

Primljen / Received: 21.12.2020.

Ispravljen / Corrected: 26.8.2021.

Prihvaćen / Accepted: 21.6.2022.

Dostupno online / Available online: 10.9.2022.

# Metoda procjene kolapsa čeličnog okvira temeljena na faktoru dinamičkog povećanja

## Autori:



Dr.sc. **Pengfei Wang**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Nanyang Normal  
Nanyang, Kina  
Odjel za građevinarstvo i arhitekturu  
[wpf8664@163.com](mailto:wpf8664@163.com)



Dr.sc. **Xiaofei Wang**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Nanyang Normal  
Nanyang, Kina  
Odjel za građevinarstvo i arhitekturu  
[wangxiaofei870102@163.com](mailto:wangxiaofei870102@163.com)  
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

**Pengfei Wang, Xiaofei Wang**

## Metoda procjene kolapsa čeličnog okvira temeljena na faktoru dinamičkog povećanja

Kako bi se istražio razvoj faktora dinamičkog povećanja (eng. dynamic increase factors -  $DIF_{\delta}$ ) i odnosa između  $DIF_{\delta}$  i sposobnosti otpornosti konstrukcije s priključcima izvedenim kutnicama na hrptu nosača na progresivni kolaps u scenariju uklanjanja stupa, na temelju postojećeg nazovi statičkog ispitivanja uspostavljen je rafinirani model konačnih elemenata. Zakonitosti razvoja  $DIF_{\delta}$  proučavaju se pri različitim vrstama opterećenja, visinama nosača i rotacijskim krutostima priključka. Utvrđeno je da faktor dinamičkog povećanja temeljen na pomaku ( $DIF_{\nu}$ ) raste s porastom razine opterećenja u elastičnom i elastičnoplastičnom području, te se  $DIF_{\nu}$  smanjuje s povećanjem razine opterećenja u plastičnom području. S povećanjem oštećenja konstrukcije,  $DIF_{\nu}$  dostiže najveću vrijednost kada je omjer frekvencija jednak 1, opadajući s daljnjim povećanjem omjera frekvencije i stupnja prigušenja. Faktor dinamičkog povećanja temeljen na opterećenju ( $DIF_p$ ) u negativnoj je korelaciji s "učinkom tlačnog luka" nosača. Konačno, metoda temeljena na  $DIF_{\nu}$  predlaže se za ocjenjivanje kolapsa konstrukcija s priključcima izvedenim kutnicama na hrptu nosača. U radu je ponuđeno i poboljšanje projektiranja priključaka izvedenih kutnicama na hrptu nosača koje se pokazalo razumnim i učinkovitim uz pomoć metode procjene kolapsa koja je predložena.

### Ključne riječi:

progresivni kolaps, faktor dinamičkog povećanja, metoda procjene kolapsa, poboljšanje priključaka, metoda ravnoteže energije

Research Paper

**Pengfei Wang, Xiaofei Wang**

## Steel frame collapse assessment method based on dynamic increase factor

To study the laws of evolution of dynamic increase factors ( $DIF_{\delta}$ ), relationship between the  $DIF_{\delta}$  and progressive collapse resisting capacity of a structure with web cleat joints under the column removal scenario, a refined finite element model is established based on an existing quasi-static test. The laws of evolution of  $DIF_{\delta}$  are studied for different loading type, beam height, and joint rotation stiffness. It was observed that the displacement-based dynamic increase factor ( $DIF_{\nu}$ ) increases with an increase in the load level in elastic and elastic-plastic stages, and it decreases with an increase in the load level in the plastic stage. With an increase in structural damage,  $DIF_{\nu}$  reaches the maximum value when the frequency ratio is equal to 1 and decreases with a further increase in frequency and damping ratios. The load-based dynamic increase factor ( $DIF_p$ ) is negatively correlated to the "arch compression effect" of the beam. Finally, a method based on  $DIF_{\nu}$  is proposed for judging the collapse of structures with web cleat joints. In addition, an improvement is provided for the design the web cleat joint. The improvement is proved to be reasonable and effective with the help of collapse evaluation method proposed in this study.

### Key words:

progressive collapse, dynamic increase factor, collapse evaluation method, joint improvement, energy balance method

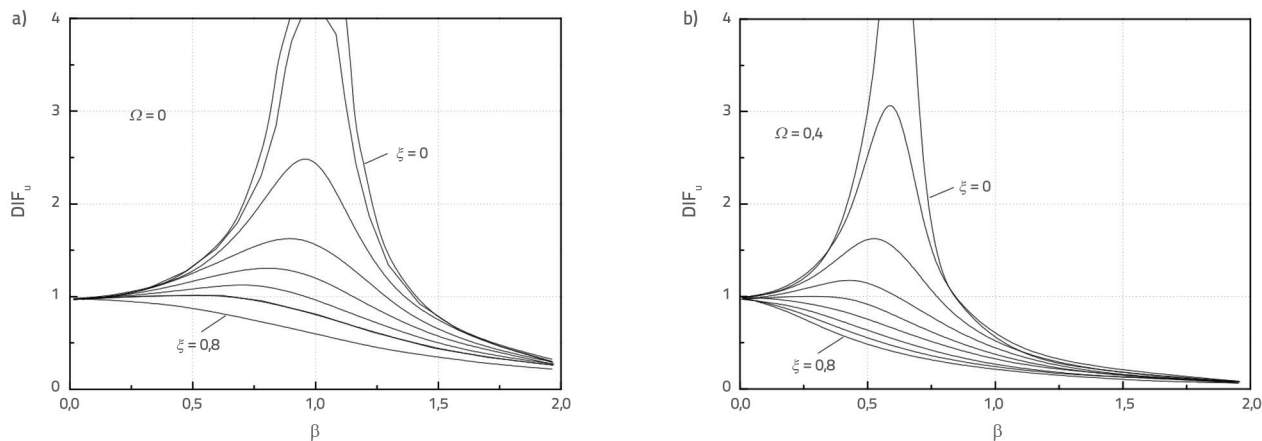
## 1. Uvod

Od djelomičnog urušavanja apartmana u Ronan Pointu 1968. godine, mnogi znanstvenici i inženjeri neprekidno proučavaju progresivni kolaps građevinskih konstrukcija. Progresivni kolaps građevinskih konstrukcija označava proces u kojem se početno oštećenje uzrokovano lokalnim oštećenjem konstrukcija pod ekstremnim događajem (kao što je jak potres, udar, eksplozija, požar itd.), proširi na druge dijelove konstrukcije zbog unutarnje preraspodjele sile, što na kraju dovodi do djelomičnog ili potpunog urušavanja konstrukcija [1]. Nakon nekonvencionalnih opterećenja, geometrija konstrukcije se naglo mijenja i dovodi do vibracija. Progresivni kolaps konstrukcije zapravo je nelinearni dinamički proces. Stvarno ponašanje konstrukcije može se dobiti metodom nelinearne dinamičke analize. Međutim, metoda analize je toliko složena da nije prikladna za praktičnu inženjersku primjenu. Dinamički odgovor konstrukcije može se pojednostaviti kao statički faktor dinamičkog povećanja (eng. *dynamic increase factors* - DIF). U istraživanju progresivnog kolapsa DIF je uvijek popularna tema.

Godine 1964. Biggs [2] je predložio da se dinamička analiza konstrukcijskog sustava može pojednostaviti pomoću  $DIF_u$  koji je korišten za prikaz odnosa između statičkog i dinamičkog odgovora konstrukcije. Kasnije su istraživači predložili i  $DIF_p$  za olakšavanje projektiranja komponenti konstrukcije. Mnogi znanstvenici diljem svijeta [1, 3-11] iznijeli su različite stavove o ovom pitanju. Godine 2008., Hu i Qian [1] analizirali su dinamički odgovor ravninskog čeličnog okvira s dva broda i jednom etažom prema scenariju uklanjanja stupa, koristeći pojednostavljeni model odnosno model od štapnih elementa. Rezultati su pokazali da se  $DIF_u$  u linearno elastičnom stanju smanjio s povećanjem vremena oštećenja i stupnja prigušenja, a najveća vrijednost bila je 2,0;  $DIF_u$  u plastičnom stanju također je bio povezan s omjerom zahtijevanog kapaciteta (eng. *demand capacity ratio* - DCR), povećavajući se s povećanjem DCR-a do kolapsa konstrukcije. Godine 2009. Izzuddin i Nethercot [3] analizirali su  $DIF_p$  metodom ravnoteže energije. Istaknuto je da bi se  $DIF_p$  povećao s povećanjem duktilnosti ako se razmotre djelovanje nosača kao lančanica ili membransko djelovanje. Norma za projektiranje u SAD-u DoD [4] prilagodila je krivulju  $DIF_p$  u odnosu na plastični kut zakretanja na temelju testa uklanjanja stupa trokatne čelične konstrukcije. Smatralo se da je  $DIF_p$  bio povezan s vrstom priključaka i razvojem plastičnih zglobova. Također, dana je odgovarajuća formula za proračun. Godine 2010. Huo i Hu [5] proučavali su  $DIF_p$  u progresivnom kolapsu numeričkom metodom analize. Rezultati su pokazali da su  $DIF_p$  bili manji od 2,0, a dinamički odgovor konstrukcije bio je vrlo osjetljiv na rotacijsku krutost priključaka. Tsai [6] je 2010. godine proučavao  $DIF_s$  na temelju pojednostavljenog modela. Rezultati su pokazali da se  $DIF_p$  smanjuje s povećanjem duktilnosti u tipičnim elastičnoplastičnim konstrukcijama, a  $DIF_u$  se povećava povećanjem razine opterećenja. Godine 2011. Tian i Su [7] proveli su dinamičko ispitivanje ravninskog čeličnog okvira s dva broda prema scenariju uklanjanja srednjeg stupa. Utvrđeno je da je  $DIF_p$

