-10	box 350-10	2UNP100	350-8 / 200-15	8-10	box 350-10	2UNP100	350-8 / 200-15
11-12	box 250-10	2UNP100	300-8 / 200-12	11-12	box 250-10	2UNP100	300-8 / 200-12
13-15	box 200-10	2UNP100	250-8 / 150-12	13-15	box 200-10	2UNP100	250-8 / 150-12
15 katova, slučaj br. 2				15 katova, slučaj br. 3			
Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)	Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)
1-2	box 450-20	2UNP200	400-8 / 200-20	1-2	box 450-15	2UNP200	400-8 / 150-15
2-4	box 400-15	2UNP160	400-8 / 200-20	2-4	box 400-15	2UNP160	400-8 / 150-15
5-8	box 400-10	2UNP100	400-8 / 200-20	5-8	box 400-10	2UNP100	400-8 / 150-15
8-10	box 350-10	2UNP100	350-8 / 200-15	8-10	box 350-10	2UNP100	350-8 / 200-15
11-12	box 250-10	2UNP100	300-8 / 200-12	11-12	box 250-10	2UNP100	300-8 / 200-12
13-15	box 200-10	2UNP100	250-8 / 150-12	13-15	box 200-10	2UNP100	250-8 / 150-12
10 katova				10 katova, slučaj br. 1			
Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)	Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)
1	box 400-15	2UNP120	300-8 / 200-20	1-2	box 400-10	2UNP120	300-8 / 200-20
2-4	box 400-10	2UNP120	300-8 / 200-10	2-4	box 400-10	2UNP120	300-8 / 200-10
5-8	box 250-12	2UNP100	200-8 / 200-10	5-8	box 250-12	2UNP100	200-8 / 200-10
8-10	box 200-10	2UNP100	200-8 / 150-10	8-10	box 200-10	2UNP100	200-8 / 150-10
10 katova, slučaj br. 2				10 katova, slučaj br. 3			
Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)	Kat	Stup	Vez	Nosač (h_w-t_w / b_f-t_f)
1-2	box 400-10	2UNP120	300-8 / 200-2	1-2	box 350-12	2UNP120	300-8 / 200-10
2-4	box 350-12	2UNP120	300-8 / 200-10	2-4	box 350-12	2UNP120	300-8 / 200-10
5-8	box 250-12	2UNP100	200-8 / 150-10	5-8	box 200-10	2UNP100	200-8 / 150-10
8-10	box 200-10	2UNP100	200-8 / 100-10	8-10	box 200-10	2UNP100	200-8 / 100-10

tražene sile po konstrukciji kako bi se postigao određeni pomak na bazi obrasca gravitacijskog opterećenja prema stvarnoj sili na konstrukciji. Ustvari, faktor opterećenja 1 odgovara stanju u kojem je konstrukcija izložena svom stvarnom opterećenju. Stoga je taj faktor pokazatelj kapaciteta konstrukcije na nestabilnost koja proizlazi iz naglog uklanjanja stupa. Nelinearna dinamička analiza se koristi za ocjenjivanje odziva građevine na naglo uklanjanje stupova [24].



Slika 3. Metoda za postizanje lokalnog otkazivanja i kombinacija opterećenja prema NSA

Prema normi GSA, APM je jedna od najkorisnijih metoda za ocjenjivanje opasnosti od PC-a kroz simulaciju naglog uklanjanja stupa. Prema toj metodi, konstrukcija se najprije analizira pod gravitacijskim opterećenjem. Nakon toga se određuje opterećenje na analiziranom elementu konstrukcije te se opterećenje nanosi u smjeru suprotnom od gornjeg čvora nakon uklanjanja elementa. Kako bi se provela nelinearna dinamička analiza, gravitacijsko opterećenje s kombinacijom opterećenja $DL + 0,25LL$ postiže svoju stvarnu vrijednost linearno u roku od pet sekundi. Kako bi se eliminirale vibracije, opterećenje se ne mijenja u vremenu od dvije sekunde te se nakon toga sa stupa naglo uklanja reakcija izbrisano stupa, kako je to prikazano na slikama 4.a i 4.b, a rezultirajuće vibracije se eliminiraju kao vertikalni pomak stupa pri čemu je vrijeme prikazano kao NDA [8]. Ova krivulja ilustrira dinamički odziv građevine na naglo uklanjanje stupa.



Slika 4. Analiza NDA prema normi GSA: a) obrazac opterećenja; b) vremenski zapis gravitacijskih opterećenja

Danas postoje brojni programi za provođenje analize NDA. OpenSees je jedan od računalnih programa otvorenog koda koji se koristi u analizi konačnih elemenata [25]. Taj program posjeduje brojne mogućnosti za nelinearno modeliranje i provođenje dinamičkih analiza. Tim se programom može obrisati svako opterećenje ili bilo koji element tijekom same analize. Zbog navedenih mogućnosti programa, izvršen je pokušaj realističnog modeliranja scenarija naglog uklanjanja stupa i to kombiniranjem metode APM, predložene u normi GSA, s mogućnošću uklanjanja elemenata tijekom analize. Usvojeno je da se gravitacijsko opterećenje nanosi linearno s kombinacijom stalnog opterećenja (eng. *Dead Load* – DL) + 0,25 korisnog opterećenja (eng. *Live Load* – LL) u roku od 5 sekundi, kako je prikazano na slici 4. (bez krivulje R). Zatim se nastavlja s konstantnim opterećenjem i u funkciji vremena, kao u krivulji "W" prikazanoj na slici 4.

Kako bi se modeliralo naglo uklanjanje stupova, pretpostavlja se da će se u sedmoj sekundi analize određeni stupovi ukloniti s konstrukcije i da će konstrukcija početi vibrirati. Kao što je navedeno u ovom radu, program OpenSees koristi se za analizu NDA. Nelinearni element "nosač-stup" koristi se za nelinearno modeliranje nosača i stupova. U modeliranju elemenata razmatra se i utjecaj P -delta i to promjenom korotacijske komande. U programu OpenSees koriste se tri metode za pripisivanje lokalnih osi: linearna, P - Δ i korotacijska. Korotacijska metoda je sveobuhvatan postupak u kojem se u obzir uzimaju kako utjecaji P - Δ tako i utjecaji velikih deformacija. Stoga, kako su utjecaji P - Δ značajni za postupno rušenje, koristi se korotacijska metoda u kojoj se razmatraju utjecaji P - Δ i utjecaj velikih deformacija.

Materijal Steel01 iz biblioteke programa OpenSees koristi se za modeliranje čeličnih elemenata koji se razmatraju u ovom radu. Karakteristike materijala spomenute u tablici 1. koriste se za definiranje ovog materijala. Za modeliranje elemenata primjenjuje se model konačnih elemenata s raspoređivanjem plastičnosti u obliku vlakana s deset točaka integracije. Usvojeno je da koeficijent sekundarne krutosti iznosi 0,02. Stoga se model korišten za elemente bazira na raspoređivanju plastičnosti s deset integracijskih točaka u kojima se ponašanje svakog vlakna temelji na odnosu naprezanja i deformacije, te se razmatra prema materijalu Steel01.

