

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Nikola Oreb

**NEPRIZMATIČNI ČELIČNI KONSTRUKCIJSKI
ELEMENTI – VALIDACIJA POSTOJEĆIH I
PRIJEDLOG NOVOG PRORAČUNSKOG
POSTUPKA**

Zagreb, 2025.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za metalne konstrukcije, Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Zagrebu, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Ivana Lukačevića, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2024./2025.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	i
1. UVOD	1
2. HIPOTEZA I CILJ ISTRAŽIVANJA	5
3. METODE ISTRAŽIVANJA	7
4. ANALITIČKI PRISTUP PRORAČUNU NEPRIZMATIČNIH ELEMENTATA	9
4.1. Klasifikacija poprečnog presjeka	9
4.2. Određivanje kritičnog presjeka	12
4.3. Dokazi stabilnosti elementa	14
4.4. Opća metoda	16
4.4.1. Teorijska pozadina	16
4.4.2. Primjena na neprizmatične elemente	17
5. NUMERIČKA ANALIZA	19
5.1. Uvod u numeričku analizu	19
5.2. Opis numeričkog modela	20
5.2.1. Geometrija modela	20
5.2.2. Mreža konačnih elemenata	21
5.2.3. Modeliranje materijala	21
5.2.4. Uvjeti oslanjanja	22
5.2.5. Opterećenje	23
5.3. Imperfekcije modela	25
5.3.1. Globalne imperfekcije	25
5.3.2. Lokalne imperfekcije	26
5.4. Validacija modela	26

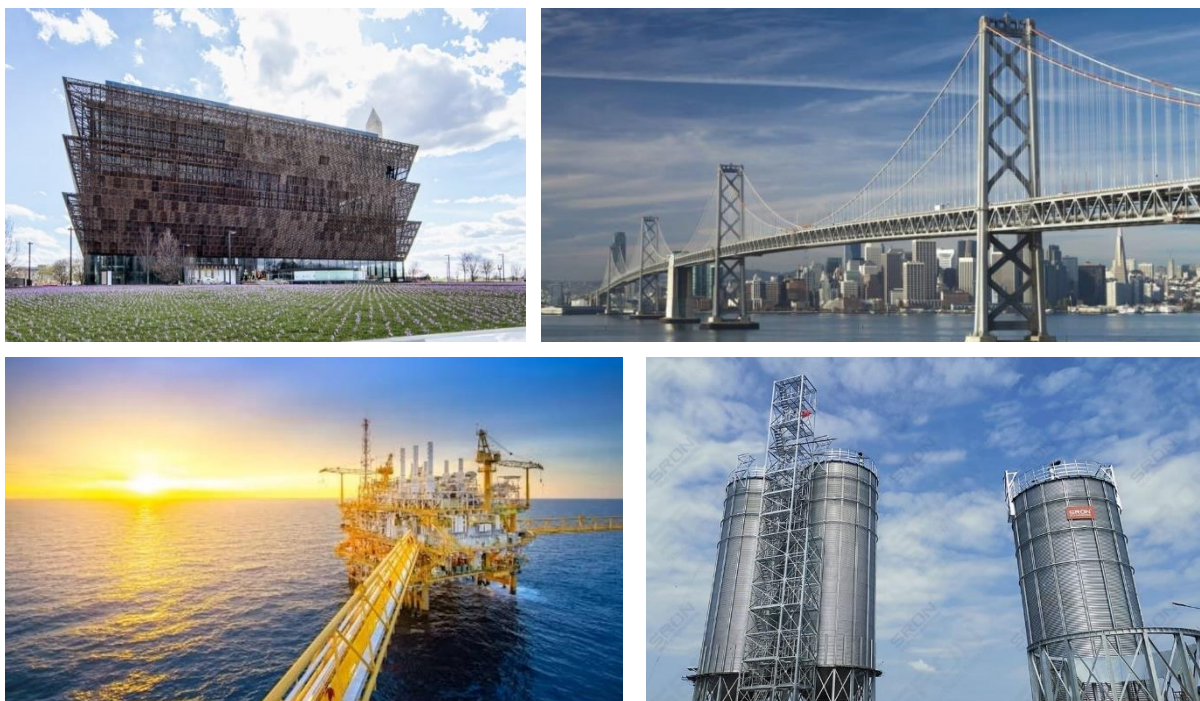
6.	USPOREDBA METODA PRORAČUNA NEPRIZMATIČNIH ELEMENATA.....	28
7.	NEPRIZMATIČNI ELEMENTI U REALNIM KONSTRUKCIJSKIM SUSTAVIMA.....	35
7.1.	Portalni okvir sa vutama	35
7.2.	Portalni okvir sa neprizmatičnim elementima	37
7.3.	Numerički model okvira sa neprizmatičnim elementima	38
7.3.1.	Geometrija modela.....	38
7.3.2.	Mreža konačnih elemenata	39
7.3.3.	Modeliranje materijala	39
7.3.4.	Uvjeti oslanjanja	39
7.3.5.	Opterećenje	40
7.3.6.	Imperfekcije modela	41
7.3.6.1.	Globalne imperfekcije	41
7.3.6.2.	Lokalne imperfekcije.....	42
7.4.	Rezultati numeričke analize	43
7.5.	Scenarij životnog ciklusa promatranih okvira	44
7.5.1.	Okvir 1	44
7.5.1.1.	Modul A.....	44
7.5.1.2.	Modul B.....	45
7.5.1.3.	Modul C.....	46
7.5.1.4.	Modul D	47
7.5.2.	Okvir 2	47
7.5.2.1.	Modul A.....	47
7.5.2.2.	Modul B.....	48
7.5.2.3.	Modul C.....	49
7.5.2.4.	Modul D	50
8.	NOVI POSTUPAK PRORAČUNA NEPRIZMATIČNIH ELEMENATA	51

9.	USPOREDBA REZULTATA I DISKUSIJA	62
9.1.	Evaluacija i usporedba postupaka proračuna neprizmatičnih elemenata prema drugoj generaciji norme EN 1993-1-1	63
9.1.1.	Usporedba proračuna prema točki 8.3.3. – postupci 1 i 2.....	63
9.1.2.	Usporedba proračuna prema točki 8.3.4. – postupci 3 i 4 – Opća metoda	65
9.1.3.	Evaluacija metoda proračuna prema drugoj generaciji norme EN 1993-1-1	67
9.2.	Evaluacija upotrebe neprizmatičnih elemenata u konstrukcijskim sustavima.....	69
9.2.1.	Usporedba utroška materijala	69
9.2.2.	Usporedba scenarija životnog ciklusa.....	70
9.3.	Evaluacija predloženog postupka proračuna neprizmatičnih elemenata	71
10.	ZAKLJUČAK.....	76
10.1.	Zaključci iz provedenih analiza	76
10.2.	Preporuke za daljnja postupanja i istraživanja.....	78
	ZAHVALE	79
	POPIS LITERATURE.....	80
	PRILOZI.....	82
	Prilog A: Primjer proračuna neprizmatičnih elemenata prema drugoj generaciji norme EN 1993-1-1	82
	Prilog A1: 1. postupak.....	83
	Klasifikacija elementa.....	83
	Iskoristivost presjeka	83
	Otpornost elementa	88
	Prilog A2: 2. postupak.....	90
	Otpornost elementa	90
	Prilog A3: 3. postupak.....	92
	Otpornost elementa	92
	Prilog A4: 4. postupak.....	93

Prilog B: Formiranje krivulje na temelju numeričkih analiza.....	96
Prilog C: Usporedba predloženog postupka i numeričke analize	106
POPIS SLIKA	122
POPIS TABLICA.....	128
SAŽETAK.....	129
SUMMARY	131
ŽIVOTOPIS	133

1. UVOD

Čelik je jedan od najčešće korištenih materijala u građevinarstvu. Modernizacija i razvoj novih materijala ne potiskuje primjenu čelika, već povećava potrebu za njim u skladu s raznovrsnim i velikim mogućnostima koje pruža. Neke od njih su: raznovrsnost područja primjene, povoljni ekonomski i ekološki učinci, vrhunska tehnologija proizvodnje te mogućnost ispunjenja vrhunskih tehničkih i estetskih zahtjeva. Raznovrsnost područja primjene očituje se u zastupljenosti čelika kao materijala prilikom izgradnje: hala, zgrada, mostova, dalekovodnih stupova, nadstrešnica, platformi za naftu, silosa i rezervoara [1], a neke od konstrukcija prikazane na slici 1.1.



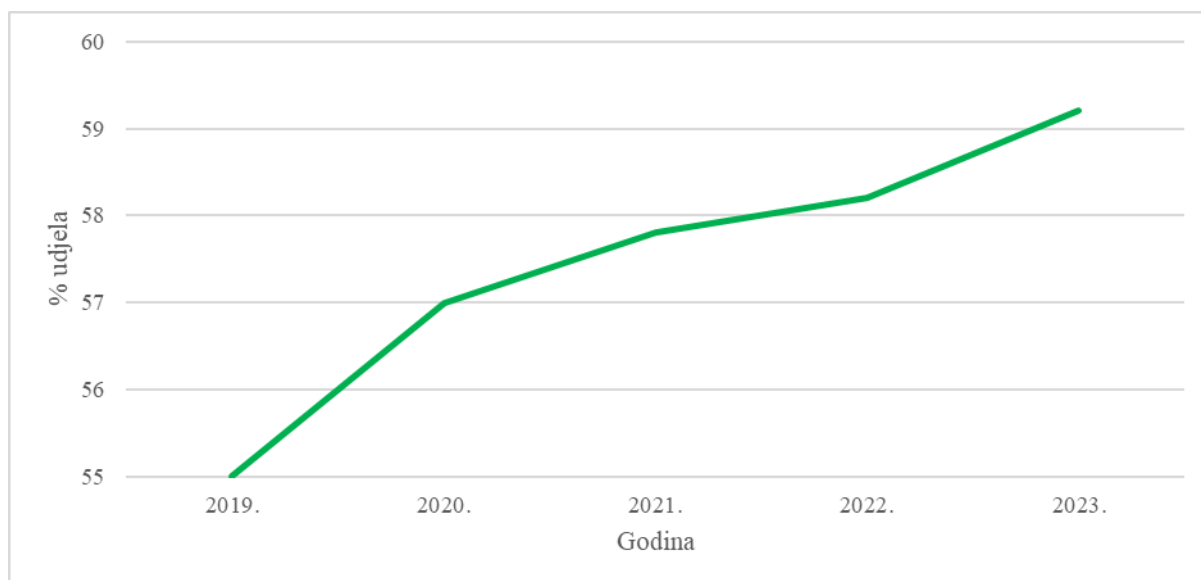
Slika 1.1 – Raznovrsnost primjene čelika u građevinarstvu [2 – 5]

Trendovi današnjice i budućnosti pokazuju rastući značaj smanjenja emisija ugljičnog dioksida, u čemu građevinarstvo prednjači. WorldGBC (*World Green Building Council*), kojeg je članica i Hrvatska, ističe cilj Europske unije: do 2050. godine sve nove građevine, infrastruktura i projekti obnove trebaju imati neto nultu emisiju ugljičnog dioksida [6]. Mogućnost reciklaže i ponovne upotrebe čelika time dodatno dobiva na značaju. Kako Sustainable Ships [7] navodi, korištenje recikliranog čelika rezultira smanjenjem emisija 1,787 tona CO₂ po toni recikliranog čelika, a čelik također ima dobar potencijal za ponovnu upotrebu, čime se ne generira dodatni otpad što ga čini održivim rješenjem. Izvještaj BIR-a (*Bureau of International Recycling*) u razdoblju od 2019. do 2023. godine na području Europske unije

pokazuje kontinuirani rast udjela recikliranog čelika u ukupnoj proizvodnji čelika [8], kako je prikazano u tablici 1.1 i na slici 1.2.

Tablica 1.1 – Proizvodnja čelika i udio recikliranog čelika u proizvodnji u milijunima tona u EU [8]

Godina	2019.	2020.	2021.	2022.	2023.
Proizvodnja sirovog čelika	150,2	132,2	152,8	136,4	126,4
Udio recikliranog čelika	86,5	75,3	87,9	79,3	74,8
Omjer reciklirani/sirovi u %	55,0	57,0	57,8	58,2	59,2

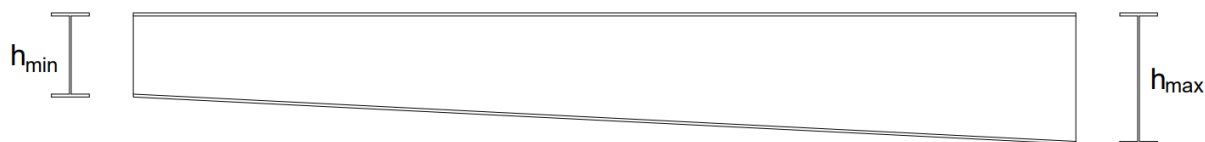


Slika 1.2 – Porast udjela recikliranog čelika u ukupnoj proizvodnji čelika na području Europske unije [8]

Smanjivanje ugljičnog otiska također se postiže i smanjenjem količine utrošenog materijala, ispunjajući pritom jednake konstrukcijske i arhitektonske zahtjeve. Značajni je zadatak građevinarstva unaprjeđenje građevina s ekonomskog i ekološkog gledišta.

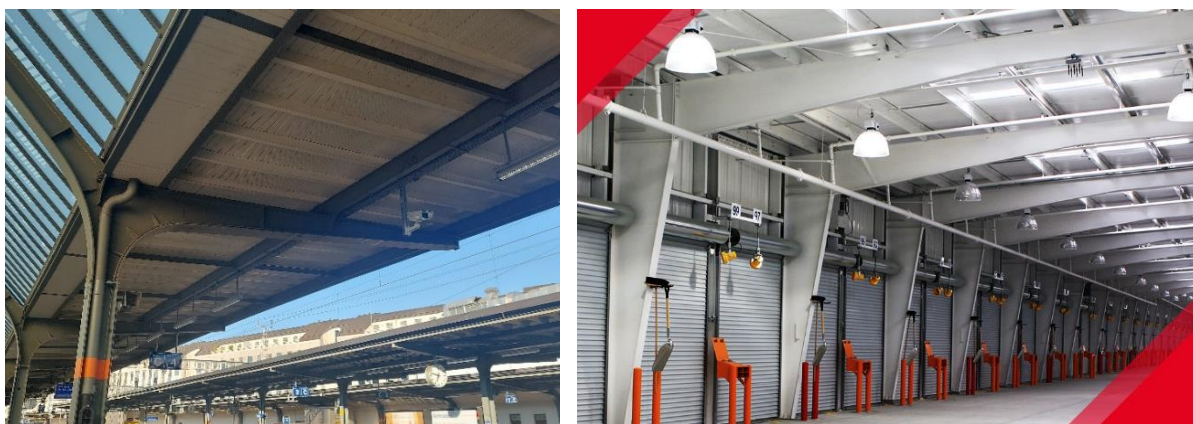
Jedno od rješenja koji svojom promjenom visine presjeka omogućuje optimalno korištenje materijala su neprizmatrični konstrukcijski elementi. Primjer neprizmatričnog konstrukcijskog elementa prikazan je na slici 1.3.

Promjenjivi poprečni presjek elementa optimizira iskorištenost materijala – na mjestu većeg učinka djelovanja element ima veću visinu, a time i veću otpornost.



Slika 1.3 – Neprizmatični element

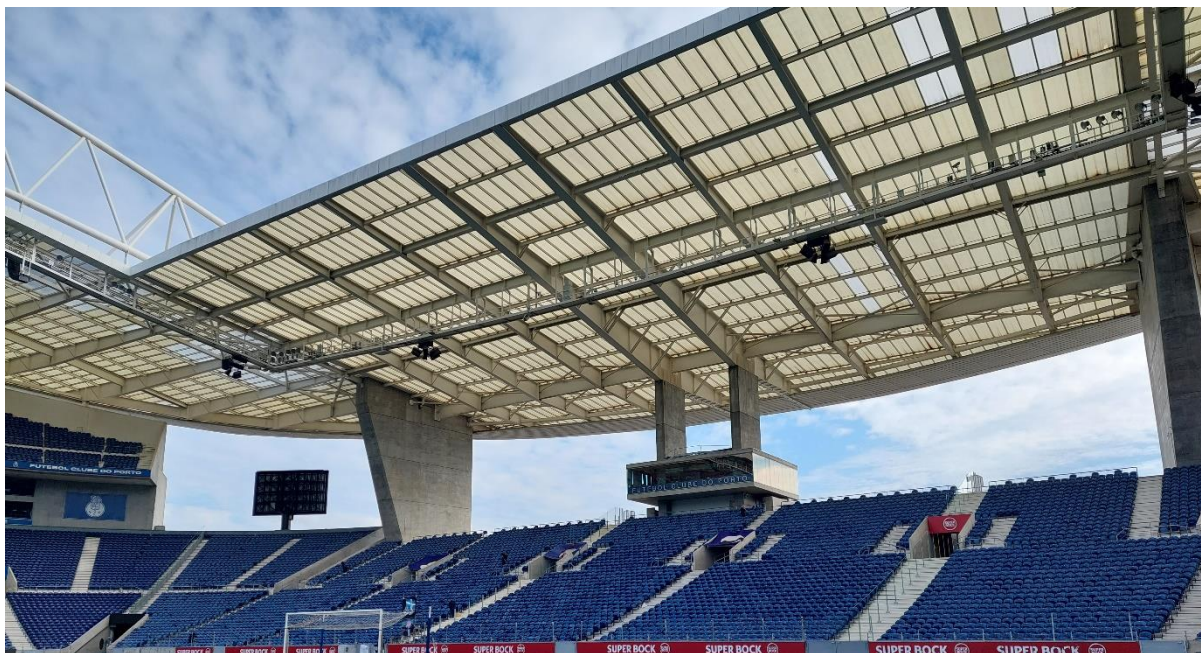
Neprizmatični elementi se u građevinarstvu koriste zbog konstrukcijske učinkovitosti, ostavljajući pritom estetski ugodan dojam. Neki primjeri njihove primjene prikazani su na slikama 1.4 – 1.7.



Slika 1.4 – Željeznički kolodvor, Geneva (lijevo); čelična hala (desno) [9]



Slika 1.5 – Stadion Etihad, Manchester, Engleska [10]



Slika 1.6 – Estádio do Dragão, Porto, Portugal



Slika 1.7 – Multi-sport complex – Coimbra, Portugal [11]

Iako korištenje elemenata promjenjive visine omogućuje uštedu materijala u odnosu na prizmatične elemente, nedostatak jednostavnijih, manje konzervativnih postupaka i smjernica za dokaz njihove pouzdanosti može odvratiti inženjere od njihove primjene u praksi. U ovom radu detaljno su istraženi postojeći postupci za dokaz pouzdanosti neprizmatičnih konstrukcijskih elemenata te je dan prijedlog novog postupka koji nudi prednosti u smislu optimalnog iskorištenja elementa uz jednostavnost i zadržavanje zahtijevane razine pouzdanosti.

2. HIPOTEZA I CILJ ISTRAŽIVANJA

Dobra mehanička svojstva čelika i njegove konstruktivne mogućnosti čine ga jednim od najbitnijih i često korištenih materijala u građevinarstvu. Težnja za napretkom i optimizacijom elemenata i konstrukcija rezultira kontinuiranim pronalaženjem novih konstrukcijskih rješenja. Međutim, potreba za evaluacijom novih rješenja i pronalaženjem adekvatnog postupka proračuna istih često rezultira vremenskim odmakom između pronalaska novih konstrukcijskih rješenja i širenja njihove upotrebe. Neprizmatični elementi trenutno ostavljaju dojam takvog konstrukcijskog rješenja. U dostupnoj literaturi postoji mogućnost prilagodbe postupaka proračuna elemenata prema drugoj generaciji europske norme, kako bi isti bili primjenjivi i za neprizmatične elemente. Stoga je cilj rada evaluirati točnost i valjanost trenutno dostupnih metoda proračuna neprizmatičnih elemenata i dati usporedbe postupaka proračuna. Za potrebe evaluacije dostupnih metoda proračuna izrađeni su numerički modeli različitih neprizmatičnih elemenata. Područje istraživanja elemenata definirano je u nastavku:

- Promatrani su nosači – stupovi, odnosno elementi opterećeni uzdužnom tlačnom silom i kontinuiranim opterećenjem.
- Elementi su zglobno oslonjeni.
- Osnovni presjek za formiranje elementa su standardni čelični vruće valjani IPE profili, a visina linearno raste od presjeka IPE profila (ovisno o stopi promjene visine).
- Kvaliteta čelika promatranih elemenata je S355.

Cilj rada je prikazati mogućnosti primjene neprizmatičnih elemenata u često korištenim, čeličnim okvirnim konstrukcijskim sustavima. Usporedbom dvaju portalnih okvira – okvira sa standardnim elementima izvedenim s vutama i okvira sastavljenog od neprizmatičnih elemenata, ispitane su konstruktivne, ekonomske i ekološke prednosti upotrebe neprizmatičnih elemenata. Uz provedbu LCA (eng. *Life Cycle Assessment*) analize okvirnih sustava stavljen je naglasak na smanjenje ugljičnog otiska prilikom projektiranja, kao i mogućnost ponovne upotrebe neprizmatičnih elemenata..

Sadašnji i budući cilj Europske unije i svijeta je redukcija emisija ugljikovog dioksida, što je lako moguće ostvariti smanjivanjem utroška materijala prilikom izrade konstrukcija, s obzirom da je građevinska industrija u vrhu po količini emitiranog ugljikovog dioksida. Formiranjem novog, efikasnijeg postupka proračuna neprizmatičnih elemenata, isti mogu postati konkurentno, a često i efikasnije rješenje u brojnim konstruktivnim zadacima u odnosu

na standardne – prizmatične čelične elemente. Budući da je postupak formiran na temelju karakteristika IPE profila određenog broja uzoraka, svakako je potrebno u naredna istraživanja uključiti i ostale tipove poprečnih presjeka, kao i drukčije rubne uvjete i načine opterećivanja, a provedbom probabilističkih analiza potvrditi zahtijevanu razinu pouzdanosti postupka.

Hipoteze rada:

H1: Neprizmatični konstrukcijski elementi predstavljaju efikasno konstruktivno rješenje za izvedbu čeličnih okvirnih konstrukcija ukoliko se za njihovo dimenzioniranje koriste pouzdane metode proračuna.

H2: Napredne numeričke analize, dati će podlogu za novi, jednostavno upotrebljiv, i pouzdani postupak proračuna neprizmatičnih elemenata.

3. METODE ISTRAŽIVANJA

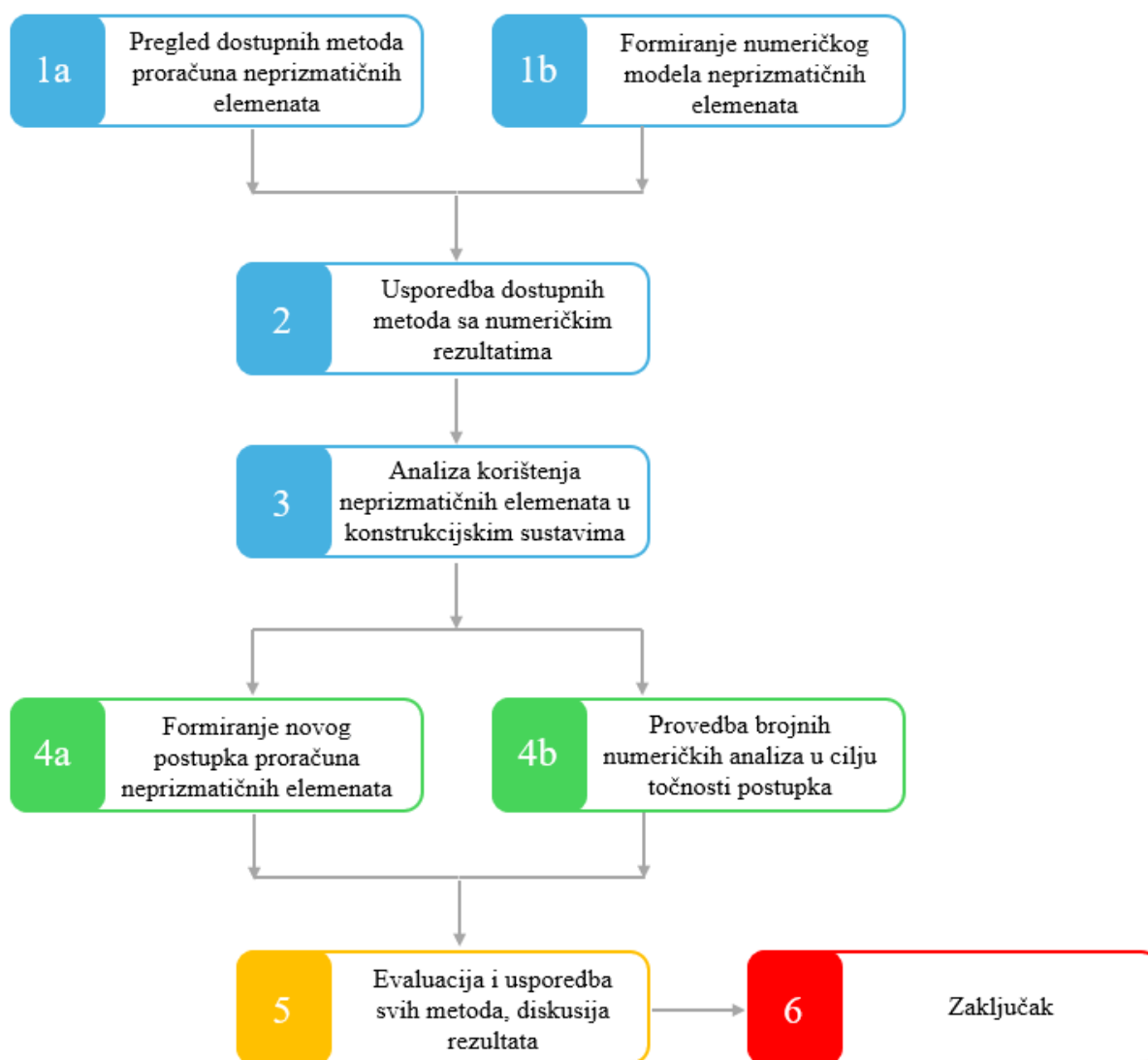
U radu su korištene analitička, numerička, normativna i komparativna metoda istraživanja. Prvo su analizirani trenutno dostupni postupci proračuna neprizmatičnih elemenata, uključujući i one prema drugoj generaciji norme, a njihova teorijska pozadina prikazana je u 4. poglavlju rada. Primjeri proračuna prema svakom od analiziranih postupaka dani su u prilogu A. Za potrebe evaluacije postupaka razvijeni su napredni numerički modeli temeljeni na metodi konačnih elemenata. Provedene su brojne numeričke analize, kao GMNIA (eng. *Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections*), LBA (eng. *Linear Bifurcation Analysis*) i LFA (eng. *Linear Frequency Analysis*), a koje su detaljno opisane u 5. poglavlju rada, dok su svi rezultati analiza dani u prilogu B rada. U svrhu dobivanja preciznog modela, provedene su analize osjetljivosti mreže konačnih elemenata, kako bi rješenje, uz veliku preciznost, konvergiralo ka točnom. Usporedbom metoda proračuna prema drugoj generaciji europske norme sa rezultatima numeričke analize prikazani su nedostaci trenutno dostupnih postupaka proračuna neprizmatičnih elemenata. U 7. poglavlju ispitana je mogućnost korištenja neprizmatičnih elemenata u realnim konstrukcijskim sustavima kao što su portalni okviri. Provedene su i LCA analize, odnosno procjene životnog vijeka konstrukcije okvira te su pokazane konstruktivne, ekonomske i ekološke prednosti neprizmatičnih elemenata. Nadalje, prilikom formiranja novog postupka proračuna neprizmatičnih elemenata korišteni su rezultati brojnih numeričkih analiza, a za postizanje optimalnog rješenja metoda najmanjih kvadrata, kojom se tražila minimalna razlika između numeričkih i analitičkih rezultata. Novi predloženi postupak proračuna opisan je u 8. poglavlju rada, a usporedba postupka i rezultata numeričkih analiza dana je u prilogu C. Usporedbom rezultata pokazan je napredak koji postupak daje u odnosu na trenutno dostupne metode, a koji može rezultirati poboljšanjem korištenja neprizmatičnih elemenata iz više promatranih gledišta.

Definirani plan istraživanja sastoji se od nekoliko koraka:

- 1) Proučavanje dostupne literature i pregled postojećih postupaka proračuna neprizmatičnih elemenata.
- 2) Izrada numeričkih modela neprizmatičnih elemenata koji su kalibrirani prema rezultatima modela iz relevantne literature kako bi se precizno odredilo njihovo stvarno ponašanje.
- 3) Usporedba dostupnih postupaka proračuna sa rezultatima numeričkih analiza ako bi se evaluirala njihova točnost.

- 4) Numeričke analize okvirne konstrukcije izvedene neprizmatičnim elementima i okvirne konstrukcije izvedene prizmatičnim elementima i vutama te njihova usporedba kako bi se istražile mogućnosti i prednosti primjene neprizmatičnih elemenata u realnim konstrukcijskim sustavima.
- 5) Provedba numeričkih parametarskih analiza za razvoj novog postupka dokaza pouzdanosti neprizmatičnih elemenata.
- 6) Diskusija svih dobivenih rezultata te zaključak na temelju usporedbe metoda dokaza pouzdanosti iz druge generacije europske norme, numeričkih analiza i novo razvijenog postupka proračuna.

Istraživanje je strukturirano kako je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1 – Struktura istraživanja

4. ANALITIČKI PRISTUP PRORAČUNU NEPRIZMATIČNIH ELEMENATA

Druga generacija norme EN 1993 – Eurokod 3 je europska norma koja daje smjernice i pravila za projektiranje čeličnih konstrukcija. Dio norme EN 1993-1-1 [12] pokriva opća pravila i pravila za zgrade. Unutar te norme nalaze se dokazi koje elementi, ovisno o opterećenju i učinku djelovanja kojem su izloženi, moraju zadovoljiti. U praksi se u elementima najčešće javlja kombinacija djelovanja uzdužne sile i momenta savijanja. Takvi elementi se često nazivaju nosači – stupovi (u nosaču se javlja moment savijanja, dok se u stupu javlja uzdužna sila). Zbog kompleksnog djelovanja i česte pojave u praksi, u okviru ovog rada promatrani su upravo nosači – stupovi. Eurokod 3 daje dva načina proračuna nosača – stupova, a opisani su u točki 8.3.3 i 8.3.4 druge generacije norme EN 1993-1-1 [12]. U nastavku su prikazani koraci koje je potrebno slijediti prilikom proračuna, a primjer proračuna nosača – stupa prema svim dostupnim postupcima dan je u prilogu A ovog rada.

4.1. Klasifikacija poprečnog presjeka

Čelične elemente u kojima se javlja tlačno naprezanje potrebno je svrstati u klase 1, 2, 3 ili 4. Presjeci se klasificiraju ovisno o kvaliteti čelika, vitkosti i raspodjeli naprezanja. Klasa poprečnog presjeka određuje koliku nosivost i rotacijski kapacitet presjek posjeduje obzirom na njegovu osjetljivost na lokalno izbočivanje [12]. Mjerodavna otpornost poprečnog presjeka na unutarnje sile ovisno o klasi presjeka prikazana je u tablici 4.1.

Tablica 4.1 – Mjerodavna otpornost ovisno o klasi poprečnog presjeka

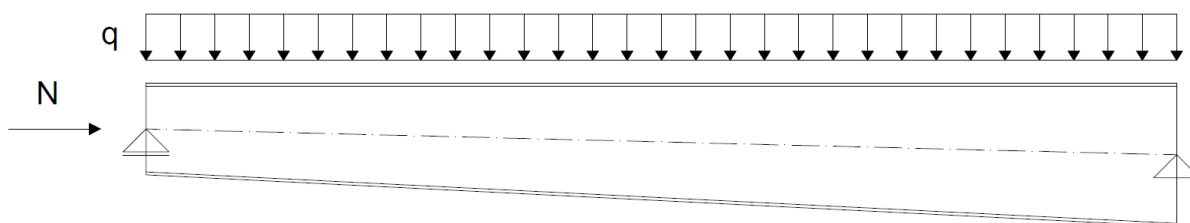
Učinak djelovanja	Klasa poprečnog presjeka	Otpornost elementa
Uzdužna sila	1, 2, 3	Plastična otpornost
	4	Efektivna otpornost
Moment savijanja	1, 2	Plastična otpornost
	3	Elasto – plastična otpornost
	4	Efektivna otpornost

Ukoliko je element klasificiran u klasu 4 potrebno je reducirati poprečni presjek, odnosno odrediti njegov efektivni dio, kako bi se uzelo u obzir smanjenje nosivosti presjeka zbog lokalnog izvijanja. Određivanje efektivnog dijela presjeka provodi se u skladu s točkom

6.4 druge generacije norme EN 1993-1-5 [13]. Otpornost elemenata u kojima se javlja moment savijanja, a klasificirani su kao klasa 3, prema drugoj generaciji norme određuje se interakcijom između plastične i elastične otpornosti, a što je detaljno opisano u dodatku B norme EN 1993-1-1 [12].

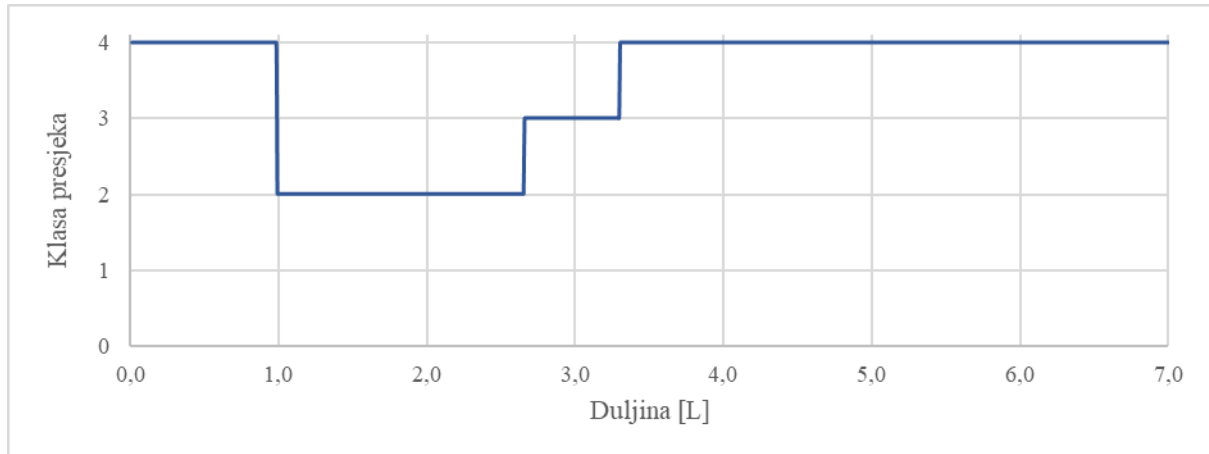
Bitan parametar prilikom klasificiranja je vitkost poprečnog presjeka. Ukoliko se promatraju IPE profili, potrebno je posebno klasificirati pojasnicu (budući da je ona vanjski dio presjeka) i hrbat (unutarnji dio presjeka). Kod prizmatičnih elemenata kojima je vitkost svakog poprečnog presjeka ista nije problem odrediti klasu elementa. U praksi se takvi elementi klasificiraju na način da se odredi klasa najnepovoljnije opterećenog poprečnog presjeka (presjeka koji je u najnepovoljnijem stanju naprezanja) te se sukladno tome računaju otpornosti elementa na učinke djelovanja.