bio između 1,36 i 1,7. Također,  $DIF_p$  se smanjio sa smanjenjem krutosti nosača uzrokovane opterećenjem. Godine 2012. Naji i Irani [8] analizirali su progresivni kolaps čelične konstrukcije: ako lančano djelovanje nije uzeto u obzir,  $DIF_p$  se može povećati s rastom duktilnosti. Međutim, kada je duktilnost dosegla 12,0,  $DIF_p$  se približio iznosu od 1,0. Ako se uzme u obzir lančano djelovanje, za vrijednost duktilnosti do 4,0, rastuća duktilnost uzrokovala je da se  $DIF_p$  smanji; međutim, nakon toga se  $DIF_p$  povećava. Za vrijednost duktilnosti jednaku 12,0, vrijednost  $DIF_p$  bila je otprilike 2,0. Kao rezultat toga, ako je lančano djelovanje uzeto u obzir i duktilnost konstrukcije je bila visoka, korištenje faktora opterećenja jednakog 2,0 nije bilo konzervativno. Godine 2012. Tsai i You [9] proučavali su  $DIF_s$  pri progresivnom kolapsu konstrukcije. Rezultati su pokazali da su  $DIF_u$  i  $DIF_p$  bili različiti u neelastičnoj fazi. Prvi je bio veći od 2,0, a  $DIF_u$  krivulja je bila konkavna i usmjerena prema dolje. Nasuprot tome, posljednji je bio manji od 2,0, a krivulja je bila konkavna. Godine 2013. Liu [10] je proučavao  $DIF_s$  konstrukcije prema scenariju uklanjanja stupa. Smatralo se da su i  $DIF_u$  i  $DIF_p$  bili oko 2,0 u elastičnom stadiju. I  $DIF_p$  bi premašio 2,0 s razvojem plastičnih zglobova. Godine 2016. Xie i sur. [11] proveli su eksperimentalno istraživanje  $DIF_p$  pri progresivnom kolapsu čelične konstrukcije. Utvrđeno je da je  $DIF_p$  bio jednak 2,0 primjenom metode statičke elastičnosti; a primjenom statičke elastičnoplastične metode analize,  $DIF_p$  varirao je između 1,0 i 2,0. Deng i sur. [12] proveli su teorijsku derivaciju  $DIF_s$ , što pokazuje da je izravno povezan s krutošću, stupnjem prigušenja i frekvencijskim omjerom. U literaturi [13] teorijsku formulu  $DIF_u$  izveli su Clough i sur., što je funkcija stupnja prigušenja i frekvencijskog omjera.

Osim toga, mnogi su znanstvenici istraživali odnos između oštećenja materijala i dinamičkih karakteristika konstrukcijskih komponenti. Na temelju odnosa između prigušenja i deformacije i odnosa između lokalnog oštećenja i deformacije, odnos između oštećenja i prigušenja dobiven je s deformacijom kao medijem, a Xing [14] je dao odgovarajuću formulu. Fu i sur. [15] proučavali su konstitutivne odnose s obzirom na oštećenje i odgovarajuće nelinearne dinamičke jednadžbe za lameliranu ploču, pokazujući da bi se dinamički odgovori konstrukcija značajno promijenili kada bi se razmotrilo oštećenje i razvoj oštećenja. Wang i sur. [16] smatraju da dinamička svojstva konstrukcija ovise o masi, prigušenju, krutosti i njihovoj raspodjeli unutar konstrukcije. Dinamičke karakteristike konstrukcija mijenjale su se pri promjeni ovih parametara i njihove distribucije. Zhang i sur. [17] numerički su proučavali dinamički odgovor oštećenih komponenti i dinamičko ponašanje oštećenih materijala. Zaključeno je da kada se frekvencijski spektar oštećene konstrukcije smanjuje, stupanj prigušenja oštećenih materijala postaje veći, a amplituda odgovora značajno se povećava. Također su napravili i usporedbu za krivulje  $DIF_u$  naspram frekvencijskog omjera ( $\beta$ ) pod različitim stupnjima prigušenja ( $\xi = 0$  do 0,8) u slučaju oštećenja ( $\Omega = 0,4$ ) i bez oštećenja ( $\Omega = 0$ ), kao što je prikazano na slici 1. Park i sur. [18] razmotrili su indeks oštećenja Park-Ang kao kriterij kolapsa. S povećanjem kumulativnog oštećenja konstrukcije smanjila se otpornost konstrukcije na urušavanje.



Slika 1. Odnos između  $DIF_u$  i frekvencijski omjer konstrukcije s različitim stupnjem prigušenja ( $\xi = 0-0,8$ ) u slučajevima neoštećenja i oštećenja: a) U slučaju neoštećenja; b) U slučaju oštećenja

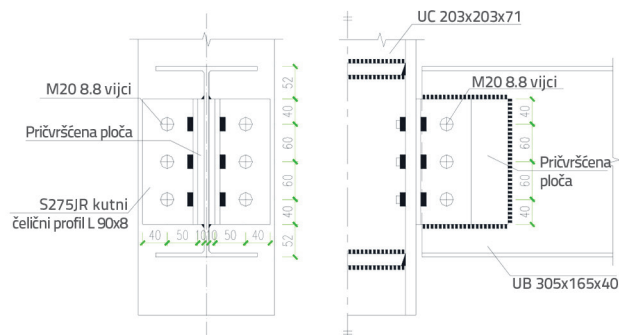
Prema navedenom, učinci vremena oštećenja, DCR-a, tipa priključka, razvoja duktilnosti i plastičnosti, stupnja prigušenja, frekvencijskog omjera i oštećenja na dinamički odgovor pri progresivnom kolapsu konstrukcija razmatrani su s aspekta eksperimenta, numeričke simulacije ili teorije. Sadašnja istraživanja zakonitosti evolucije  $DIF_s$  pri progresivnom kolapsu konstrukcija još uvijek nisu ujednačena, a posebice su istraživanja  $DIF_u$  rijetka. Nadalje, utvrđeno je da su izravne determinante  $DIF_u$ -a parametri dinamičke izvedbe uključujući stupanj prigušenja i frekvencijski omjer. Prema prethodnim istraživanjima [14, 16, 19], oštećenje konstrukcije također ovisi o stupnju prigušenja i frekvencijskom omjeru. Dakle, moguće je da se  $DIF$  usvoji kao mjera za procjenu oštećenja konstrukcije. Kada se radi o frekvencijskom omjeru, on je u literaturi definiran kao omjer primijenjene frekvencije opterećenja i prirodne frekvencije slobodnih vibracija [13].

Na temelju nazovanih statičkog ispitivanja kolapsa ravninskog čeličnog okvira s dva broda i jednom etažom sa priključcima izvedenim kutnicima na hrptu nosača prema scenariju koncentriranog opterećenja, koje su proveli Yang i Tan [20], u ovom je radu prikazan odgovarajući model konačnih elemenata. Uzimajući u obzir utjecaj DCR-a, razvoja plastičnosti, stupnja prigušenja, frekvencijskog omjera i oštećenja na faktor dinamičkog povećanja ( $DIF_s$ ),  $DIF$  u progresivnom kolapsu proučava se pod različitim tipovima opterećenja, visinama nosača i rotacijske krutosti priključka, kako bi se analizirali zakoni evolucije  $DIF$ s i dobio odnos između  $DIF$ s i sposobnosti otpornosti na progresivni kolaps konstrukcije sa priključcima izvedenim kutnicima na hrptu nosača prema scenariju uklanjanja stupa, i za smjernice projektiranja konstrukcije na makro razini. Naposljetku, razvijeno je poboljšanje priključaka izvedenih kutnicima na hrptu nosača.