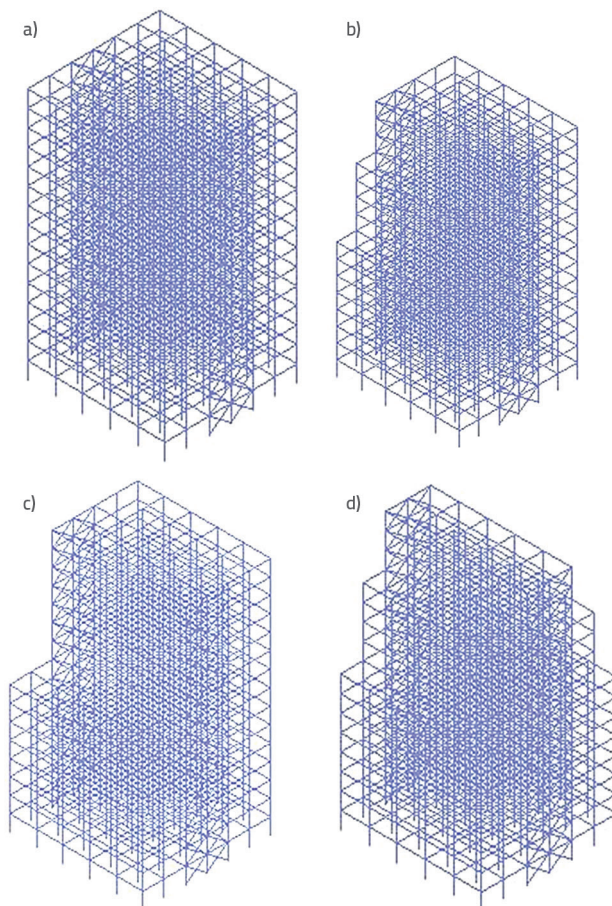
Nekoliko se metoda koristi za modeliranje plastičnog ponašanja materijala i elemenata. Dvije metode koje se

obično primjenjuju za takvo modeliranje uključuju primjenu modela koncentrirane, tj. raspodijeljene plastičnosti. U metodi koncentrirane plastičnosti, ukupno plastično ponašanje materijala razmatra se u okviru krivulja momenta i rotacije za nosače, te momenta i rotacije uz interakciju osne sile za stupove. U metodi raspodijeljene plastičnosti, svojstva plastičnog spoja razmatraju se kao vlakna. Ta vlakna mogu biti prisutna duž elementa ili se mogu usvojiti kao točke smještene duž elementa. Te točke su definirane kao integracijske točke. Kao što je navedeno u uputama za program OpenSees, koeficijent očvršćivanja pri deformaciji izražava se koeficijentom b . Taj koeficijent iskazuje omjer očvršćivanja u plastičnom području prema početnom očvršćivanju, a u literaturi se često spominje da varira od 0,01 do 0,05.

Postoje dvije opsežne metode za modeliranje plastičnosti: metoda koncentriranog plastičnog zgloba i metoda raspodijeljene plastičnosti [26]. U metodi koncentriranog plastičnog zgloba, koja se i sama dijeli na dvije metode za kontrolu sile tj. kontrolu pomaka, pretpostavlja se da se integracijske točke nalaze na kritičkim točkama elementa. Kod stupova se npr. koncentrirani plastični zglobovi postavljaju na oba kraja stupa gdje je posmik najviši. Te se točke smatraju dvjema točkama integracije. U slučaju raspodijeljene plastičnosti, koja ne uključuje niti kontrolu deformacije niti kontrolu sile, tj. u kojoj se primjenjuju odnosi naprezanja i deformacije, koriste se integracijske točke koje nisu kritičke točke i to zato da bi se smanjio opseg jednadžbi te da bi se zadržala odgovarajuća razina preciznosti. U programu OpenSees takvih točaka može biti najviše deset, a one se u jednadžbama mogu koristiti na različite načine.

Nelinearni element nosač-stup, dostupan u biblioteci programa OpenSees, jedan je od najkorisnijih i najpotrebnijih elemenata za modeliranje nelinearnog ponašanja elemenata. Svojstva i formulacija tog elementa opisana su u priručniku programa OpenSees. U ovom se radu koristi deset integracijskih točaka. Integracijske se točke mogu koristiti na dva mjesta: duž elementa i na visini presjeka (visina presjeka koristi se kada se primjenjuje presjek vlakna, što nije poželjno u ovom istraživanju). Ako se komanda vlakna primjeni u modeliranju presjeka, korisnik to najprije treba pretpostaviti u skladu s uvjetima presjeka, s tim da se presjek treba inicijalno podijeliti na nekoliko dijelova te se zatim svakom dijelu pripisuju njegova svojstva. U ovom se slučaju integracijske točke pripisuju automatski. Međutim, u našem se istraživanju za izradu presjeka primjenjuje komanda lokalnog četverokuta (eng. *patch quad*), što je precizniji postupak. Prema ovoj se metodi najprije kreira oblik presjeka zadavanjem koordinata za različite dijelove presjeka. Zatim se, zadavanjem točaka podjele, svaki dio presjeka uključuje u mrežu u svakom smjeru u skladu s potrebnim brojem. Zato se podjela poprečnog presjeka ne smatra točkama integracije već točkama umrežavanja i u tome je razlika između integracijskih točaka i kreiranja mreže koja se treba zadati.