Neprizmatičnim elementima vitkost se mijenja duž raspona elementa. To znači da isti element u jednom dijelu može biti svrstan u klasu 1, a u drugom dijelu ta klasa može biti 2, 3 pa čak i 4. Na idućem primjeru pokazana je klasifikacija IPE 400 profila raspona 7 metara, kojem se visina presjeka linearno mijenja od 400 do 700 mm. Profil je prikazan na slici 4.1.

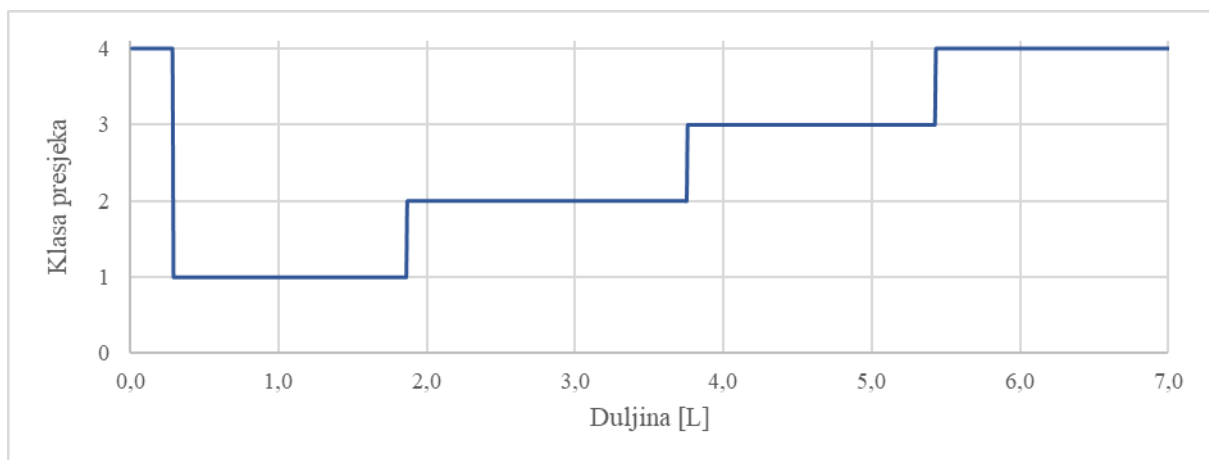


Slika 4.1 – Neprizmatični element za primjer klasifikacije

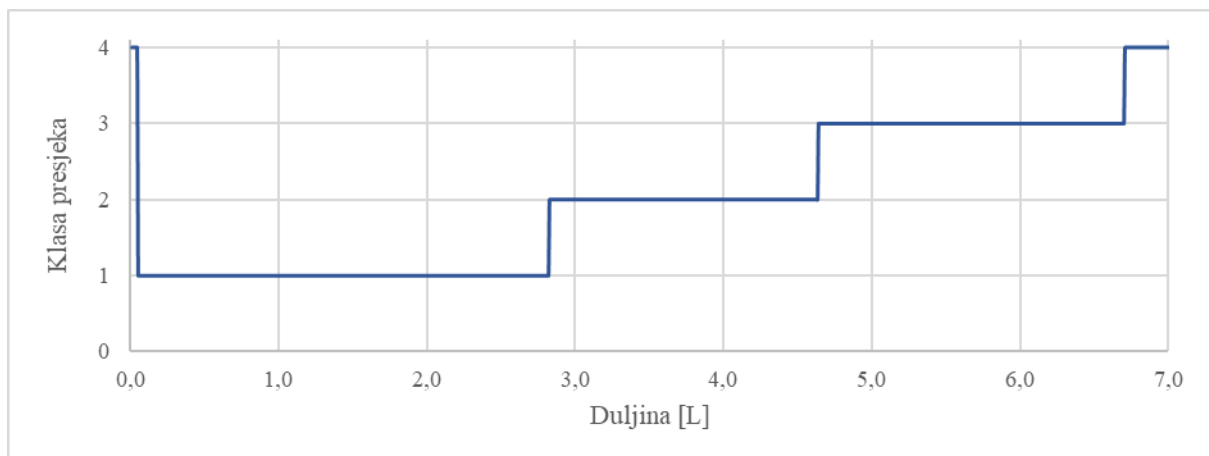
U nastavku je na slikama 4.2 – 4.4. prikazana klasifikacija za drukčije vrijednosti tlačne uzdužne sile i vertikalnog kontinuiranog opterećenja.



Slika 4.2 – Klasifikacija elementa za $N = 200 \text{ kN}$ i $q = 10 \text{ kN/m}$



Slika 4.3 – Klasifikacija elementa za $N = 100 \text{ kN}$ i $q = 15 \text{ kN/m'}$



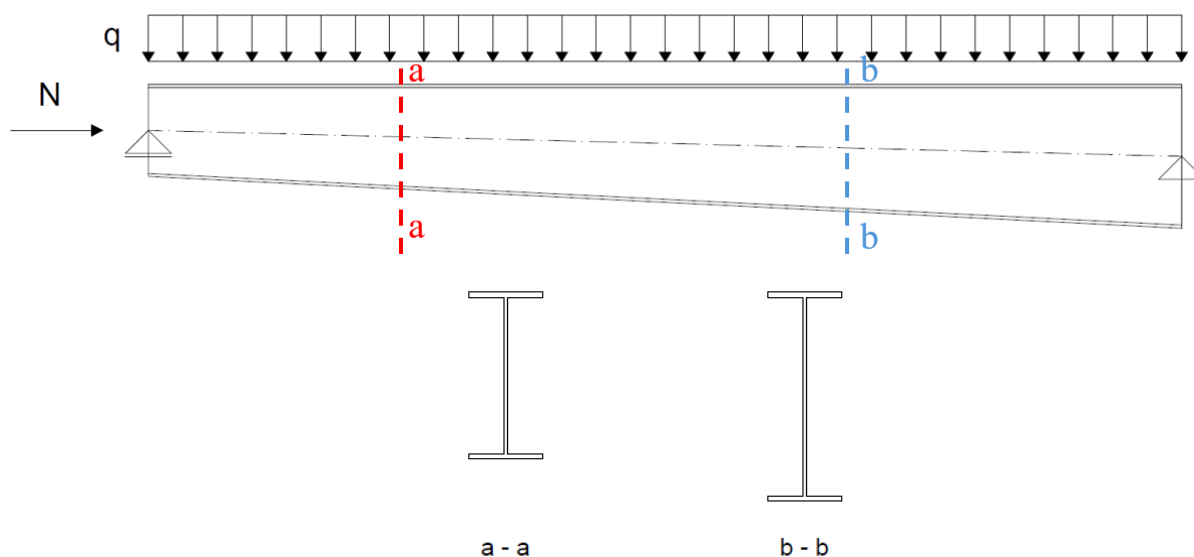
Slika 4.4 – Klasifikacija elementa za $N = 20 \text{ kN}$ i $q = 20 \text{ kN/m'}$

Uočava se da za različite kombinacije opterećenja klase presjeka duž elementa variraju. Kod prizmatičnih elemenata, koji imaju konstantne geometrijske karakteristike (površinu, moment tromosti i moment otpora) to ne predstavlja problem – odabire se najveća klasa

presjeka i ona je mjerodavna za cijeli element. Neprizmatičnim elementima se, zbog promjene visine, mijenjaju i geometrijske karakteristike duž raspona. To znači da presjek najveće klase nije nužno i najiskorišteniji. Dakle, klasifikacija presjeka je značajno kompleksnija kod neprizmatičnih elemenata u odnosu na prizmatične, što vodi do problematike određivanja kritičnog presjeka elementa.

4.2. Određivanje kritičnog presjeka

Kritični presjek elementa je onaj presjek kod kojeg je omjer učinka djelovanja i otpornosti najveći. Element u kritičnom presjeku ima najveću iskoristivost. Kod prizmatičnih elemenata, kojima je otpornost u svakom presjeku elementa jednaka, posljedično je kritični presjek onaj sa najvećim djelovanjem. Međutim, kod neprizmatičnih elemenata situacija je složenija. Kao što je pokazano u prethodnom pod poglavlju, klasa poprečnog presjeka mijenja se duž neprizmatičnog elementa. Također se mijenja i otpornost presjeka, zbog povećanja njegove visine. Stoga, na primjer, presjek a-a prikazan na slici 4.5, iako je klase 1 ili 2, može biti iskorišteniji od presjeka b-b, koji je klase 4, ali zbog veće visine ima i veću otpornost. Dakle, kritični presjek neprizmatičnih elemenata nije jednoznačno određen, on ovisi o veličini pojedinog opterećenja i njihovom odnosu, kao i o geometriji neprizmatičnog elementa.



Slika 4.5 – Različiti presjeci neprizmatičnog elementa

U sklopu rada razvijen je sustav preciznog identificiranja kritičnog presjeka elemenata na temelju dokaza na razini presjeka koji se nalaze u drugoj generaciji norme EN 1993-1-1 [12]. Postupak se sastoji od nekoliko koraka koji su prikazani na dijagramu toka na slici 4.6. Na početku je potrebno definirati osnovne karakteristike elementa. Zatim definirati opterećenje

i odabrati broj podjela elementa, koji je jednak broju poprečnih presjeka za koje će se računati iskoristivost. Što je ta podjela gušća, preciznost određivanja je veća. Na primjer, ukoliko je element dug 5 metara, i broj podjela je 10, to znači da će se iskoristivost poprečnog presjeka računati svakih 50 centimetara. Ako je broj podjela za isti element 1000, iskoristivosti se računaju za poprečne presjeke na razmacima 5 milimetara. Veći broj podjela znači veću preciznost, ali i oduzima značajno više vremena. U idućem koraku, svaki od poprečnih presjeka se klasificira sukladno normi, a kako je opisano u poglavlju 4.1. Na temelju klase određuju se djelotvorne geometrijske karakteristike poprečnog presjeka. Zatim se, sukladno normi EN 1993-1-1 [12], za svaki presjek posebno računa iskoristivost poprečnog presjeka na sve učinke djelovanja kojima je presjek izložen. Pritom treba voditi računa da je dokaz pouzdanosti drukčiji za klase presjeka 3 te 4, u odnosu na klase 1 i 2. Poprečni presjek s najvećom iskoristivosti je kritičan poprečni presjek promatranog elementa za promatranu kombinaciju opterećenja.



Slika 4.6 – Dijagram toka za identifikaciju kritičnog presjeka neprizmatičnog elementa

4.3. Dokazi stabilnosti elementa

Dokazom pouzdanosti prema drugoj generaciji norme EN 1993-1-1 [12] na razini presjeka moguće je odrediti kritični presjek neprizmatičnog elementa. Međutim, dokazi na razini elementa su kompleksniji. Da Silva, Simões i Gervásio [14], ističu dva bitna razloga koja rezultiraju kompleksnijim dokazom stabilnosti neprizmatičnog elementa u odnosu na prizmatične:

- i. Adekvatni analitički izrazi za elastična kritična opterećenja nisu spremni i dostupni.
- ii. Određivanje kritičnog presjeka za primjenu izraza za izvijanje je ostavljeno interpretaciji i nije precizno određeno.

Pod pojmom elastično kritično opterećenje misli se na Eulerovu kritičnu tlačnu silu za izvijanje savijanjem te elastični kritični moment za bočno torzijsko izvijanje. Prilikom procjene elastičnih kritičnih opterećenja postoji nekoliko mogućnosti [14]:

- i. Korištenje tablica za standardne slučajeve.
- ii. Korištenje formula za prizmatične elemente, ali uz karakteristike prikladnog ekvivalentnog poprečnog presjeka, koji uzima u obzir neprizmatičnost elementa.
- iii. Korištenje numeričkih proračuna.

U nastavku je dan pregled predloženih izraza za proračun karakteristika neprizmatičnih elemenata.

Hirt i Crisinel sa EPFL-a u Lozani [15] predlažu izraz za proračun ekvivalentnog momenta tromosti oko jače osi presjeka, uzimajući u obzir odnos minimalnog i maksimalnog momenta tromosti elementa:

$$r = \sqrt{\frac{I_{y,\min}}{I_{y,\max}}} \quad (4.1)$$

$$C = (0,08 + 0,92 \cdot r) \quad (4.2)$$

$$I_{y,eq} = C \cdot I_{y,\max} \quad (4.3)$$

Gdje je faktor C koeficijent redukcije maksimalnog momenta tromosti, a on ovisi o parametru r koji predstavlja odnos minimalnog i maksimalnog momenta tromosti elementa.

Posljedično se elastična kritična sila na izvijanje oko jače osi računa prema izrazu:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{y,eq}}{L^2} \quad (4.4)$$

Kako je promjena momenta tromosti oko slabije osi zanemarivo mala, elastična kritična sila na izvijanje oko slabije osi može se izračunati prema izrazu:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{z,min}}{L^2} \quad (4.5)$$

Za proračun elastičnog kritičnog momenta moguće je koristiti izraz za prizmatične elemente koji daje NCCI (*Non Contradictory Complementary Information*) [16], uz proračun ekvivalentnih geometrijskih karakteristika:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_T}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right] \quad (4.6)$$

Pozivajući se na autora Galea (1986), a kako navode Hirt i Crisinel [15], ekvivalentne geometrijske karakteristike za određivanje elastičnog kritičnog momenta moguće je proračunati prema slijedećim izrazima:

Ekvivalentna visina presjeka:

$$h_{eq} = h_{max} \cdot \sqrt{0,283 + 0,434 \cdot \gamma + 0,283 \cdot \gamma^2} \quad (4.7)$$

Gdje je:

$$\gamma = \frac{h_{min}}{h_{max}}$$

Konstanta krivljenja $I_{w,eq}$ računa se prema izrazima za prizmatične elemente sa vrijednošću h_{eq} .

Za ekvivalentni moment tromosti oko slabije osi presjeka usvaja se minimalna vrijednost momenta tromosti, pošto je njegova promjena zanemarivo mala.

Ekvivalentna torzijska konstanta računa se prema izrazu:

$$I_{T,eq} = I_T = \frac{I_{T,max} + I_{T,min}}{2} \quad (4.8)$$

Dokaz stabilnosti elementa može se provesti prema normi EN 1993-1-1 [12] koristeći:

- i. karakteristike kritičnog presjeka za proračun svih potrebnih vrijednosti – neprizmatični element se zamjenjuje prizmatičnim koji ima karakteristike kritičnog presjeka.
- ii. karakteristike kritičnog presjeka za proračun otpornosti, uz primjenu karakteristika ekvivalentnog presjeka za proračun elastičnih kritičnih opterećenja.

4.4. Opća metoda

4.4.1. Teorijska pozadina

Opća metoda za bočno i bočno torzijsko izvijanje elemenata opisana je u točki 8.3.4. druge generacije norme EN 1993-1-1 [12]. Metoda je primjenjiva za bilo koji element. Dokaz otpornosti prema općoj metodi glasi:

$$\frac{1}{\chi_{op} \cdot \frac{\alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (4.9)$$

$\alpha_{ult,k}$ predstavlja minimalnu vrijednost množitelja proračunskog opterećenja potrebnu da se dostigne otpornost kritičnog poprečnog presjeka uzimajući u obzir ponašanje elementa u ravnini. Prilikom proračuna potrebno je uzeti u obzir utjecaj izvijanja elementa u ravnini, ali se izvijanje van ravnine i bočno torzijsko izvijanje zanemaruje.

Koeficijent $\alpha_{cr,op}$ predstavlja minimalnu vrijednost množitelja proračunskog opterećenja kako bi se dosegla elastična otpornost na izvijanje savijanjem van ravnine ili bočno torzijsko izvijanje.

Faktor redukcije χ_{op} određuje se za globalnu svedenu vitkost $\overline{\lambda}_{op}$, koja se računa prema izrazu:

$$\overline{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} \quad (4.10)$$

Zatim se sa globalnom svedenom vitkošću određuje vrijednost χ za izvijanje prema točki 8.3.1. i χ_{LT} za bočno torzijsko izvijanje prema točki 8.3.2. norme EN 1993-1-1 [12].

Faktor redukcije χ_{op} usvaja se kao minimalna vrijednost između χ i χ_{LT} .

Norma dopušta određivanje minimalnih vrijednosti množitelja kritičnog opterećenja korištenjem metode konačnih elemenata (eng. FEM – *finite element method*).

4.4.2. Primjena na neprizmatične elemente

Prilikom određivanja množitelja kritičnog opterećenja za otpornost u ravnini $\alpha_{ult,k}$ norma [12] predlaže usvajanje izraza za dokaz otpornosti elementa u ravnini koji glasi:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (4.11)$$

Da Silva, Simões i Gervásio [14] usvajaju ovaj izraz i za neprizmatične elemente. Pritom se otpornosti elementa proračunavaju sa karakteristikama kritičnog presjeka, dok se faktor redukcije za izvijanje u ravnini može odrediti sa karakteristikama kritičnog presjeka, ili ekvivalentnog presjeka, a kako je obrađeno u poglavlju 4.3. Druga mogućnost određivanja $\alpha_{ult,k}$ je numeričkom GMNIA (*Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections*) metodom.

Određivanje minimalnog množitelja elastičnog kritičnog opterećenja za izvijanje savijanjem i bočno torzijsko izvijanje van ravnine nosača – stupova značajno je složenije. Trahair [17], predlaže izraz za elemente izložene konstantnom momentu savijanja:

$$\left(\frac{M_{y,max}}{M_{cr}} \right)^2 = \left(1 - \frac{N_{max}}{N_{cr,z}} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{max}}{N_{cr,T}} \right) \quad (4.12)$$

Pritom je M_{cr} elastični kritični moment bočno torzijskog izvijanja, $N_{cr,z}$ elastična kritična sila za izvijanje savijanjem oko osi z i $N_{cr,T}$ elastična kritična sila za torzijski mod izvijanja. Uzimajući u obzir da se maksimalno opterećenje ($M_{y,max}$; N_{max}) dobije množenjem $\alpha_{cr,op}$ i proračunskih vrijednosti djelovanja ($M_{y,Ed}$; N_{Ed}), izraz se može modificirati uvodeći pritom množitelj opterećenja:

$$\left(\frac{\alpha_{cr,op} \cdot M_{y,Ed}}{M_{cr}}\right)^2 = \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right) \quad (4.13)$$

Kako su u radu obrađivani elementi koji su izloženi jednolikom kontinuiranom opterećenju, moment savijanja elementa nije konstantan. Za elemente koji su izloženi momentu savijanja koji se mijenja po paraboli, Trahair [17] modificira izraz za $\alpha_{cr,op}$ koji tada poprima oblik:

$$\left(\frac{M_{y,max}}{C_{bc} \cdot M_{cr}}\right)^2 = \left(1 - \frac{N_{max}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{max}}{N_{cr,T}}\right) \quad (4.14)$$

$C_{bc} \approx 1,13$ za jednoliko raspodijeljeno opterećenje. Raspisani izraz stoga glasi:

$$\left(\frac{\alpha_{cr,op} \cdot M_{y,Ed}}{1,13 \cdot M_{cr}}\right)^2 = \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right) \quad (4.15)$$

Druga mogućnost određivanja $\alpha_{cr,op}$ je numeričkim LEA (*Linear Elastic Analysis*) proračunom.

5. NUMERIČKA ANALIZA

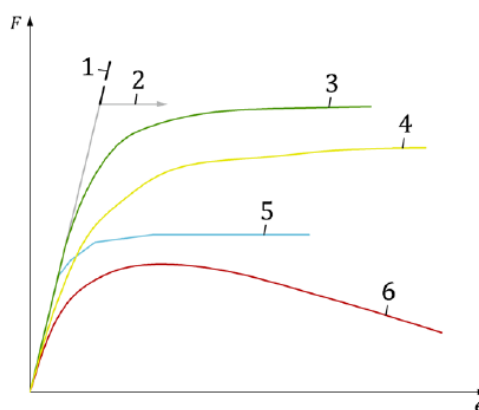
5.1. Uvod u numeričku analizu

Numeričke analize provedene su u skladu s drugom generacijom norme, Eurokoda 3 dijela 1-14, koji pokriva analizu konačnih elemenata (eng. *Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-14: Design assisted by finite element analysis*) [18]. Numeričkim analizama ispitano je realno ponašanje neprizmatičnih elemenata izloženih savijanju i uzdužnoj tlačnoj sili. Korištene su različite numeričke metode:

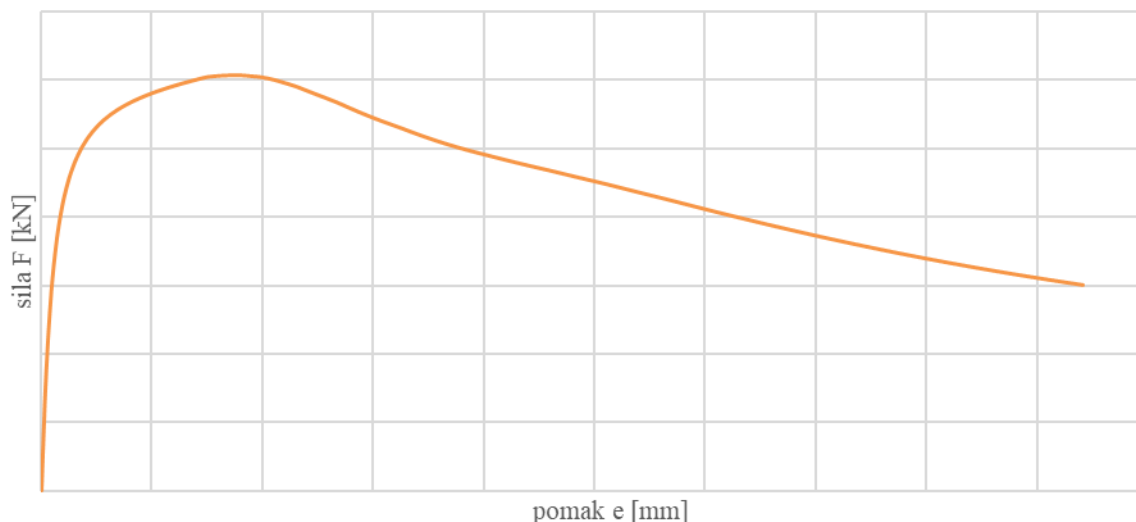
GMNIA (*Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections*) uzima u obzir geometrijsku (nesavršen element) i materijalnu nelinearnost (uzimanje u obzir plastičnog ponašanja elementa). Metoda se danas smatra najpreciznijim modelom ponašanja elementa, kako navode Walport i dr. [19], što i brojna druga literatura potvrđuje, kao npr. [20, 21].

LBA (*Linear Bifurcation Analysis*) korištena je za određivanje elastičnih kritičnih opterećenja pri kojima dolazi do gubitka stabilnosti elementa. Metoda je linearna, smatra se da je materijal elastičan te se provodi na savršenom elementu (imperfekcije nisu uzete u obzir). Analiza je također korištena za određivanje nesavršenih (deformiranih) oblika elementa, koji su kasnije korišteni u GMNIA analizi.

Na slici 5.1 prikazan je odnos sile i deformacija za različite tipove analiza prema EN 1993-1-14 [24]. LBA je prikazana sa brojem 2, dok je GMNIA prikazana sa brojem 6. Na slici 5.2 prikazan je odnos sile i pomaka za jednu od GMNIA analiza provedene u okviru ovog rada te se može uočiti da odnos odgovara onom propisanom normom.



Slika 5.1 – Grafički prikaz tipova analiza [18]



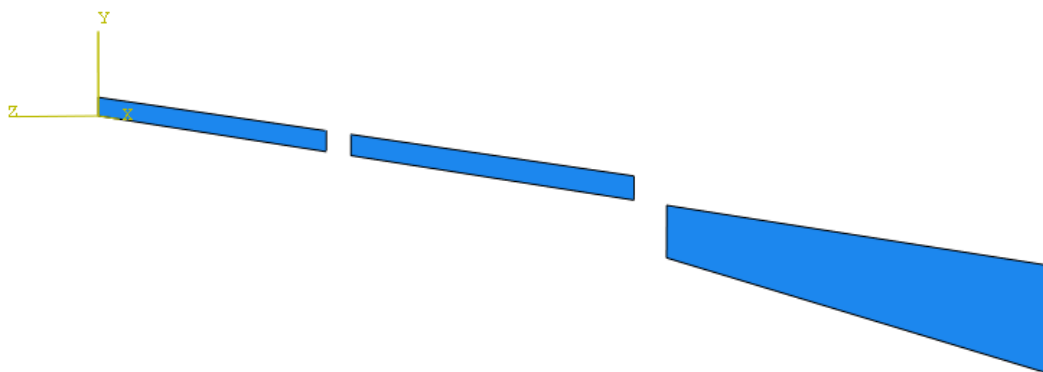
Slika 5.2 – Grafički prikaz rezultata GMNIA analize

Za provedbu numeričkih analiza korišten je FEA (eng. *Finite Element Analysis*) računalni program Abaqus 6.14-5 [22].

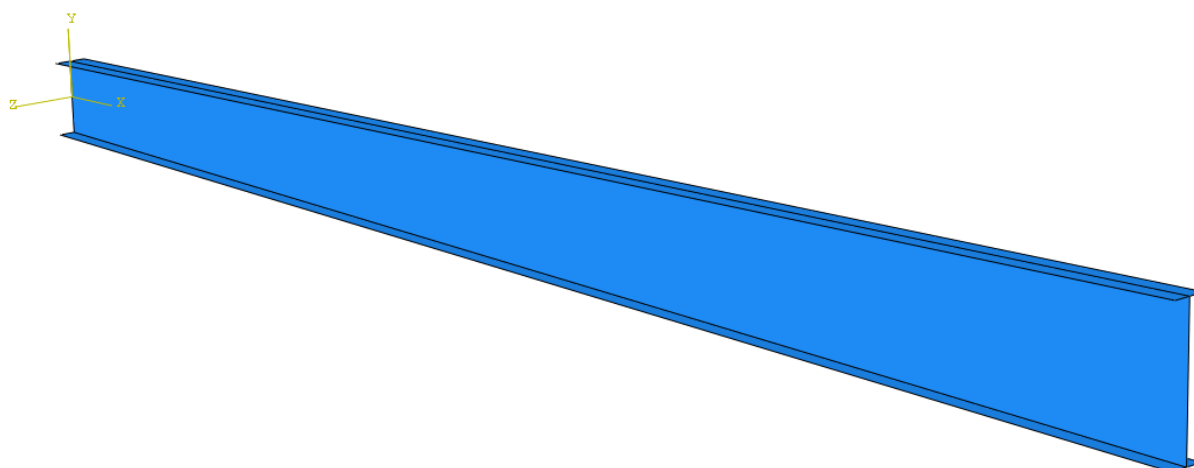
5.2. Opis numeričkog modela

5.2.1. Geometrija modela

Modelirani su elementi različitih duljina i odnosa maksimalne i minimalne visine. Promatrani su elementi kojima su na kraju manje visine osnova presjeka IPE profili standardiziranih dimenzija širine te debljine pojasnica i hrpta, često korišteni u čeličnim konstrukcijama. Elementi su sastavljeni od ljuskastih (eng. *shell*) elemenata. Ovakav pristup modeliranju usvojen je jer se korištenjem ljuskastih elemenata značajno preciznije može ispitati ponašanje elemenata u odnosu na štapne (eng. *beam*) modele. Štapni model tretira element kao niz točaka kojima je pridružen IPE poprečni presjek. Ljuskasti model tretira svaki dio IPE profila, pojasnice i hrbat, kao zasebnu ljusku. Na taj način je također moguće uočiti lokalno izbočivanje dijelova elementa, ukoliko dolazi do njega. Prednosti principa modeliranja sa ljuskastim elementima potvrđuje i literatura [11, 19-21]. U računalnom programu su posebno zadani hrbat te pojasnice. Zatim je ljuskastim elementima pridružena debljina te materijal. U dijelu računalnog programa sklop (eng. *assembly*) ljuskasti dijelovi (slika 5.3) spajani su u konačni neprizmatični element, a koji je prikazan je na slici 5.4.



Slika 5.3 – Ljuskasti elementi prije formiranja neprizmatičnog elementa



Slika 5.4 – Neprizmatični element

5.2.2. Mreža konačnih elemenata

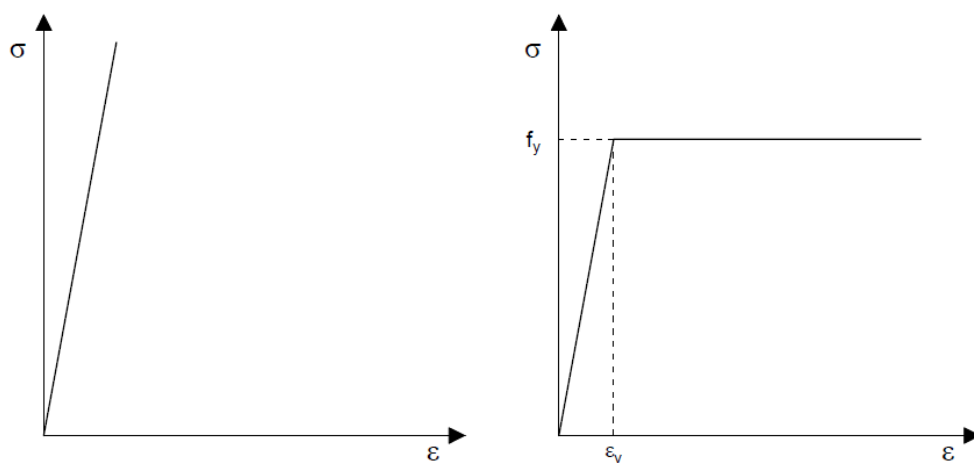
Korišteni su standardni linearni plošni elementi sa 6 stupnjeva slobode (S4R). Analizom osjetljivosti utvrđeno je da rezultati konvergiraju za mrežu konačnih elemenata koji imaju veličinu 10 mm.

5.2.3. Modeliranje materijala

Korišten je čelik S355. Za LBA metodu ponašanje čelika definirano je kao linearno elastično (slika 5.5, lijevo), dok je za GMNIA metodu ponašanje opisano bilinearnim dijagramom (slika 5.5, desno). Očvršćivanje materijala je zanemareno pošto relevantna literatura [11] sugerira da ono nema bitan utjecaj na provedbu analiza. U tablici 5.1. prikazane su karakteristike materijala zadavane u softveru. Za linearne analize modul elastičnosti je uzet $E = 210000 \text{ Mpa}$, dok je Poissonov omjer 0,3. Za nelinearne analize dodatno je zadana granica popuštanja materijala. Modeliranje materijala u skladu je s normom EN 1993-1-14 [18].

Tablica 5.1 – Karakteristike korištenog materijala u numeričkom modelu

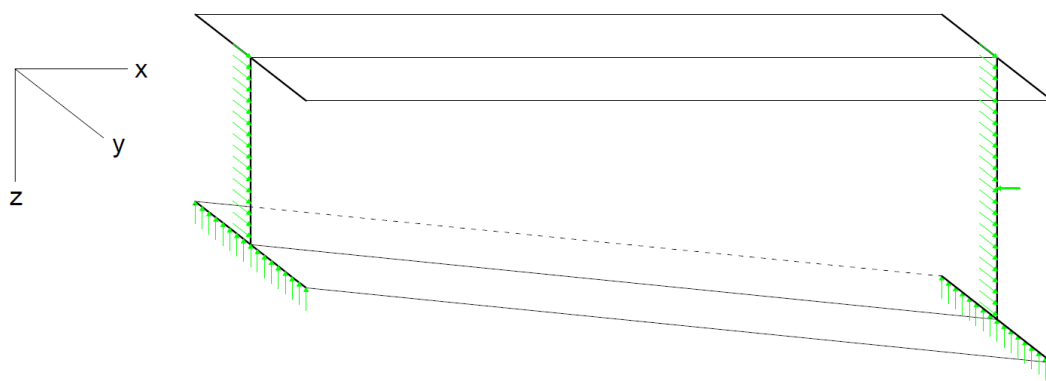
Kvaliteta čelika	Granica popuštanja f_y [Mpa]	Modul elastičnosti E [Mpa]	Poissonov koeficijent
S355	355	210 000	0,3



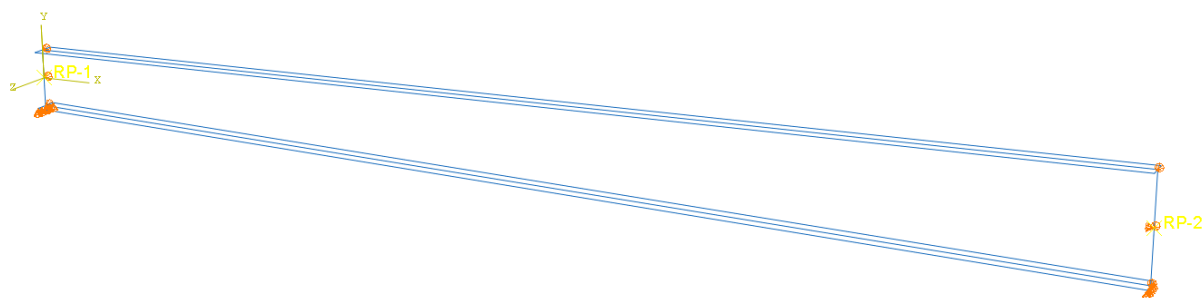
Slika 5.5 – linearno elastično ponašanje čelika (lijevo) i bilinearno ponašanje čelika (desno)

5.2.4. Uvjeti oslanjanja

Uvjeti oslanjanja u skladu su sa normom EN 1993-1-14 [18]. Za promatrane elemente modelirani su viličasti uvjeti oslanjanja elementa. Na krajevima elementa spriječen je bočni pomak hrpta (u smjeru osi y). Također je spriječen vertikalni pomak donje pojasnice (u smjeru osi z). Dodatno je u referentnoj točki na jednom kraju elementa spriječen horizontalni pomak elementa (u smjeru osi x), a kako je prikazano na slikama 5.6 i 5.7.