## 2. Osvrt na postojeća ispitivanja

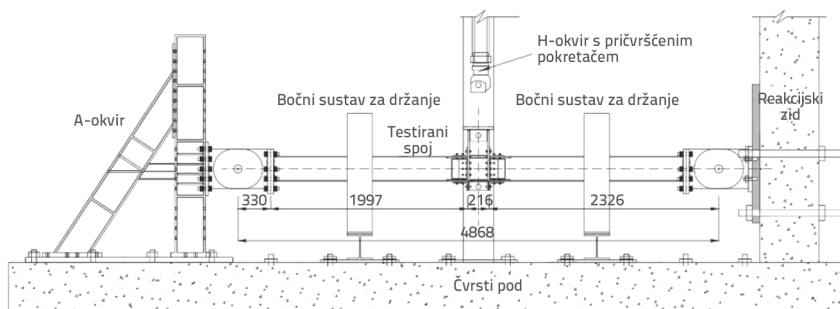
U literaturi [20] provedena su nazovi statička ispitivanja kolapsa ravninskih čeličnih okvira s dva broda i jednom etažom s različitim tipovima priključaka. Dinamički odgovor

u progresivnom procesu kolapsa čelične konstrukcije s priključcima izvedenih čeličnim kutnicima na hrptu nosača razradit će se u ovom radu u svrhu komplementarnog istraživanja. U ispitivanju, UC 203x203x71 označava stup, UB 305x165x40 označava nosač, a L 90x8 čelični kutnik. S tri vijka M20 stupnja 8.8, kutni čelični profil je povezan s hrptom nosača i pojasnicom stupa. Između hrpta nosača i kutnika projektirana je dodatna ploča dimenzija 200x150x10. Ukrućenja su projektirana u području anela hrpta priključka. Čelik S275JR upotrebljava se za kutnike, a čelik S355 služi za ostale čelične dijelove. Detalji priključka prikazani su na slici 2.



Slika 2. Detalji priključka [20]

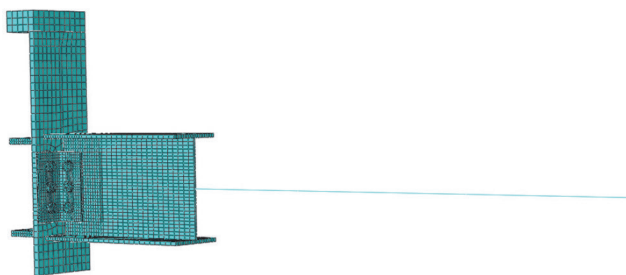
Uređaj za ispitivanje prikazan je na slici 3. Pod pretpostavkom da je točka infleksije nosača u sredini raspona, kao objekti istraživanja uzimaju se lijevi i desni nosač s pola raspona te srednji priključak. Lijevi i desni krajevi uzorka zglobovima su pričvršćeni za A-okvir, odnosno reakcijski zid. Uzimajući u obzir prostorni učinak konstrukcije, ugrađeni su sustavi za bočno pridržanje kako bi se ograničila torzija i bočni pomak nosača. H-okvir s aktuatorom ugrađen je iznad priključka kao sustav za bočno pridržanje i sustav opterećivanja. Točka opterećenja kontrolirana pomakom primjenjuje se na središnji stup pomoću aktuatora. Opterećenje, koje se može promatrati kao statičko, primjenjuje se pod kontrolom pomaka brzinom od 6 mm/min.



Slika 3. Postavljeno ispitivanje [mm] [20]

### 3. Postavljanje i verifikacija modela konačnih elemenata

U ovom radu korišten je računalni program ABAQUS. Pozivajući se na poznate eksperimentalne podatke [20] i postojeću homolognu simulaciju [21], uzimajući u obzir simetriju konstrukcije i računsku učinkovitost, izrađen je model pola konstrukcije s višestrukim mjerilima sa priključcima izvedenim kutnicima na hrptu nosača. Geometrijske dimenzije svih komponenti jednake su onima u ispitivanju. Na temelju mehaničkih parametara materijala, čelik Q345B koristi se umjesto čelika kvalitete S355. Kada se radi o čeliku Q345B, granica popuštanja je 350 MPa, vlačna čvrstoća je 550 MPa, a istezanje je 22 %. Prema [21], čelični kutnik je podijeljen u dva područja uključujući područje spoja krakova kutnika i ostatak, a različiti materijalni parametri su dani u dva područja. Koriste se čvrsti element (C3D8R) i gredni element (B31). Čvrsti element (C3D8R) primjenjuje se samo u području priključka, stupu i lokalnom dijelu nosača u blizini priključka, a gredni element (B31) na krajnjem kraju nosača. Kada se radi o čvrstom elementu, približna veličina elementa za vijke i rupe za vijke je 5 mm, a 10 mm za ostatak modela. Kada se radi o kontaktima u modelu konačnih elemenata, kontakt između vijka i rupe za vijak je normalni čvrsti kontakt, kontakt između podložne pločice vijka i čelične ploče i kontakt između kutnika i čelične ploče modeliran je i modelom tangencijalnog Coulombovog trenja i normalnog čvrstog kontakta, a s koeficijent trenja postavljen je na 0,5. Ograničenja spajanja u naredbi ograničenja služe za definiranje dijela nosača koji je modeliran čvrstim elementima grede i dijela nosača modeliranog grednim elementima.

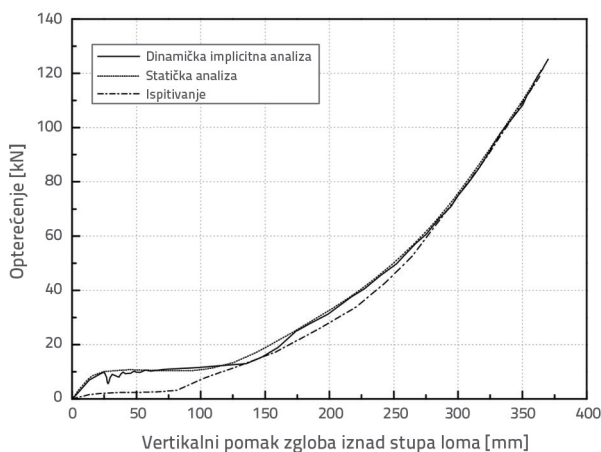


Slika 4. Model konačnih elemenata

Ekvivalentni promjer vijka je 17,65 mm, a sila prednapreznja vijka je 140 kN. Model je prikazan na slici 4. Za primjenu sile prednapreznja vijaka u Abaqusu, uspostavljena su tri koraka analize: u prvom koraku, primjenjuje se mala sila prednapreznja (0,01 kN) kako bi se razvio stabilan kontakt u simulaciji. U drugom koraku primjenjuje se normalna sila prednapreznja (140 kN); a u trećem koraku primjenjuje se opcija "popravi po trenutnoj duljini". Točka opterećenja

kontrolirana pomakom iznad stupa koji otkazuje primjenjuje se od četvrtog koraka analize.

Metoda statičke analize i metoda dinamičke implicitne analize također se primjenjuju. U dinamičkoj implicitnoj analizi, za dobivanje ekvivalentne statičke krivulje opterećenje-pomak potrebno je odabrati odgovarajuće vrijeme koraka, odnosno vrijeme uklanjanja stupa. Odgovarajući kod kolapsa propisuje da trajanje dinamičkog opterećenja ne smije biti veće od 0,1 puta prirodnog perioda vibracija preostale konstrukcije [22]. Ako se vrijeme koraka produlji u dinamičkoj implicitnoj analizi, dinamički odgovor konstrukcije bio bi oslabljen. Usporedba rezultata simulacije i eksperimentalnih rezultata prikazana je na slici 5. Razlika na početku može biti posljedica praznina u pojednostavljenim rubnim uvjetima u ispitivanju. Također, može se smatrati da su rezultati simulacije izvedivi. Osim toga, također se može vidjeti da se dvije simulacijske krivulje iz različitih metoda analize u osnovi podudaraju, što pokazuje da dinamička implicitna analiza može zamijeniti statičku analizu. Potrebno je napomenuti da vrijednost pomaka u dinamičkoj implicitnoj analizi predstavlja maksimalni pomak, koji je u nastavku jednak. Kada se radi o modelu konačnih elemenata za analizu dinamičkog odgovora modela konstrukcije, bit će prikazan u poglavlju 5.4.



Slika 5. Verifikacija rezultata simulacije

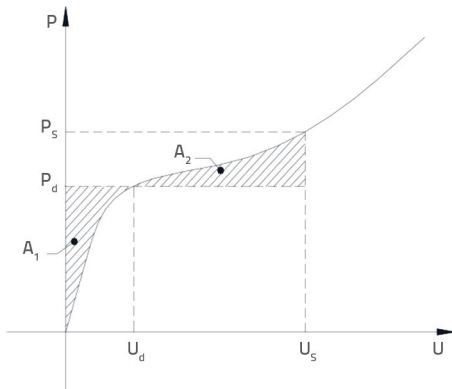
## 4. Metoda ravnoteže energije

Metoda ravnoteže energije koju je predložio Izzuddin 2008. godine [23] ističe da je vanjsko djelovanje koje vrše primijenjena opterećenja jednak energiji deformacije konstrukcije. Smatra se da su vanjski radovi koje čine dinamička opterećenja i statička opterećenja jednaki ako je odgovor konstrukcije isti, što se vidi na slici 6. Može se izraziti matematičkim formulama na sljedeći način:

$$P_d = \frac{1}{u_s} \int_0^{u_s} p du \quad (1)$$

$$A_1 = A_2 \quad (2)$$

U ovom slučaju,  $P_d$  predstavlja ekvivalentno dinamičko opterećenje koje odgovara statičkom opterećenju  $P_s$ ;  $P_s$  predstavlja statičko opterećenje;  $u_d$  i  $u_s$  predstavljaju pomake koji odgovaraju  $P_d$  i  $P_s$ ;  $A_1$  i  $A_2$  su zasjenjena područja na slici 6.