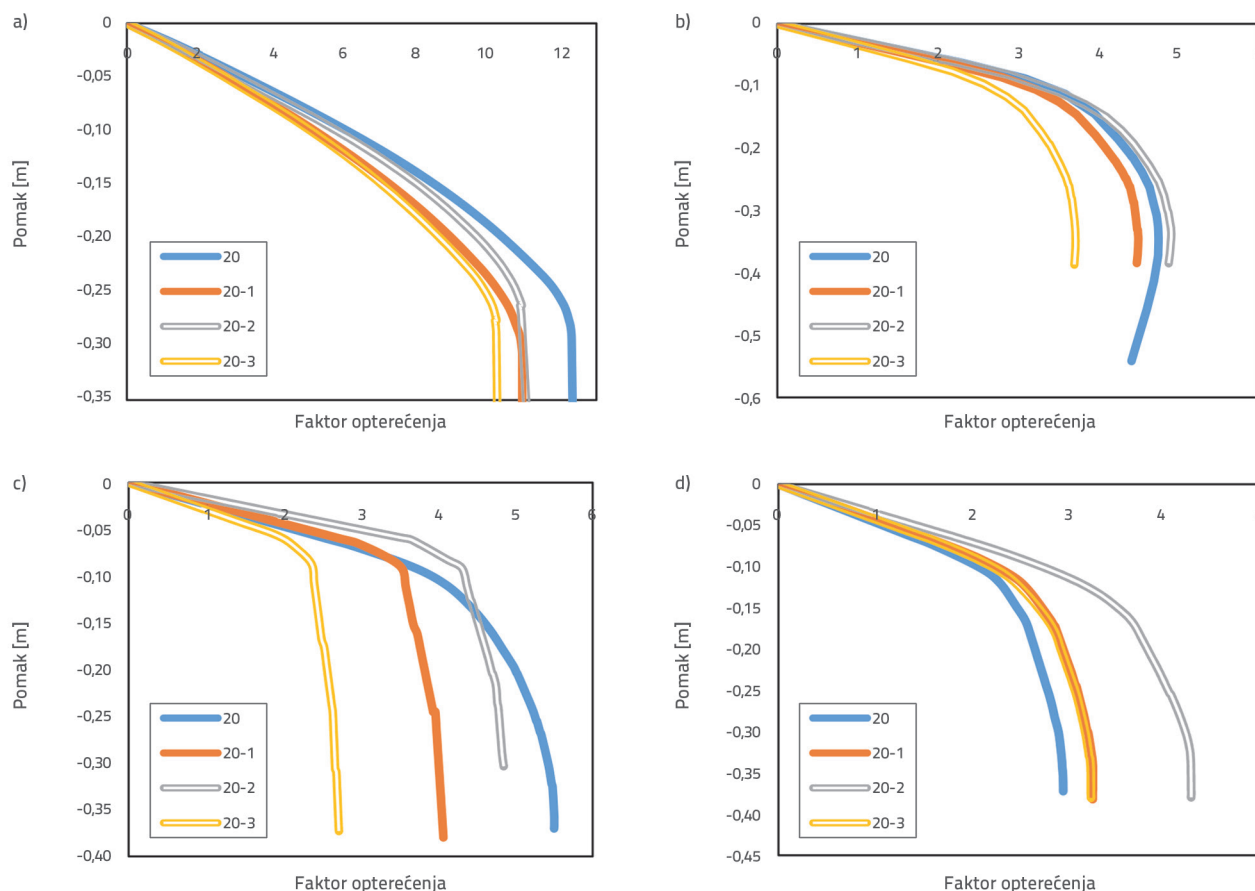
Tolerancija koja se koristi za udovoljavanje zahtjevu kompatibilnosti elementa iznosi 10^{-16} , a usvojeno je da maksimalni broj iteracija potreban za udovoljavanje zahtjevu kompatibilnosti elementa iznosi 1. Osim toga, korotacijska se formulacija koristi za definiranje lokalnih osi tog elementa. Uz to, presjeci tog elementa definirani su kao vlaknasti tip s nelinearnim odnosom između naprezanja i deformacija, prema materijalu Steel01. Primjer trodimenzionalnog modeliranja građevina analiziranih u ovom radu prikazan je na slici 5.



Slika 5. Modeliranje konstrukcija s 15 katova pomoću programa OpenSees: a) 15 katova; b) 15 katova – slučaj br. 1; c) 15 katova – slučaj br. 2; d) 15 katova – slučaj br. 3

U ovom su radu razmatrani različiti načini glede lokacije lokalnog popuštanja i naglog uklanjanja stupova. Za svaki tip konstrukcije analizirana su četiri scenarija uklanjanja stupova.

Dakle, analizirane su različite situacije u pogledu lokacije lokalnog popuštanja i naglog uklanjanja stupova. Scenariji naglog uklanjanja stupova su: stupovi D1 i D3 i G3 na šestom katu, te stup D3 na osmom katu desetokatne građevine; zatim ostali scenariji sa stupovima D1 i D3 i G3 na osmom katu te D3 na dvanaestom katu petnaestokatne građevine, te stupovi D1 i D3 i G3 na desetom katu i D3 na šesnaestom katu dvadesetokatne građevine, kao što je to prikazano na slici 1.



Slika 6. Statičke krivulje smanjenja otpornosti za konstrukcije s 20 katova: a) D1 – deseti kat; b) D3 – deseti kat; c) G3 – deseti kat; d) D3 – šesnaesti kat

3. Analiza rezultata

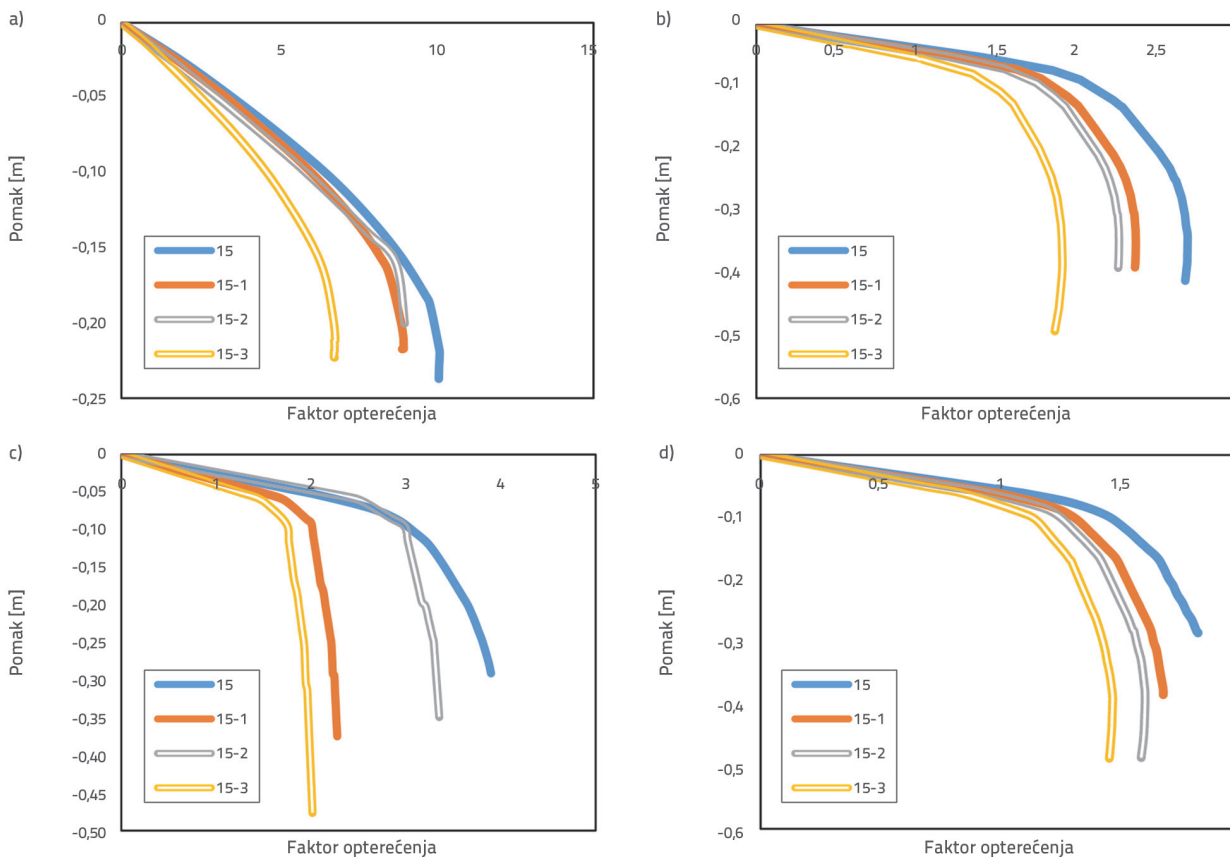
Nakon nelinearnog modeliranja konstrukcija, sljedeća dva cilja ovog istraživanja su ispitati utjecaje naglog uklanjanja stupova te analiza kapaciteta analiziranih konstrukcija u odnosu na pojavu postupnog rušenja, u skladu s normom GSA, a pomoću analiza NSA i NDA.