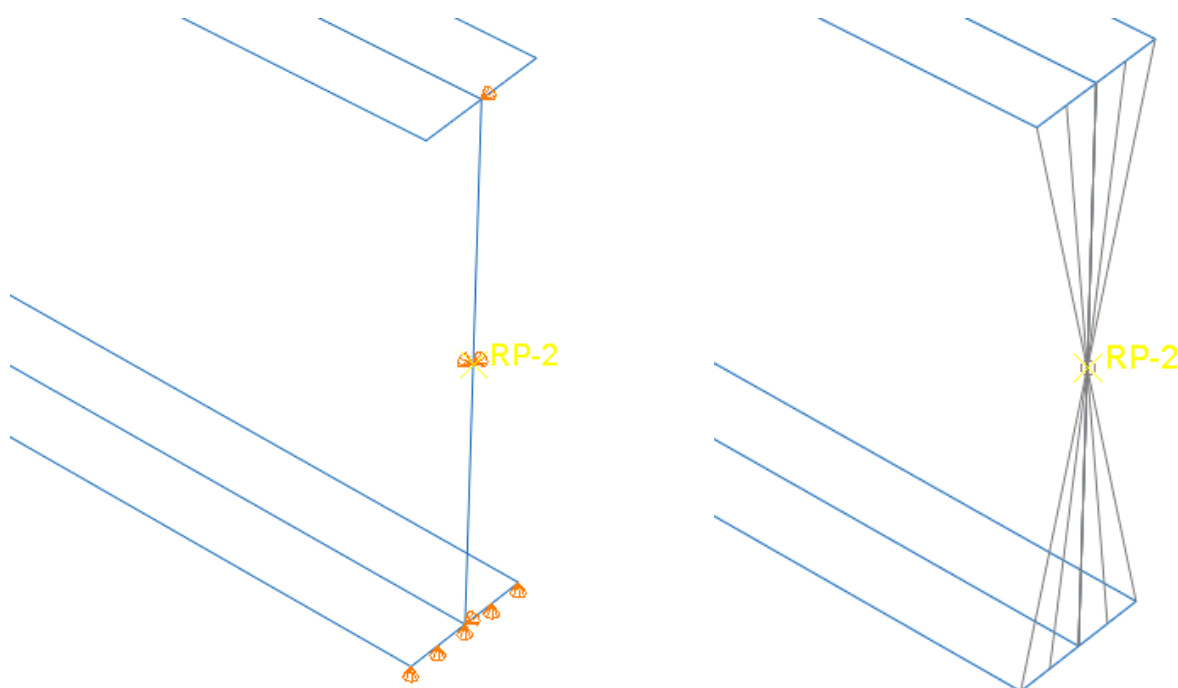
Slika 5.6 – Modelirani uvjeti oslanjanja elementa



Slika 5.7 – Modelirani uvjeti oslanjanja elementa u softveru

Ovakav način modeliranja viličastih pridržanja primjenjuju i Maia i ostali u [23].

Slika 5.8 lijevo prikazuje uvećane modelirane uvjete oslanjanja na ležaju te dodatni spriječen uzdužni pomak u referentnoj točki RP2. Vezom između stupnjeva slobode (eng. *constraint*) referentna točka povezana je sa cijelim rubnim presjekom (slika 5.8 desno) kako bi se osiguralo sprječavanje horizontalnih pomaka cijelog rubnog poprečnog presjeka i na taj način ostvario nepomičan ležaj.

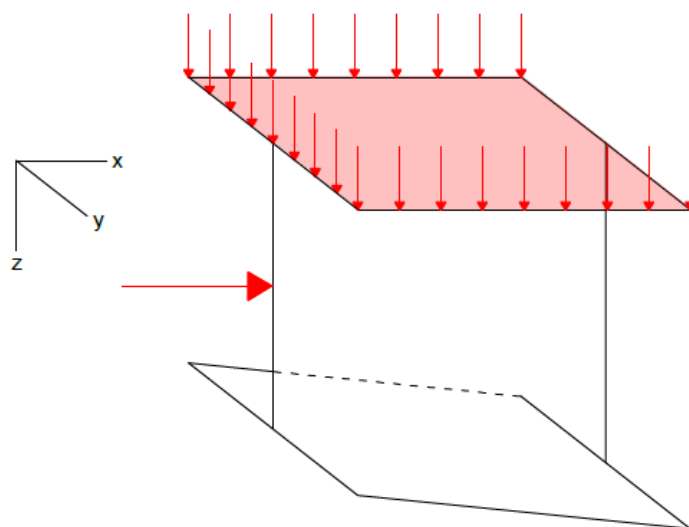


Slika 5.8 – Detalj uvjeta oslanjanja (lijevo) i prijenos uvjeta s referentne točke na cijeli presjek (desno)

5.2.5. Opterećenje

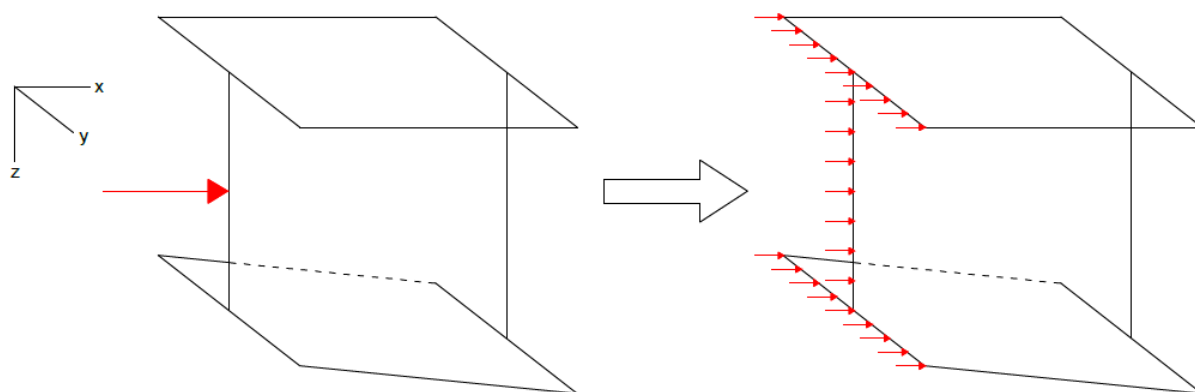
Način modeliranja opterećenja prikazan je na slici 5.9. Vertikalno kontinuirano opterećenje modelirano je kao površinsko na gornju pojasnicu elementa, što je bliže stvarnom ponašanju u odnosu na svođenje opterećenja na metar dužni elementa. Tlačna uzdužna sila

zadana je centralno na pomičnom kraju elementa. Opterećenje je modelirano u skladu s normom EN 1993-1-14 [18].



Slika 5.9 – Modeliranje opterećenja u računalnom programu

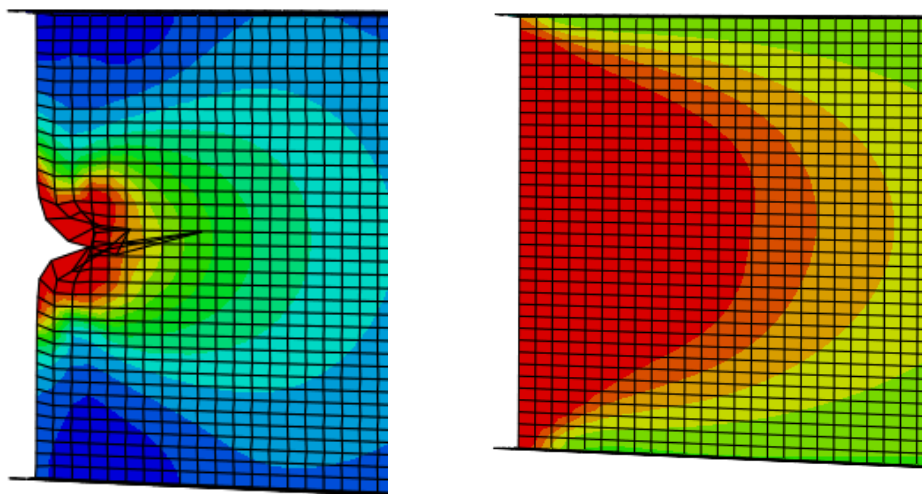
Kako bi se osigurao realan prijenos centrične tlačne sile na element, sila je zadana u referentnoj točki u težištu rubnog presjeka te je vezom između stupnjeva slobode ostvaren prijenos sile na cijeli rubni poprečni presjek elementa. Ostvareno djelovanje prikazano je na slici 5.10.



Slika 5.10 – Prikaz modeliranog prijenosa tlačne sile sa točke na cijeli poprečni presjek

U nastavku je opisana, i prikazana na slici 5.11, problematika zadavanja centrične sile kod modeliranja elementa od ljuskastih dijelova. Ukoliko se sila zada u jednoj točki ljuske (hrpta), prilikom analize dolazi do „cijepanja“ ljuskastog elementa (slika 5.11, lijevo), odnosno stvaranja pukotine približno paralelno sa smjerom djelovanja sile, što svakako nije realan

slučaj. Načinom modeliranja prikazanim na slici 5.10 osigurava se realan odgovor elementa opterećenog tlačnom silom (slika 5.11, desno).

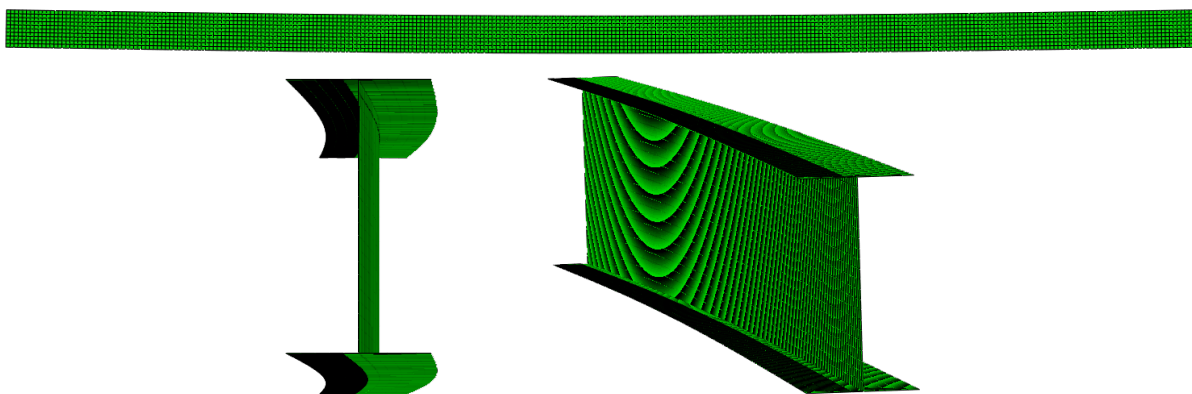


Slika 5.11 – Ponašanje hrpta unosom sile u jednoj točki ljuske (lijevo) i prijenosom sile na cijeli rubni presjek (desno)

5.3. Imperfekcije modela

5.3.1. Globalne imperfekcije

Geometrijska globalna imperfekcija ima oblik moda izvijanja elementa. Mod izvijanja elementa dobiven je kao rezultat LBA analize. Uzeta je maksimalna vrijednost imperfekcije $L/1000$, što je u skladu sa vrijednostima na temelju kojih su dobivene Europske krivulje izvijanja, a kako navodi i [11]. Također se navodi da ovakav oblik zadavanja imperfekcija daje preciznije rezultate u odnosu na zadavanje maksimalne vrijednosti imperfekcije u polovini raspona elementa, što se i podudara sa normom EN 1993-1-4 [18]. Zadane imperfekcije prikazane su na slici 5.12.



Slika 5.12 – Imperfekcije modela

5.3.2. Lokalne imperfekcije

Kako elementi promjenjive visine najčešće imaju vitke hrptove (porast visine uz jednaku debljinu hrpta), u modelima je dozvoljeno lokalno izbočivanje hrptova. Kako [11] navodi, ukoliko nisu prisutna velika posmična naprezanja, unatoč dozvoljenom lokalnom izbočivanju elementi bi trebali dosegnuti svoju otpornost.

5.4. Validacija modela

Detaljnim pregledom relevantne literature i istraživanjem FEA softvera, odabran je princip modeliranja, a koji je opisan u poglavljima 5.2. i 5.3. Cilj je bio provjeriti različite mogućnosti i načine modeliranja jednakog dijela modela, i odabrati onaj koji najvjernije prikazuje realno ponašanje elementa (kao npr. zadavanje tlačne sile, ili definiranje rubnih uvjeta). Prije provođenja vlastitih numeričkih simulacija, provjerena je ispravnost numeričkog modela uspoređujući rezultate sa radovima autora koji su također numeričkim simulacijama ispitivali ponašanje neprizmatičnih elemenata. Model je izrađen prema opisu danom u poglavlju 5.2 i 5.3, a zatim su rezultati analize uspoređeni sa rezultatima iz literature. Cilj nije bio kalibrirati model prema već izrađenima iz literature, već ispitati podudaraju li se dobiveni rezultati dvaju neovisnih numeričkih modela, kako bi validacija bila što vjernija.

Princip opterećivanja elementa tlačnom silom (slika 5.8) ispitan je na primjeru numeričke simulacije tlačno centrično opterećenog stupa iz [11]. Na elementu su provedene GMNIA i LBA analiza. Uočeno je odstupanje rezultata od 1,3 % za GMNIA analizu i 1,2 % za LBA analizu. Obzirom na drukčije zadavanje rubnih uvjeta u FEA softveru, različitoj veličini konačnih elemenata i zadavanju imperfekcija, a potencijalno i drukčijem zadavanju opterećenja, zaključuje se da su ovakve razlike zanemarive. Dodatno, razlike su takve da su dobivena manja kritična opterećenja u odnosu na literaturu, što je na strani pouzdanosti.

Ponašanje nosača-stupa validirano je prema [14]. Razlike u rezultatima iznose manje od 5 %. Kada se u obzir uzme da u [14] nema detaljnih podataka o modeliranju promatranog elementa, vjerojatne su razlike u koracima u odnosu na one opisane u 5.2 (veličina konačnih elemenata, način opterećivanja, rubni uvjeti, položaj opterećenja). Kada se sve mogućnosti uzmu u obzir, zaključuje se da je razlika prihvatljiva. Dodatno, razlike su takve da su dobivena manja kritična opterećenja u odnosu na literaturu, što je na strani pouzdanosti.

U praksi se kod proračuna vertikalno kontinuirano opterećenje zadava kao linijsko te se elementi promatraju kao štapni. Kako su u numeričkom modelu elementi ljuskasti, a vertikalno opterećenje zadano je na površinu gornje pojasnice (umjesto linijski), provedena je validacija načina opterećivanja. Promatran je prizmatični element (kako bi „inženjerski“ računalni program dao preciznije rezultate) te su uspoređeni rezultati analize istog elementa „inženjerskim“ računalnim programom (koji je zadan kao štapni, a opterećenje linijsko) i analize u Abaqusu (gdje je modeliran sa ljuskastim elementima, a opterećenje zadano kao površinsko). Pri analizi korišten je „inženjerski“ računalni program Dlubal RFEM 6.09.0003 [24]. Razlika rezultata iznosi 2,2 %, što je, kada se u obzir uzmu svi faktori, zanemarivo mala razlika. Kao i u prethodnim slučajevima, numeričkom simulacijom dobivena je manja vrijednost kritičnog opterećenja, što je na strani pouzdanosti.

Kada se sve usporedbe uzmu u obzir, zaključak je da princip modeliranja daje vjerodostojne vrijednosti koje zanemarivo odstupaju od rezultata iz literature s kojom su modeli uspoređivani. Odstupanja su također na strani pouzdanosti, jer su dobivene kritične vrijednosti u svakom primjeru manje od onih sa kojima su bili uspoređivane.

6. USPOREDBA METODA PRORAČUNA NEPRIZMATIČNIH ELEMENATA

U 4. poglavlju dan je pregled trenutno mogućih načina proračuna neprizmatičnih elemenata koristeći postupke iz europske norme za prizmatične elemente. Autori predlažu različite izraze za prilagodbu formula trenutno važećih normi, kako bi se dobili precizniji rezultati. Sukladno tome, otpornost neprizmatičnih elemenata moguće je proračunati koristeći 4 različita postupka:

- 1. postupak: Točka 8.3.3. druge generacije norme EN 1993-1-1 [12] provodeći dokaze na razini presjeka u kritičnom presjeku, a dokaze na razini elementa koristeći karakteristike kritičnog presjeka.
- 2. postupak: Točka 8.3.3. druge generacije norme EN 1993-1-1 [12] provodeći dokaze na razini presjeka u kritičnom presjeku, a dokaze na razini elementa koristeći karakteristike ekvivalentnog presjeka, gdje postoje izrazi za proračun karakteristika ekvivalentnog presjeka (koristeći izraze 4.1 – 4.8).
- 3. postupak: Točka 8.3.4. druge generacije norme EN 1993-1-1 [12] (Opća metoda) koristeći izraz 4.13 za proračun $\alpha_{cr,op}$.
- 4. postupak: Točka 8.3.4. druge generacije norme EN 1993-1-1 [12] (Opća metoda) koristeći izraz 4.14 za proračun $\alpha_{cr,op}$.

Primjer proračuna neprizmatičnog elementa prema svakom od navedenih postupaka dan je u prilogu A ovog rada. Kako je jedan od ciljeva rada prikazati ponašanje neprizmatičnih nosača – stupova, u ovom poglavlju prikazane su njihove M – N krivulje otpornosti dobivene na temelju postupaka 1 – 4. Svaki od 5 promatranih elemenata proračunat je za 20 različitih kombinacija uzdužne tlačne sile i vertikalnog kontinuiranog opterećenja kako bi se dobila M – N krivulja ponašanja elementa. Dakle, svaka krivulja koja opisuje ponašanje elementa prema jednom od trenutno dostupnih analitičkih postupaka dobivena je na temelju proračuna 20 različitih točaka te krivulje + dva rubna slučaja – kada na element djeluje isključivo uzdužna tlačna sila odnosno vertikalno opterećenje. Krivulje su formirane na način da je nakon određivanja otpornosti na uzdužnu silu element opterećivan sa 5%, 10%, 15%... otpornosti na uzdužnu silu te je traženo ono vertikalno opterećenje koje će dati takav moment savijanja da iskoristivost elementa bude točno 1. Kako se za svaku kombinaciju opterećenja mijenja kritični presjek, mijenjaju se i dimenzije na temelju kojih se provodi proračun. Stoga je proračun svake

točke svake krivulje bio iterativan, uz konvergiranje prema točnom rješenju nakon nekoliko iteracija (3 – 10, ovisno o odnosu uzdužne sile i vertikalnog opterećenja).

U 5. poglavlju dane su karakteristike numeričkog modela. Za svaki element (svaki numerički model) provedena je 41 GMNIA i jedna LBA analiza kako bi se dobila $M - N$ krivulja otpornosti koja prikazuje ponašanje neprizmatičnog nosača – stupa dobiveno numeričkim simulacijama. Detaljan postupak dobivanja jedne $M - N$ krivulje numeričkim simulacijama, kao i dodatne korisne informacije o analizama, prikazan je u prilogu B ovog rada.

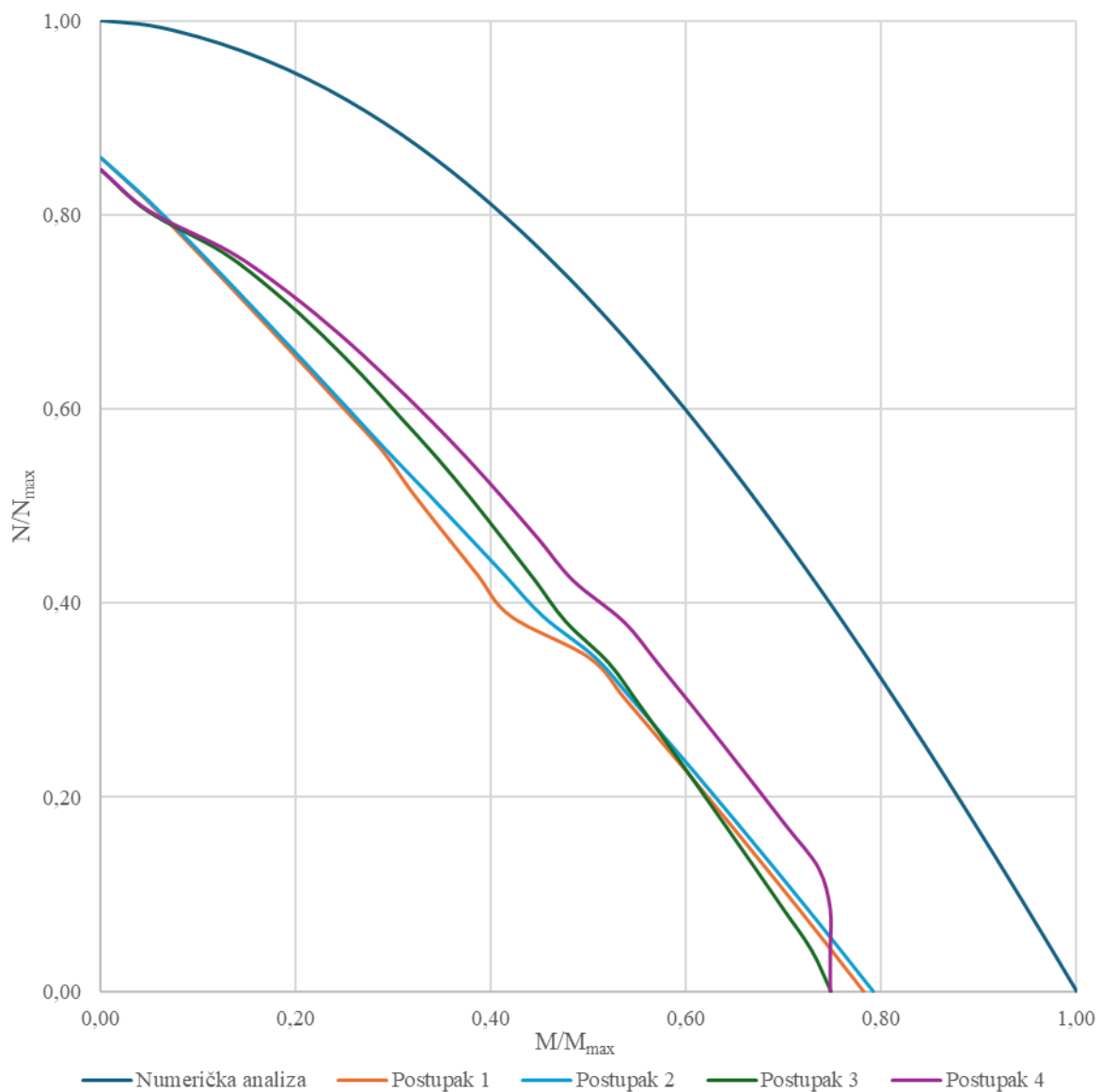
Kako bi se adekvatno usporedile metode proračuna neprizmatičnih elemenata, provedeni su proračuni i analize više elemenata IPE profila različitih raspona i različitih stopa promjena visine ($a_{t.r.}$) elementa. Ukupno je promatrano 5 elemenata, a njihovi podaci dani su u tablici 6.1.

Tablica 6.1 – Popis i karakteristike promatranih elemenata

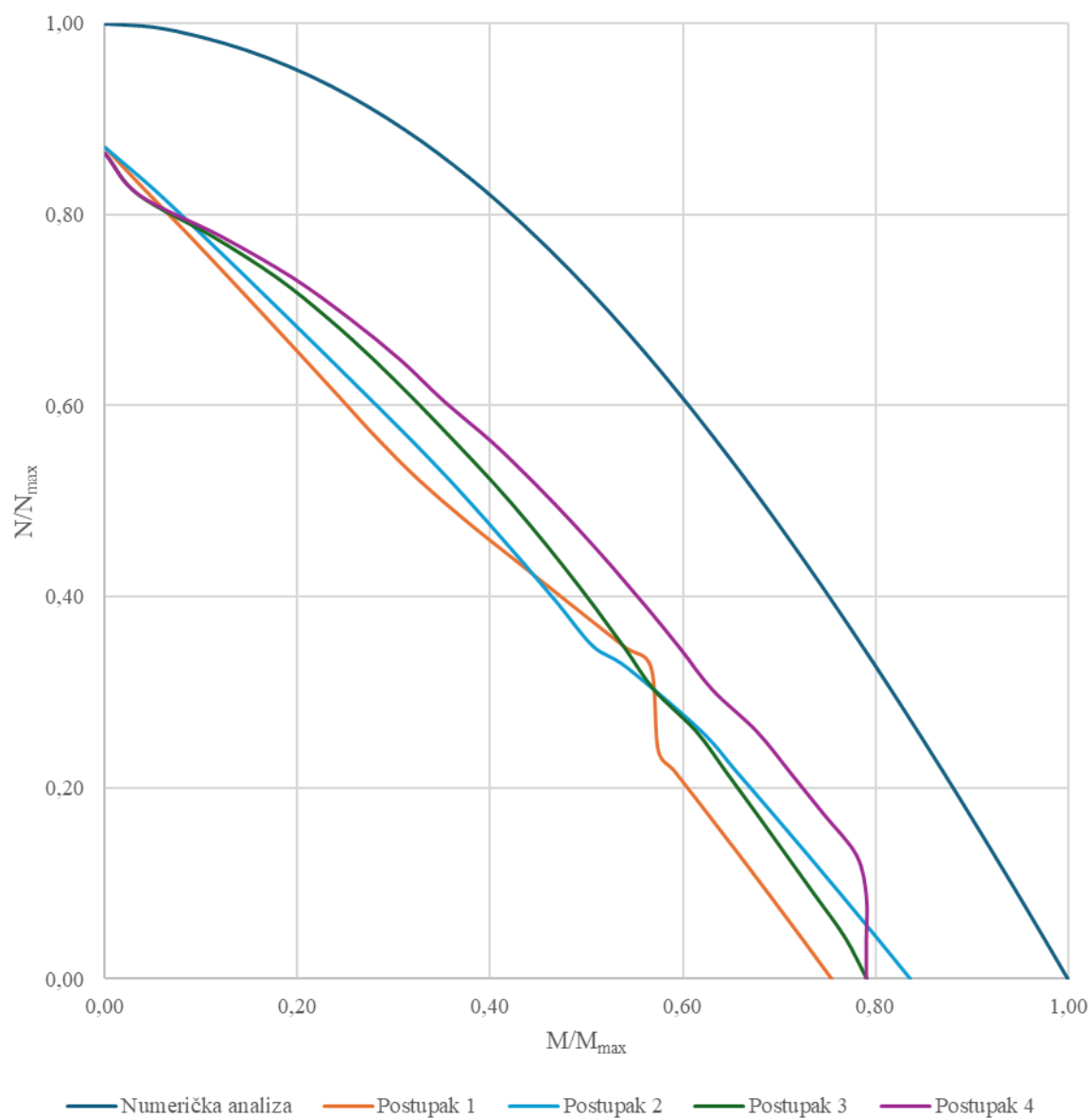
	Profil	Raspon	$a_{t.r.}$	Naziv elementa
1	IPE 180	3	0,025	IPE180_L3.0m_TR0025
2	IPE 220	4	0,075	IPE220_L4.0m_TR0075
3	IPE 270	6,5	0,025	IPE270_L6.5m_TR0025
4	IPE 330	8	0,05	IPE330_L8.0m_TR0050
5	IPE 400	9	0,075	IPE400_L9.0m_TR0075

S obzirom na 5 promatranih elemenata koji su proračunati prema 4 opisana postupka, a krivulja svakog postupka formirana je od 20 točaka, to ukupno rezultira 400 provedenih iterativnih proračuna koja su dana u prilogu A.

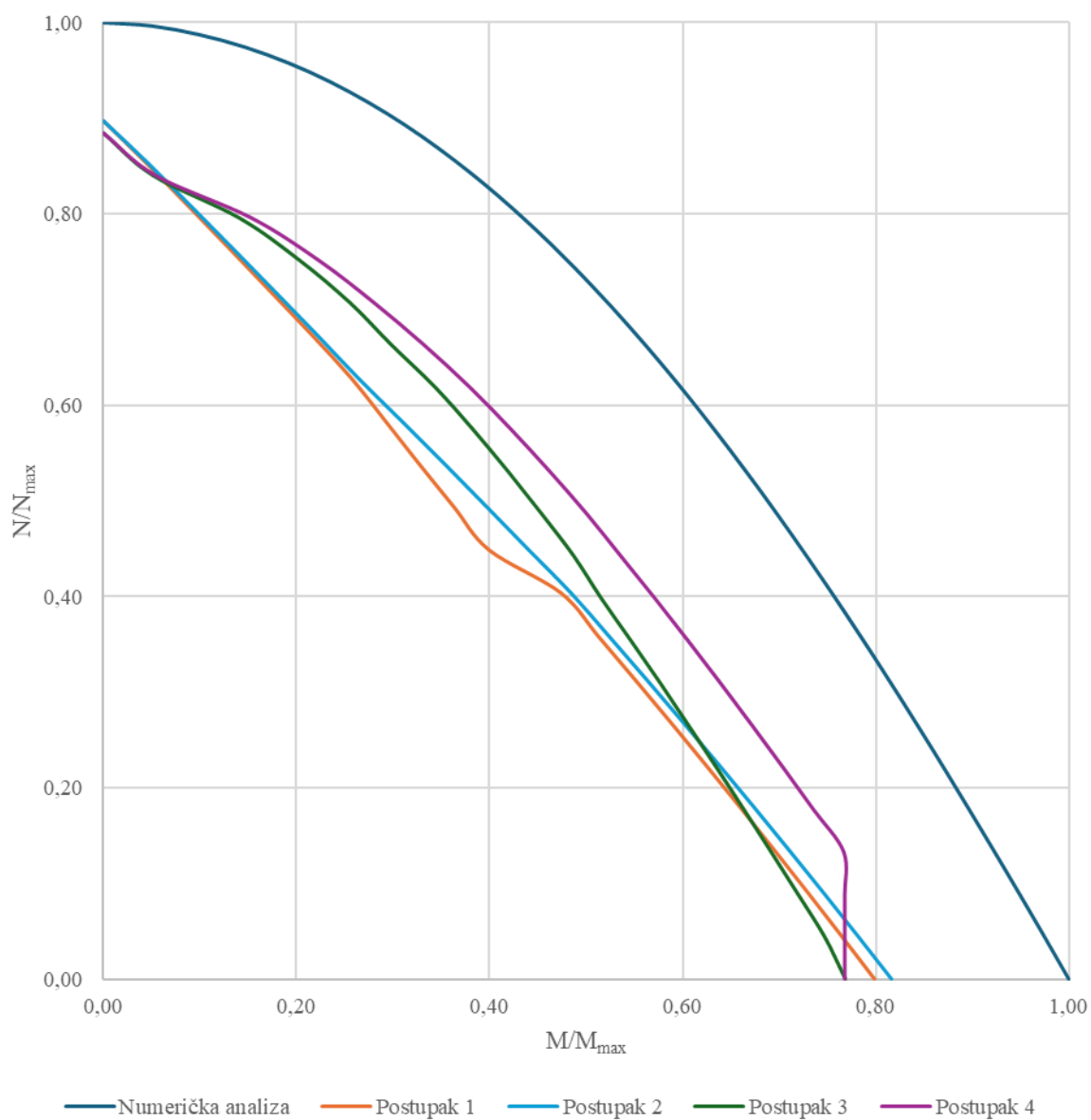
Rezultati svih analiza i proračuna prikazane su na slikama 6.1 – 6.5, a detaljno su komentirani u 9. poglavlju rada – usporedba rezultata i diskusija.



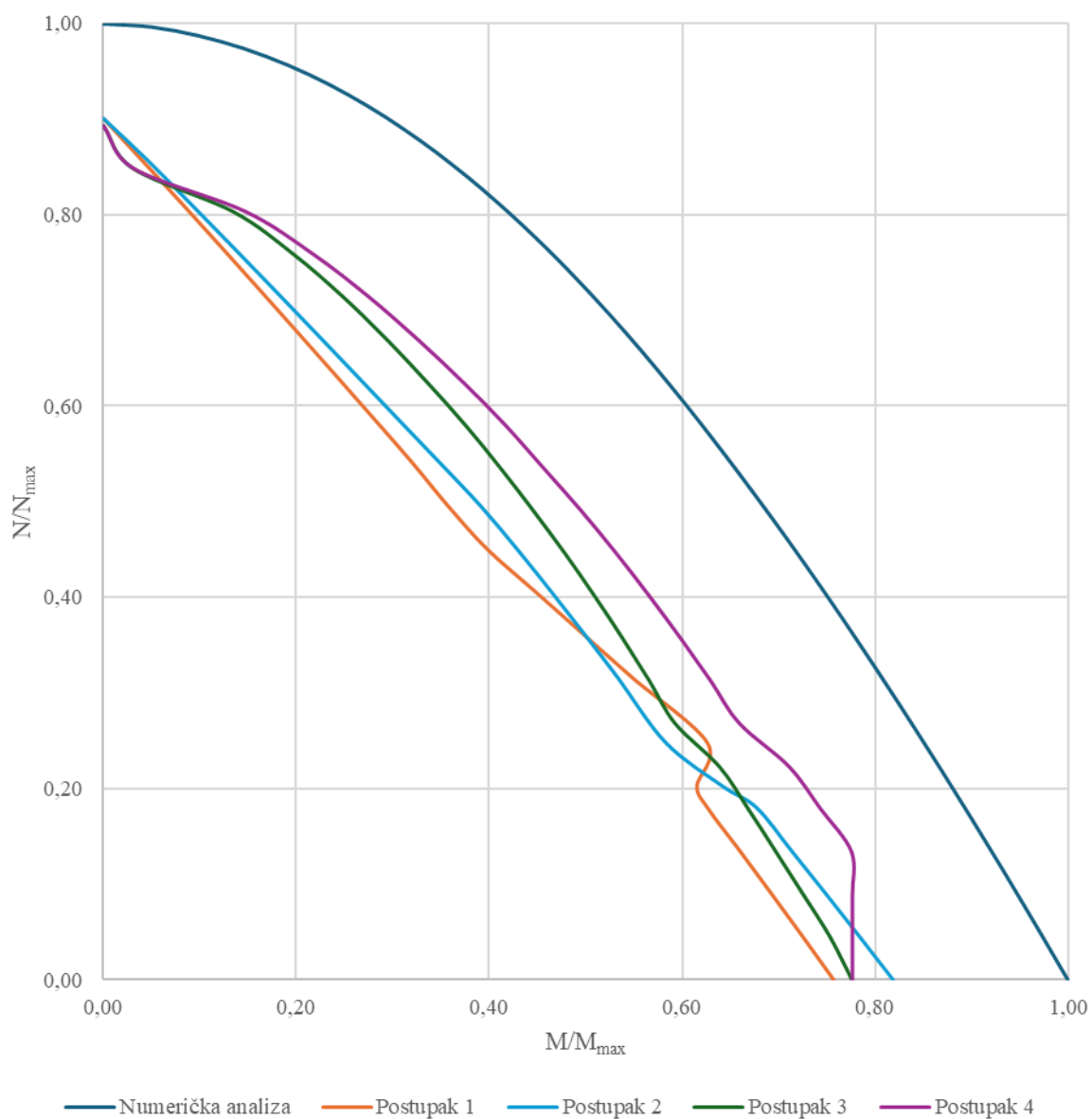
Slika 6.1 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 1 iz tablice 6.1



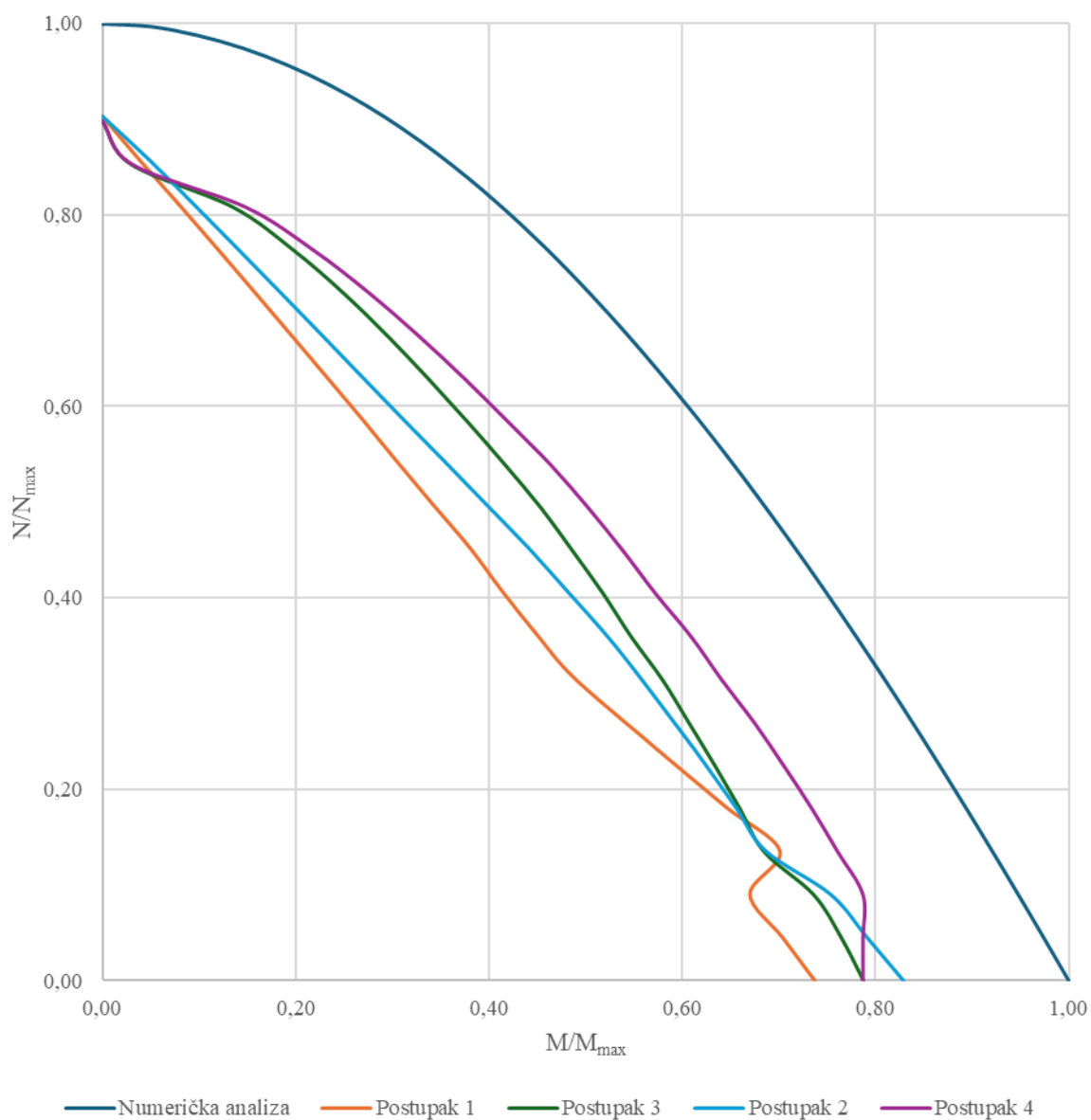
Slika 6.2 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 2 iz tablice 6.1



Slika 6.3 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 3 iz tablice 6.1

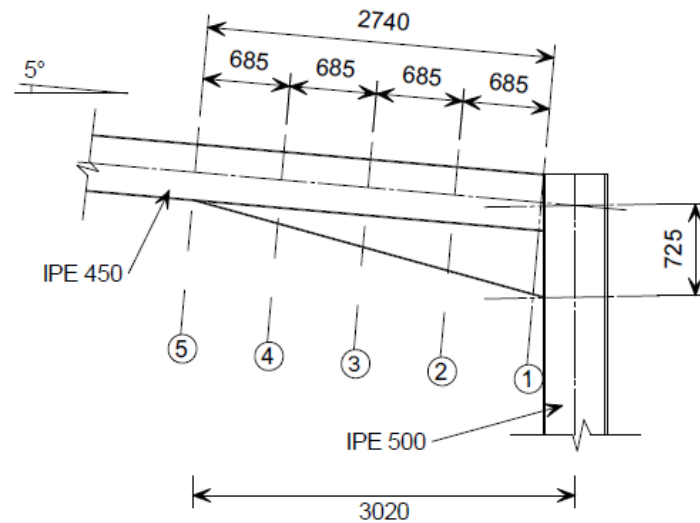


Slika 6.4 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 4 iz tablice 6.1



Slika 6.5 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 5 iz tablice 6.1

Postupak dimenzioniranja detaljno je dan u [25], a u nastavku su dani bitni podaci i rezultati dimenzioniranja. Okvir je dimenzioniran na ukupno opterećenje 10 kN/m'. Odabrani profili okvira su za stup IPE 500 te za prečku IPE 450. Vuta je napravljena od profila IPE 550, a njezine dimenzije prikazane su na slici 7.2.