Slika 6. Dijagram s objašnjenjem metode ravnoteže energije

Na temelju metode ravnoteže energije može se predvidjeti dinamička krivulja pomaka i opterećenja koja odgovara postojećoj statičkoj krivulji pomaka i opterećenja. Prema drugim relevantnim eksperimentalnim rezultatima [15], točnost rezultata izračunanih metodom ravnoteže energije u prihvatljivom je rasponu.

Osim toga, uz pomoć metode ravnoteže energije, teorijska zakonitosti razvoja  $DIF_s$  s povećanjem razine opterećenja može se grubo dati na temelju opće krivulje pomaka i opterećenja, kao

što je prikazano na slici 7. Iz slike 7., u elastičnom stadiju (pri niskim razinama opterećenja),  $DIF$  je jednak 2,0. S povećanjem opterećenja,  $DIF_u$  raste i postiže najveću vrijednost na prvoj točki infleksije na krivulji pomaka i opterećenja, a zatim se smanjuje s daljnjim povećanjem opterećenja. Što se tiče daljnjeg razvoja  $DIF_u$ , zakonitosti razvoja  $DIF_u$  može uvelike varirati zbog različite vrste priključka i primijenjenih opterećenja. U ovom radu se to neće opisivati.

## 5. Faktori dinamičkog povećanja

Godine 1964., Biggs [2] je predložio  $DIF_u$  kako bi se pojednostavio izračun dinamičkog odgovora konstrukcije. Kasnije su istraživači predložili i  $DIF_p$  za olakšavanje projektiranja konstrukcijskih komponenti. Pri istoj razini opterećenja,  $DIF_u$  je omjer dinamičkog odgovora prema statičkom odgovoru konstrukcije, a definiran je na sljedeći način:

$$DIF_u = u_s / u_d \quad (3)$$

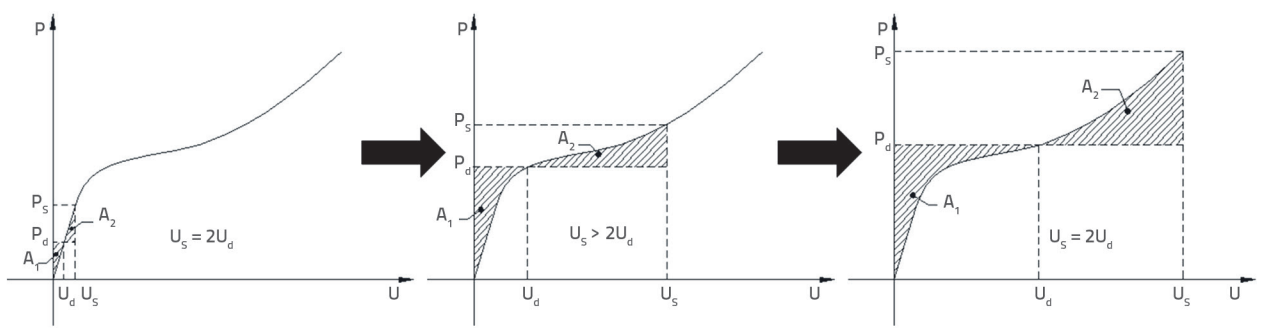
$DIF_p$  se odnosi na omjer statičkog opterećenja prema dinamičkom pod navedenim pomakom. Definirana je na sljedeći način:

$$DIF_p = P_s / P_d \quad (4)$$

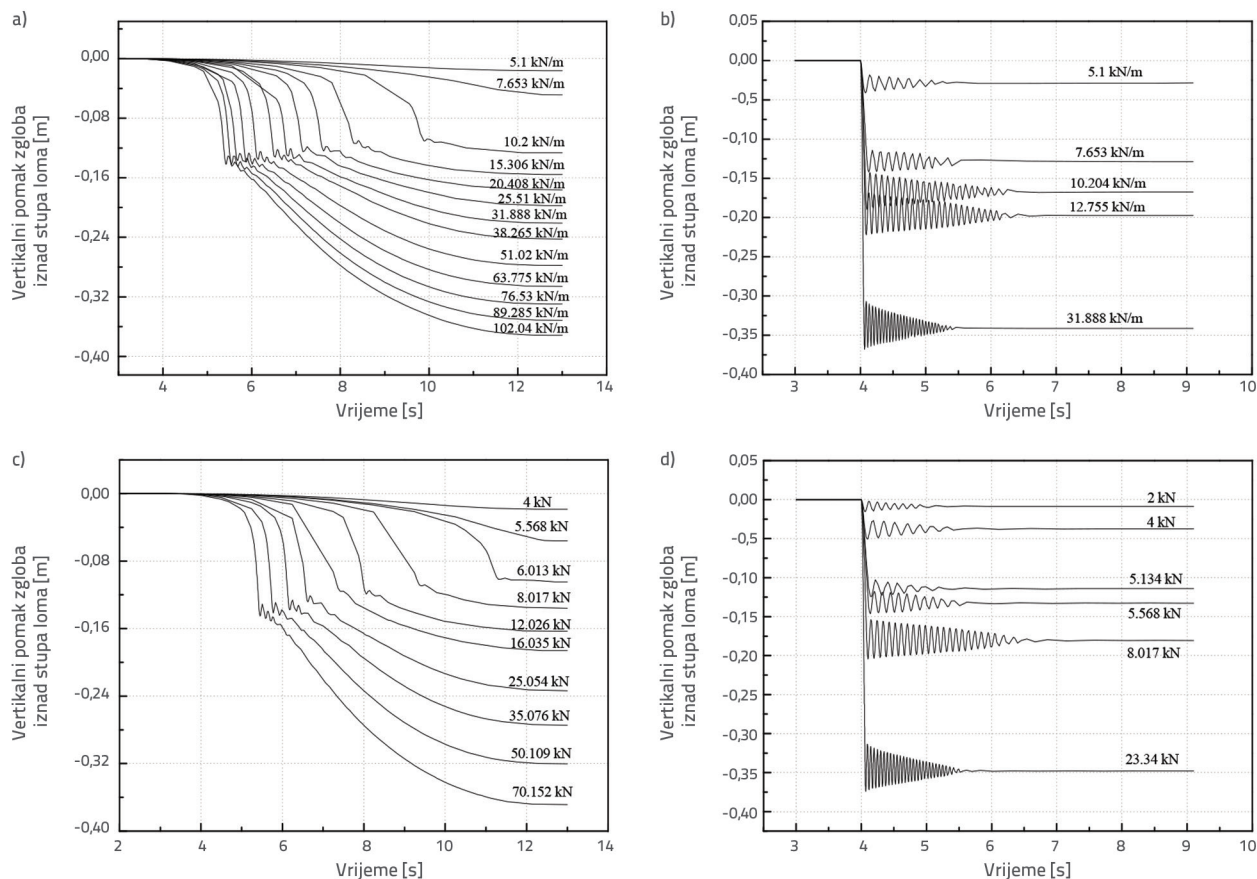
U ovom slučaju,  $u_s$ ,  $u_d$ ,  $P_s$  i  $P_d$  jednaki su onima u poglavlju 4. Na temelju metode konačnih elemenata u poglavlju 2,  $DIF_s$  konstrukcije u scenariju uklanjanja stupova analiziraju se metodom analize dinamičkog implicitnog procesa s tri aspekta, uključujući vrstu opterećenja, visinu nosača i rotacijsku krutost priključka, za smjernice projektiranja konstrukcije na makrorazini.