U ovom se radu izraz "odziv konstrukcije" odnosi na vertikalni pomak na vrhu uklonjenog stupa u dinamičkoj analizi smanjenja otpornosti, a izraz "kapacitet konstrukcije" odnosi se na vrijednosti popuštanja i faktora krajnjeg opterećenja u statičkoj krivulji smanjenja otpornosti. U početku se kapacitet konstrukcija korištenih u ovom istraživanju razmatrao za slučaj naglog uklanjanja stupa prema gore spomenutim scenarijima. Na slici 6. prikazane su statičke krivulje smanjenja otpornosti za dvadesetokatne konstrukcije. Statičke krivulje smanjenja otpornosti obično se prikazuju tako da negativni pomak oštećenog vrha bude na vertikalnoj osi, a faktor izračunanog opterećenja na horizontalnoj osi. Te se krivulje obično uspoređuju na bazi popuštanja i krajnjih pomaka, a uglavnom se iskazuju kako bi se usporedio kapacitet konstrukcije u slučaju preraspodjele sila izazvanih naglim uklanjanjem stupa. Zato je tumačenje ovih krivulja uglavnom kvalitativno, te se koriste izrazi kao što su "viši kapacitet" ili "niži kapacitet".

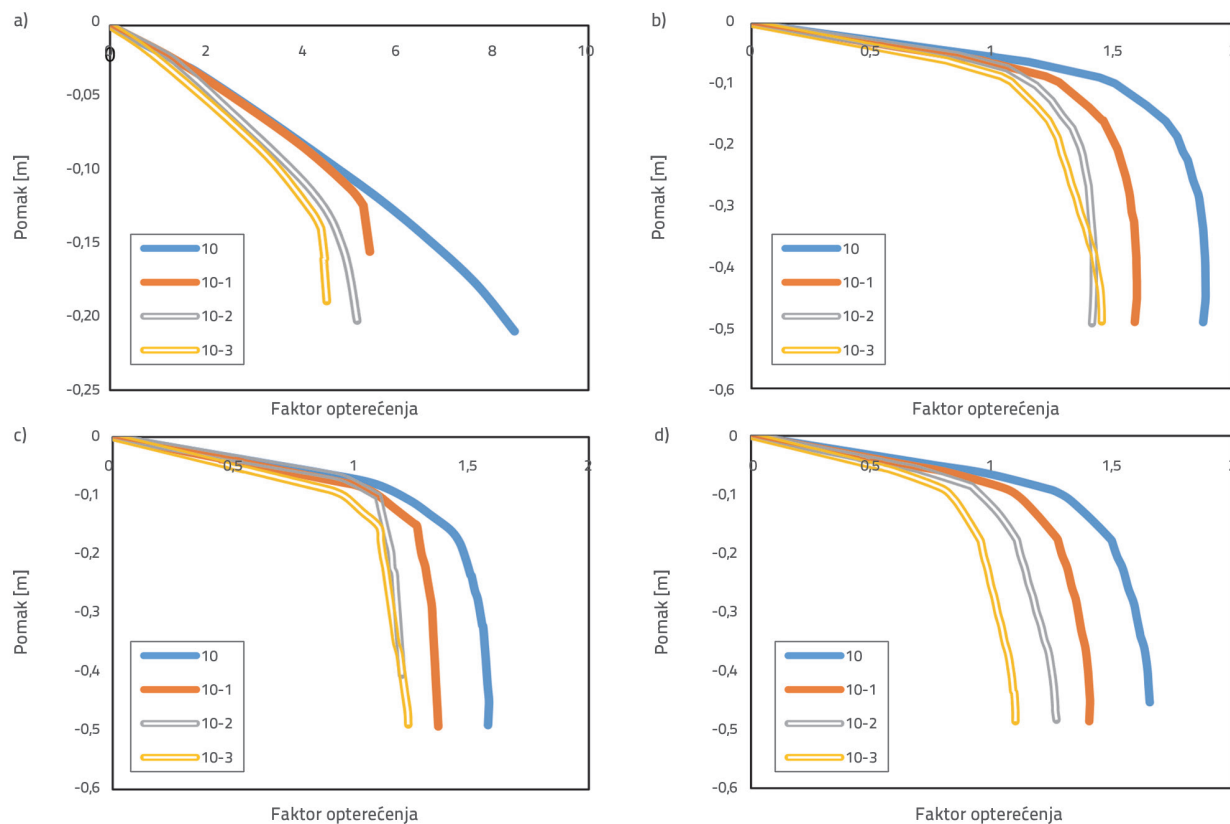
Kao što se može vidjeti na statičkim krivuljama smanjenja otpornosti (slika 6.), faktor opterećenja pri popuštanju viši je od jedan u svim modelima konstrukcija i u svim scenarijima uklanjanja stupova. To znači da te konstrukcije posjeduju dostatan kapacitet prema postupnom rušenju uzrokovanom scenarijima uklanjanja stupova.

Prema normi GSA, konstrukcija ima dostatan kapacitet na preraspodjelu sila ako do pomaka pri popuštanju dolazi pri faktorima opterećenja većima od jedan. Ako do krajnjeg pomaka dolazi pri faktorima opterećenja manjima od jedan, tada konstrukcija nema dostatan kapacitet na preraspodjelu sila i sigurno će doseći globalnu točku sloma. Stoga, ako do pomaka pri popuštanju dolazi pri faktorima opterećenja većima od jedan, može se zaključiti da je konstrukcija otporna na naglo uklanjanje stupova te da neće doći do postupnog rušenja te konstrukcije. Prema navedenim objašnjenjima, konstrukcija će u ovom istraživanju imati dovoljan kapacitet na postupno rušenje, jer je faktor opterećenja koji odgovara pomaku pri popuštanju veći od jedan u svim scenarijima.