Slika 7.2 – Dimenzije vute [25]

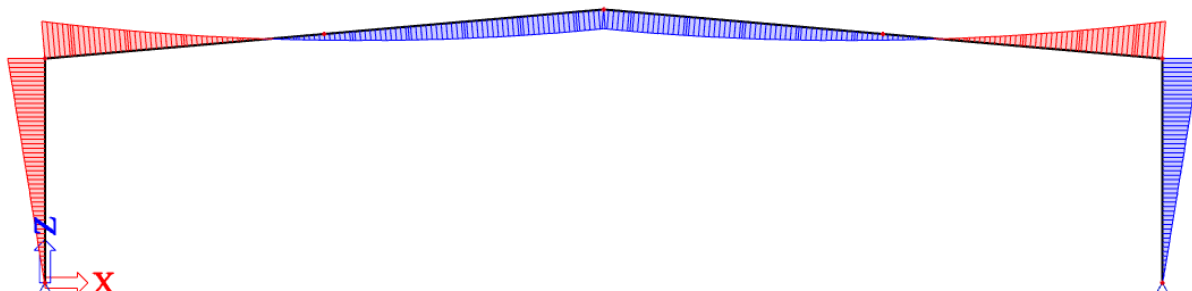
Iskoristivost stupa iznosi 96,25%, a prečke i vute oko 80 %.

Utrošak materijala okvira 1 iznosi 3584,74 kg.

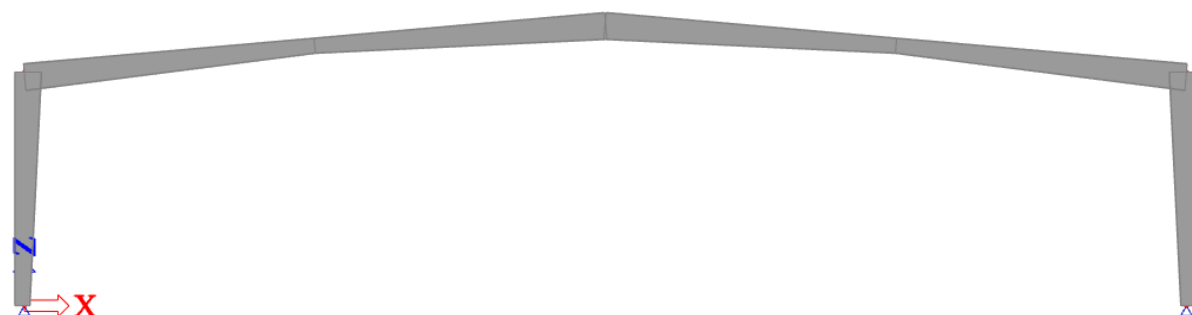
7.2. Portalni okvir sa neprizmatičnim elementima

Cilj svakog nosivog sustava, pa tako i okvira, je pouzdano preuzeti vanjska djelovanja i prenijeti ih dalje u konstrukciju, ili u temelje. Vanjska opterećenja u elementima uzrokuju unutarnje sile, a za dimenzioniranje okvira najčešće su mjerodavni uzdužna sila i moment savijanja. Momentu savijanja pojednostavljeno se odupire moment otpora elementa, koji raste s kvadratom visine. Stoga se povećanjem visine elementa povećava i njegova otpornost na savijanje. Zato se kod okvira 1, koji je opisan u poglavlju 7.1, na mjestu najvećih momenata savijanja postavila vuta (daje veću visinu elementa te se na taj način moment savijanja uspješno prenosi).

Na slici 7.3. prikazan je momentni dijagram za promatrani portalni okvir, dok je na slici 7.4 prikazana geometrija okvira koja je sastavljena od neprizmatičnih elemenata (u nastavku rada „Okvir 2“). Prečka okvira sastavljena je od četiri jednaka elementa profila dimenzija IPE 400, dok je stup također sastavljen od profila dimenzija IPE 400. Visina grede na krajevima svakog od 4 elementa iznosi 400 i 700 mm, a visina stupova na krajevima također iznosi 400 i 700 mm.



Slika 7.3 – Momentni dijagram okvira



Slika 7.4 – Geometrija okvira

Razmatranjem slika 7.3 i 7.4 može se uočiti jasna prednost i efikasnost upotrebe neprizmatičnih elemenata. Kako je prethodno opisano, veća visina profila rezultira većom

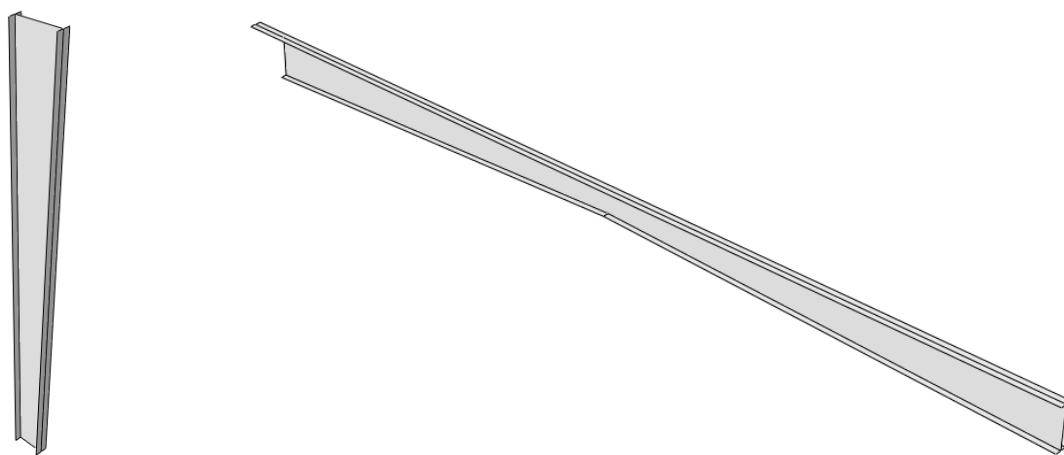
otpornosti na savijanje elementa. Na mjestima najvećih momenata savijanja (priključak stupa i prečke, polovina raspona prečke) elementi imaju najveće visine (u ovom primjeru 700 mm), dok na mjestima (približno) najmanjih momenata savijanja (u $L/4$ grede i na dnu stupova) elementi imaju najmanju visinu (u ovom primjeru 400 mm).

Kako je pokazano u 6 poglavlju rada, principi proračuna prema europskoj normi podcjenjuju otpornost neprizmatičnih elemenata (sve $M - N$ krivulje otpornosti daju značajno manje vrijednosti u odnosu na numeričke analize, odnosno krivulje se nalaze „ispod“ rezultata numeričke analize). Stoga je za ovaj okvirni sustav također provedena numerička analiza, a za koju je korišten je FEA (eng. *Finite Element Analysis*) računalni program Abaqus 6.14-5 [22].

7.3. Numerički model okvira sa neprizmatičnim elementima

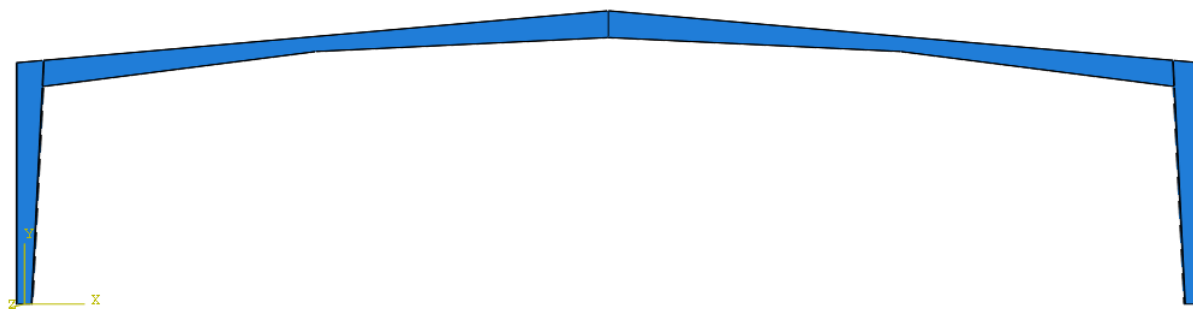
7.3.1. Geometrija modela

U poglavlju 5.2. dani su razlozi korištenja ljuskastih elemenata, a koje potvrđuje i literatura [11, 19-21]. Stupovi i dijelovi prečke formirani su na jednak način kao u poglavlju 5.2, a što je i prikazano na slikama 5.1 i 5.2. Formirani stup i polovina prečke prikazani su na slici 7.5.



Slika 7.5 – Modelirani dijelovi okvira

Na slici 7.6. prikazan je modeliran kompletan okvirni sustav.



Slika 7.6 – Okvirni sustav

7.3.2. Mreža konačnih elemenata

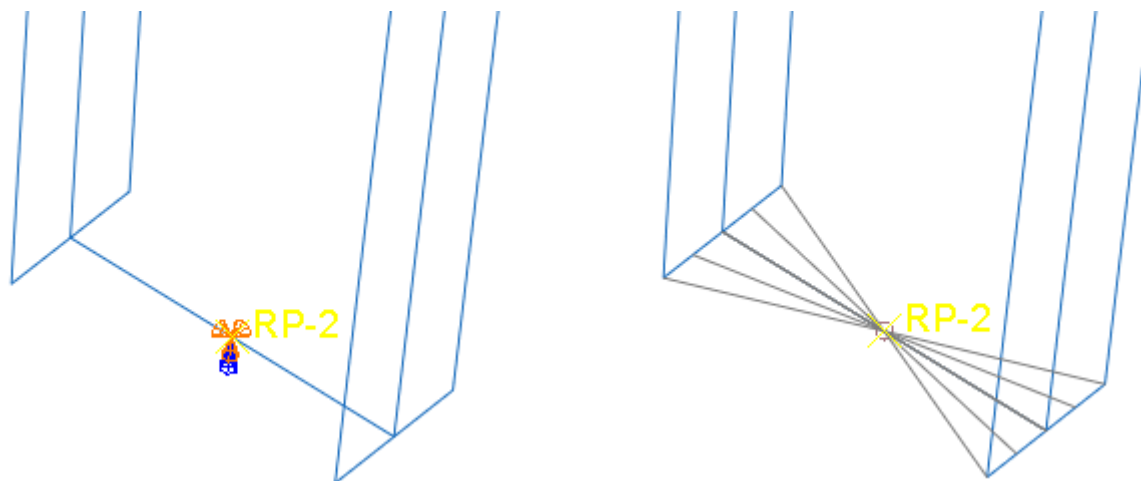
Korišteni su standardni linearni plošni elementi sa 6 stupnjeva slobode (S4R). Analizom osjetljivosti utvrđeno je da rezultati konvergiraju za mrežu konačnih elemenata koji imaju veličinu 50 mm.

7.3.3. Modeliranje materijala

Korišten je čelik S355. Za LBA metodu ponašanje čelika definirano je kao linearno elastično, dok je za GMNIA metodu ponašanje opisano bilinearnim dijagramom. Očvršćivanje materijala je zanemareno pošto relevantna literatura [11] sugerira da ono nema bitan utjecaj na provedbu analiza. Detaljnije modeliranje materijala opisano je u poglavlju 5.2.3.

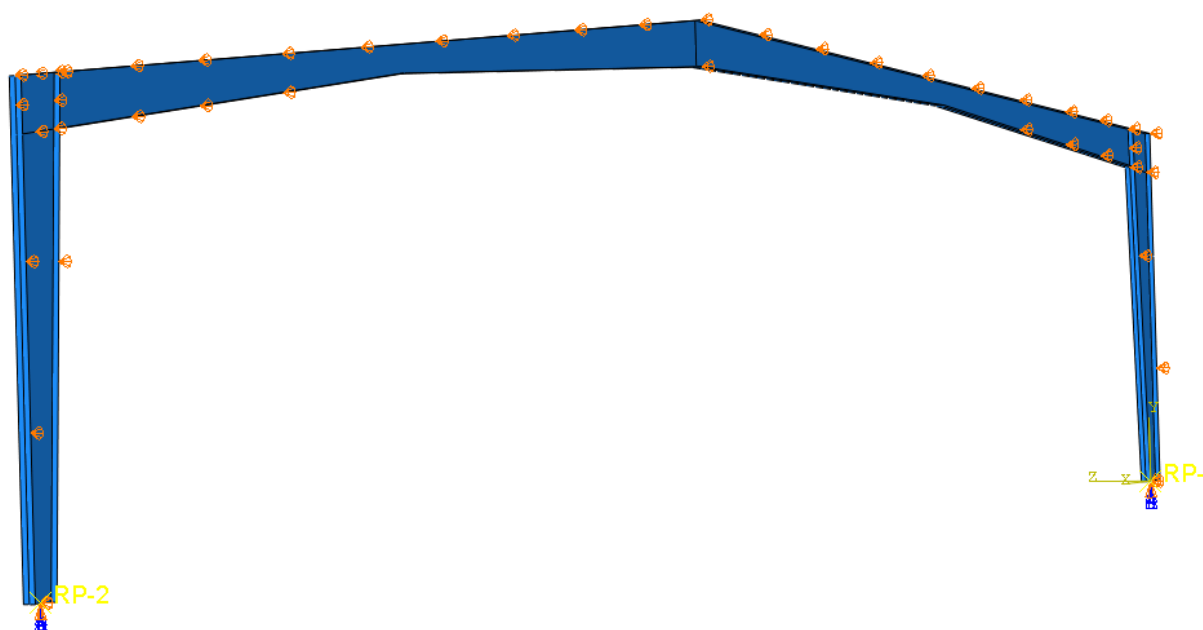
7.3.4. Uvjeti oslanjanja

Uvjeti oslanjanja jednaki su onima kod okvira 1 (zglobni spoj stupova i temelja). Zadani su preko referentnih točaka (slično kao u poglavlju 5.2.4.). Vezom između stupnjeva slobode (eng. *constraint*) referentna točka povezana je sa cijelim rubnim presjekom (slika 7.7 desno), a spriječeni translacijski pomaci i rotacija oko osi elementa u referentnoj točki prikazani su na slici 7.7 lijevo.



Slika 7.7 – Detalj uvjeta oslanjanja (lijevo) i prijenos uvjeta s referentne točke na cijeli presjek (desno)

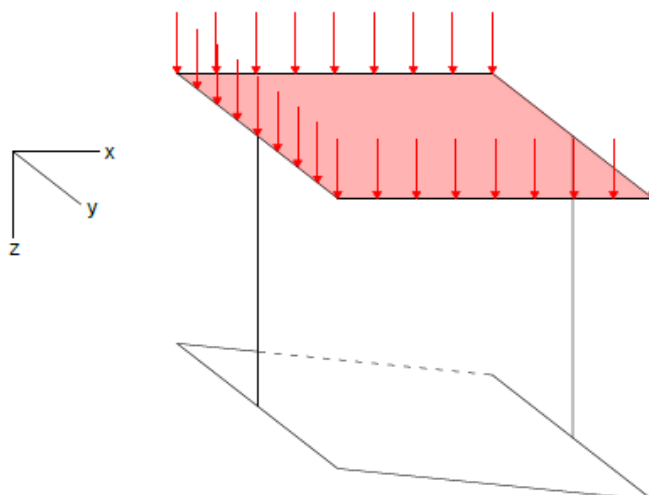
Bočna pridržanja prečke i stupova modelirana su jednako kao što su postavljena na okviru 1, kako bi se što vjernije usporedilo ponašanje dvaju okvira. Zadavanje bočnih pridržanja prikazano je na slici 7.8.



Slika 7.8 – Zadavanje bočnih pridržanja

7.3.5. Opterećenje

Način modeliranja opterećenja prikazan je na slici 7.9. Vertikalno kontinuirano opterećenje modelirano je kao površinsko na gornju pojasnicu elementa, što je bliže stvarnom ponašanju u odnosu na svođenje opterećenja na metar dužni elementa.

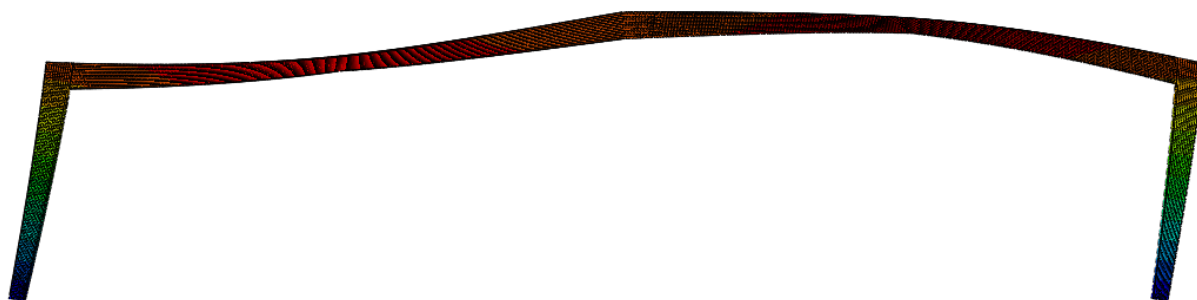


Slika 7.9 – Modeliranje opterećenja u računalnom programu

7.3.6. Imperfekcije modela

7.3.6.1. Globalne imperfekcije

Oblik geometrijske globalne imperfekcije zadan je u skladu sa normama EN 1993-1-1 [12] i EN 1993-1-14 [18]. Za globalnu imperfekciju odabran je pomični mod izvijanja okvira, a koji je prikazan na slici 7.10. Oblik imperfekcije je dobiven linearnom frequency analizom.



Slika 7.10 – Oblik globalne imperfekcije okvira

Vrijednost imperfekcije proračunata je prema EN 1993-1-1 [12] i zadava se kao otklon od vertikale (slika 7.11):

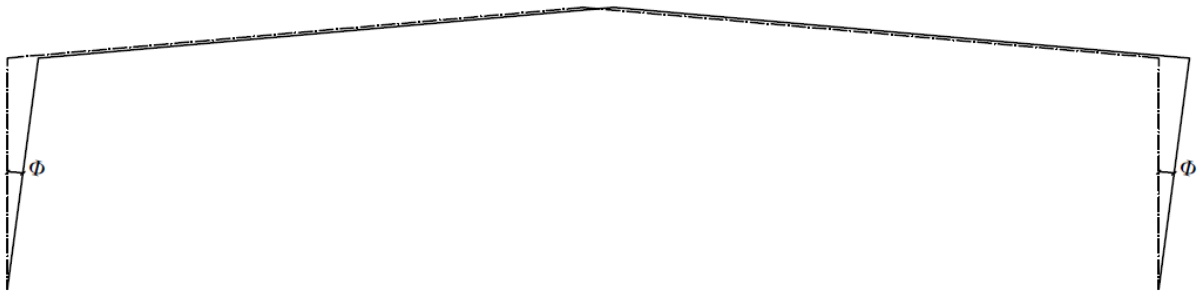
$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad (7.1)$$

$$\phi_0 = 1/200 \quad (7.2)$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{6,0}} = 0,82 \quad (7.3)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\right)} = 0,87 \quad (7.4)$$

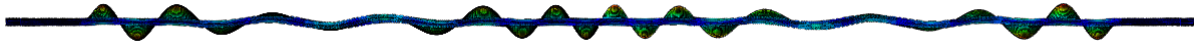
$$\phi = \frac{1}{200} \cdot 0,82 \cdot 0,87 = 0,00356$$



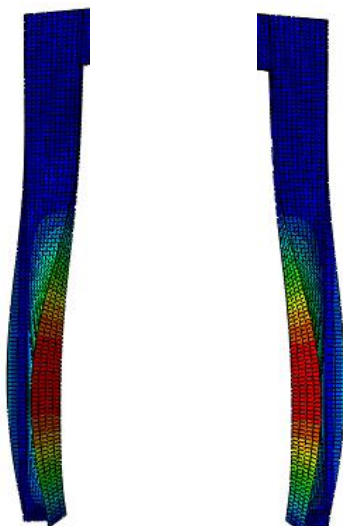
Slika 7.11 – Zadavanje globalne imperfekcije okvira

7.3.6.2. Lokalne imperfekcije

Oblik lokalne imperfekcije grede (slika 7.12) i stupova (slika 7.13) također je dobiven linearnom frequency analizom. Lokalne imperfekcije zadane su na jednak način kao u poglavlju 5.3. Linearna frequency analiza provedena je na okviru na kojem su zadana bočna pridržanja, kako bi se dobio oblik izvijanja elemenata između pridržanja, odnosno nepovoljniji oblik u odnosu na oblik lokalnih imperfekcija okvira bez bočnih pridržanja.



Slika 7.12 – Zadavanje lokalne imperfekcije prečke

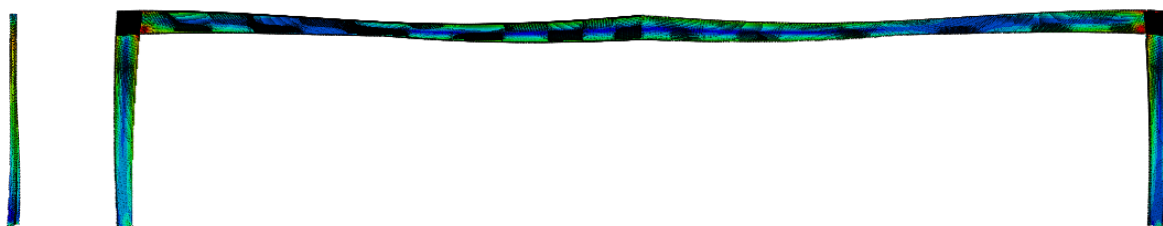


Slika 7.13 – Zadavanje lokalne imperfekcije stupova

7.4. Rezultati numeričke analize

U svrhu određivanja kritičnog opterećenja okvira provedena je GMNIA analiza. Zadano je početno površinsko opterećenje na pojasnicu, opisano u poglavlju 7.3.5, sa vrijednošću $q = 0,01 \text{ kN/m}^2$. Kada se opterećenje svede na linijsko, iznosi $q = 0,01 \cdot 180 = 1,8 \text{ kN/m}'$. Rezultati analize prikazani su na slici 7.14.

Napomena: deformacije okvira su uvećane kako bi se jasno vidio deformirani oblik pri opterećenju otkazivanja.



Slika 7.14 – Oblik okvira pri otkazivanju

Analizom je dobiven množitelj opterećenja koji iznosi $\alpha = 6,13968$

Dakle, kritično opterećenje pri kojem dolazi do otkazivanja okvira je:

$$q_{kr} = 1,8 \cdot 6,13968 = 11,05 \text{ kN/m}' \quad (7.5)$$

Okvir stoga zadovoljava promatrano opterećenje ($10 \text{ kN/m}'$) uz iskoristivost 90,49 %.

Utrošak materijala okvira 2 iznosi 3042,43 kg.

7.5. Scenarij životnog ciklusa promatranih okvira

Za potrebe ovog rada razmatrani okviri se razmatraju kao glavni nosivi sustavi industrijske hale duljine 80 metara. Pretpostavka je da su svi ostali elementi (vezovi sustavi, podrožnice, sekundarni stupovi...) jednakih dimenzija, pošto je cilj usporediti samo okvirne sustave. Za uobičajeni raster okvira 8 metara, u hali se nalazi 11 glavnih nosivih sustava.

U nastavku je dan proračun emisija ugljikovog dioksida za dva različita glavna nosiva sustava – okvir sa vutama (okvir 1) i okvir sastavljen od neprizmastičnih elemenata (okvir 2). Kako je pretpostavka da su svi ostali elementi jednakih dimenzija, oni će za oba slučaja emitirati jednaku količinu ugljikovog dioksida, pa njihova količina nije uključena u proračun. Za količine emitiranog ugljičnog dioksida korištena je baza podataka EPD Give Steel A/S [26]. LCA analiza u narednim poglavljima provedena je prema vodiču „*How to calculate embodied carbon*“ koji daje *The Institute of Structural Engineers* [27].

7.5.1. Okvir 1

Ukupna masa čelika potrebna za provedbu analize: $W = 11 \cdot 3584,74 = 39432,14$ kg

7.5.1.1. Modul A

Moduli A1 – A3

$$EC_{A13} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A13,i})] \quad (7.6)$$

Faktor potreban za proračun modula A1 – A3 [26]: $ECF_{A13} = 1,04$ kgCO₂e/kg

$$EC_{A13} = 39432,14 \cdot 1,04$$

$$EC_{A13} = 41010 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Modul A4 (transport)

Pretpostavlja se da se proizvedeni elementi transportiraju na gradilište koje se nalazi u Zagrebu, te da je udaljenost između gradilišta i proizvodnog pogona manja (ili jednaka) od 20 kilometara.

Faktor emisija uslijed transporta prema [27], za transport elemenata cestom, i za prosječno utovaren prijevozni kamion, iznosi: $TEF_{mode} = 0,10749 \text{ gCO}_2\text{e/kg/km}$

$$ECF_{A4} = n \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2\text{e/kg/km}}{1000} \quad (7.7)$$

$$ECF_{A4} = 20 \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2\text{e/kg/km}}{1000} = 0,0021498 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

$$EC_{A4} = 0,0021498 \cdot W_{uk}$$

$$EC_{A4} = 0,0021498 \cdot 39432,14 = 84,8 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Modul A5

$$EC_{A5} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A5,i})] \quad (7.8)$$

Faktor potreban za proračun modula A5 [26]: $ECF_{A5} = 0,000658 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$

$$EC_{A5} = 39432,14 \cdot 0,000658$$

$$EC_{A5} = 25,95 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul A:

$$EC_A = EC_{A13} + EC_{A4} + EC_{A5} \quad (7.9)$$

$$EC_A = 41010 + 84,8 + 25,95$$

$$EC_A = 41121 \text{ kgCO}_2\text{e} = 41,121 \text{ tCO}_2\text{e}$$

7.5.1.2. Modul B

U bazi podataka [26] koja je korištena u ovom radu podaci o emisijama ugljikovog dioksida za čelik tijekom faze korištenja (za modul B) nisu dani. Razlog tomu je da nosiva konstrukcija najčešće daje vrlo male, a ponekad i zanemarive količine ugljikovog dioksida tijekom svog životnog vijeka. Dio B4 (zamjena elemenata, npr. zamjena fasade) je najčešće fokus faze korištenja građevine [27]. Kako se uspoređuje samo okvirna nosiva konstrukcija, pretpostavka je da će se za oba okvirna sustava u fazi korištenja emitirati približno slična

količina ugljikovog dioksida, stoga se u okviru ovog rada neće proračunati emisije modula B analize. Opravdanost toga potvrđuje i [27].

7.5.1.3. Modul C

Modul C1

Faktor potreban za proračun modula C1 [26]: $ECF_{C1} = 0,000658 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$

$$EC_{C1} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C1,i})] \quad (7.10)$$

$$EC_{C1} = 39432,14 \cdot 0,000658$$

$$EC_{C1} = 25,95 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Modul C2

Transport demontiranih elemenata konstrukcije proračunat je na jednak način kao transport elemenata na gradilište (A4):

$$EC_{C2} = EC_{A4} = 84,8 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Moduli C3 i C4

$$EC_{C3+C4} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C3+C4,i})] \quad (7.11)$$

Faktor potreban za proračun modula C3 i C4, očitao iz baze podataka [26]:

$$ECF_{C3+C4} = (0,0233 + 0,0) = 0,0233 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

$$EC_{C3+C4} = 39432,14 \cdot 0,0233$$

$$EC_{C3+C4} = 918,8 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul C:

$$EC_C = EC_{C1} + EC_{C2} + EC_{C3+C4} \quad (7.12)$$

$$EC_C = 25,95 + 84,8 + 918,8$$

$$EC_C = 1030 \text{ kgCO}_2\text{e} = 1,03 \text{ tCO}_2\text{e}$$

Tablica 7.1 – Rekapitulacija rezultata LCA za okvir 1

Količina emitiranog ugljikovog dioksida	Modul A			Modul B	Modul C
	A1 – A3	A4	A5		
tCO ₂ e	41,010	0,0848	0,02595	/	1,03
Ukupno	42,15 tCO₂e				

7.5.1.4. Modul D

Kako navodi [27] prednosti ponovne upotrebe i reciklaže konstrukcije moguće je prikazati razvijanjem realnih scenarija za moguću buduću upotrebu (dijelova) konstrukcije. Određivanje modula D može dati mjeru „cirkularnosti“ projekta.

Okvir 1 – okvirni sustav standardnih IPE profila sa vutama najizgledniju ponovnu upotrebu ima u istoj funkciji, ali na drugoj lokaciji. Dakle elemente okvira moguće je ponovno upotrijebiti u (približno) istom sastavu sa istom funkcijom (glavni nosivi sustav industrijske hale), ali na drukčijoj lokaciji.

7.5.2. Okvir 2

Ukupna masa čelika potrebna za provedbu analize: $W = 11 \cdot 3042,43 = 33466,7 \text{ kg}$

7.5.2.1. Modul A

Moduli A1 – A3

Faktor potreban za proračun modula A1 – A3 [26]: $ECF_{A13} = 1,04 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$

Prema izrazu 7.6:

$$EC_{A13} = 33466,7 \cdot 1,04$$

$$EC_{A13} = 34805 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Modul A4 (transport)

Pretpostavlja se da se proizvedeni elementi transportiraju na gradilište koje se nalazi u Zagrebu, te da je udaljenost između gradilišta i proizvodnog pogona manja (ili jednaka) od 20 kilometara.

Faktor emisija uslijed transporta prema [27], za transport elemenata cestom, i za prosječno utovaren prijevozni kamion, iznosi: $TEF_{mode} = 0,10749 \text{ gCO}_2\text{e/kg/km}$

Prema izrazu 7.7:

$$ECF_{A4} = 20 \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2\text{e/kg/km}}{1000} = 0,0021498 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

$$EC_{A4} = 0,0021498 \cdot W_{uk}$$

$$EC_{A4} = 0,0021498 \cdot 33466,7 = 71,94 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Modul A5

Faktor potreban za proračun modula A5 [26]: $ECF_{A5} = 0,000658 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$

Prema izrazu 7.8:

$$EC_{A5} = 33466,7 \cdot 0,000658$$

$$EC_{A5} = 22 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul A:

Prema izrazu 7.9:

$$EC_A = 34805 + 71,94 + 22$$

$$EC_A = 34898 \text{ kgCO}_2\text{e} = 34,898 \text{ tCO}_2\text{e}$$

7.5.2.2. Modul B

U bazi podataka [26] koja je korištena u ovom radu podaci o emisijama ugljikovog dioksida za čelik tijekom faze korištenja (za modul B) nisu dani. Razlog tomu je da nosiva

konstrukcija najčešće daje vrlo male, a ponekad i zanemarive količine ugljikovog dioksida tijekom svog životnog vijeka. Dio B4 (zamjena elemenata, npr. zamjena fasade) je najčešće fokus faze korištenja građevine [27]. Kako se uspoređuje samo okvirna nosiva konstrukcija, pretpostavka je da će se za oba okvirna sustava u fazi korištenja emitirati približno slična količina ugljikovog dioksida, stoga se u okviru ovog rada neće proračunati emisije modula B analize.