### 5.1. DIF-ovi pod različitim vrstama opterećenja

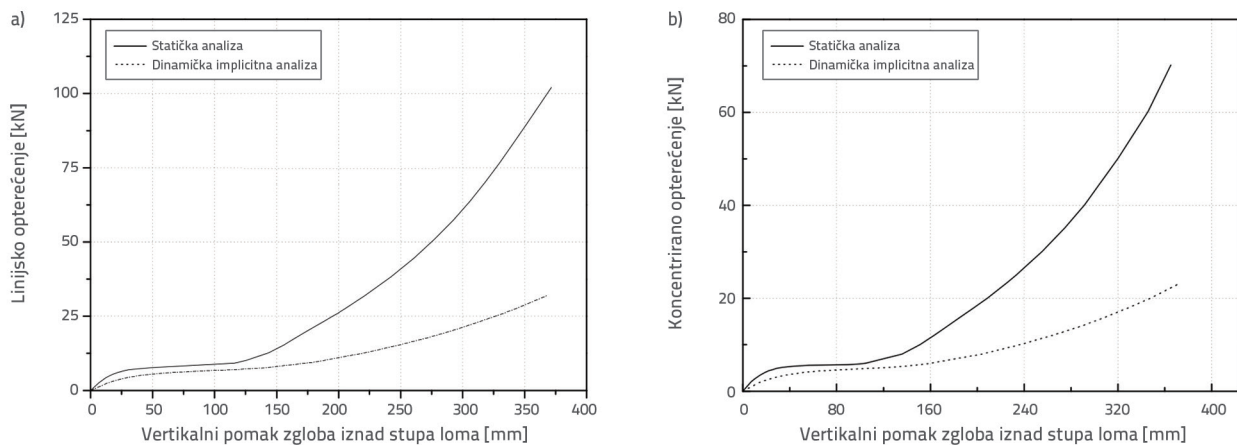
Primjenjuju se koncentrirano i linearno opterećenje. Krajnji vertikalni pomak priključka u simulaciji jednak je maksimalnoj vrijednosti u ispitivanju. Dobivene su dinamičke i statičke vremenske krivulje pomaka s dvije vrste opterećenja pod različitim razinama opterećenja, kao što je prikazano na slici 8. Potom su dobivene odgovarajuće krivulje opterećenja i pomaka, kao što je prikazano na slici 9.



Slika 7. Teorijska evolucijska zakonitost faktora dinamičkog povećanja



Slika 8. Vremenska krivulja pomaka pod različitim razinama opterećenja: a) u uvjetima statičkog linijskog opterećenja; b) u uvjetima dinamičkog linijskog opterećenja; c) u uvjetima statičkog koncentriranog opterećenja; d) u uvjetima dinamičkog koncentriranog opterećenja

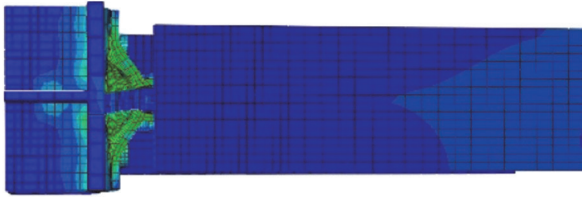


Slika 9. Krivulje pomaka i opterećenja: a) u uvjetima linijskog opterećenja; b) u uvjetima koncentriranog opterećenja

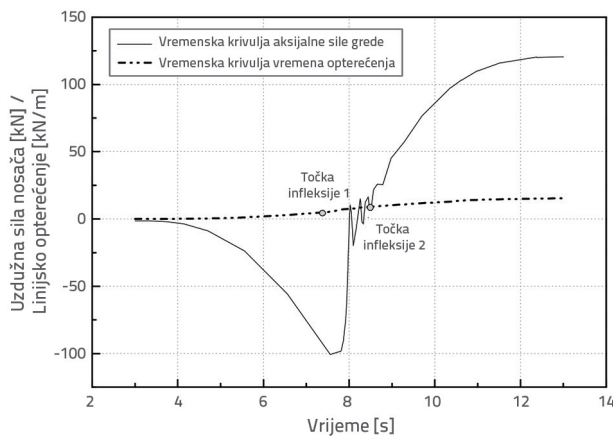
U kombinaciji s fenomenom oštećenja u simulaciji na slici 10., može se smatrati da je ključ u cijelom procesu kolapsa deformacija čeličnih kutnika. U početku, čelični kutnici uglavnom nose moment savijanja izvan ravnine. Budući da krutost na savijanje uglavnom ovisi o debljini čeličnih kutnika, ona je relativno mala. U ovom trenutku, vlačna krutost nije zapravo sudjelovala u mehanizmu konstrukcije otporne na kolaps. Stoga

je krutost konstrukcije na kolaps pri niskoj razini opterećenja relativno mala, što se može vidjeti iz krivulje opterećenja i pomaka. Kada opterećenje dosegne 7 kN/m ili 6 kN, dolazi do inicijacije savijanja izvan ravnine, što se može vidjeti na slici 9. ili na slici 11. (odgovara točki infleksije 1). Slika 11. prikazuje kontrast između vremenske krivulje uzdužne sile nosača i krivulje u vremenu opterećenja pod statičkim linearnim

opterećenjem od 15 kN/m. S povećanjem opterećenja, nastavlja se razvijati plastifikacija čeličnih kutnika. Na slici 11. očito je da postoji transformacija iz faze "djelovanja tlačnog luka" u fazu "djelovanja lančanice" u točki infleksije 2 za nosače. To jest, mehanizam otpornosti na kolaps počinje se postupno mijenjati iz mehanizma otpornosti na savijanje izvan ravnine u mehanizam vlačne otpornosti u točki infleksije 2 na slici 11.



Slika 10. Fenomen oštećenja u simulaciji

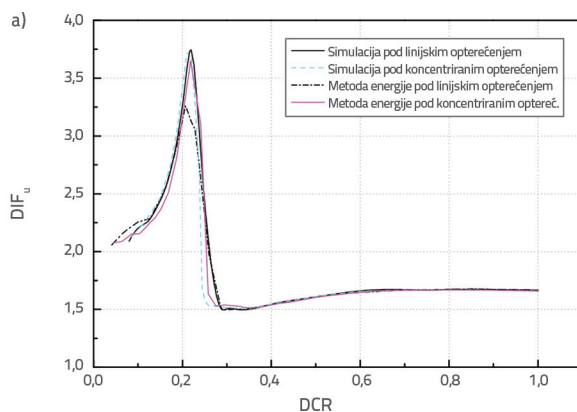


Slika 11. Vremenske krivulje uzdužne sile i opterećenja nosača

Kako bi se olakšala analiza, uveden je DCR i definiran na sljedeći način:

$$DCR = P_o / P_u \quad (5)$$

U izrazu (5),  $P_o$  predstavlja primijenjeno opterećenje, a  $P_u$  je krajnje opterećenje kolapsa.

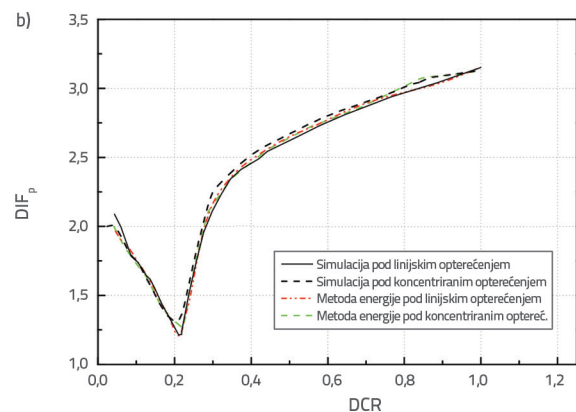


Slika 12. prikazuje DCR-DIF krivulje pod različitim vrstama opterećenja. Na slici 12. može se uočiti obrnuto proporcionalna korelacija između DCR-DIF<sub>u</sub> i DCR-DIF<sub>p</sub> krivulja i nelinearni odnos između DIF<sub>s</sub> i DCR. Pri niskoj razini opterećenja, vrijednost DIF<sub>s</sub> je blizu 2,0. Za priključak izveden kutnicima na hrptu nosača, DIF<sub>s</sub> bi se vidno povećao čak i s malim povećanjem DCR-a, čemu je uzrok njegova mala krutosti na savijanje. U početku, s povećanjem DCR-a, DIF<sub>u</sub> dostiže svoju maksimalnu vrijednost kada je DCR oko 0,22 i smanjuje se na svoju minimalnu vrijednost; a zatim lagano raste i na kraju se smanjuje. Međutim, DIF<sub>p</sub> dostiže svoju minimalnu vrijednost kada je DCR oko 0,22; a zatim raste s porastom DCR-a sve do kolapsa konstrukcije. U procesu povećanja DIF<sub>p</sub>, osjetljivost DIF<sub>p</sub> na razinu opterećenja postupno se smanjuje, što znači da DIF<sub>p</sub> krivulja nije prikladna za procjenu sposobnosti otpornosti konstrukcije na progresivni kolaps.