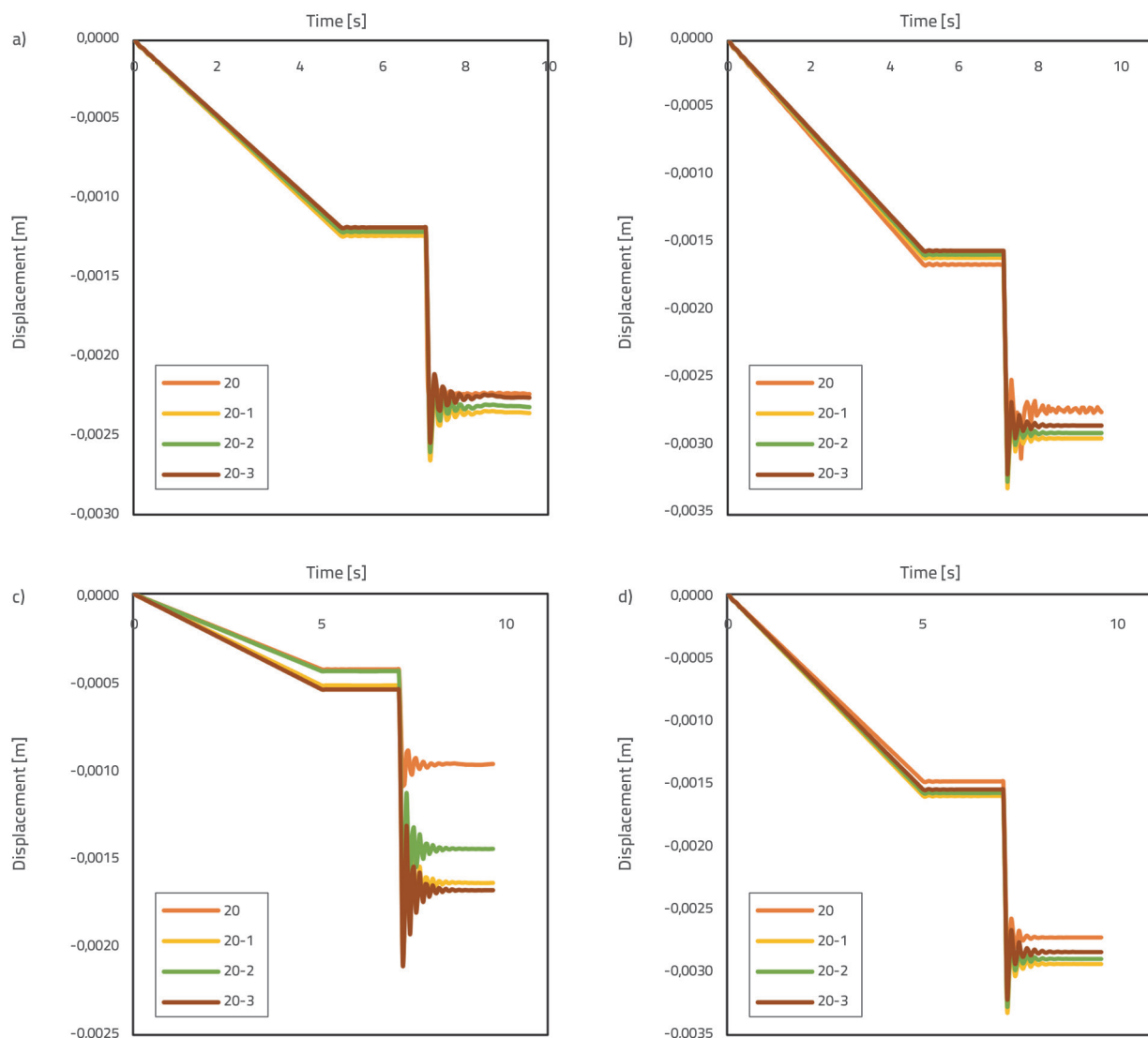
Kao što se može vidjeti na slici 6.a, sposobnost konstrukcije da se uspješno nosi s pojavom postupnog rušenja veća je u slučaju lokalnog otkazivanja u ukrućenom rasponu nego u ostalim situacijama. U ovoj situaciji, pravilna konstrukcija



Slika 7. Statičke krivulje smanjenja otpornosti za konstrukcije s 15 katova: a) D1 – osmi kat; b) D3 – osmi kat; c) G3 – osmi kat; d) D3 – dvanaesti kat



Slika 8. Statičke krivulje smanjenja otpornosti konstrukcije s 10 katova: a) D1 – šesti kat; b) D3 – šesti kat; c) G3 – šesti kat; d) D3 – osmi kat



Slika 9. Nelinearne dinamičke krivulje za konstrukcije s 20 katova: a) D1 – deseti kat; b) D3 - deseti kat; c) G3 - deseti kat; d) D3 - šesnaesti kat

ima veći kapacitet na lokalno otkazivanje u odnosu na nepravilne konstrukcije.

Krivulje smanjenja otpornosti posjeduju dvije značajne komponente koje upućuju na kapacitet konstrukcije u scenariju naglog uklanjanja stupa. Te dvije komponente su faktori opterećenja pri popuštanju i faktori krajnjeg opterećenja. Što su te dvije komponente više, to je i veća sposobnost konstrukcije da uspješno podnese preraspodjelu sila pri postupnom rušenju uzrokovanom naglim uklanjanjem stupa. Vrijednosti faktora opterećenja pri popuštanju i faktora krajnjeg opterećenja prikazane na slici 6.b niže su od onih prikazanih na slici 6.a, što pokazuje da je konstrukcija otpornija na oštećenja u slučaju okvira s vezovima nego u slučaju okvira bez veznog sustava. Osim toga, uspoređivanjem slika 6.b i 6.d može se zaključiti da je, u sličnim uvjetima oštećenja, sposobnost konstrukcije da se nosi s preraspodjelom sila niža ako do oštećenja dolazi u višim rasponima.

Faktor opterećenja pri popuštanju iznosi 12 kod pravilnih konstrukcija, dok taj faktor u najprijem, drugom i trećem slučaju kod nepravilnih konstrukcija redom iznosi 10,2, 10,9 i 10,07. Stoga je pravilna konstrukcija po visini otpornija u odnosu na nepravilne konstrukcije. Slika 7. prikazuje taj postupak za konstrukcije s petnaest katova.

Iz krivulja prikazanih na slici 7. vidi se da se faktor opterećenja smanjuje kada se broj katova smanji s 20 na 15. Osim toga, može se uočiti da se najmanji faktor opterećenja odnosi na slučaj oštećenja na dvanaestom katu. U modelima konstrukcija s petnaest katova, najviši faktori opterećenja odnose se na pravilne konstrukcije a najniži na modele konstrukcija iz slučaja 3 koji iskazuju najmanju otpornost na postupno rušenje. Na slici 8. prikazana je otpornost desetokatnih konstrukcija u scenariju postupnog rušenja nakon uklanjanja stupova.