7.5.2.3. Modul C

Modul C1

Faktor potreban za proračun modula C1 [26]: $ECF_{C1} = 0,000658 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$

Prema izrazu 7.10:

$$EC_{C1} = 33466,7 \cdot 0,000658$$

$$EC_{C1} = 22 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Modul C2

Transport demontiranih elemenata konstrukcije proračunat je na jednak način kao transport elemenata na gradilište (A4):

$$EC_{C2} = EC_{A4} = 71,94 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Moduli C3 i C4

Faktor potreban za proračun modula C3 i C4, očitani iz baze podataka [26]:

$$ECF_{C3+C4} = (0,0233 + 0,0) = 0,0233 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

Prema izrazu 7.11:

$$EC_{C3+C4} = 33466,7 \cdot 0,0233$$

$$EC_{C3+C4} = 779,8 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul C:

Prema izrazu 7.12:

$$EC_C = 22 + 71,94 + 779,8$$

$$EC_C = 873,7 \text{ kgCO}_2\text{e} = 0,8737 \text{ tCO}_2\text{e}$$

Tablica 7.2 – Rekapitulacija rezultata LCA za okvir 2

Količina emitiranog ugljikovog dioksida	Modul A			Modul B	Modul C
	A1 – A3	A4	A5		
tCO ₂ e	34,805	0,07194	0,022	/	0,8737
Ukupno	35,77 tCO₂e				

7.5.2.4. Modul D

Kako navodi [27] prednosti ponovne upotrebe i reciklaže konstrukcije moguće je prikazati razvijanjem realnih scenarija za moguću buduću upotrebu (dijelova) konstrukcije. Određivanje modula D može dati mjeru „cirkularnosti“ projekta.

Okvir 2 – okvirni sustav neprizmatičnih elemenata ima više realnih scenarija ponovne upotrebe. Moguće ga je, kao i okvir 1, koristiti u istoj funkciji, ali na drukčijoj lokaciji. Može se također ponovno koristiti na način da se svaki element okvira rastavi na 4 dijela te se na taj način dobiju 4 jednaka elementa koja je moguće koristiti u statičkom sustavu konzole nadstrešnice, kao što je naprimjer sustav nadstrešnice željezničkog kolodvora u Ženevi (slika 1.4 u uvodnom poglavlju rada).

Rezultati prikazani u ovom poglavlju uspoređeni su i diskutirani u 9. poglavlju rada.

8. NOVI POSTUPAK PRORAČUNA NEPRIZMATIČNIH ELEMENATA

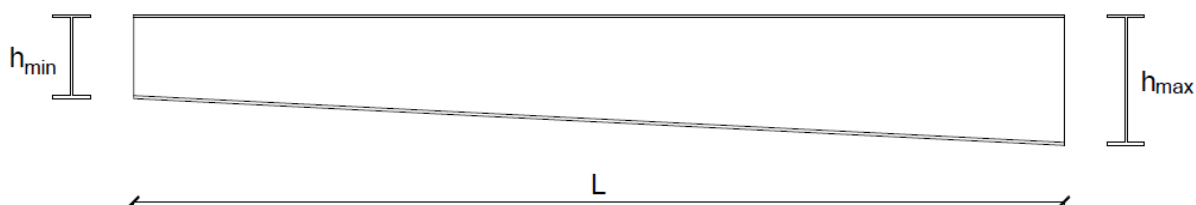
U prethodnim poglavljima su prikazane moguće metode proračuna neprizmatičnih elemenata odnosno njihovog dokaza pouzdanosti, a iste su u 6. poglavlju rada uspoređene sa ponašanjem neprizmatičnih elemenata dobivenog temeljem numeričkim simulacijama modela koji je validiran na temelju različitih autora relevantnih u promatranom području. Može se uočiti da trenutne norme značajno podcjenjuju ponašanje neprizmatičnih elemenata, a što je detaljnije komentirano u diskusiji rezultata. U 7. poglavlju rada prikazana je mogućnost upotrebe neprizmatičnih elemenata u okvirnim sustavima te prednosti njihovog korištenja.

Kako trenutni postupci značajno podcjenjuju otpornost, razvijen je novi postupak proračuna neprizmatičnih elemenata. Kako bi izrazi i sam postupak bio što precizniji, provedene su 42 numeričke simulacije za svaki promatrani element. Ukupno je promatrano 30 elemenata što daje ukupno 1260 numeričkih simulacija. Promatrani su elementi sastavljeni od različitih IPE čeličnih profila različitih duljina. Elementi imaju različite stope promjene visine, kako bi se ista mogla uzeti u obzir pri razvoju postupka proračuna. Detaljan postupak dobivanja M – N krivulje otpornosti jednog elementa prikazan je u prilogu B rada. U tablici 8.1. dane su karakteristike promatranih elemenata. Karakteristike preko kojih se ostvaruje promjena visine prikazane su na slici 8.1. Najmanja visina elementa je visina profila, dakle ako se promotri element 1 iz tablice 8.1., njegova najmanja visina je 180 milimetara (osnova je profil IPE 180), a mijenja se na način da je stopa promjene visine $a_{t.r.}$ (eng. *taper ratio*) jednak 0,025, tad njegova najveća visina iznosi:

$$a_{t.r.} = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{L} \quad (8.1)$$

$$0,025 = \frac{h_{\max} - 180}{3000}$$

$$h_{\max} = 255 \text{ mm}$$

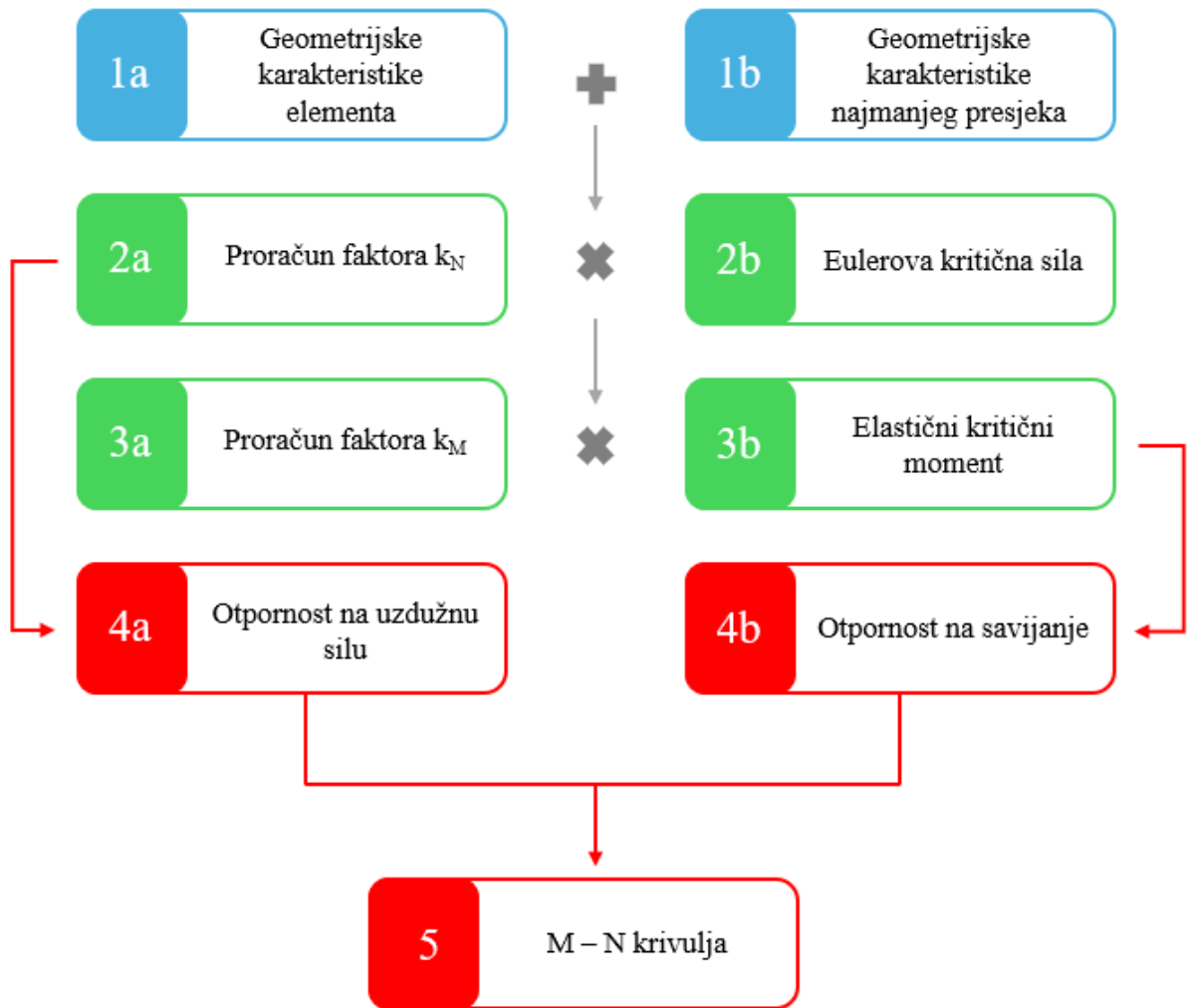


Slika 8.1 – Potrebne dimenzije za određivanje stope promjene visine

Tablica 8.1 – Popis i karakteristike promatranih elemenata

	Profil	Raspon	a _{t.r.}	Naziv elementa
1	IPE 180	3	0,025	IPE180_L3.0m_TR0025
2	IPE 180	3	0,05	IPE180_L3.0m_TR0050
3	IPE 180	3	0,075	IPE180_L3.0m_TR0075
4	IPE 180	4	0,025	IPE180_L4.0m_TR0025
5	IPE 180	4	0,05	IPE180_L4.0m_TR0050
6	IPE 180	4	0,075	IPE180_L4.0m_TR0075
7	IPE 220	4	0,025	IPE220_L4.0m_TR0025
8	IPE 220	4	0,05	IPE220_L4.0m_TR0050
9	IPE 220	4	0,075	IPE220_L4.0m_TR0075
10	IPE 220	5,5	0,025	IPE220_L5.5m_TR0025
11	IPE 220	5,5	0,05	IPE220_L5.5m_TR0050
12	IPE 220	5,5	0,075	IPE220_L5.5m_TR0075
13	IPE 270	5	0,025	IPE270_L5.0m_TR0025
14	IPE 270	5	0,05	IPE270_L5.0m_TR0050
15	IPE 270	5	0,075	IPE270_L5.0m_TR0075
16	IPE 270	6,5	0,025	IPE270_L6.5m_TR0025
17	IPE 270	6,5	0,05	IPE270_L6.5m_TR0050
18	IPE 270	6,5	0,075	IPE270_L6.5m_TR0075
19	IPE 330	6	0,025	IPE330_L6.0m_TR0025
20	IPE 330	6	0,05	IPE330_L6.0m_TR0050
21	IPE 330	6	0,075	IPE330_L6.0m_TR0075
22	IPE 330	8	0,025	IPE330_L8.0m_TR0025
23	IPE 330	8	0,05	IPE330_L8.0m_TR0050
24	IPE 330	8	0,075	IPE330_L8.0m_TR0075
25	IPE 400	7	0,025	IPE400_L7.0m_TR0025
26	IPE 400	7	0,05	IPE400_L7.0m_TR0050
27	IPE 400	7	0,075	IPE400_L7.0m_TR0075
28	IPE 400	9	0,025	IPE400_L9.0m_TR0025
29	IPE 400	9	0,05	IPE400_L9.0m_TR0050
30	IPE 400	9	0,075	IPE400_L9.0m_TR0075

Predloženi postupak prikazan je na slici 8.2 te je detaljnije opisan u nastavku.



Slika 8.2 – Slijed proračuna prema predloženom postupku

U prvom koraku potrebno je definirati karakteristike elementa – raspon, stopu promjene visine, dimenzije profila (debljine pojasnica, hrpta, širina elementa), materijal. Također je potrebno definirati karakteristike najmanjeg poprečnog presjeka. Na temelju karakteristika najmanjeg poprečnog presjeka proračunavaju se Eulerova kritična sila (izraz 8.2) i elastični kritični moment savijanja (izraz 8.3).

$$N_{cr,min} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{L^2} \quad (8.2)$$

$$M_{cr,min} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{z,min}}{L^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{I_{w,min}}{I_{z,min}} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_{t,min}}{\pi^2 \cdot E \cdot I_{z,min}}} + (C_2 \cdot z_{g,min})^2 - C_2 \cdot z_{g,min} \right] \quad (8.3)$$

Na temelju rezultata numeričkih simulacija razvijeni su faktori korekcije Eulerove kritične sile (8.4) i elastičnog kritičnog momenta savijanja (8.5). Izrazi su formirani na način da uzimaju u obzir sve karakteristike koje utječu na otpornost, kao i imperfekcije elemenata (pošto su izrazi rezultat analiza koje uzimaju u obzir imperfekcije).

$$k_N = 0,568 \cdot L^{0,091} \cdot \left(\frac{h_{\min}}{I_{Z,\min}} \right)^{0,032} \cdot (100 \cdot a_{t.r.})^{-0,0024} \quad (8.4)$$

$$k_M = 0,7^{-5a_{t.r.}} \cdot \left(\frac{L}{100} \right)^{0,223+0,88 \cdot a_{t.r.}} \cdot \left(\frac{h_{\min}}{I_{Z,\min}} \right)^{0,257} \cdot \left(\frac{I_{W,\min}}{1000 \cdot I_{T,\min}} \right)^{0,155} \quad (8.5)$$

Gdje je:

- $a_{t.r.}$ stopa promjene visine prema izrazu 8.1
- L raspon elementa u cm
- $h_{\min}$ visina najmanjeg presjeka u cm
- $I_{Z,\min}$ moment tromosti oko slabije osi (z) u cm^4
- $I_{W,\min}$ konstanta krivljenja najmanjeg presjeka u cm^6
- $I_{T,\min}$ torzijska konstanta najmanjeg presjeka u cm^4

Izrazi su dobiveni analizom rezultata i korištenjem metode najmanjih kvadrata. Tražen je izraz za koji će suma kvadrata razlike između vrijednosti dobivenih pomoću faktora i vrijednosti dobivenih numeričkom analizom biti minimalna.

Faktorima se korigira Eulerova kritična sila (8.2) i elastični kritični moment savijanja (8.3) te se dobiva otpornost na uzdužnu tlačnu silu i moment savijanja (8.6) i (8.7). Zbog minimalnih odstupanja prilikom formiranja izraza te kako bi se pokrile eventualne nepouzdanosti i pogreške prilikom modeliranja, otpornost se dodatno smanjuje sa faktorom 1,05.

$$N_{\max} = \frac{k_N \cdot N_{cr,\min}}{1,05} \quad (8.6)$$

$$M_{\max} = \frac{k_M \cdot M_{cr,\min}}{1,05} \quad (8.7)$$

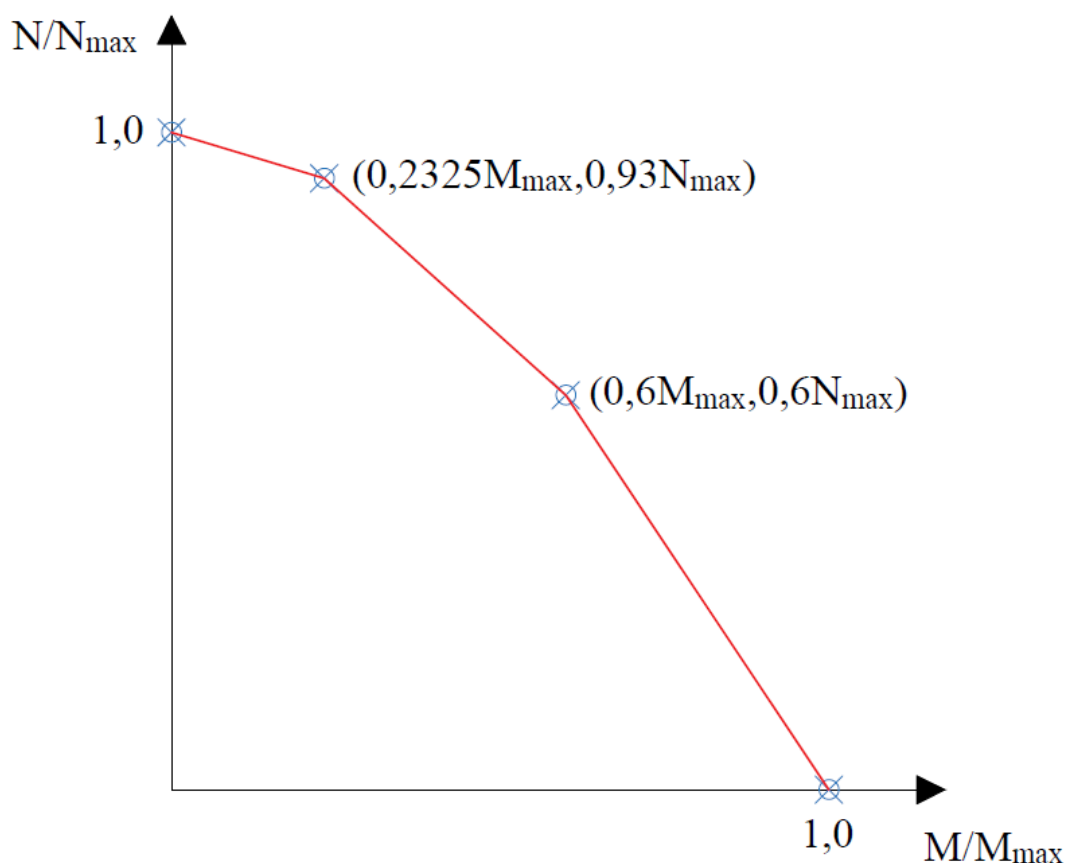
Zatim je potrebno izračunati dodatne dvije točke kako bi se formirala $M - N$ krivulja otpornosti elementa.

Točka 1: $(0,6 \cdot M_{\max}; 0,6 \cdot N_{\max})$

Točka 2: $(0,25 \cdot 0,93 \cdot M_{\max}; 0,93 \cdot N_{\max})$

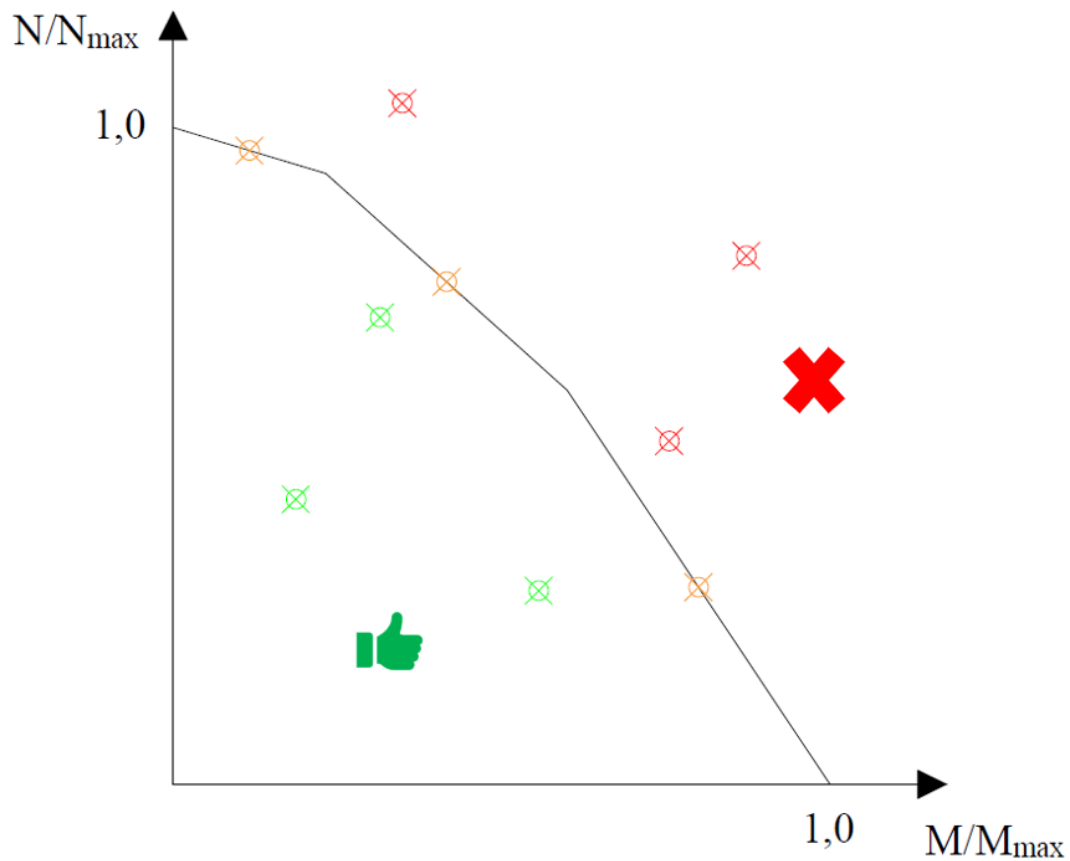
Vrijednosti kojima se množe otpornosti dobivene su na temelju rezultata ispitivanja 30 modela (minimalni faktor opterećenja za opterećenje $N_{\max}$ i $0,25 \cdot M_{\max}$ je 0,93, a za opterećenje $N_{\max}$ i $M_{\max}$ je 0,6)

Formiranje krivulje prikazano je na slici 8.3.



Slika 8.3 – Formiranje $M - N$ krivulje

Ukoliko je element opterećen takvom kombinacijom uzdužne sile i momenta savijanja da se ta točka nalazi „ispod“ dijagrama (ili na dijagramu, što je rubni slučaj), element zadovoljava, a ukoliko se nalazi „iznad“ dijagrama, element ne zadovoljava na zadano opterećenje, a kako je prikazano na slici 8.4.



Slika 8.4 – Područja $M - N$ krivulje

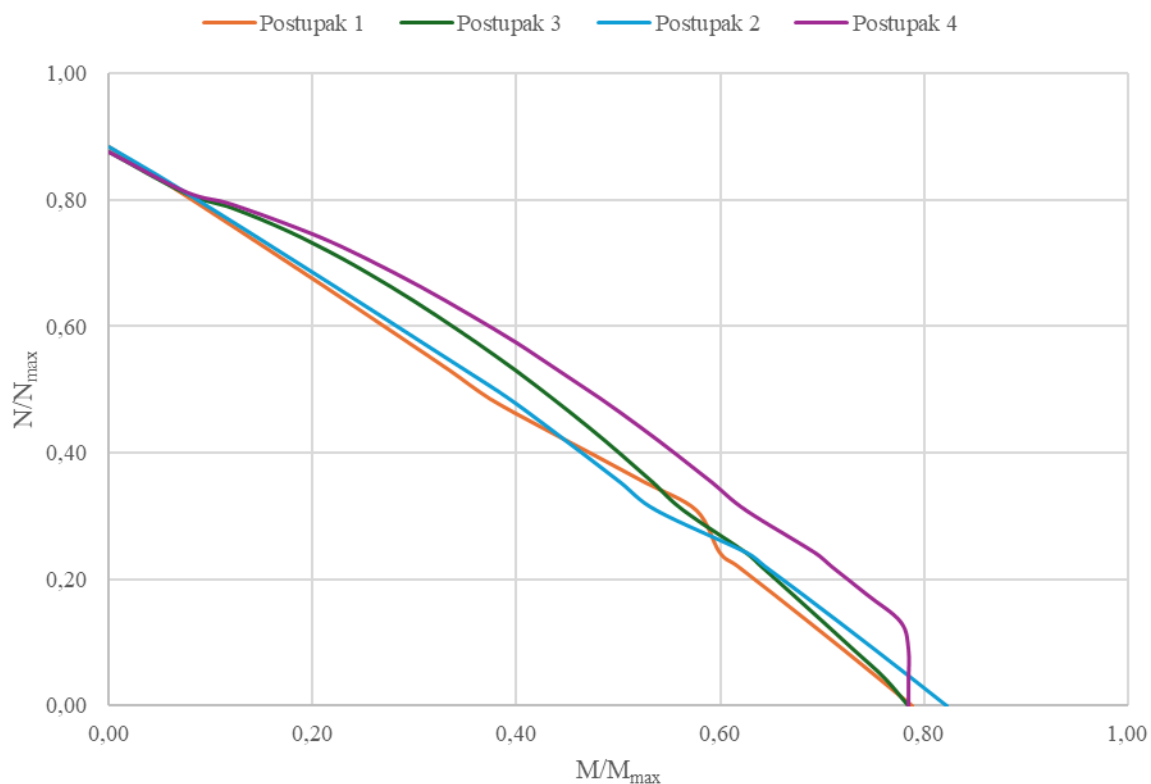
$M - N$ dijagram dobiven na ovakav način je na strani pouzdanosti u odnosu na numeričke rezultate (daje manje vrijednosti čvrstoća od onih numerički dobivenih). To je i potvrđeno na način da je za svaki promatrani element formiran $M - N$ dijagram na temelju predloženog izraza i uspoređen sa numerički dobivenom krivuljom, a svi rezultati usporedbe dani su u prilogu C ovog rada.

Kako bi se predloženi postupak proračuna dodatno validirao, promotren je element za koji je uzet „neuobičajen“ raspon i stopa promjene visine. Za element su formirane M – N krivulje otpornosti dobivene na temelju trenutno dostupnih postupaka proračuna prema drugoj generaciji norme (opisano u poglavlju 6. i detaljno pokazano na primjeru u prilogu A, a prikazano na slici 8.5). Također su provedene numeričke analize i formirana M – N krivulja na temelju numeričkih rezultata (postupak opisan u prilogu B, a prikazano na slici 8.6).

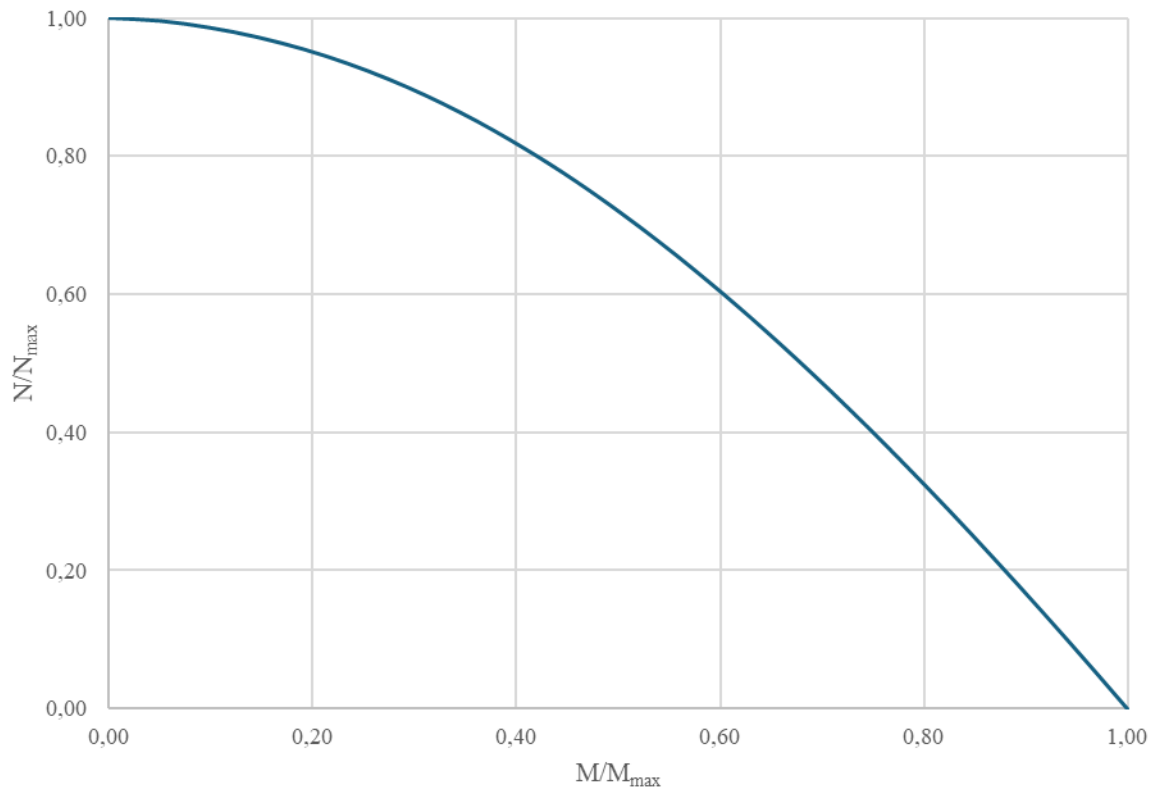
Karakteristike promatranog elementa dane su u tablici 8.2.

Tablica 8.2 – Karakteristike promatranog elementa

Geometrijske karakteristike elementa promjenjive visine		
Raspon [cm]	752,9	
	Manji rub	Veći rub
h [mm]	400	700
b [mm]	180,0	180,0
t _w [mm]	8,6	8,6
t _f [mm]	13,5	13,5
I _y [cm ⁴]	1272,45	2824,46
I _z [cm ⁴]	1314,18	1315,77
W _y [cm ³]	1093,82	2260,39
W _z [cm ³]	146,02	146,20
W _{pl,y} [cm ³]	1238,32	2641,99
W _{pl,z} [cm ³]	225,60	231,14
I _t [cm ⁴]	36,7122	43,0728
I _w [cm ⁶]	490787	1550244,3
Karakteristike materijala elementa promjenjive visine		
E [N/mm ²]	Čelik	Poissonov koeficijent ν
210000	S355	0,3



Slika 8.5 – Rezultati proračuna prema drugoj generaciji norme EN 1993-1-1 [12]



Slika 8.6 – Rezultati numeričke analize

Koristeći predloženi postupak (izrazi 8.1 – 8.7) dobivena je M – N krivulja (slika 8.7):

$$a_{t.r.} = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{L} = \frac{700 - 400}{7529} = 0,039846$$

$$N_{cr,min} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{L^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1314,18}{752,9^2} = 480,5 \text{ kN}$$

$$M_{cr,min} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{Z,min}}{L^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{I_{W,min}}{I_{Z,min}} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_{T,min}}{\pi^2 \cdot E \cdot I_{Z,min}}} + (C_2 \cdot z_{g,min})^2 - C_2 \cdot z_{g,min} \right]$$

$$M_{cr,min} = 12817,2 \text{ kNcm} = 128,2 \text{ kNm}$$

$$k_N = 0,568 \cdot L^{0,091} \cdot \left(\frac{h_{\min}}{I_{Z,min}} \right)^{0,032} \cdot (100 \cdot a_{t.r.})^{-0,0024}$$

$$k_N = 0,568 \cdot 752,9^{0,091} \cdot \left(\frac{40}{1314,18} \right)^{0,032} \cdot (100 \cdot 0,039846)^{-0,0024}$$

$$k_N = 0,925$$

$$k_M = 0,7^{-5a_{t.r.}} \cdot \left(\frac{L}{100} \right)^{0,223+0,88 \cdot a_{t.r.}} \cdot \left(\frac{h_{\min}}{I_{Z,min}} \right)^{0,257} \cdot \left(\frac{I_{W,min}}{1000 \cdot I_{T,min}} \right)^{0,155}$$

$$k_M = 0,7^{-5 \cdot 0,039846} \cdot \left(\frac{752,9}{100} \right)^{0,223+0,88 \cdot 0,039846} \cdot \left(\frac{40}{1314,18} \right)^{0,257} \cdot \left(\frac{490787}{1000 \cdot 36,7122} \right)^{0,155}$$

$$k_M = 1,101$$

$$N_{\max} = \frac{k_N \cdot N_{cr,min}}{1,05} = \frac{0,925 \cdot 480,5}{1,05}$$

$$N_{\max} = 423,3 \text{ kN}$$

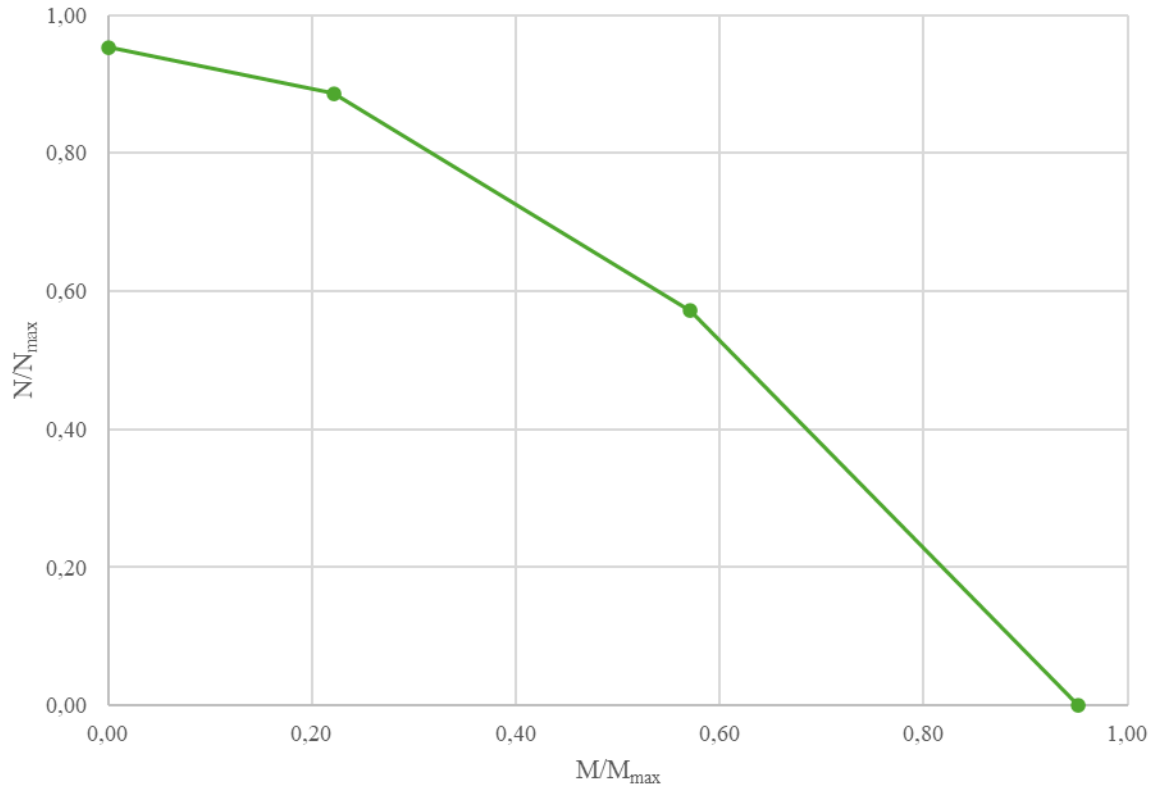
$$M_{\max} = \frac{k_M \cdot M_{cr,min}}{1,05} = \frac{1,101 \cdot 128,2}{1,05}$$

$$M_{\max} = 134,43 \text{ kNm}$$

Točka 1: $(0,6 \cdot M_{\max} = 80,66 \text{ kNm}; 0,6 \cdot N_{\max} = 254 \text{ kN})$

Točka 2: $(0,25 \cdot 0,93 \cdot M_{\max} = 31,25 \text{ kNm}; 0,93 \cdot N_{\max} = 393,7 \text{ kN})$

Napomena: dobivene točke normalizirane su sa rezultatima numeričke analize, pošto je ona dala najveće vrijednosti otpornosti.