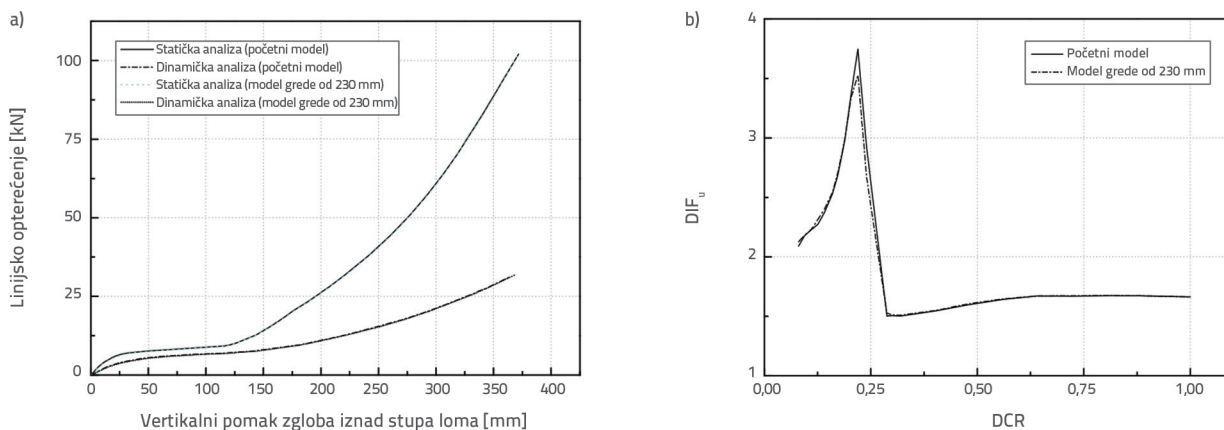
Iz perspektive tipa opterećenja na slici 12., DCR-DIF<sub>u</sub> krivulje su zapravo iste, posebice pri visokoj razini opterećenja. Kada se radi o DCR-DIF<sub>p</sub> krivulji, minimalna vrijednost DIF<sub>p</sub> pod koncentriranim opterećenjem je 8,3 % manja od one pod linearnim opterećenjem, a pod visokom stopom opterećenja vrijednost DIF<sub>p</sub> pod linearnim opterećenjem nešto je veća od one pod koncentriranim opterećenjem.

Uspoređujući rezultate DIF-a iz simulacije s onima iz metode ravnoteže energije pod koncentriranim opterećenjem na slici 12., pokazalo se da su rezultati zapravo isti. U uvjetima linearnog opterećenja, maksimalna vrijednost DIF<sub>u</sub> izračunana metodom ravnoteže energije 13 % je manja od one iz simulacije. Pri visokoj stopi opterećenja, razlika nestaje.

Općenito, DCR-DIF<sub>u</sub> krivulja je u skladu s razvojem plastifikacije čeličnog kutnika u priključku: prije savijanja izvan ravnine kutnika, DIF<sub>u</sub> naglo raste s povećanjem razine opterećenja, a naglo opada s razvojem plastifikacije kutnika do stvaranja plastičnog zgloba. Zatim, vlačna krutost kutnika postupno počinje imati veliki utjecaj u mehanizmu otpora na kolaps. I u novom mehanizmu za otpornost na kolaps, DIF<sub>u</sub> neznatno raste zbog povećanja razine opterećenja i na kraju blago opada kada je DCR jednak 0,8. Može se zaključiti da se vrhunac DCR-DIF<sub>u</sub> krivulje koja odgovara mehanizmu vlačne otpornosti, može koristiti kao kritična



Slika 12. Usporedba DCR-DIF krivulje pod različitim vrstama opterećenja: a) DIF<sub>u</sub>; b) DIF<sub>p</sub>



Slika 13. Usporedba izračunanih rezultata s različitim visinama nosača: a) krivulje pomaka i opterećenja; b) DCR-DIF<sub>v</sub> krivulje

točka kolapsa konstrukcije. A primijenjeno opterećenje koje odgovara vrhuncu može predstavljati sposobnost otpornosti na progresivni kolaps.

Zatim bi se navedena metoda procjene kolapsa analizirala iz perspektive oštećenja materijala, kako bi se dodatno potvrdila njezina svrhovitost. Uzimajući u obzir različite mehanizme otpora na kolaps u procesu kolapsa konstrukcije, razvoj oštećenja dijeli se na dva tipa uključujući savijanje i vlak. Svakoj vrsti razvoja oštećenja odgovara jedna DCR-DIF<sub>v</sub> krivulja. S povećanjem DCR-a, postupno bi se razvijalo oštećenje komponenti konstrukcije, a bilo bi praćeno smanjenjem krutosti, povećanjem stupnja prigušenja i smanjenjem prirodne frekvencije [13]. U kombinaciji s istraživanjima dostupnima u literaturi [17], uz smanjenje od prirodne frekvencije, maksimum DIF<sub>v</sub> pojavio bi se kada je frekvencijski omjer jednak 1, odnosno došlo bi do rezonancije konstrukcije. Daljnjim razvojem oštećenja s povećanim DCR-om, konstrukcija prelazi u plastični stadij i krutost se naglo smanjuje, što uzrokuje povećanje stupnja prigušenja i frekvencijskog omjera. Kao što je vidljivo na slici 1., kada omjer frekvencije prijeđe 1,0, povećanje stupnja prigušenja i povećanje frekvencijskog omjera uzrokuju smanjenje DIF<sub>v</sub>. Odgovarajući svakoj vrsti navedenog razvoja oštećenja, DCR-DIF<sub>v</sub> krivulja najprije pokazuje trend rasta, a zatim pada. Prema toj analizi, popuštanje komponente konstrukcije događa se na vrhuncu DCR-DIF<sub>v</sub> krivulje. Za istraživanje progresivnog kolapsa, vrhunac pri kojem krutost naglo opada, mogao bi predstavljati oštećenje odgovarajućeg mehanizma otpornosti na kolaps. U kombinaciji s postojećim ispitivanjem i rezultatima metode konačnih elemenata, razumno je da se vrhunac DCR-DIF<sub>v</sub> krivulje koja odgovara mehanizmu otpornosti na konačan kolaps može uzeti kao kritična točka kolapsa konstrukcija. Može se smatrati da se vrhunac DCR-DIF<sub>v</sub> krivulje koja odgovara mehanizmu vlačne otpornosti, može koristiti kao kritična točka kolapsa konstrukcije. Primijenjeno opterećenje koje odgovara vrhuncu može predstavljati sposobnost otpornosti na progresivni kolaps.

Međutim, DIF<sub>p</sub> nije osjetljiv na razvijanje plastifikacije. U kombinaciji sa slikom 11. i slikom 12.b, razvoj DIF<sub>p</sub> ima izravan

odnos s razvojem uzdužne sile nosača. Vrijednost DIF<sub>p</sub> smanjuje se s povećanjem tlačnog naprezanja u nosaču (ili učinka tlačnog luka), a raste sa smanjenjem tlačnog naprezanja u nosaču (ili učinkom tlačnog luka) sve do oštećenja konstrukcije.

## 5.2. DIF-ovi s različitim visinama nosača

Analizirat će se utjecaj visine nosača na DIF u uvjetima linearnog opterećenja, a služiti će kao preporuka za projektiranje konstrukcije.

U ovom odjeljku, visina nosača određena je na 230 mm, što odgovara 303,4 mm u početnom modelu. Slika 13. prikazuje usporedbu opterećenja i pomaka i DCR-DIF<sub>v</sub> krivulje između početnog modela i modela nosača od 230 mm. Utvrđeno je da odgovarajuće krivulje nemaju razlike u različitim modelima konstrukcija, što upućuje na to da visina nosača nema utjecaja na performanse kolapsa konstrukcije sa priključkom kutnika. Razlog tome može biti činjenica da je rotacijska krutost koja ovisi o deformaciji i oštećenju čeličnih kutnika relativno mala u usporedbi s linearnom krutosti nosača.

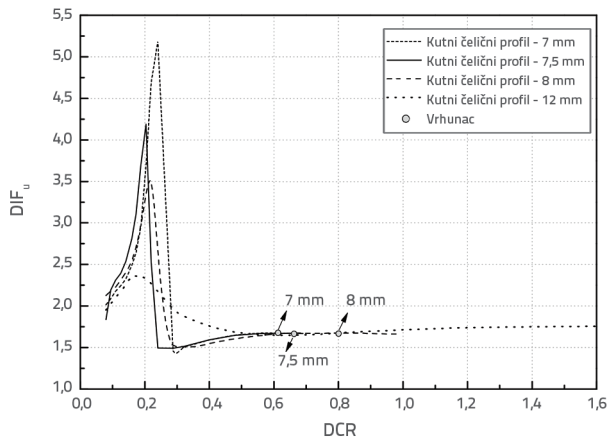
## 5.3. DIF-ovi s različitim rotacijskim krutostima priključka

Na temelju prethodne analize, debljina kutnika određena je na 7,0 mm, 7,5 mm odnosno 12 mm, kako bi se proučio utjecaj rotacijske krutosti priključka na DIF<sub>v</sub>, te dodatno potvrdio odnos između zakonitosti razvoja DIF<sub>v</sub> i sposobnosti otpornosti konstrukcije s priključkom izvedenim kutnicima na hrptu nosača na progresivni kolaps. DCR-DIF<sub>v</sub> krivulje, koje su dobivene istom metodom kao i prije, prikazane su na slici 14.