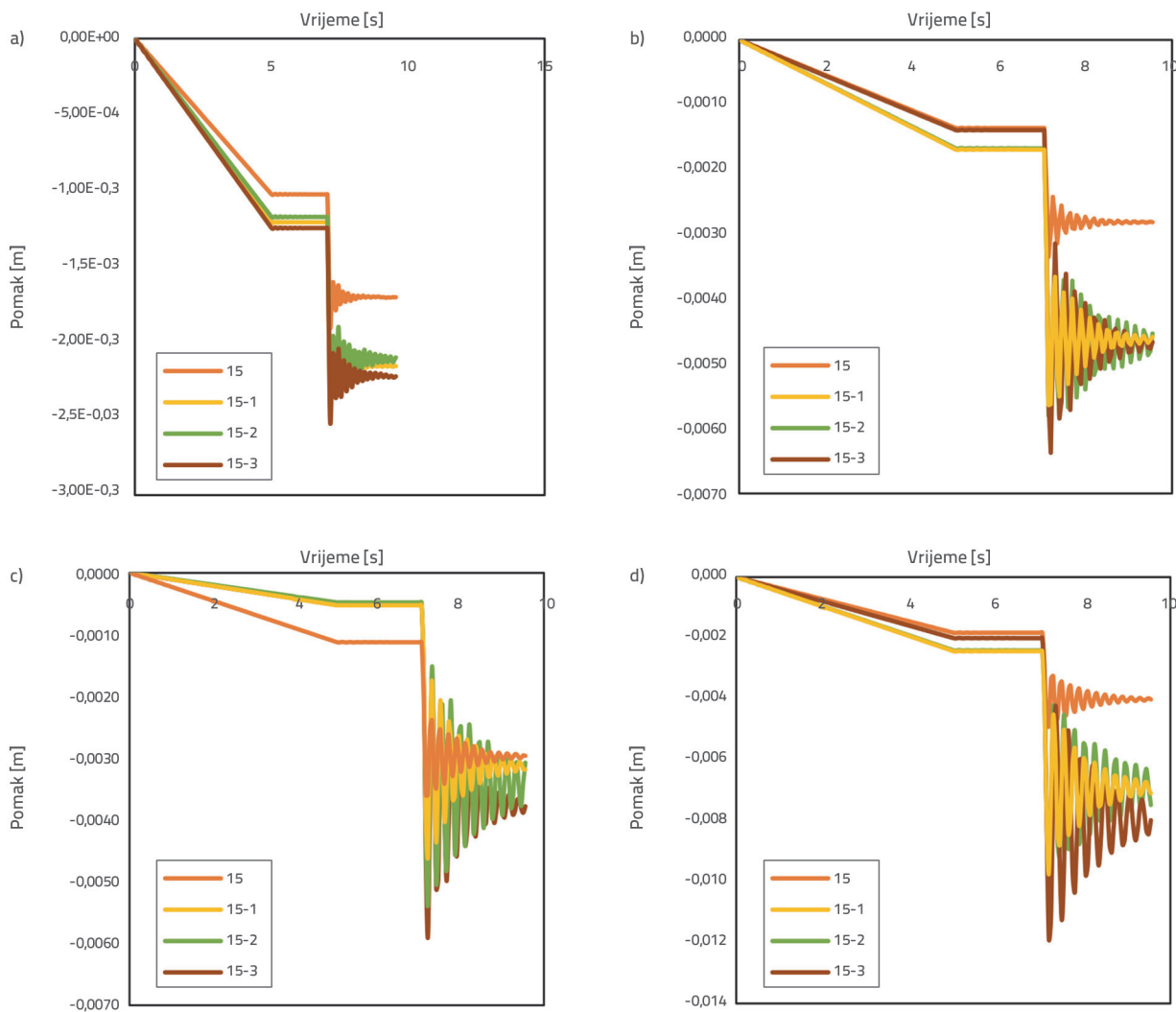
Kao i kod modela konstrukcija s petnaest katova, ponašanje po visini pravilnih konstrukcija iskazano na modelima desetokatnih konstrukcija pokazuje da je kapacitet tih konstrukcija na naglo

uklanjanje stupova veći, kao i njihova sposobnost preraspodjele prekomjernih sila, u odnosu na druge konstrukcije. Faktori opterećenja desetokatnih konstrukcija niži su u usporedbi s ostalim konstrukcijama. Osim toga, te konstrukcije iskazuju najviši potencijal protiv postupnog rušenja kada do lokalnog otkazivanja dođe u ukrućenom rasponu. Na slici 9. prikazane su krivulje odziva konstrukcija na scenarij naglog uklanjanja stupova prema nelinearnoj dinamičkoj analizi, a za konstrukcije s dvadeset katova.

Analiza krivulja NDA za scenarije naglog uklanjanja stupova pokazuje da kod dvadesetokatnih konstrukcija vertikalni pomak na vrhu uklonjenog stupa iznosi samo nekoliko milimetara. To pokazuje da uklanjanje stupa kod visokih konstrukcija uzrokuje tek neznatan odziv. Zapravo, naglo uklanjanje stupa neće uzrokovati postupno rušenje tih konstrukcija, te kod njih neće biti prisutna opasnost od potpunog sloma u slučaju takvog naglog uklanjanja stupa. Osim toga, analiza utjecaja nepravilnosti konstrukcija pokazuje da nepravilnost kod dvadesetokatnih modela bitno ne utječe na odziv konstrukcije,

jer su kod modela konstrukcije vrijednosti maksimalnog pomaka i konačnog pomaka bliske jedna drugoj. Takva konstrukcija ima najmanji maksimalni pomak i održivi odziv. Uz to, u scenariju uklanjanja stupa D1 na desetom katu vidimo da naglo uklanjanje stupa u susjednim vezovima uzrokuje najmanju vibraciju u konstrukciji. Isto tako, rezultati pokazuju da prisutnost vezova u zoni uklanjanja stupa dovodi do situacije u kojoj na konstrukciju utječu sporije vibracije i manje domene vibracija, pa stoga konstrukcija uspijeva ponovno ostvariti svoju ravnotežu.

Na slici 10. prikazane su krivulje NDA za poželjne scenarije konstrukcija s petnaest katova. Na tim krivuljama se vidi da kod svih modela, isto kao i kod dvadesetokatnih konstrukcija, pravilne konstrukcije imaju najmanji odziv ako se usporede s ostalim konstrukcijama. U scenariju naglog uklanjanja stupova, u usporedbi s ostalim konstrukcijama, pravilne konstrukcije s petnaest katova imaju najmanji i najstabilniji odziv. Analiza mjesta naglog uklanjanja stupova također pokazuje da u scenariju naglog uklanjanja stupa D1 (osmi kat) konstrukcija ima najniži odziv u odnosu na druge scenarije, a uz to su i vibracije