Slika 8.7 – Rezultati prema novo predloženom postupku

Za usporedbu preciznosti faktora k_N i k_M razmatraju se dobivene vrijednosti $N_{\max}$ i $M_{\max}$ bez parcijalnih faktora 1,05:

$$N_{\max} = k_N \cdot N_{cr,min} = 0,925 \cdot 480,5$$

$$N_{\max} = 444,46 \text{ kN}$$

$$N_{num} = 444,21 \text{ kN}$$

$$M_{\max} = k_M \cdot M_{cr,min} = 1,101 \cdot 128,2$$

$$M_{\max} = 141,15 \text{ kNm}$$

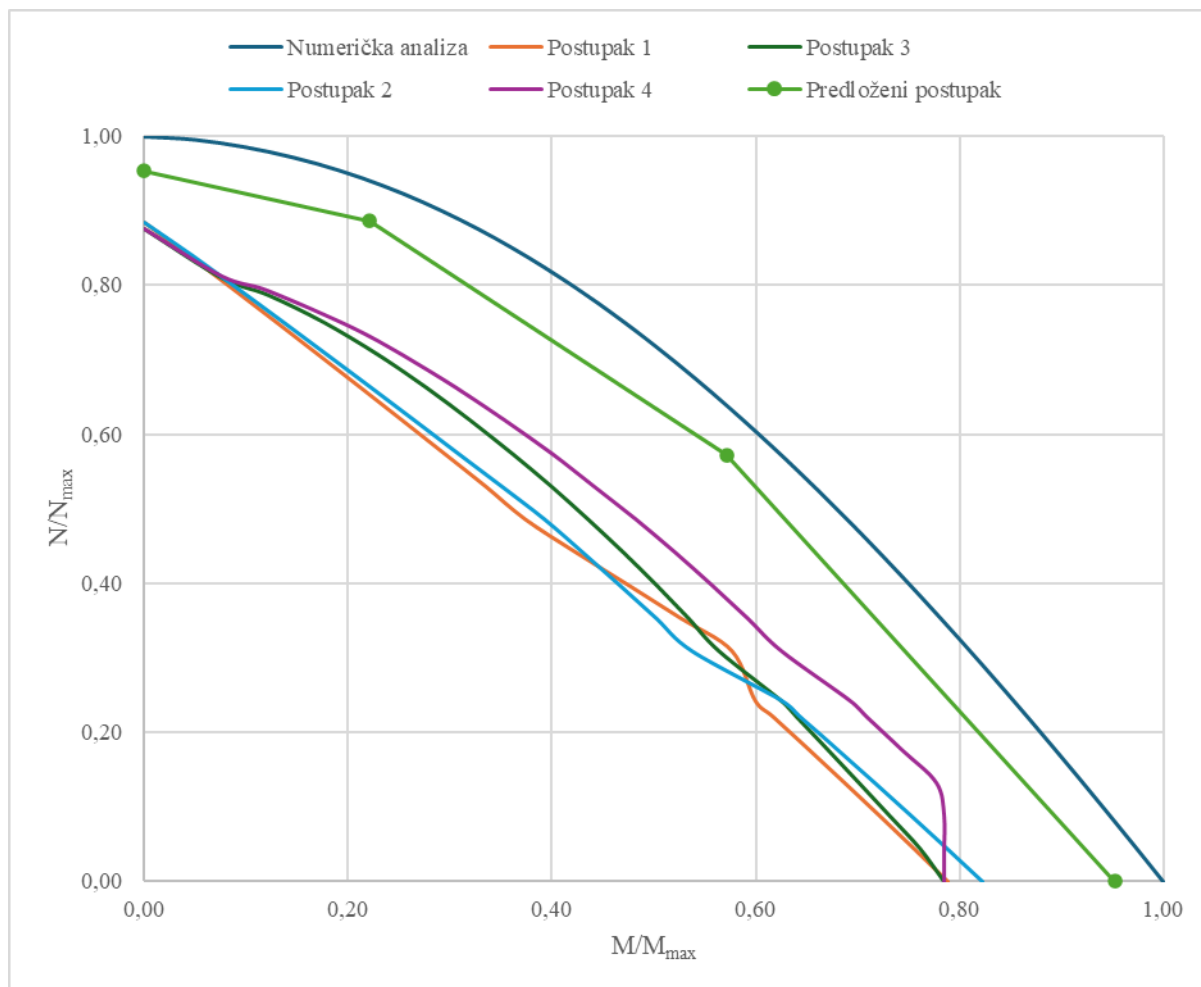
$$M_{num} = 141,18 \text{ kNm}$$

Razlika:

$$\frac{N_{\max}}{N_{num}} = \frac{444,46}{444,21} = 1,0005 \approx 1$$

$$\frac{M_{\max}}{M_{num}} = \frac{141,15}{141,18} = 0,9998 \approx 1$$

Na slici 8.8 prikazani su svi razmatrani postupci proračuna promatranog neprizmatičnog elementa.



Slika 8.8 – Rekapitulacija rezultata svih postupaka

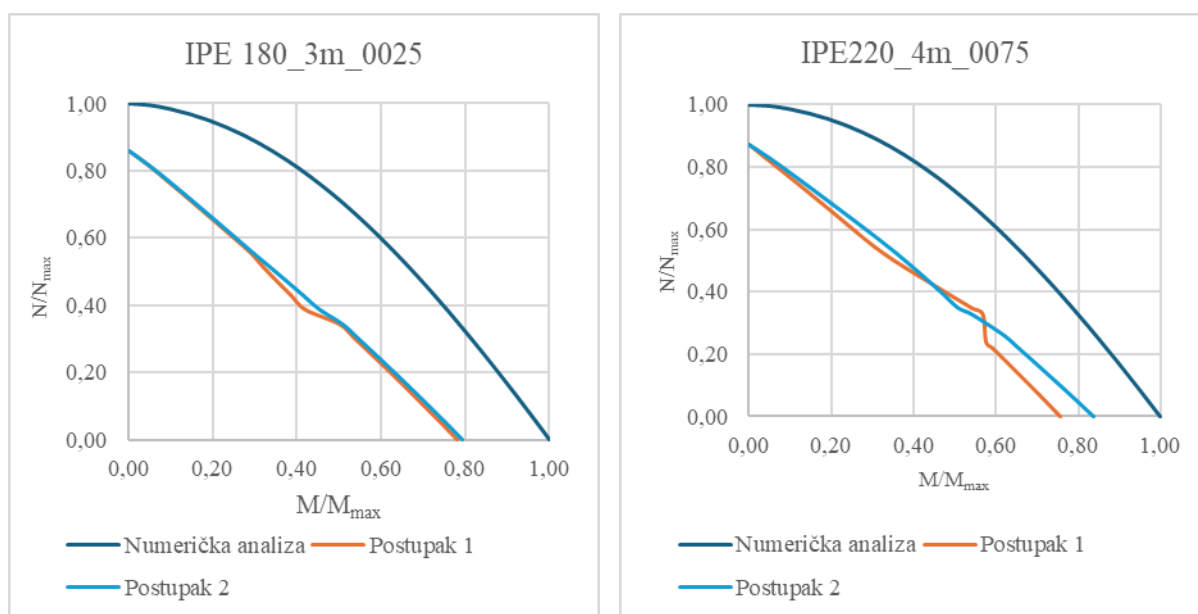
9. USPOREDBA REZULTATA I DISKUSIJA

U radu je detaljno analizirano ponašanje i postupci dokaza pouzdanosti neprizmatičnih čeličnih konstrukcijskih elemenata. Za područje istraživanja odabrani su elementi dobiveni na temelju dimenzija IPE profila, jednostavno oslonjeni i opterećeni vertikalnim kontinuiranim opterećenjem i uzdužnom tlačnom silom. 5 različitih elemenata proračunato je prema trenutno dostupnim postupcima (točke 8.3.3. i 8.3.4. druge generacije norme EN 1993-1-1[12]). Rezultati proračuna dani su u 6. poglavlju rada, a primjer proračuna u prilogu A. Za svaki element određena je $M - N$ krivulja interakcije na temelju 20 točaka, što ukupno daje 100 proračuna prema svakom postupku i 400 proračuna ukupno. Za istih 5 elemenata numeričkim analizama formirane su $M - N$ krivulje, a dodatno je promatrano još 25 elemenata, što daje ukupan broj od 30 promatranih elemenata za numeričke analize na kojima je provedeno 1260 numeričkih simulacija. Rezultati numeričkih analiza bili su podloga za predlaganje novog postupka, odnosno nove metode proračuna neprizmatičnih elemenata koristeći predložene faktore korekcije kojima se množe elastična kritična sila i elastični kritični moment izvijanja dobiveni na temelju karakteristika presjeka najmanje visine. Nadalje, prikazana je mogućnost upotrebe neprizmatičnih elemenata u realnim konstrukcijskim sustavima te su evaluirane njihove prednosti sa ekonomskog i ekološkog aspekta. U nastavku poglavlja komentirani su svi postupci proračuna prema drugoj generaciji norme te su dane njihove evaluacije i usporedbe u odnosu na rezultate numeričkih analiza. Također je komentiran novo predloženi postupak proračuna razvijen u okviru ovog rada i uspoređen s trenutno dostupnim postupcima i numeričkim analizama.

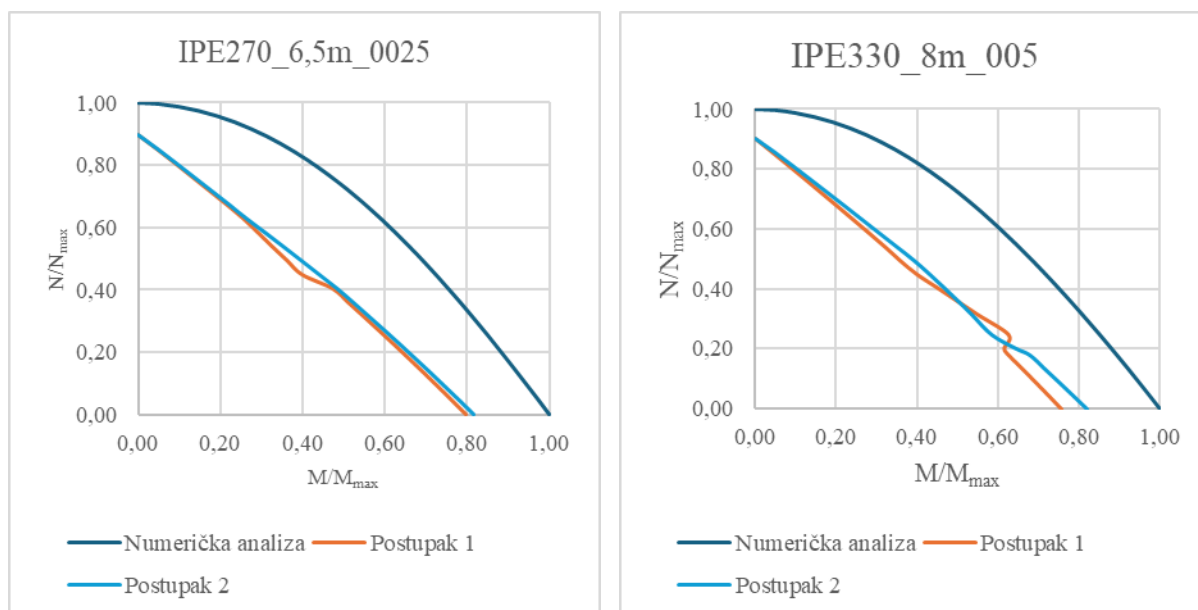
9.1. Evaluacija i usporedba postupaka proračuna neprizmatičnih elemenata prema drugoj generaciji norme EN 1993-1-1

9.1.1. Usporedba proračuna prema točki 8.3.3. – postupci 1 i 2

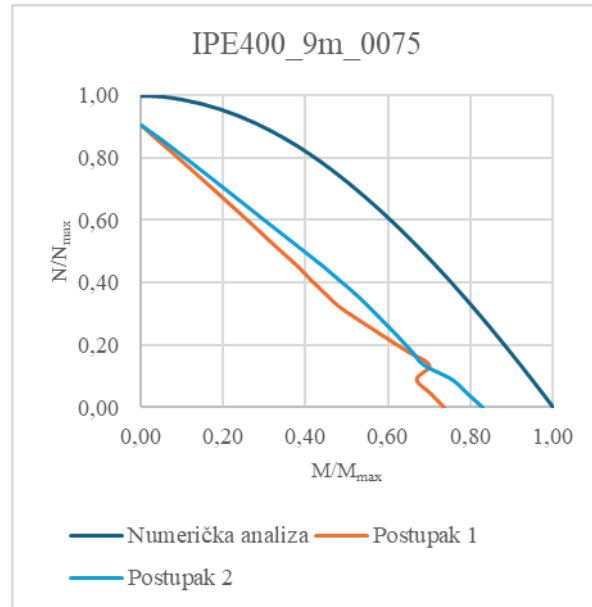
Na slikama 9.1 – 9.3 prikazane su $M - N$ krivulje otpornosti za promatrane neprizmatične elemente definirane u tablici 6.1 proračunate prema točki 8.3.3 druge generacije norme EN 1993-1-1 [12] te krivulja otpornosti dobivena numeričkom analizom.



Slika 9.1 – $M - N$ krivulje otpornosti prema točki 8.3.3. EN norme za elemente 1 i 2 iz poglavlja 6

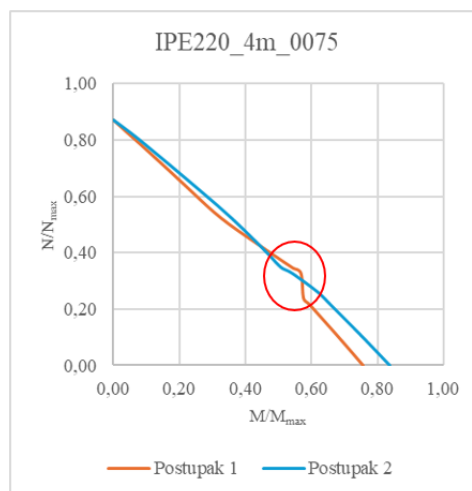


Slika 9.2 – $M - N$ krivulje otpornosti prema točki 8.3.3. EN norme za elemente 3 i 4 iz poglavlja 6



Slika 9.3 – $M - N$ krivulja otpornosti prema točki 8.3.3. EN norme za element 5 iz poglavlja 6

Uočava se da proračun prema postupku 2 općenito daje veće vrijednosti otpornosti u odnosu na postupak 1. Dakle, proračun sa karakteristikama ekvivalentnog elementa prikazuje realnije ponašanje u odnosu na proračun sa karakteristikama kritičnog presjeka. Oba postupka prikazuju približno linearan odnos uzdužne sile i momenta savijanja. Na temelju promotrenih rezultata pri određenoj kombinaciji sile i momenta (za primjer prikazano na slici 9.4), dolazi do naglog „skoka“ u otpornosti i odstupanja od linearnosti krivulje. Do tog dolazi zbog nagle promjene mjesta kritičnog presjeka ovisno o opterećenju. Npr. za jednu kombinaciju sile i momenta kritični presjek se nalazi na mjestu x . Malim povećanjem jednog od opterećenja i smanjenjem drugog, zbog klasifikacije presjeka, dolazi do nagle promjene mjesta kritičnog presjeka, a samim time i promjena otpornosti kod oba postupka.

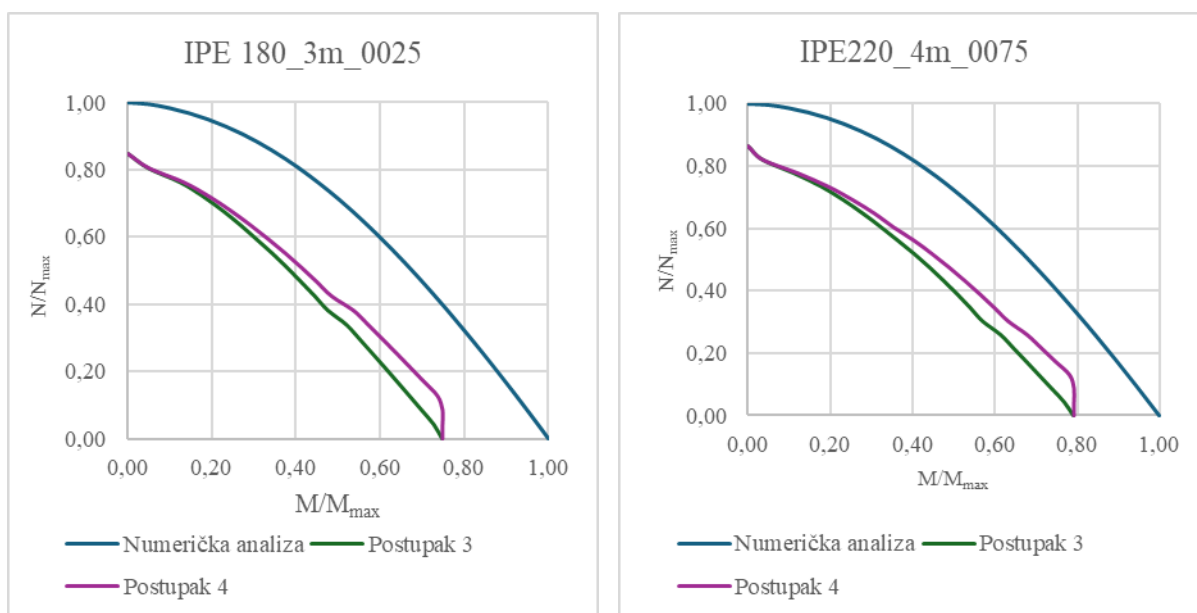


Slika 9.4 – Skok u otpornosti zbog nagle promjene kritičnog presjeka

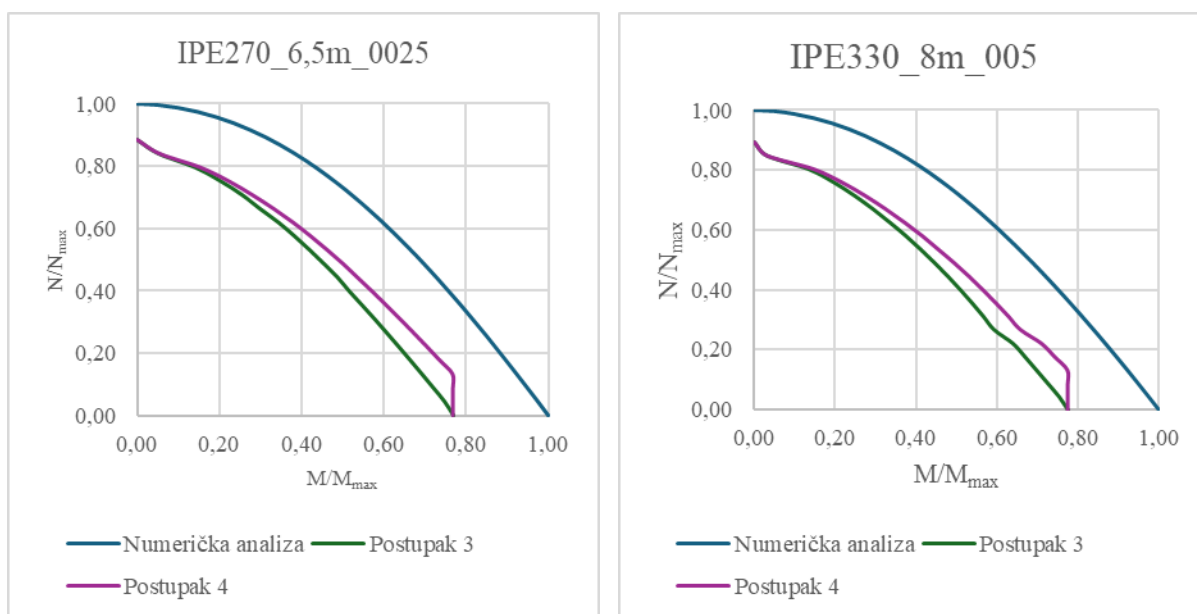
Nadalje, što je stopa promjene visine veća, skok u otpornosti odnosno odstupanje od linearnosti je izraženije. Može se uočiti da skoka kod stopa promjene visine 0,025 gotovo nema, dok je kod stope 0,075 jako izražen.

9.1.2. Usporedba proračuna prema točki 8.3.4. – postupci 3 i 4 – Opća metoda

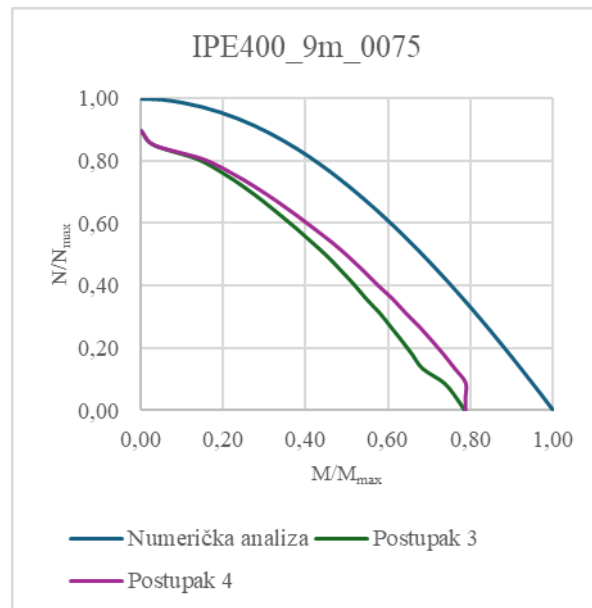
Na slikama 9.5 – 9.7 prikazane su $M - N$ krivulje otpornosti za promatrane neprizmatične elemente definirane u tablici 6.1 dobivene prema općoj metodi te krivulje dobivene numeričkom analizom.



Slika 9.5 – $M - N$ krivulje otpornosti prema točki 8.3.4. EN norme za elemente 1 i 2 iz poglavlja 6



Slika 9.6 – $M - N$ krivulje otpornosti prema točki 8.3.4. EN norme za elemente 3 i 4 iz poglavlja 6

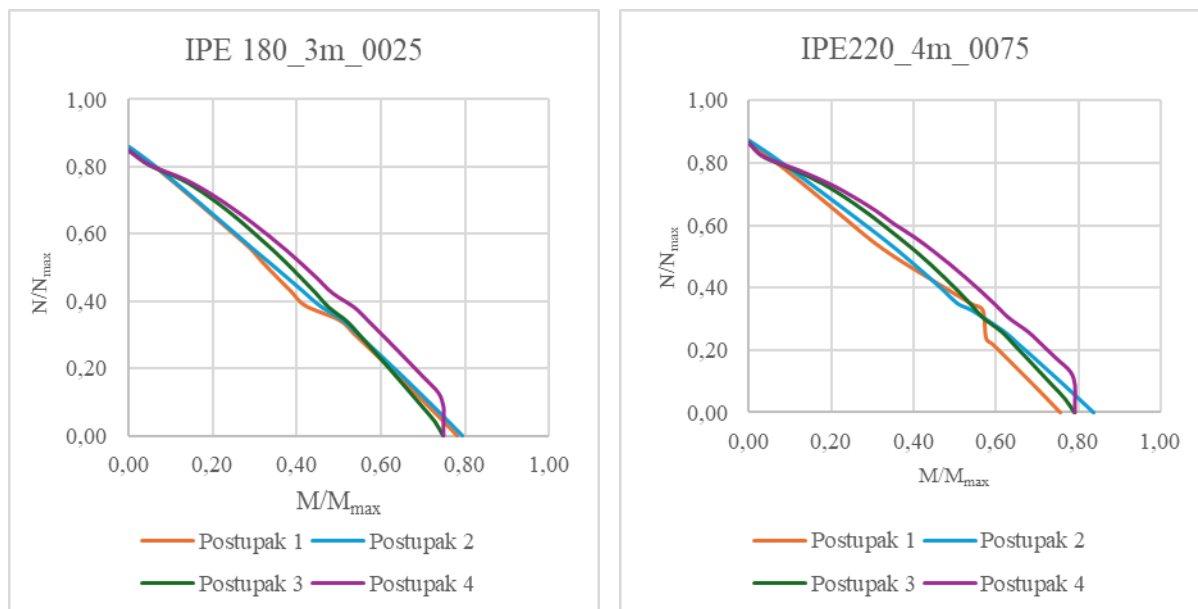


Slika 9.7 – $M - N$ krivulja otpornosti prema točki 8.3.4. EN norme za element 5 iz poglavlja 6

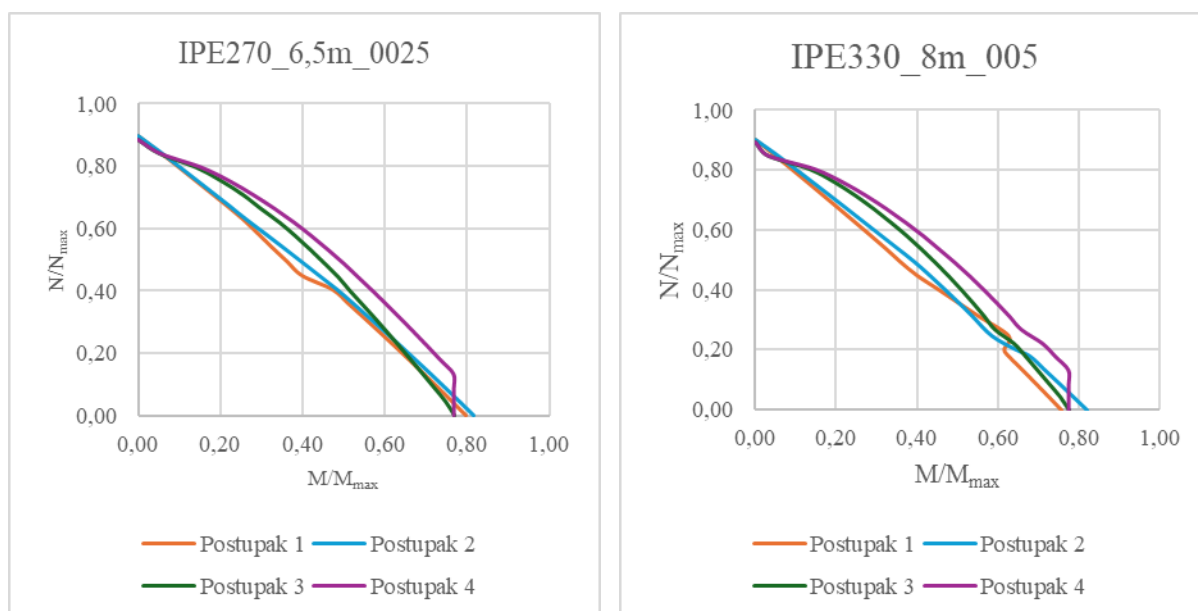
Proračun prema postupku 4 daje veće vrijednosti otpornosti u odnosu na postupak 3. Dakle, modifikacijom izrada za koeficijent opterećenja za izvijanje izvan ravnine (modificirani Trahairov izraz 4.13) postiže se bolje ponašanje neprizmatičnih elemenata. Opća metoda pokazuje nelinearan odnos uzdužne sile i momenta savijanja što je bliže stvarnom ponašanju elemenata dobivenom numeričkom analizom.

9.1.3. Evaluacija metoda proračuna prema drugoj generaciji norme EN 1993-1-1

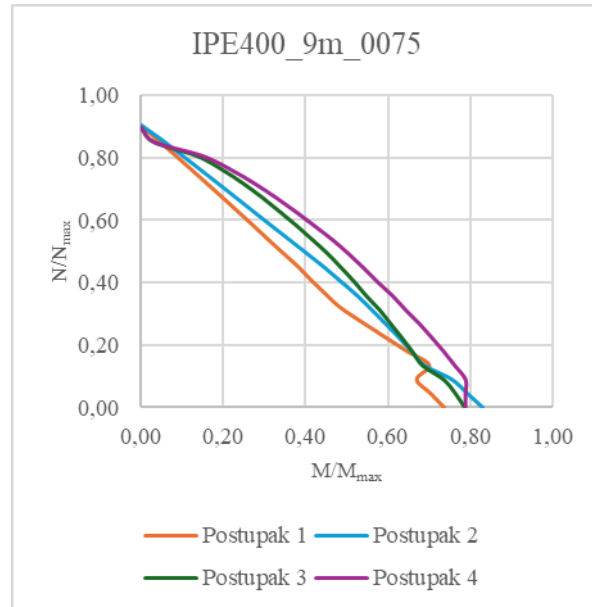
Na slikama 9.8 – 9.10 prikazane su $M - N$ krivulje otpornosti za promatrane neprizmatične elemente definirane u tablici 6.1 dobivene prema sva 4 postupka proračuna.



Slika 9.8 – Usporedba $M - N$ krivulje otpornosti prema. EN normi za elemente 1 i 2 iz poglavlja 6

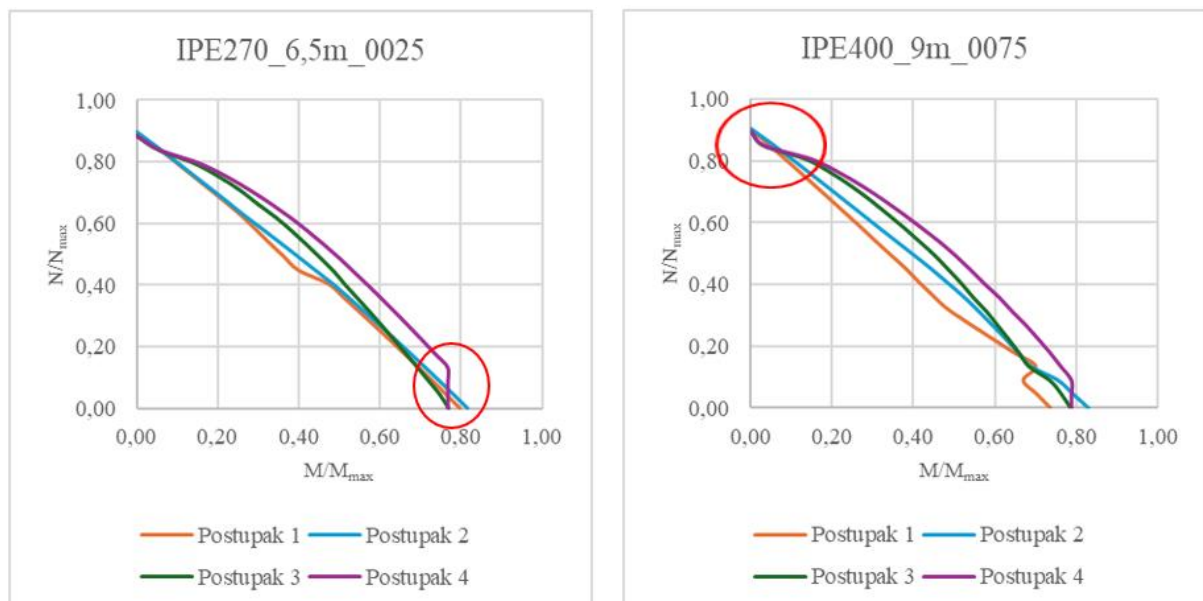


Slika 9.9 – Usporedba $M - N$ krivulje otpornosti prema. EN normi za elemente 3 i 4 iz poglavlja 6



Slika 9.10 – Usporedba $M - N$ krivulje otpornosti prema EN normi za element 5 iz poglavlja 6

Zaključak je da proračun prema postupku 4 – koristeći opću metodu sa modificiranim izrazom 4.13 daje najveće vrijednosti otpornosti neprizmatičnih elemenata. Dodatna prednost opće metode je mogućnost ostvarenja nelinearnog odnosa uzdužne sile i momenta savijanja, što se poklapa sa rezultatima numeričkog proračuna. Nedostatak opće metode uočava se pri izraženoj vrijednosti ili uzdužne sile ili momenta savijanja (pri vrijednostima blizu N_{max} i M_{max}) gdje dolazi do naglog pada u vrijednostima otpornosti (slika 9.11) i otpornost je manja nego ona proračunata prema postupcima 1 i 2.



Slika 9.11 – Nagli pad otpornosti pri vrijednostima opterećenja blizu N_{max} i M_{max}

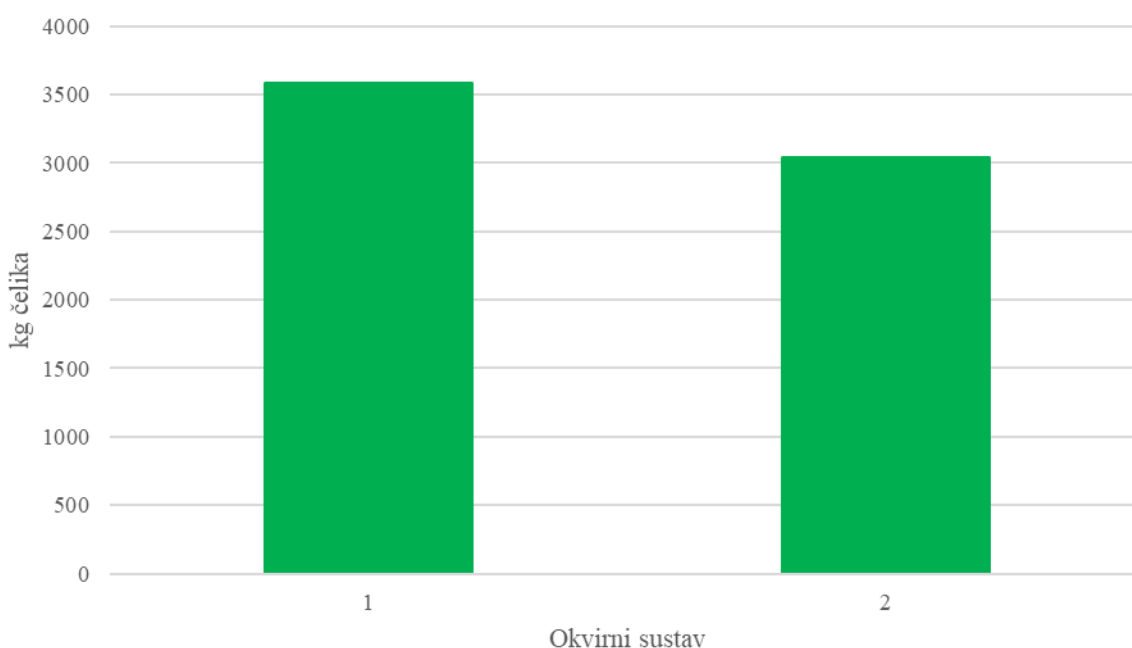
Opća metoda pokazuje ponašanje neprizmatičnih elementa najbliže rezultatima numeričke analize.

9.2. Evaluacija upotrebe neprizmatičnih elemenata u konstrukcijskim sustavima

U 7. poglavlju rada uspoređena su dva okvirna sustava jednakih dimenzija, jednakih mjesta bočnih pridržanja i jednake visine. Okvir sa vutama preuzet je iz literature te je poštujući istu geometriju kreiran okvir od neprizmatičnih elemenata. Svrha je evaluacija konstruktivnih, ekoloških i ekonomskih prednosti neprizmatičnih elemenata u svakodnevnoj upotrebi.