Na slici 14. vidljiv je utjecaj debljine kutnika na DIF<sub>v</sub>. Pod mehanizmom otpornosti na savijanje: s povećanjem debljine kutnika, poboljšanje krutosti kutnika izvan ravnine je malo, pri čemu ono ima mali utjecaj na prirodnu frekvenciju. Dakle, ne postoji značajna razlika u DCR-u koji odgovaraju vrhuncima u krivuljama, što ovisi o frekvencijskom omjeru. Uz podjednaku krutost, stupanj prigušenja bi se povećao s povećanjem stupnja prigušenja komponente, koji se povećava s povećanjem debljine



kutnika. Također,  $DIF_u$  opada s povećanjem stupnja prigušenja [13, 17]. Pod mehanizmom vlačne otpornosti: s povećanjem debljine kutnika, vidljivo je poboljšanje vlačne krutosti kutnog čeličnog profila, što rezultira povećanjem prirodne frekvencije. Omjeri zahtjeva kapaciteta koji odgovaraju vrhuncima u krivuljama, povećavali bi se s povećanjem prirodne frekvencije. Međutim, utjecaj debljine kutnika na stupanj prigušenja je mali i maksimum  $DIF_u$  ne smatra se značajnom promjenom. Razlog je taj što se i stupanj prigušenja i vlačna krutost povećavaju s debljinom kutnika.



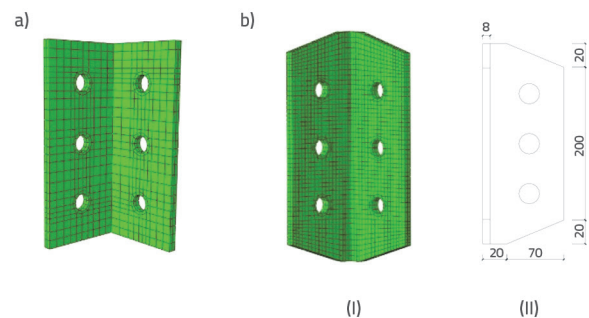
Slika 14. DCR- $DIF_u$  krivulje s različitim rotacijskim krutostima zglobova

Kako je vidljivo na slici 14., vrhunci DCR- $DIF_u$  krivulje koje odgovaraju posljednjem mehanizmu otpornosti na kolaps, vidljivo se pomiču udesno s povećanjem debljine kutnika, a ona koja odgovara kutniku debljine 12 mm i dalje nije vidljiva. Na temelju metode procjene kolapsa izvedene u poglavlju 5.1, vrhunac DCR- $DIF_u$  krivulje koja odgovara posljednjem mehanizmu otpornosti na kolaps, pomicala bi se udesno s povećanjem sposobnosti otpornosti konstrukcije na progresivni kolaps. Prema eksperimentalnim rezultatima Yanga i Tana, može se empirijski procijeniti da bi se krajnje opterećenje prema scenariju uklanjanja stupa povećalo s povećanjem debljine kutnika. Za kutnike od 7 mm, 7,5 mm i 8 mm, krajnji pomaci koji odgovaraju vrhuncima su 0,293 m, 0,324 m i 0,331 m; a krajnja opterećenja koja odgovaraju vrhuncima su 19,5 kN/m, 21,1 kN/m odnosno 25,5 kN/m. Iz pravila kretanja vrha DCR- $DIF_u$  krivulje, smatra se da se rezultati modela konačnih elemenata dobro slažu s metodom procjene kolapsa.

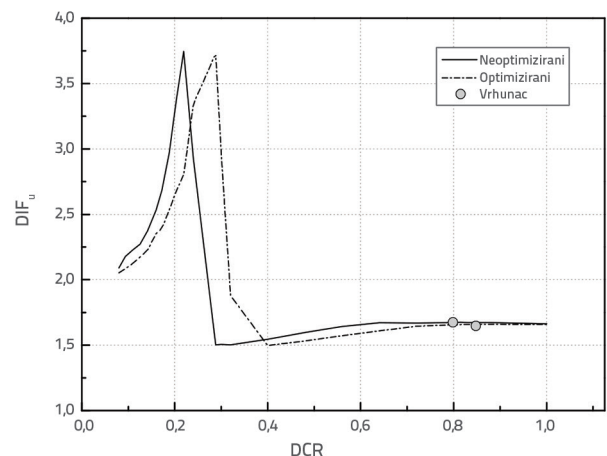
Pritom se utvrđivanje modela konstrukcije s kutnikom od 8 mm temelji na postojećem ispitivanju. Krajnji pomak u simulaciji može se grubo odrediti kao onaj u ispitivanju, to jest iznosi 0,365 m. Odgovarajuće krajnje opterećenje u simulaciji moglo se dobiti u krivulji pomaka i opterećenja, to jest iznosi 31,89 kN/m. Krajnje opterećenje kolapsa temeljeno na metodi procjene kolapsa iznosi 25,5 kN/m, a odgovarajući DCR doseže 0,8. U kombinaciji s odnosom između zakonitosti razvoja  $DIF_u$  i razvoja oštećenja,

utvrđeno je da se progresivna sposobnost otpornosti konstrukcije na kolaps može točno predvidjeti metodom procjene kolapsa predloženom u ovom radu.

Iz slučaja oštećenja priključaka (lom u području spoja krakova kutnika) u ispitivanju, smatra se da je koncentracija naprezanja područja spoja krakova kutnika glavni uzrok, a točka početka pukotine su krajevi kutnika. U projektiranju, krajevi kutnika napravljeni su tako da budu udaljeni od vijaka. Također, oblik kutnika je poboljšán kako bi se oslabio učinak koncentracije naprezanja. Poboljšanje kutnika prikazano je na slici 15. Rezultati simulacije  $DIF_u$  prikazani su na slici 16.



Slika 15. Optimizacija geometrije kutnog čeličnog profila: a) Original; b) Optimizirani: (I) Cjelokupni kutnik; (II) Detalj jednog dijela kutnika



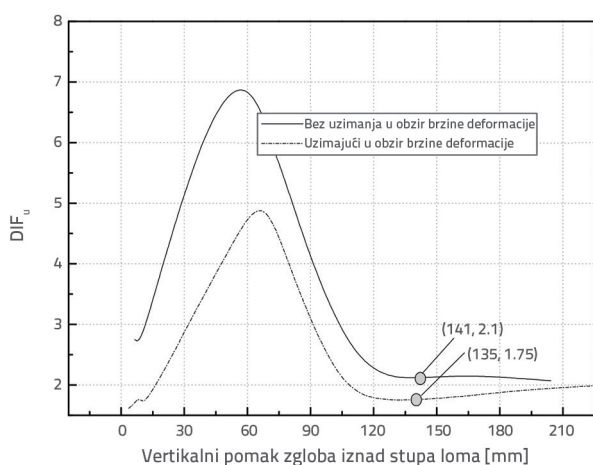
Slika 16. Usporedba za DCR- $DIF_u$  krivulje prije i nakon optimizacije priključka

Na slici 16. vidljivo je da se vrhunac DCR- $DIF_u$  krivulje koja odgovara mehanizmu otpornosti na konačni kolaps, pomiče odmah nakon poboljšanja kutnika. Na temelju metode procjene kolapsa temeljene na  $DIF_u$ , poboljšava se sposobnost otpornosti poboljšane konstrukcije na krajnji kolaps. Krajnji pomak i opterećenje koji odgovaraju vrhuncu u DCR- $DIF_u$  krivulji ispod mehanizma otpornosti konačnom kolapsu, su 0,342 m, odnosno 28,1 kN/m, veće su od onih u originalnom modelu koje iznose 0,33 m i 25,5 kN/m. Poboljšanje za kutnik je razumno i učinkovito u ovom radu.

## 5.4. Utjecaj brzine deformacije na $DIF_u$

Progresivni kolaps konstrukcija zapravo predstavlja dinamički napredak, a brzina deformacije materijala bi se znatno povećala, što bi moglo potaknuti promjenu konstrukcijskog odnosa materijala. Na temelju rezultata dinamičkog ispitivanja progresivnog kolapsa [24], utvrđeno je da su vrijednosti  $DIF$ -a netočne u statičkoj analizi, a utjecaj brzine deformacije na zakonitosti razvoja  $DIF_u$  je vrlo mali. Posebna provjera je kako slijedi:

Metodom ravnoteže energije,  $DIF$ -ovi s razmatranjem i bez razmatranja brzine deformacije izračunavaju se s dinamičkim i statičkim rezultatima eksperimenta koje je dao Xie [24]. Slika 17. prikazuje usporedbu krivulja  $DIF$ -pomaka s uzimanjem i bez uzimanja u obzir brzine deformacije.



Slika 17. Usporedba za krivulje DCR-pomaka s uzimanjem i bez uzimanja u obzir brzine deformacije

Na slici 17. razlika  $DIF$ -ova kad se uzima u obzir brzina deformacije i kad se ne uzima u obzir jasno je vidljiva. Za istraživanje vrijednosti  $DIF$ -a ključna je brzina deformacije materijala. Ali zakonitosti razvoja  $DIF$ -a s uzimanjem i bez uzimanja u obzir brzine deformacije gotovo su sinkrone, posebno za točke infleksije u krivuljama. U ovom su radu zakonitosti razvoja  $DIF$ -a središnja tema i moglo bi biti prihvatljivo da se brzina deformacije materijala ne uzima u obzir.