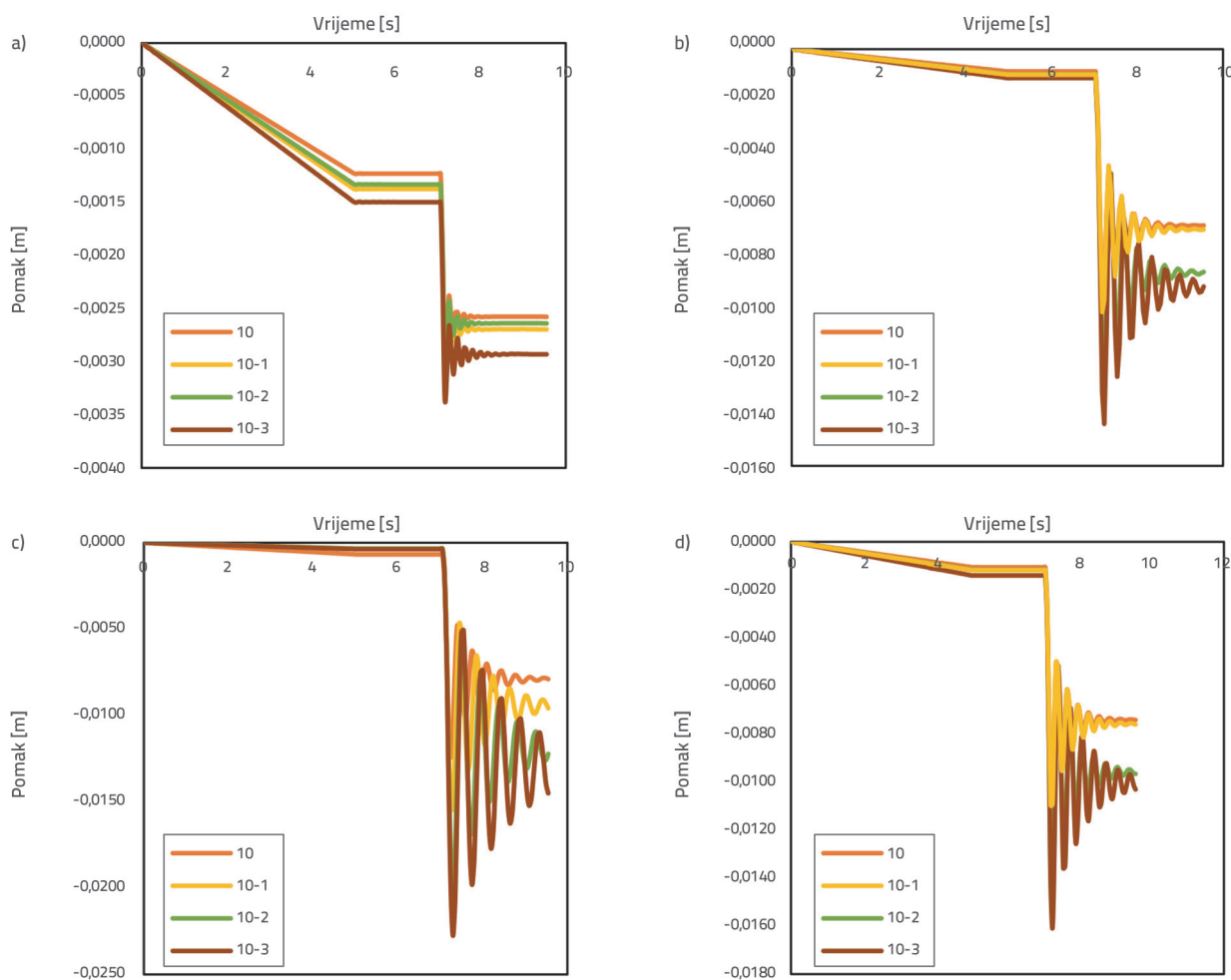
Slika 10. Nelinearne dinamičke krivulje za konstrukcije s 15 katova: a) D1 – osmi kat; b) D3 – osmi kat; c) G3 – osmi kat; d) D3 – dvanaesti kat

uzrokovane naglim uklanjanjem stupa u ovom slučaju niže u usporedbi s drugim scenarijima. U scenariju D3 (dvanaesti kat), odziv nakon uklanjanja stupova pokazuje da se uklanjanjem stupova u gornjim katovima povećava odziv konstrukcije. Drugim riječima, smanjenje broja nosivih elemenata dovodi do povećanja odziva konstrukcije. U modelima konstrukcija koji se odnose na konstrukciju s petnaest katova, najveći odziv zabilježen je nakon uklanjanja stupa D3 (dvanaest kat) i to za nepravilnu konstrukciju u slučaju 15-3. Nakon analize nepravilnosti, može se zaključiti da prisutnost nepravilnosti po visini konstrukcije može utjecati na bočno opterećenje, tj. modalne deformacije i posmik u katovima. Međutim, u scenariju naglog uklanjanja stupova, bočno opterećenje i bočno ponašanje nepravilnih građevina nije izraženo, pa je stoga značajno pitanje sposobnost konstrukcija da preuzmu dodatno opterećenje uzrokovano naglim uklanjanjem stupova. Konstrukcija s više elemenata i konstrukcijskih presjeka lakše preuzima takva dodatna opterećenja. Kreiranje nepravilnosti koje se razmatraju u ovom radu dovodi do smanjenja težine konstrukcije. Smanjivanje broja elemenata u nepravilnim konstrukcijama dovodi do smanjenja broja konstrukcijskih

elemenata koji mogu djelotvorno preuzeti dodatno opterećenje uzrokovano uklanjanjem stupova, a ujedno, zbog smanjenja težine konstrukcije, konstrukcijski presjeci postaju slabiji te se stoga smanjuje kapacitet nosivosti konstrukcije.

Prema iranskim pravilima struke za protupotresno projektiranje konstrukcija – Norma za građevine – 2800, projektirano seizmičko opterećenje seizmički otpornih konstrukcija izračunava se na temelju seizmičkog koeficijenta koji se množi s težinom građevine. Kako uklanjanje dijela konstrukcijskih elemenata po visini građevine dovodi do smanjenja ukupne težine, očito je da se smanjuje količina seizmičke sile te se takva građevina projektira za niže razine seizmičkog opterećenja. Stoga se može očekivati da će slabiji konstrukcijski elementi biti prisutni u konstrukcijama s nepravilnostima po visini prije nego kod građevina bez ikakvih nepravilnosti. Međutim, to se ne može smatrati općim pravilom već samo razlogom za smanjenje kapaciteta i porast odziva kod građevina s nepravilnostima.

Može se dakle zaključiti da do povećanja odziva nepravilnih konstrukcija po visini ne dolazi zbog bočnog ponašanja, već zbog smanjenja broja elemenata i slabljenja konstrukcijskih presjeka. Taj je postupak za desetokatne konstrukcije prikazan na slici 11.



Slika 11. Nelinearne dinamičke krivulje za konstrukcije s 10 katova: a) D1 (šesti kat); b) D3 (šesti kat); c) G3 (šesti kat); d) D3 (osmi kat)

Analizom krivulja prikazanih na slici 11. može se uočiti da odziv desetokatnih konstrukcija raste u odnosu na konstrukcije s petnaest i dvadeset katova. Stoga se može zaključiti da odziv konstrukcija na naglo uklanjanje stupova raste usporedo sa smanjenjem broja katova. Kod desetokatnih modela, najveći odziv konstrukcija zabilježen je u slučaju G3-6. Kao i kod modela s petnaest i dvadeset katova, nepravilne konstrukcije imaju najmanji odziv i najmanji potencijal pri naglom uklanjanju stupa. Općenito uzevši, nepravilne konstrukcije u slučaju 10-3 imaju najveći odziv na naglo uklanjanje stupova. Ako se u obzir uzmu svi modeli, najmanji odziv bilježi se u slučaju uklanjanja stupa na ukrućenom rasponu. Prisutnost vezova smanjuje najviši odziv i vibracije uslijed naglog uklanjanja stupa. Povećanje broja raspona u konstrukciji dovodi do povećanja odziva na naglo uklanjanje stupa.