9.2.1. Usporedba utroška materijala

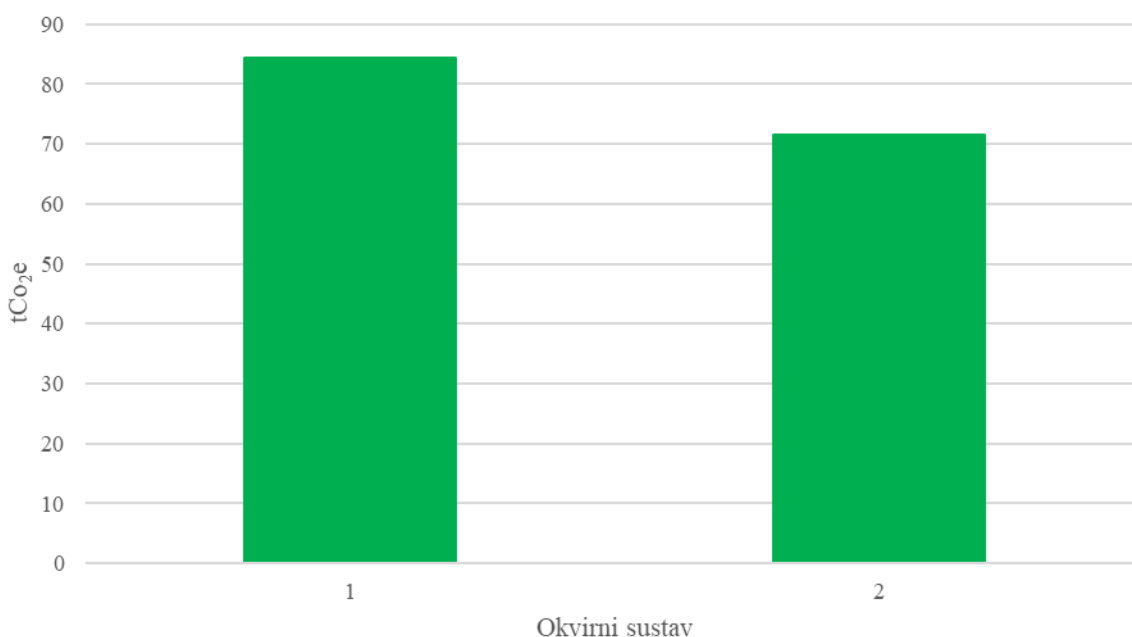
Utrošak materijala za okvir s vutama iznosi 3584,74 kg. Okvir s neprizmatičnim elementima ima utrošak materijala 3042,43 kg (slika 9.12). **Razlika u utrošku materijala iznosi 15,1 %.** Dakle, s aspekta količine materijala neprizmatični elementi pokazuju **značajnu prednost.**



Slika 9.12 – Usporedba utroška materijala okvirnih sustava

9.2.2. Usporedba scenarija životnog ciklusa

Za potrebe rada kreiran je scenarij izgradnje industrijske hale kojoj su glavni nosivi sustav portalni okviri. Odabrana je uobičajena ukupna duljina hale od 80 metara i razmak glavnih nosivih sustava 8 metara. Za takvu halu provedene su LCA analize koristeći okvir s vutama, kao i okvir sa neprizmatičnim elementima. Rezultati LCA prikazani su na slici 9.13.



Slika 9.13 – Usporedba emisija ugljikovog dioksida okvirnih sustava

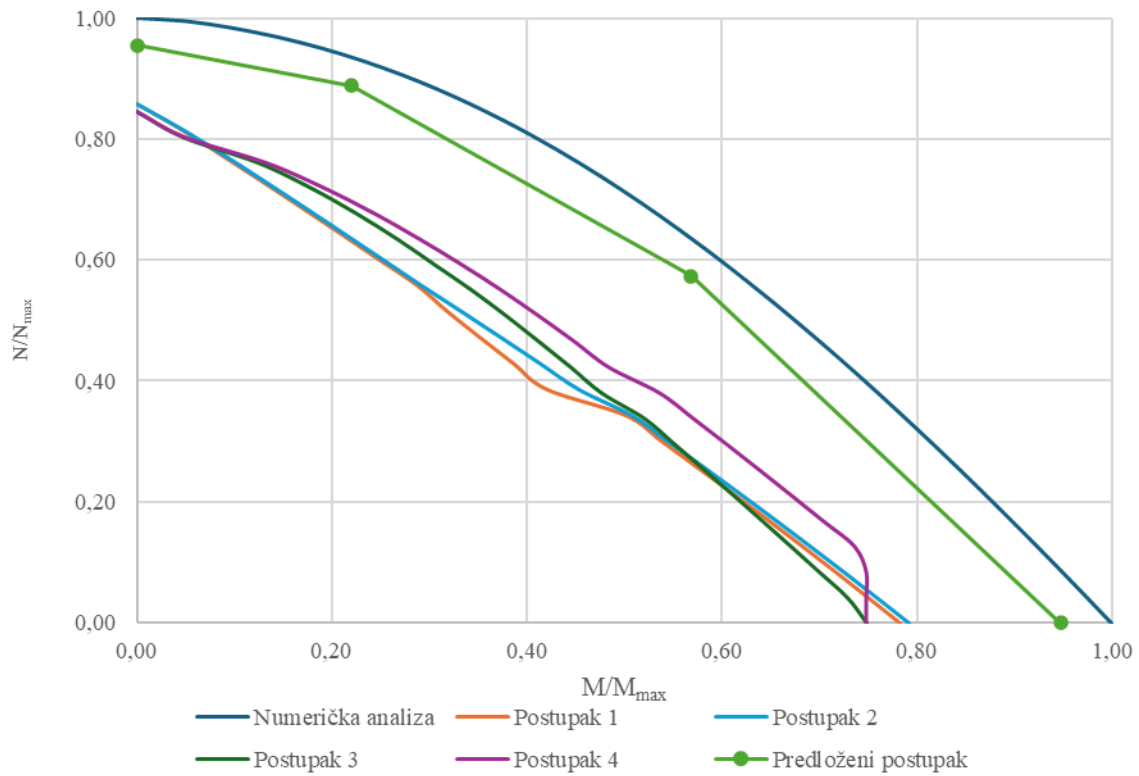
Uočava se da se na primjeru razmatrane industrijske hale, samo upotrebom neprizmatičnih elemenata za formiranje glavnog nosivog okvirnog sustava, emisije ugljikovog dioksida mogu smanjiti za čak 6,38 tona, što je značajna brojka, a pogotovo kada se u obzir uzme da su korišteni isti konstrukcijski sustavi (portalni okviri). Nadalje, u 7. poglavlju analiziran je i potencijal ponovne upotrebe promatranih okvirnih sustava. Neprizmatični elementi pokazuju veći potencijal ponovne upotrebe, iz razloga što su elementi standardnog okvira formirani upravo za tu funkciju, te je realnija njihova ponovna upotreba u na drugom mjestu, u istoj funkciji. S druge strane, okvirni sustav formiran od neprizmatičnih elemenata može se ponovno upotrijebiti na novom mjestu u istoj funkciji, ali dijelovi okvira se također mogu upotrijebiti kao konzolni nosači, koji se i često koriste za izvedbu konstrukcija nadstrešnica.

Rezultati jasno pokazuju prednosti upotrebe neprizmatičnih elemenata. Na primjeru okvirnog sustava, pokazana je mogućnost značajne uštede materijala, što jednako dovodi i do smanjenja emisija ugljikovog dioksida, a što je veliki izazov s kojim se svijet danas suočava. Nadalje, pokazano je da okvir formiran od neprizmatičnih elemenata može preuzeti i veće opterećenje od standardnog okvira s vutama. Ovi rezultati, kada se uzme u obzir i diskusija u poglavlju 9.1, ostavljaju dojam da iako neprizmatični elementi pokazuju jasne prednosti u brojnim bitnim aspektima projektiranja, manjak postupaka koji preciznije određuje njihovu otpornost rezultira njihovom smanjenom primjenom.

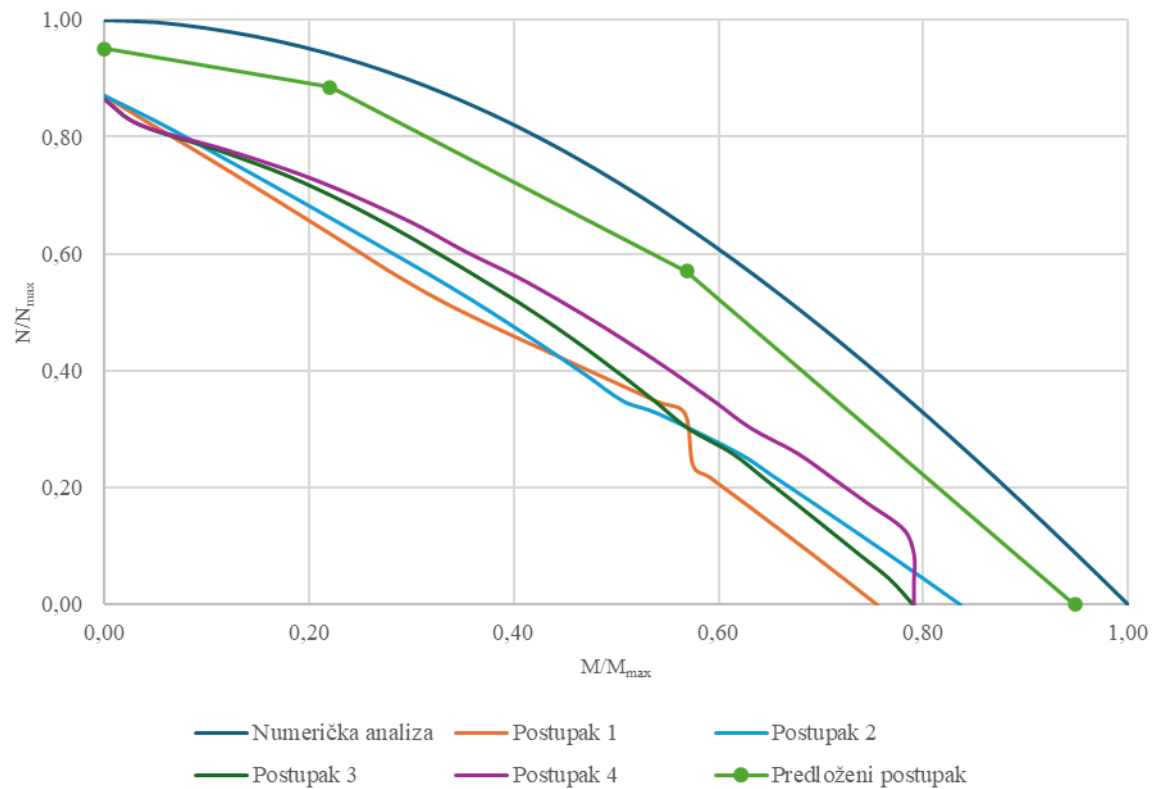
9.3. Evaluacija predloženog postupka proračuna neprizmatičnih elemenata

U 8. poglavlju razvijen je novi postupak proračuna neprizmatičnih elemenata koji su formirani od IPE profila, jednostavno oslonjeni i opterećeni vertikalnim kontinuiranim opterećenjem i uzdužnom tlačnom silom. Za razvoj postupka promatrano je 30 različitih elemenata, a provedeno je 1260 numeričkih analiza. Vrijeme potrebno za provedbu svih analiza je 25 dana, prosječno 16 sati dnevno. Veličina rezultata svih analiza je 2686,6 gigabajta. Detaljan opis i rezultati svake analize prikazani su u prilogu B rada. Opsežne analize provedene su s ciljem da novi postupak bude pouzdan, ali i jednostavan. Postupak je brz, a sastoji se od proračuna elastičnih kritičnih opterećenja sa karakteristikama najmanjeg poprečnog presjeka prizmatičnog elementa, te množenja tog opterećenja sa faktorima koji uzimaju u obzir ključne karakteristike neprizmatičnog elementa kao što su stopa promjene visine, raspon, početna visina, moment tromosti, torzijska konstanta i konstanta krivljenja. Usporedbe rezultata korištenjem novog postupka i numeričkih analiza prikazane su u prilogu C rada, gdje je pokazano da za svaki promatrani element postupak daje rezultate bliske numeričkoj analizi, a koji su na strani veće pouzdanosti (ispod su krivulje dobivene numeričkom analizom).

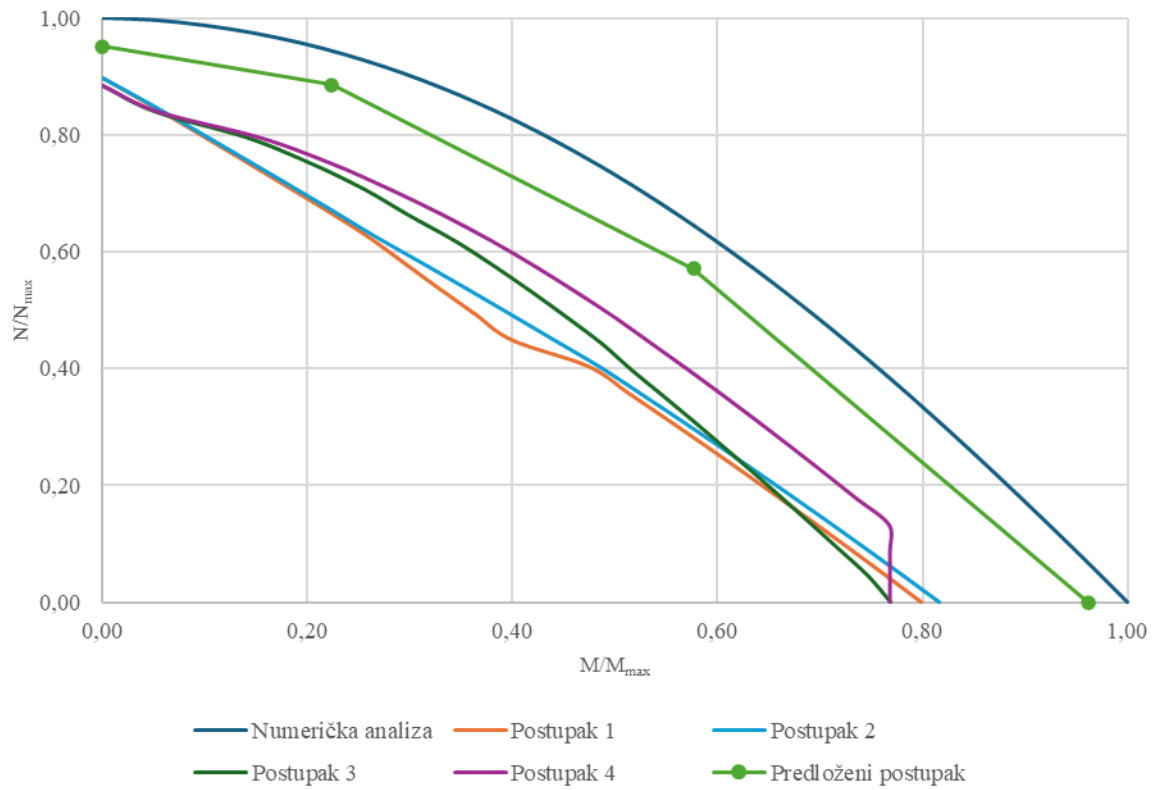
U nastavku su na slikama 9.14 – 9.18 prikazane usporedbe rezultata proračuna elemenata iz poglavlja 6 prema drugoj generaciji norme sa proračunom istih elemenata prema predloženom postupku, a također su prikazani i rezultati numeričke analize za svaki element.



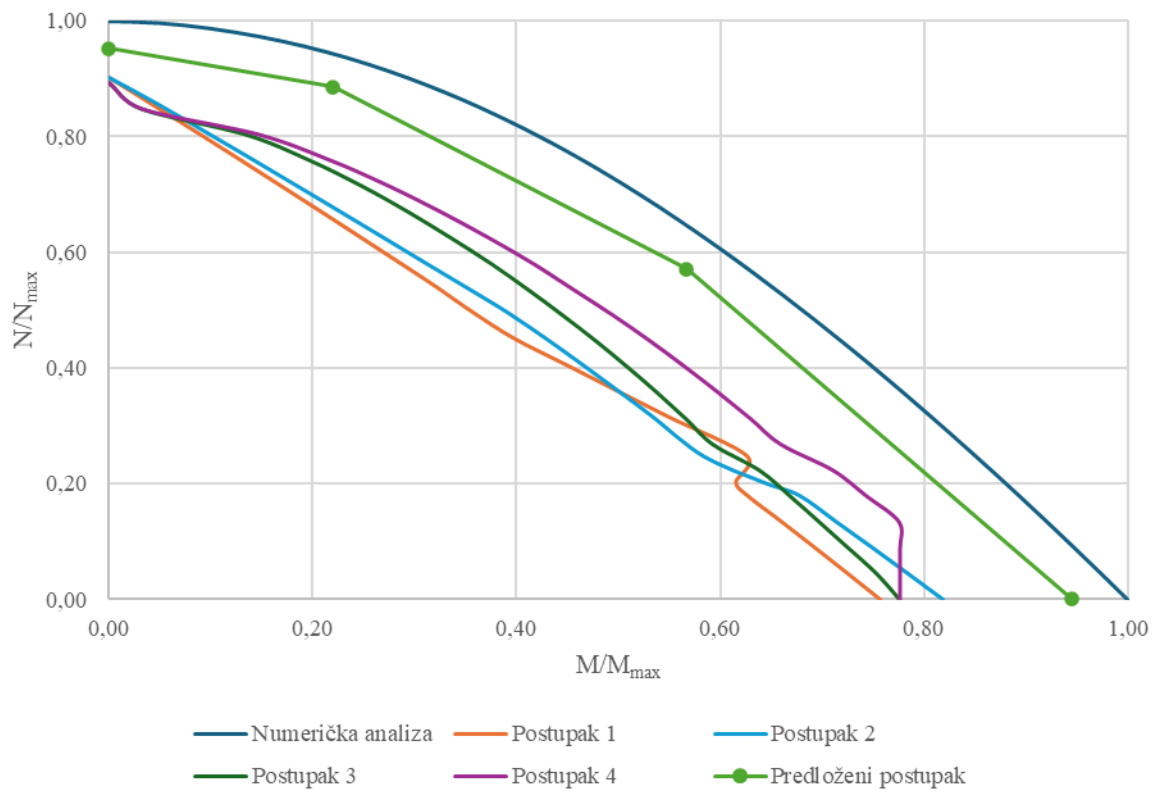
Slika 9.14 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 1



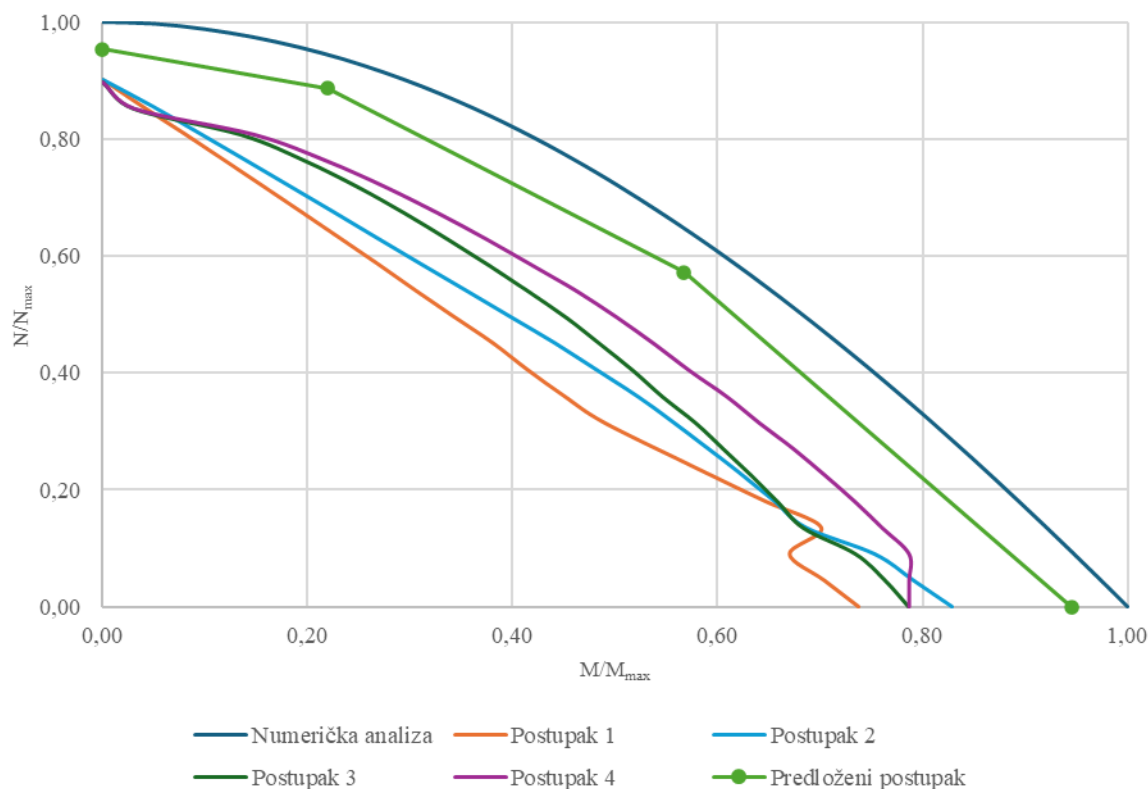
Slika 9.15 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 2



Slika 9.16 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 3



Slika 9.17 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 4



Slika 9.18 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 5

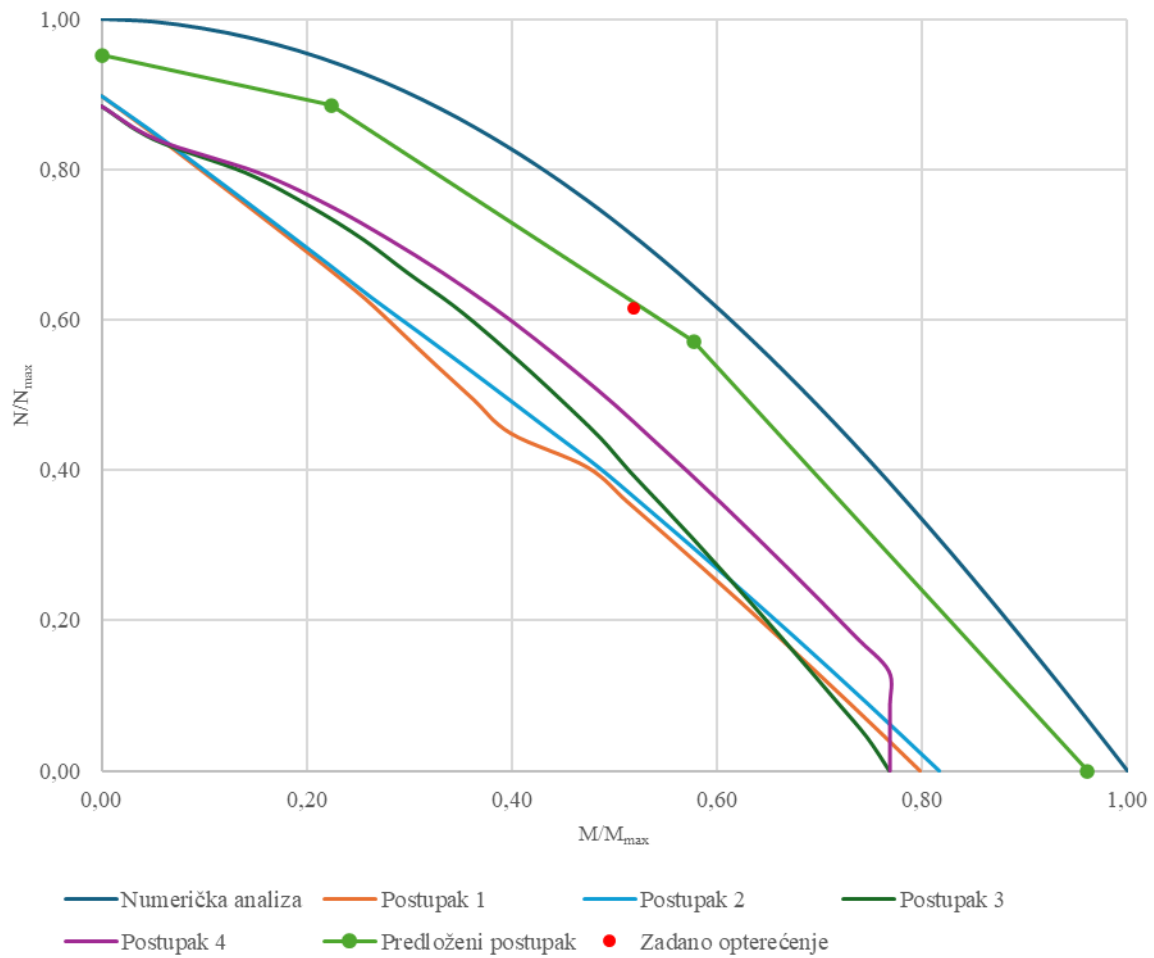
Rezultati jasno pokazuju značajno veću preciznost predloženog postupka proračuna neprizmatičnih elemenata u odnosu na trenutno dostupne metode. Predloženi postupak zadržava pouzdanost proračuna u odnosu na rezultate numeričke analize, pošto daje nešto niže rezultate. **Postupak je također brz, jednostavan, efikasan i prati stvarno ponašanje neprizmatičnih elemenata.**

Završno će se prednosti predloženog novog postupka pokazati na jednom primjeru. Ukoliko je element 3 opterećen uzdužnom silom u iznosu $N = 100$ kN te vertikalnim opterećenjem koje daje moment savijanja $M = 30$ kNm (slika 9.19).

Prema postupku 1 otpornost elementa premašena je za čak 28,2 %. Postupak 2 također daje otpornost koja je premašena 26,6 %. Postupak 3 je nešto bolji, kod njega je otpornost premašena 23,6 % dok najbolje rezultate daje postupak 4, gdje je otpornost premašena 16 %.

Međutim, prema predloženom postupku element zadovoljava naneseno opterećenje, što se može vidjeti na slici 9.19 jer se kombinacija uzdužne sile i momenta savijanja nalaz ispod

krivulje koja pokazuje otpornost neprizmatičnog elementa prema predloženom postupku (također se vidi i koliko je otpornost premašena prema svim ostalim postupcima proračuna).



Slika 9.19 – Rezultati za primjer proračuna elementa 3 prema svim postupcima za zadano opterećenje

10. ZAKLJUČAK

Građevinarstvo teži kontinuiranom razvoju novih i poboljšanju postojećih konstrukcijskih rješenja, koja će rezultirati povećanjem pouzdanosti, smanjenjem količine materijala, ekonomskih troškova i emisija ugljikovog dioksida. Jedno od takvih rješenja je i korištenje neprizmatičnih čeličnih elemenata čija promjena visine rezultira optimiziranom otpornošću. Međutim, da bi konstrukcijsko rješenje bilo efikasno, za njega mora postojati jednostavan i pouzdan postupak proračuna.

Jedan od ciljeva rada bio je detaljno proučiti trenutno dostupne metode proračuna neprizmatičnih konstrukcijskih elemenata prema drugoj generaciji norme. Provedeno je 400 analitičkih proračuna, sukladno primjeru prikazanom u prilogu A rada, kako bi se dobile krivulje otpornosti neprizmatičnih konstrukcijskih elemenata opterećenih tlačnom uzdužnom silom i vertikalnim kontinuiranim opterećenjem. Njihova preciznost validirana je provedbom brojnih numeričkih analiza korištenjem naprednih kompjutorskih programa temeljenih na metodi konačnih elemenata.

10.1. Zaključci iz provedenih analiza

Usporedbom metoda proračuna došlo se do slijedećih zaključaka:

- Rezultati svih **postojećih postupaka proračuna** koje daje druga generacija norme EN 1993-1-1 [12] **pokazuju značajno odstupanje od rezultata numeričkih analiza i podcjenjivanje otpornosti** neprizmatičnih konstrukcijskih elemenata.
- Korištenje opće metode prema drugoj generaciji norme uz modificirani izraz za proračun koeficijenta za elastično kritično opterećenje izvijanja izvan ravnine daje rezultate koji su najbliži rezultatima numeričkih analiza te pokazuje nelinearno ponašanje.
- Za elemente koji su izloženi dominantno jednom opterećenju (uzdužna tlačna sila ili kontinuirano opterećenje), rezultate najbliže numeričkim analizama pokazuje 2. postupak proračuna, koji za određivanje otpornosti elementa koristi karakteristike ekvivalentnog presjeka.

U 7. poglavlju rada potvrđena je hipoteza da neprizmatični konstrukcijski elementi predstavljaju efikasno konstruktivno rješenje za izvedbu čeličnih okvirnih konstrukcija ukoliko

se za njihovo dimenzioniranje koriste pouzdane metode proračuna. Na temelju usporedbe dvaju okvirnih sustava zaključeno je slijedeće:

- **Upotrebom neprizmatičnih konstrukcijskih elemenata** za formiranje okvirnog sustava jednake geometrije **u ovom primjeru** utrošeno je **15,1 % manje materijala** u odnosu na okvir sa vutama i prizmatičnim elementima.
- Na primjeru čelične industrijske hale, čije su dimenzije unutar uobičajenih, korištenjem okvira od neprizmatičnih konstrukcijskih elemenata moguće je smanjiti **emisije ugljikovog dioksida za čak 6,38 tona** u odnosu na okvir sa vutama i prizmatičnim elementima.
- Upotrebom neprizmatičnih elemenata u realnim konstrukcijskim sustavima povećava se **potencijal ponovne upotrebe elemenata**.
- Neprizmatični elementi u realnim konstrukcijskim sustavima imaju **značajne konstruktivne, ekonomske i ekološke prednosti**.

Na temelju 1260 provedenih numeričkih analiza (koje su u skladu sa novom generacijom norme EN 1993-1-14 koja propisuje princip FEM modeliranja) razvijen je, i na primjeru predstavljen, novi postupak proračuna neprizmatičnih konstrukcijskih elemenata u cilju povećanja točnosti postojećih metoda proračuna. Dobiveni rezultati pokazuju **značajno veću preciznost predloženog postupka proračuna neprizmatičnih elemenata u odnosu na trenutno dostupne metode**. Predloženi postupak zadržava pouzdanost proračuna u odnosu na rezultate numeričke analize. Postupak je također **brz, jednostavan, efikasan** i prati stvarno ponašanje neprizmatičnih elemenata. Otpornost dobivena prema predloženom postupku pokazuje **odstupanje manje od 0,001 %** u odnosu na numerički dobivene rezultate, bez korištenja parcijalnih faktora.

Predloženi postupak formiran je na temelju istraživanja neprizmatičnih konstrukcijskih elemenata formiranih na temelju IPE profila, koji su zgloбно oslonjeni i opterećeni centričnom tlačnom silom i vertikalnim kontinuiranim opterećenjem.

10.2. Preporuke za daljnja postupanja i istraživanja

Na temelju provedenog istraživanja, daju se slijedeće preporuke:

- Proširenje istraživanja uz korištenje jednake metodologije na ostale vruće valjane čelične profile te razmatranje ostalih mogućih uvjeta oslanjanja i opterećenja kako bi predloženi postupak bio adekvatan za proračun šireg područja neprizmatičnih elemenata.
- Provedba eksperimentalnih istraživanja u cilju usporedbe i eventualne dodatne kalibracije numeričkih modela.
- Analiza utjecaja bočnih pridržanja na ponašanje neprizmatičnih elemenata.
- Analiza utjecaja postavljanja lokalnih ukrućenja hrpta kod neprizmatičnih elemenata velike lokalne vitkosti u cilju dodatnog povećanja otpornosti i sprječavanja lokalnog izbočivanja.
- Kako bi se analizirala pouzdanost predloženog postupka proračuna potrebno je provesti probabilističke analize.

ZAHVALE

Želim se zahvaliti mentoru izv. prof. dr. sc. Ivanu Lukačeviću na motivirajućem vođenju, brojnim korisnim informacijama i produbljenu znanja tijekom istraživanja i razvijanja numeričkih modela, kao i pisanja rada.

Zahvaljujem se i Katedri za metalne konstrukcije Zavoda za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Zagrebu koja mi je omogućila istraživanje i pisanje ovog rada.

POPIS LITERATURE

- [1] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I. *Metalne konstrukcije 1*. Zagreb: IGH Zagreb; 1994.
- [2] American Institute of Steel Construction Looking back on a decade of steel construction. *Modern Steel Construction*
Dostupno: <https://www.aisc.org/modernsteel/news/2020/january/looking-back-on-a-decade-of-steel-construction> [Pristupljeno: 15. svibnja 2025.]
- [3] Valle G. 4 Types of Steel Used in Bridges. *BuilderSpace* Dostupno: <https://www.builderspace.com/types-of-steel-used-in-bridges> [Pristupljeno: 15. svibnja 2025.]
- [4] Offshore staff Shell leading the line-up for frontier exploration in 2024 *Offshore*
Dostupno: <https://www.offshore-mag.com/deepwater/article/14305865/rystad-energy-shell-leading-the-line-up-for-frontier-exploration-in-2024> [Pristupljeno: 15. svibnja 2025.]
- [5] How to distinguish steel plates materials of steel silos *Grain Silo* Dostupno: <https://www.grainsilo.com/grain-technology-update/how-to-distinguish-steel-plates-materials-of-steel-silo.html> [Pristupljeno: 15. svibnja 2025.]
- [6] World Green Building Council Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon. London: World GBC; 2019
- [7] Doedee V. What is the carbon footprint of steel?. *Sustainable Ships* Dostupno: <https://www.sustainable-ships.org/stories/2022/carbon-footprint-steel> [Pristupljeno: 16. svibnja 2025.]
- [8] Bureau of International Recycling *World steel recycling in figures 2019 – 2023*: 15th edition, Bruxelles; 2024.
- [9] Tapered columns can slim down costs. *Star Building Systems* Dostupno: <https://www.starbuildings.com/blog/tapered-columns-can-slim-down-costs/> [Pristupljeno: 16. svibnja 2025.]
- [10] Preuzeto s web stranice <https://www.kalzip.com/en/references/etihad-stadium-manchester/> [Pristupljeno: 17. svibnja 2025.]
- [11] Marques L. *Tapered steel members: flexural and lateral-torsional buckling*. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra; 2012.
- [12] HRN EN 1993-1-1 Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2022)

-
- [13] HRN EN 1993-1-5 Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – Dio 1-5: Pločasti konstrukcijski elementi (EN 1993-1-5:2024)
- [14] Simões da Silva L., Simões R., Gervásio H. *Design of Steel Structures*. 1. izdanje. Portugal: ECCS – European Convention for Constructional Steelwork; 2013.
- [15] Hirt M. A., Crisinel M *Charpentes Métalliques: Conception et dimensionnement des halles et bâtiments*. 1. izdanje. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes; 2001.
- [16] Steel Construction Institute NCCI: Elastic critical moment for lateral torsional buckling. 2005.
- [17] Trahair N. S. *Flexural-Torsional Buckling of Structures*, London: E & FN SPON; 1993.
- [18] prEN 1993-1-14 Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-14: Design assisted by finite element analysis (prEN 1993-1-14:2023)
- [19] Walport F., Chan H.U., Nethercot D.A., Gardner L. *Design of stainless steel structural systems by GMNIA with strain limits*. Engineering Structures. 2023; vol. 276
- [20] Rebelo C., Lopes N., Simões da Silva L., Nethercot D., Vila Real P.M.M. *Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 1: Variability of the Eurocode 3 resistance model*. Journal of Constructional Steel Research. 2009; 65(4): 818-831
- [21] Gardner L., Yun X., Fieber A., Macorini L. *Steel Design by Advanced Analysis: Material Modeling and Strain Limits*. Engineering. 2019; 5(2): 243-249
- [22] Programski paket Abaqus 6.14.5, 2014.
- [23] Maia É., Couto C., Real P. V., Lopes N. *The General Method for the fire design of I-section web-tapered beam-columns*. Thin-Walled Structures. 2022; vol. 174
- [24] Programski paket Dlubal RFEM 6.09.0003, 2025.
- [25] Steel Building sin Europe *Single-Storey Steel Buildings*. Part 4: Detailed Design of Portal Frames.
- [26] EPD database for structural steel. Dostupno na: https://www.epddanmark.dk/media/rphaiaue/md-20042-en_rev1.pdf [Pristupljeno: 10. srpnja 2025.]
- [27] Gibbons, O. P., Orr, J. J., Archer-Jones, C., Arnold, W., Green, D. *How to calculate embodied carbon*, 2nd edition, London: The Institution of Structural Engineers; 2022.
-

PRILOZI

Prilog A: Primjer proračuna neprizmatičnih elemenata prema drugoj generaciji norme EN 1993-1-1

U prilogu A dani su primjeri proračuna neprizmatičnih elemenata prema 4 različita postupka druge generacije norme EN 1993-1-1 [12], 2 postupka prema točki 8.3.3. i 2 postupka prema točki 8.3.4. Prikazani su proračuni za jedan od elemenata koji je promatran u okviru ovog rada: profil IPE 180 odnosa promjene visine (eng. *taper ratio*) 0,025, duljine elementa 3 metra. Na temelju ovakvih proračuna dobivene su M – N krivulje za svaki element koji je dio rada. U primjeru je element opterećen uzdužnom silom $N_{Ed} = 100 \text{ kN}$ i vertikalnim kontinuiranim opterećenjem $q_{Ed} = 10 \text{ kN/m'}$ te je proračunata iskoristivost elementa, dok se prilikom izrade M – N krivulje računao upravo takav par uzdužne sile i vertikalnog kontinuiranog opterećenja koji daje iskoristivost 100 %. Karakteristike materijala i elementa dane su u tablici A1.