Nadalje, usvojeni su zavari pune penetracije između nosača i stupova u priključku nosača i stupa u ispitivanju u literaturi [24], koji pripada priključku pune otpornosti na moment savijanja. Ovdje se zanemaruje djelovanje lančаницe, odnosno mehanizam otpornosti u progresivnom kolapsu konstrukcije je samo jedan, tj. mehanizam otpornosti na savijanje. Za ovaj priključak pune otpornosti na moment savijanja, konačna točka krivulje  $DIF$ -pomaka u fazi mehanizma otpornosti na savijanje može se uzeti kao kriterij kolapsa konstrukcije, što je drugačije od onog za jednostavne priključke. Na temelju ovog kriterija kolapsa konstrukcije, na slici 17. može se uočiti da pomaci loma sa i bez razmatranja brzine deformacije iznose 141 mm odnosno 135 mm.

U ispitivanju koje je proveo Xie, početni lom priključka događa se kada vertikalni pomak priključka iznad stupa loma dosegne 150 mm. Može se zaključiti da bi metoda procjene kolapsa temeljena na  $DIF$ u koja je predložena u ovom radu mogla biti prikladna ne samo za priključak izveden kutnicima na hrptu nosača.

## 6. Zaključak

U ovom radu uspostavljen je prihvatljiv i rafiniran model konačnih elemenata temeljen na postojećem ispitivanju Yanga i Tana, koji se sastoji od ravninskog čeličnog okvira s dva broda i jednom etažom sa priključcima izvedenim kutnicima na hrptu nosača. Za smjernice projektiranja konstrukcije na makro razini, uzimajući u obzir utjecaj DCR-a, razvoja plastifikacije, stupnja prigušenja, omjera frekvencija i oštećenja na  $DIF$ -u, analiziran je i proučavan zakon razvoja  $DIF_u$  pod različitim vrstama opterećenja, različitim visinama nosača i različitim rotacijskim krutostima priključaka. Doneseni su sljedeći zaključci:

- Za priključak izveden kutnicima na hrptu nosača, utjecaj vrste opterećenja i visine nosača na  $DIF_u$  može se zanemariti. Utjecaj rotacijske krutosti na  $DIF_u$  je očigledan, posebice pod mehanizmom otpornosti na savijanje.
- Zakonitost razvoja  $DIF_u$  analizira se na temelju razvoja plastifikacije konstrukcijskih komponenti, odnosno konstrukcijskih oštećenja. Utvrđeno je da  $DIF_u$  raste s porastom razine opterećenja u elastičnom i elastičnoplastičnom stadiju, a  $DIF_u$  se smanjuje s povećanjem razine opterećenja u plastičnoj fazi.
- Kombinirajući vremensku krivulju uzdužne sile u nosaču s primijenjenom vremenskom krivuljom opterećenja, utvrđeno je da je  $DIF_u$  uglavnom povezan s razvojem uzdužne sile u nosaču. Drugim riječima, negativno je povezan s "učinkom tlačnog luka" nosača.
- Prema zakonitosti razvoja  $DIF_u$ , predložena je metoda procjene kolapsa temeljena na  $DIF_u$ , a dokazana je na temelju kvalitativne analize i rezultata numeričke simulacije.
- Na temelju postojećeg ispitivanja utvrđeno je da je utjecaj brzine deformacije materijala na zakonitost razvoja  $DIF_u$  malen. Također, metoda procjene kolapsa temeljena na  $DIF_u$  u ovom radu nije prikladna samo za priključke izvedene kutnicima na hrptu nosača.
- Poboljšanje priključaka izvedenih kutnicima na hrptu nosača je u razvoju, a opravdanost i izvedivost poboljšane veze provjerava se novom metodom procjene kolapsa.

## Zahvale

Projekt su podržali "Key Scientific Research Project" (Ključni znanstvenoistraživački projekt) visokoškolske ustanove provincije Henan u Kini (br. 18A560018), "Special Project" (Posebni projekt) sveučilišta Nanyang Normal University (potpora br. ZX2016009) i "Science and Technology Research Project" (Projekt istraživanja znanosti i tehnologije) kineske provincije Henan (br. 182102210465), kojima zahvaljujemo.

## LITERATURA

- [1] Hu, X.B., Qian, J.R.: Dynamic effect analysis during progressive collapse on a single-story steel plane frame, *Engineering Mechanics*, 26 (2008) 6, pp. 38-43, [https://doi.org/10.1016/S1872-5791\(08\)60058-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5791(08)60058-5).
- [2] Biggs, J.M.: *Introduction to structural dynamics*, New York, McGraw-Hill, Inc., 1964.
- [3] Izzuddin, B.A., Nethercot, D.A.: Design-Oriented Approaches for Progressive Collapse Assessment: Load-Factor vs Ductility-Centred Methods, *American Society of Civil Engineers Structures Congress 2009*, Austin, pp. 198-198, 2009.
- [4] UFC 4-023-03: Design of buildings to resist progressive collapse, Department of Defence (DoD), Unified Facilities Criteria, 2013.
- [5] Huo, J.S., Hu, C.L.: Dynamic effect research during progressive collapse of steel frame, *Journal of Catastrophology*, 25 (2010) 50, pp. 89-94, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-811X.2010.z1.020>.
- [6] Tsai, M.H.: An analytical methodology for the dynamic amplification factor in progressive collapse evaluation of building structures, *Mechanics Research Communications*, 37 (2010) 1, pp. 61-66, <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2009.11.001>.
- [7] Tian, Y., Su Y.: Dynamic response of reinforced concrete beams following instantaneous removal of a bearing column, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 5 (2011) 1, pp. 19-28, <https://doi.org/10.4334/IJCSM.2011.5.1.019>.
- [8] Najj, A., Irani, F.: Progressive collapse analysis of steel frames: Simplified procedure and explicit expression for dynamic increase factor, *International Journal of Steel Structures*, 12 (2012) 4, pp. 537-549, <https://doi.org/10.1007/s13296-012-4008-0>.
- [9] Tsai, M.H., You, Z.K.: Experimental evaluation of inelastic dynamic amplification factors for progressive collapse analysis under sudden support loss, *Mechanics Research Communications*, 40 (2012), pp. 56-62, <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2012.01.011>.
- [10] Liu, C., Tan, K.H., Fung, T.C.: Dynamic behaviour of web cleat connections subjected to sudden column removal scenario, *Journal of Constructional Steel Research*, 86 (2013), pp. 92-106, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.03.020>.
- [11] Xie, F.Z., Shu, G.P.: Dynamic experimental study during progressive collapse of a steel plane frame, *Journal of Building Structure*, 37 (2016) 12, pp. 144-152, <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2016.12.018>.
- [12] Deng, L., Duan, L.L., Zou, Q.L.: Comparison of dynamic amplification factors calculated from bridge strain and deflection, *Engineering Mechanics*, 35 (2018) 1, pp. 126-135, <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0654>.
- [13] Clough, R., Penzien, J.: *Dynamic of Structures*, second edition, Computer and Structures, Inc., 2003.
- [14] Xing, B.P.: Study on the relationship between the local damage and damping of concrete, 31 December 2013, Master, Yangzhou University, Yangzhou, China.
- [15] Fu, Q.N., Yang, B., Hu, Y., et al.: Dynamic analyses of bolted-angle steel joints against progressive collapse based on component-based model, *Journal of Constructional Steel Research*, 117 (2016), pp. 161-174, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.010>.
- [16] Wang, S.S., Qiu, L., Xu, W.: Study on relationship between structural mass distribution, damage and dynamic response. *Journal of Dynamic and Control*, 8 (2010) 1, pp. 53-56, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6553.2010.01.011>.
- [17] Zhang, W.H., Jin, Y., Chen, Y.M.: Behaviour of dynamic response for damaged materials, *Journal of Vibration Engineering*, 13 (2000) 3, pp. 413-425, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4523.2000.03.013>.
- [18] Park, Y., Alfredo, H.S.: Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering*, 111 (1985) 4, pp. 722-739, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722)).
- [19] Fu, Y.M., Wang, Y.: Nonlinear dynamic responses of composite plates based on the damage model with internal state variables, *Journal of Hunan University*, 31 (2004) 6, pp. 70-74, <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2472.2004.06.016>.
- [20] Yang, B., Tan, K.H.: Experimental tests of different types of bolted steel beam-column joints under a central-column-removal scenario, *Engineering Structures*, 54 (2013) 1, pp. 112-130, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.037>.
- [21] Yang, B., Tan, K.H.: Numerical analyses of steel beam-column joints subjected to catenary action, *Journal of Constructional Steel Research*, 70 (2012) 7, pp. 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.007>.
- [22] GSA-2016.: *Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance*, United States General Services Administration, Washington, DC, 2016.
- [23] Izzuddin, B.A., Vlassis, A.G., Elghazouli, A.Y., et al.: Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss: part I: simplified assessment framework, *Engineering Structures*, 30(2008) 5, pp. 1308-1318, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.011>.
- [24] Xie, F.Z.: Analysis and assessment and experimental research on progressive collapse of steel frame structure, 18 September 2014, Doctor, Southeast University, Nanjing, China.