4. Zaključak

Cilj ovog rada je utvrditi ponašanje nepravilnih konstrukcija po visini u različitim scenarijima postupnog rušenja nakon naglog uklanjanja stupa. U istraživanju su konstrukcije s deset, petnaest

i dvadeset katova izložene naglom uklanjanju stupa nakon nelinearnog modeliranja pomoću metode APM. Definirana su četiri scenarija uklanjanja stupa s tri nepravilne konstrukcije i s jednom pravilnom građevinom. Kapacitet konstrukcija u slučaju naglog uklanjanja stupa istražena je metodom NSA, a njihov odziv istražen je metodom NDA.

Rezultati pokazuju da kapacitet, tj. otpornost konstrukcije raste s porastom broja katova i kod pravilnih i kod nepravilnih konstrukcija. Ovo pitanje dovodi do smanjenja dinamičkog odziva konstrukcije. Porast nepravilnosti po visini konstrukcije obrnuto je proporcionalan smanjenju otpornosti u scenariju postupnog rušenja. Rezultati također pokazuju da uklanjanje stupa u ukrućenom rasponu dovodi do najmanjeg odziva nakon naglog uklanjanja stupa. Kako broj katova pada, tako se povećava utjecaj nepravilnosti po visini na smanjenje otpornosti konstrukcije na postupno rušenje. Niže nepravilne konstrukcije imaju veći odziv od viših nakon naglog uklanjanja stupa. Međutim, uklanjanje jednog stupa na svim konstrukcijama razmatranima u ovom istraživanju nije dovelo do postupnog rušenja te su nakon toga konstrukcije ponovno uspjele uspostaviti ravnotežu sila.

LITERATURA

- [1] Lew, H.: Best practices Guidelines for Mitigation of Building for progressive collapse, Senior Research Engineer, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, U.S.A, 20899-8611, 2003.
- [2] Usefi, N., Nav, F.M., Abbasnia, R.: Finite element analysis of RC elements in progressive collapse scenario, GRAĐEVINAR, 68 (2016) 12, pp. 1009-1022.
- [3] Faridmehr, I., Osman, M.H., Tahir, M.M., Nejad, A.F., Hodjati, R.: Procjena ponašanja "Pre-Northridge" priključaka na ekstremna opterećenja, GRAĐEVINAR, 66 (2014) 10, pp. 889-898, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1087.2014>
- [4] Misini, M., Ristic, J., Ristic, D., Guri, Z., Pllana, N.: Seizmičko poboljšanje mostova izoliranih uređajima SF-ED: analitičko istraživanje potvrđeno ispitivanjima na potresnom stolu, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 4, pp. 255-272, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2274.2017>
- [5] Ristic, J., Misini, M., Ristic, D., Guri, Z., Pllana, N.: Seizmičko poboljšanje izoliranih mostova pomoću uređaja SF-ED: Ispitivanje modela u velikom mjerilu na potresnom stolu, GRAĐEVINAR, 70 (2018) 6, pp. 463-485, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2147.2017>
- [6] Lakušić, V.T.: Pouzdanost stupova uz prometnice pri udaru vozila, GRAĐEVINAR, 64 (2012) 4, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.652.2011>
- [7] Fischinger, M., Kramar, M., Isaković, T.: Potresna sigurnost armiranobetonskih montažnih hala – eksperimentalna studija, GRAĐEVINAR, 61 (2009) 11, pp.1031-1038
- [8] GSA: Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects, The US General Services Administration, 2003.
- [9] UFC-DoD: Unified Facilities Criteria-Department Of Defense, Design of buildings to resist progressive collapse, 2005.
- [10] Kim, J., Kim, T.: Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames, Journal of Constructional Steel Research, 65 (2009), pp. 169-179.
- [11] Kim, J., Dawoon, A.: Evaluation of Progressive Collapse Potential of Steel Moment Frames Considering Catenary Action, the Structural Design of Tall and Special Buildings, 18 (2009), pp. 455-465.
- [12] Kim, J., Hong, S.: Progressive Collapse Performance of Irregular Buildings, Structural Design of Tall and Special Buildings, 20 (2011), pp. 721-734.
- [13] Mashhadiali, N., Kheyrodin, A.: Dynamic increase factor for investigation of progressive collapse potential in tall tube-type buildings, Performance of Constructed Facilities, 30 (2016), pp. 04016050.
- [14] Jalali Larijani, R., Dashti Nasserabadi, H., Aghayan, I.: Progressive collapse analysis of buildings with concentric and eccentric braced frames, Structural Engineering and Mechanics, 6 (2017), pp. 755-763.
- [15] Mahmoud, Y.M., Hasan, M.M., Mourad, S.A., Sayed, H.S.: Assessment of progressive collapse of steel structures under seismic loads, Alexandria Engineering Journal, 57 (2018), pp. 3825-3839.
- [16] Rahnavard, R., Fathi Zadeh Fard, F., Hosseini, A., Suleiman, M.: Nonlinear analysis on progressive collapse of tall steel composite buildings, Case studies in construction materials, 8 (2018), pp. 359-379.
- [17] Kordbagh, B., Mohammadi, M.: Influence of seismicity level and height of the building on progressive collapse resistance of steel frames, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 26 (2017), pp. 1305.

- [18] Kiakojouri, F., Sheidaii, M.R., De Biagi, V., Chiaia, B.: Progressive Collapse Assessment of Steel Moment-Resisting Frames Using Static-and Dynamic-Incremental Analyses, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34 (2020) 3, pp. 04020025.
- [19] SAP2000 v17.1.1: Structural analyses and design, Theory Manual, 2015.
- [20] Buildings standard- 2800: Iranian code of practice for seismic resistant design of, Building and Housing Research Center, 2004.
- [21] AISC360: Specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago (IL), 2010.
- [22] Kim, T., Kim, J.: Collapse analysis of steel moment frames with various seismic connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (2009), pp. 1316-1322.
- [23] Izzuddin, B.A., Vlassis, A.G., Elghazouli, A.Y., Nethercot, D.A.: Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss- Part I: Simplified assessment framework, *Engineering Structures*, 30 (2008), pp. 1308-18.
- [24] Vlassis, A.G., Izzuddin, B.A., Elghazouli, A.Y., Nethercot, D.A.: Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss- Part II: Application, *Engineering Structures*, 30 (2008), pp. 1424-38.
- [25] Luo, J., Fahnestock, LA., Faveb, L.: Nonlinear Static Pushover and Eigenvalue Modal Analyses of Quasi-Isolated Highway Bridges with Seat-Type Abutments, *Structures*, 12 (2017), pp. 145-167.
- [26] Scott, M.H.: Numerical integration options for the force-based beam-column element in OpenSees, *Force-Based Element Integration Options in OpenSees*, (2011), pp. 1-7.