Tablica A.1 – Karakteristike materijala i elementa

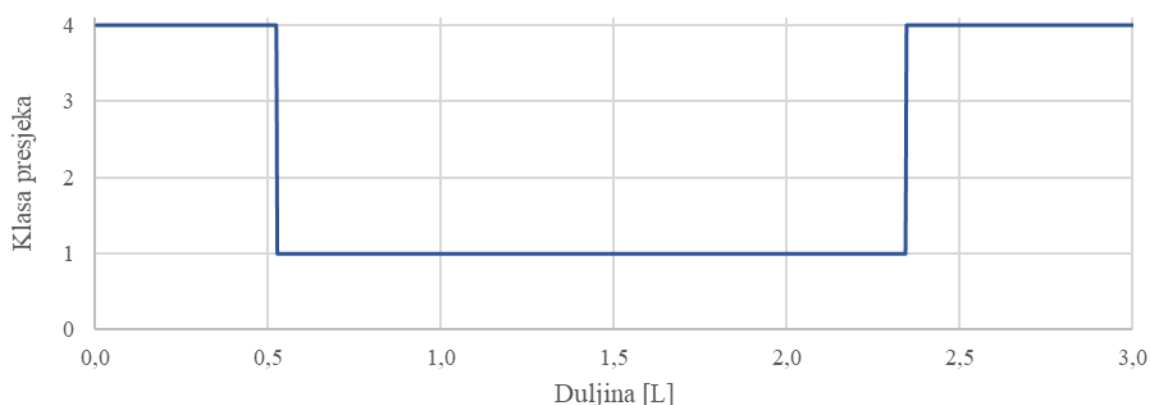
Geometrijske karakteristike elementa promjenjive visine		
	Manji rub	Veći rub
$h \text{ [mm]}$	180	255
$b \text{ [mm]}$	91,0	91,0
$t_w \text{ [mm]}$	5,3	5,3
$t_f \text{ [mm]}$	8,0	8,0
$I_y \text{ [cm}^4\text{]}$	1272,45	2824,46
$I_z \text{ [cm}^4\text{]}$	100,68	100,77
$W_y \text{ [cm}^3\text{]}$	141,38	221,53
$W_z \text{ [cm}^3\text{]}$	22,13	22,15
$W_{pl,y} \text{ [cm}^3\text{]}$	160,85	255,50
$W_{pl,z} \text{ [cm}^3\text{]}$	34,28	34,80
$I_t \text{ [cm}^4\text{]}$	3,8377	4,2098
$I_w \text{ [cm}^6\text{]}$	7446	15370,1
Karakteristike materijala elementa promjenjive visine		
$E \text{ [N/mm}^2\text{]}$	Čelik	Poissonov koeficijent ν
210000	S355	0,3

Prilog A1: 1. postupak

U prilogu A1 prikazan je primjer postupka proračuna prema točki 8.3.3. druge generacije norme EN 1993-1-1 [12] provodeći dokaze na razini presjeka u kritičnom presjeku, a dokaze na razini elementa koristeći karakteristike kritičnog presjeka.

Klasifikacija elementa

Element je klasificiran u skladu s točkom 7.6. norme EN 1993-1-1 [12], koja daje uvjete za klase presjeka. Klase presjeka duž elementa prikazane su na slici A1.



Slika A.1 – Grafički prikaz klase presjeka duž elementa

Iskoristivost presjeka

Dokaz na uzdužnu silu

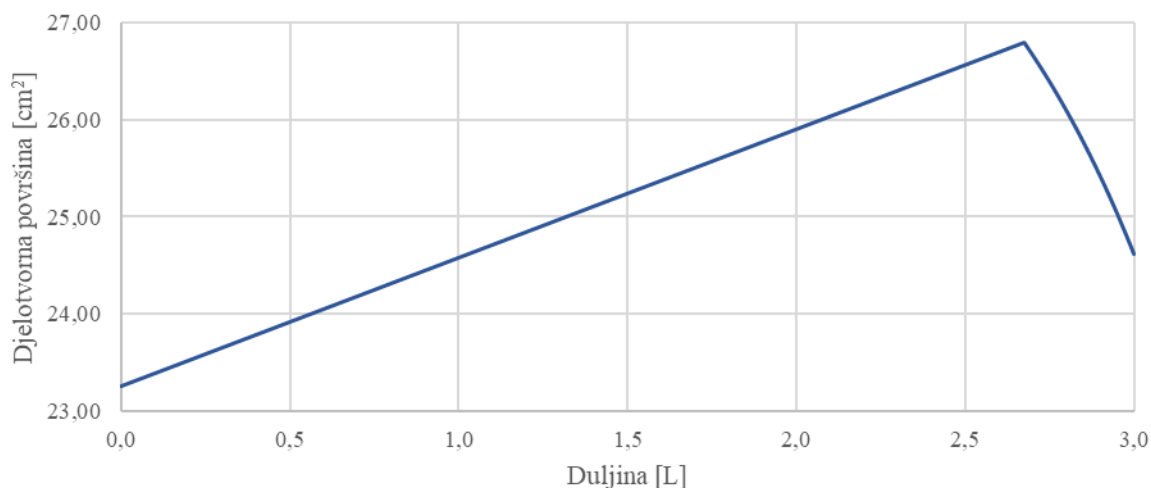
Uzdužna sila u svakom presjeku elementa provjerava se prema izrazu:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{A. 1})$$

Otpornost presjeka na uzdužnu silu računa se prema izrazu:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{A. 2})$$

Na slici A2 prikazane su djelotvorne površine duž elementa.



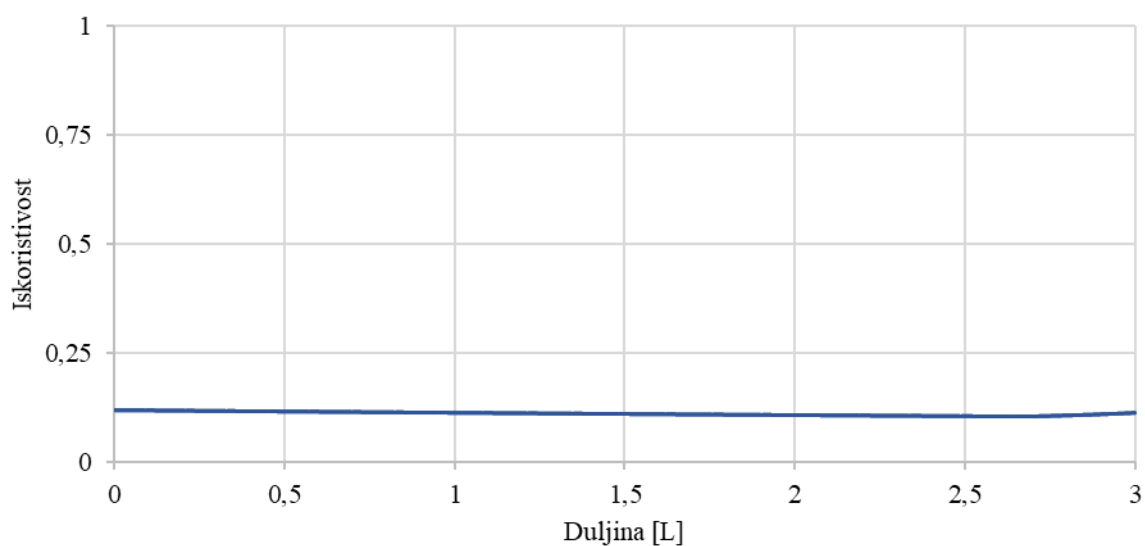
Slika A.2 – Grafički prikaz djelotvorne površine duž elementa

U primjeru za presjek najmanje površine:

$$N_{c,Rd} = \frac{23,25 \cdot 35,5}{1,0} = 825,4 \text{ kN}$$

$$\frac{100}{825,4} = 0,12 < 1,0$$

Na slici A3 prikazana je iskoristivost presjeka na uzdužnu tlačnu silu u svakom presjeku elementa.



Slika A.3 – Grafički prikaz iskoristivosti presjeka na uzdužnu tlačnu silu

Dokaz je zadovoljen duž cijelog elementa.

Napomena: Za dijelove elementa klase 4 otpornost se računa s efektivnom površinom A_{eff} .

Dokaz na moment savijanja

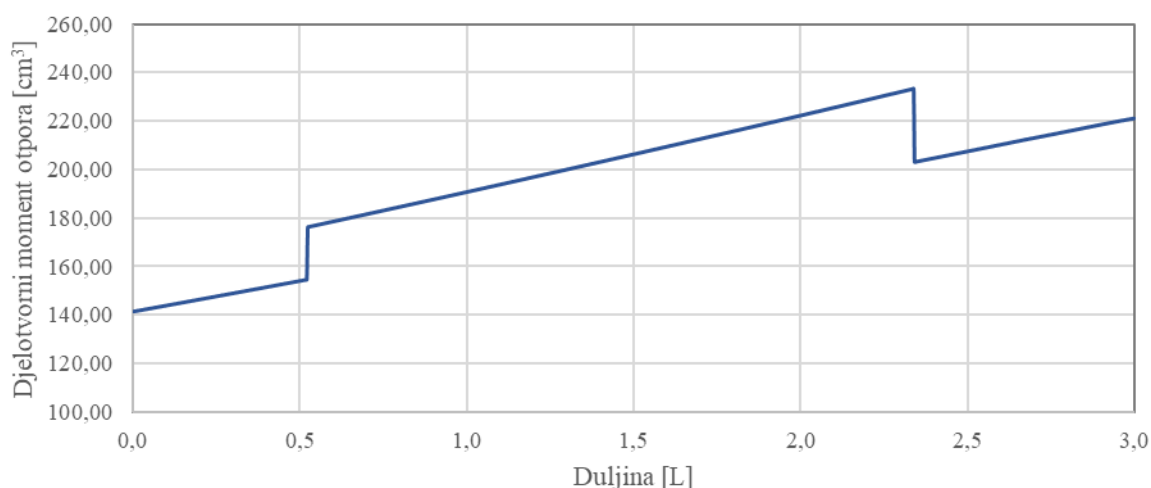
Moment savijanja u svakom presjeku elementa provjerava se prema izrazu:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (A.3)$$

Otpornost presjeka na moment savijanja računa se prema izrazu:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (A.4)$$

Na slici A4 prikazane su djelotvornog momenta otpora W_y duž elementa.



Slika A.4 – Grafički prikaz djelotvornog momenta otpora duž elementa

U primjeru za presjek najmanjeg momenta otpora:

$$M_{c,Rd} = \frac{141,38 \cdot 35,5}{1,0} = 50,2 \text{ kNm}$$

$$\frac{11,2}{50,2} = 0,22 < 1,0$$

Dokaz je zadovoljen duž cijelog elementa.

Napomena: Za dijelove elementa klase 4 otpornost se računa s efektivnom momentom otpora W_{eff} , za dijelove elementa klase 3 prema drugoj generaciji norme presjek se tretira kao djelomično kompaktan te se otpornost se računa sa W_{ep} (Prilog B norme EN 1993-1-1), dok se za klase presjeka 1 i 2 otpornost računa s plastičnim momentom otpora.

Dokaz na poprečnu silu

S obzirom da je za elemente izložene savijanju i uzdužnoj sili (i malim vrijednostima poprečne sile) normalno naprezanje značajnije od posmičnog, element zadovoljava na posmičnu silu. Ovakav pristup usvaja i [14]. Ipak, u nastavku je dan dokaz na poprečnu silu u kritičnom presjeku elementa.

Posmična sila u svakom presjeku elementa provjerava se prema izrazu:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad (A. 5)$$

Otpornost presjeka na poprečnu silu računa se prema izrazu:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (A. 6)$$

Posmična površina računa se prema izrazu:

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + t_w \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w \quad (A. 7)$$

$$A_{v,z} = 23,25 - 2 \cdot 9,1 \cdot 0,8 + 0,56 \cdot 0,8 \geq 1,2 \cdot 16,4 \cdot 0,56$$

$$A_{v,z} = 9,14 < 11,0 \text{ cm}^2$$

$$A_{v,z} = 11,0 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{11 \cdot (35,5 / \sqrt{3})}{1,0} = 225,5 \text{ kN}$$

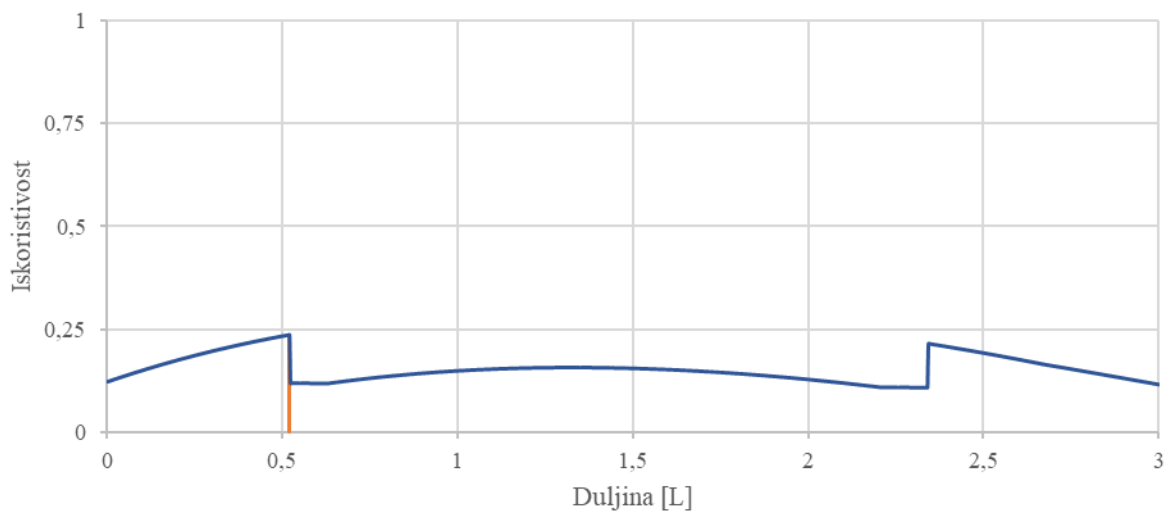
$$\frac{15}{225,5} = 0,067 \leq 1,0$$

Dokaz je zadovoljen.

Dokaz na M – N interakciju

M – N interakcija na razini presjeka u svakom presjeku provedena je u skladu sa drugom generacijom norme EN 1993-1-1 [12]. Dokaz za klase 1 i 2 proveden je na način da je proračunat utjecaj uzdužne sile na otpornost na savijanje (točka 8.2.9.1. norme), dok je dokaz za klase presjeka 3 (točka 8.2.9.2. norme) i 4 (točka 8.2.9.2. norme) proveden na razini naprezanja. U svakom presjeku određeno je da li je veća iskoristivost presjeka na uzdužnu silu,

ili iskoristivost presjeka na M – N interakciju. Na slici A5 prikazana je mjerodavna iskoristivost u svakom presjeku elementa te je vertikalnom linijom identificiran i označen kritični presjek.



Slika A.5 – Grafički prikaz iskoristivosti duž elementa

Karakteristike kritičnog presjeka prikazane su u tablici A2.

Tablica A.2 – Karakteristike kritičnog presjeka

Geometrijske karakteristike elementa promjenjive visine	
	Kritični presjek
h [mm]	192,99
b [mm]	91,0
t_w [mm]	5,3
t_f [mm]	8,0
Klasa presjeka	4
I_{eff} [cm ⁴]	1491,27
A_{eff} [cm ²]	23,94
$W_{eff,y}$ [cm ³]	154,55
I_z [cm ⁴]	100,70
W_z [cm ³]	22,13
$W_{pl,z}$ [cm ³]	34,37
I_t [cm ⁴]	3,9021
I_w [cm ⁶]	8614,7

Otpornost elementa

Otpornost elementa na uzdužnu silu

Elastična kritična sila:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} \quad (A. 8)$$

Svedena vitkost:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr}}} \quad (A. 9)$$

Pomoćna veličina:

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}] \quad (A. 10)$$

Faktor redukcije:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}}} \quad (A. 11)$$

Otpornost elementa na tlačnu silu:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (A. 12)$$

Dokaz pouzdanosti:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (A. 13)$$

Proračunata mjerodavna otpornost elementa na uzdužnu tlačnu silu sa karakteristikama kritičnog presjeka iznosi:

$$N_{b,Rd} = 179,67 \text{ kN}$$

$$\frac{100}{179,67} = 0,56 \leq 1,0$$

Dokaz je zadovoljen.

Otpornost elementa na savijanje

Elastični kritični moment:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right] \quad (A. 14)$$

Svedena vitkost:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (A.15)$$

Pomoćna veličina:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + f_m \cdot \left(\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right)^2 \cdot \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right] \quad (A.16)$$

Faktor redukcije:

$$\chi_{LT} = \frac{f_m}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - f_m \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (A.17)$$

Otpornost elementa na savijanje:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (A.18)$$

Dokaz pouzdanosti:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (A.19)$$

Proračunata otpornost elementa na savijanje sa karakteristikama kritičnog presjeka iznosi:

$$M_{b,Rd} = 20,7 \text{ kNm}$$

$$\frac{11,25}{20,7} = 0,543 < 1,0$$

Otpornost elementa na M – N interakciju

Dokaz pouzdanosti za M – N interakciju za os y:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (A.20)$$

Dokaz pouzdanosti za M – N interakciju za os z:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (A.21)$$

Interakcijski faktori proračunati su prema tablicama 8.7 i 8.8 druge generacije norme EN 1993-1-1.

$$k_{yy} = 0,988$$

$$k_{zy} = 0,960$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{100}{0,885 \cdot \frac{849,9}{1,0}} + 0,988 \cdot \frac{11,25}{0,377 \cdot \frac{54,87}{1,0}} = 0,67 < 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{100}{0,211 \cdot \frac{849,9}{1,0}} + 0,96 \cdot \frac{11,25}{0,377 \cdot \frac{54,87}{1,0}} = 1,08 > 1,0$$

Dokaz nije zadovoljen. Element nema dostatnu otpornost prema postupku 1.

Prilog A2: 2. postupak

U prilogu A2 prikazan je primjer postupka proračuna prema točki 8.3.3. druge generacije norme EN 1993-1-1 provodeći dokaze na razini presjeka u kritičnom presjeku, a dokaze na razini elementa koristeći karakteristike ekvivalentnog presjeka, gdje postoje izrazi za proračun karakteristika ekvivalentnog presjeka opisani u poglavlju 4 rada.

Dokaz na razini presjeka prikazan je u prilogu A1.

Otpornost elementa

Proračun karakteristika ekvivalentnog presjeka

Prema izrazima 4.1 – 4.3, za proračun otpornosti elementa na uzdužnu tlačnu silu:

$$r = \sqrt{\frac{I_{y,\min}}{I_{y,\max}}} = \sqrt{\frac{1272,45}{2819,17}} = 0,672$$

$$C = (0,08 + 0,92 \cdot r) = (0,08 + 0,92 \cdot 0,672) = 0,698$$

$$I_{y,eq} = C \cdot I_{y,\max} = 0,698 \cdot 2819,17 = 1968,02 \text{ cm}^2$$

Prema izrazima 4.7 i 4.8, za proračun otpornosti elementa na savijanje:

$$\gamma = \frac{h_{\min}}{h_{\max}} = \frac{180}{255} = 0,706$$

$$h_{eq} = h_{\max} \cdot \sqrt{0,283 + 0,434 \cdot \gamma + 0,283 \cdot \gamma^2}$$

$$h_{eq} = 255 \cdot \sqrt{0,283 + 0,434 \cdot 0,706 + 0,283 \cdot 0,706^2} = 217,93 \text{ mm}$$

$$I_{T,eq} = \frac{I_{T,max} + I_{T,min}}{2} = \frac{4,2098 + 3,8377}{2} = 4,0238 \text{ cm}^4$$

$$I_{w,eq} = 11092,1 \text{ cm}^6$$

Otpornost elementa na uzdužnu silu

Proračun otpornosti elementa na uzdužnu tlačnu silu provodi se prema izrazima A.8 – A.13, sa vrijednostima ekvivalentnog presjeka.

Proračunata mjerodavna otpornost elementa na uzdužnu tlačnu silu sa karakteristikama ekvivalentnog presjeka iznosi:

$$N_{b,Rd} = 179,64 \text{ kN}$$

$$\frac{100}{179,64} = 0,56 \leq 1,0$$

Dokaz je zadovoljen.

Otpornost elementa na savijanje

Proračun otpornosti elementa na savijanje provodi se prema izrazima A.14 – A.19, sa vrijednostima ekvivalentnog presjeka.

Proračunata otpornost elementa na savijanje sa karakteristikama ekvivalentnog presjeka iznosi:

$$M_{b,Rd} = 22,13 \text{ kNm}$$

$$\frac{11,25}{20,7} = 0,51 < 1,0$$

Otpornost elementa na M – N interakciju

Proračun otpornosti elementa na M – N interakciju provodi se prema izrazima A.20 i A.21, sa vrijednostima ekvivalentnog presjeka.

Interakcijski faktori proračunati su prema tablicama 8.7 i 8.8 druge generacije norme EN 1993-1-1.

$$k_{yy} = 0,982$$

$$k_{zy} = 0,960$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{100}{0,913 \cdot \frac{849,9}{1,0}} + 0,982 \cdot \frac{11,25}{0,403 \cdot \frac{54,87}{1,0}} = 0,63 < 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{100}{0,211 \cdot \frac{849,9}{1,0}} + 0,96 \cdot \frac{11,25}{0,403 \cdot \frac{54,87}{1,0}} = 1,046 > 1,0$$

Dokaz nije zadovoljen. Element nema dostatnu otpornost prema postupku 2.

Prilog A3: 3. postupak

U prilogu A3 prikazan je primjer postupka proračuna prema točki 8.3.4. druge generacije norme EN 1993-1-1 koristeći opću metodu za dokazivanje otpornosti elementa te koristeći izraz 4.13 za proračun $\alpha_{cr,op}$.

Dokaz na razini presjeka prikazan je u prilogu A1.

Otpornost elementa

Pozadina proračuna otpornosti elementa prema općoj metodi opisana je u poglavlju 4.4.

Prema izrazu 4.11. dobiva se faktor $\alpha_{ult,k}$:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right)$$

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \left(\frac{100}{0,913 \cdot \frac{849,9}{1,0}} + 0,982 \cdot \frac{11,25}{\frac{54,87}{1,0}} \right)$$

$$\alpha_{ult,k} = 3,03$$

Prema izrazu 4.13. dobiva se faktor $\alpha_{cr,op}$:

$$\left(\frac{\alpha_{cr,op} \cdot M_{y,Ed}}{M_{cr}} \right)^2 = \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot N_{Ed}}{N_{cr,T}} \right)$$

Torzijska kritična sila računa se prema izrazu:

$$N_{cr,T} = \frac{A}{I_y + I_z} \cdot \left(G \cdot I_T + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_W}{L^2} \right) \quad (A.22)$$

$$N_{cr,T} = \frac{23,94}{1968,02 + 100,68} \cdot \left(8077 \cdot 4,0238 + \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 11092,1}{300^2} \right) = 671,72 \text{ kN}$$

$$\left(\frac{\alpha_{cr,op} \cdot 11,25}{31,45} \right)^2 = \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot 100}{231,86} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot 100}{671,72} \right)$$

$$\alpha_{cr,op} = 1,48$$

Uvrštavanjem u izraz 4.10 dobiva se svedena vitkost:

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} = \sqrt{\frac{3,03}{1,48}} = 1,429$$

Faktor redukcije uzima se kao najmanja vrijednost između faktora redukcije za izvijanje savijanjem oko slabije osi i faktora redukcije za bočno torzijsko izvijanje:

$$\chi_{op} = \min\{\chi_z; \chi_{LT}\} \quad (A.23)$$

$$\chi_{op} = 0,329$$

Dokaz se provodi prema izrazu 4.9:

$$\frac{1}{\chi_{op} \cdot \frac{\alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}}} = \frac{1}{0,329 \cdot \frac{3,03}{1,0}} = 1,003 > 1,0$$

Dokaz nije zadovoljen. Element nema dostatnu otpornost prema postupku 3.

Prilog A4: 4. postupak

U prilogu A4 prikazan je primjer postupka proračuna prema točki 8.3.4. druge generacije norme EN 1993-1-1 koristeći opću metodu za dokazivanje otpornosti elementa te koristeći izraz 4.14 za proračun $\alpha_{cr,op}$.

Dokaz na razini presjeka prikazan je u prilogu A1.

Dio dokaza za određivanje faktora $\alpha_{ult,k}$ jednak je kao i u prilogu A3:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right)$$

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \left(\frac{100}{0,913 \cdot \frac{849,9}{1,0}} + 0,982 \cdot \frac{11,25}{\frac{54,87}{1,0}} \right)$$

$$\alpha_{ult,k} = 3,03$$

Faktor $\alpha_{cr,op}$ dobiva se koristeći izraz 4.14 (modificirani izraz 4.13. koji uzima u oblik momentnog dijagrama):

$$\left(\frac{\alpha_{cr,op} \cdot M_{y,Ed}}{C_{bc} \cdot M_{cr}} \right)^2 = \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot N_{Ed}}{N_{cr,T}} \right)$$

Torzijska kritična sila računa se prema izrazu A.22:

$$N_{cr,T} = \frac{A}{I_y + I_z} \cdot \left(G \cdot I_T + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_W}{L^2} \right)$$

$$N_{cr,T} = \frac{23,94}{1968,02 + 100,68} \cdot \left(8077 \cdot 4,0238 + \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 11092,1}{300^2} \right) = 671,72 \text{ kN}$$

$$\left(\frac{\alpha_{cr,op} \cdot 11,25}{1,13 \cdot 31,45} \right)^2 = \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot 100}{231,86} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{cr,op} \cdot 100}{671,72} \right)$$

$$\alpha_{cr,op} = 1,57$$

Uvrštavanjem u izraz 4.10 dobiva se svedena vitkost:

$$\overline{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} = \sqrt{\frac{3,03}{1,57}} = 1,389$$

Faktor redukcije uzima se kao najmanja vrijednost između faktora redukcije za izvijanje savijanjem oko slabije osi i faktora redukcije za bočno torzijsko izvijanje:

$$\chi_{op} = \min\{\chi_z; \chi_{LT}\} \quad (\text{A. 24})$$

$$\chi_{op} = 0,344$$

Dokaz se provodi prema izrazu 4.9:

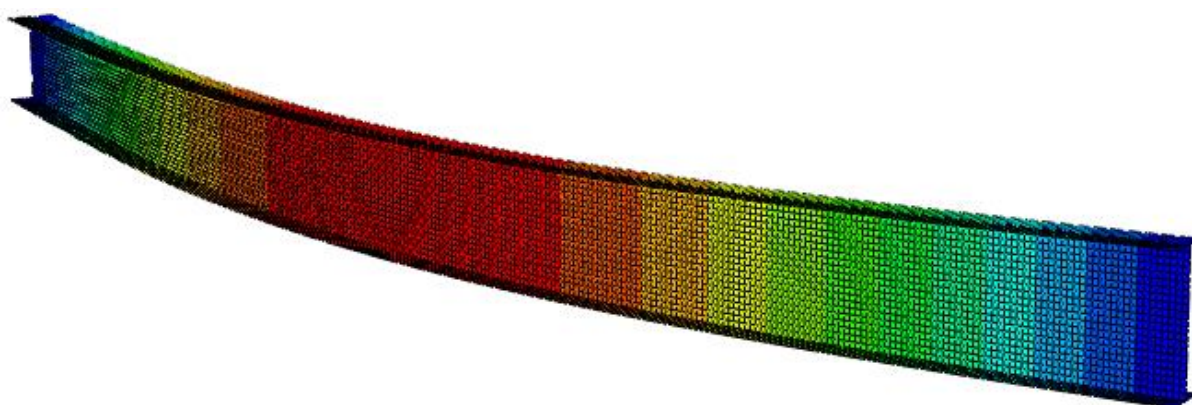
$$\frac{1}{\chi_{op} \cdot \frac{\alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}}} = \frac{1}{0,344 \cdot \frac{3,03}{1,0}} = 0,96 < 1,0$$

Dokaz je zadovoljen. Element ima dostatnu otpornost prema postupku 4.

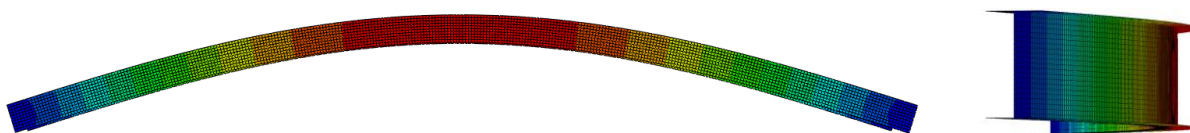
Prilog B: Formiranje krivulje na temelju numeričkih analiza

U prilogu B prikazan je detaljan princip formiranja $M - N$ krivulje na temelju numeričkih analiza za svaki od promatranih elemenata u radu. Postupak je prikazan na primjeru profila IPE 180 sa stopom promjene visine 0,025, a na jednak način dobivene su sve krivulje.

U prvom koraku provedena je LBA analiza elementa čiji su rezultati bili modovi izvijanja (slike B.1 i B.2). Na temelju modova izvijanja zadavane su imperfekcije promatranih elemenata.

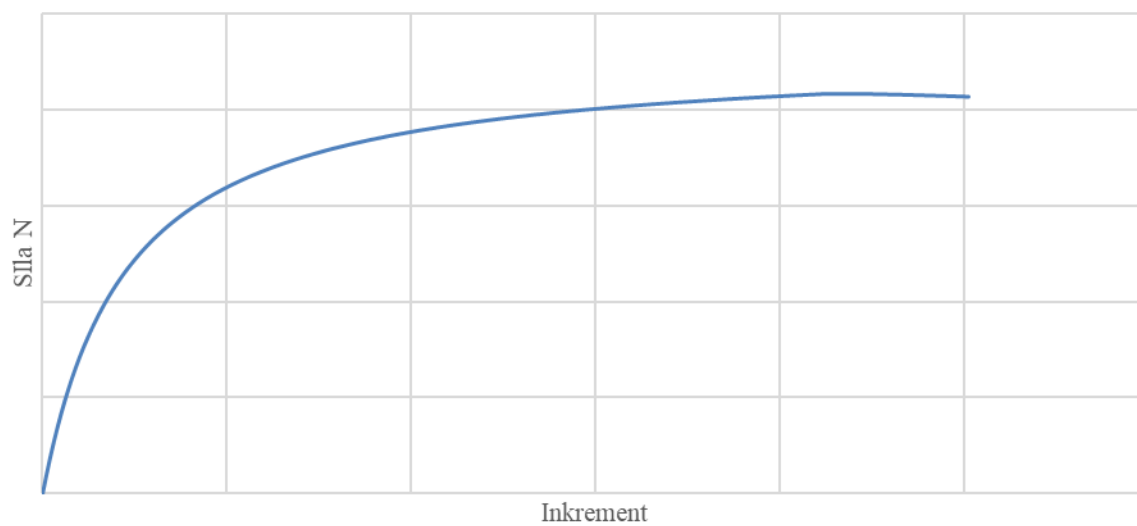


Slika B.1 – Rezultati LBA analize, 3D pogled

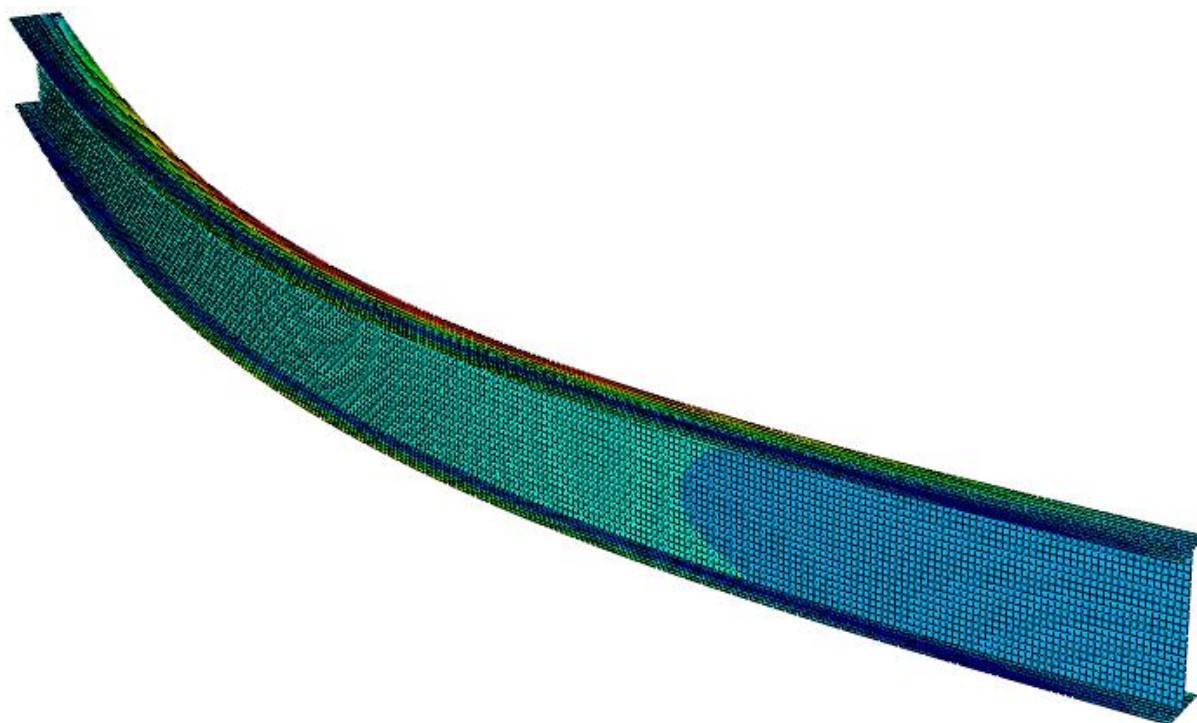


Slika B.2 – Rezultati LBA analize, pogled odozgo i sa strane

Zatim su provedene dvije GMNIA analize na temelju kojih su određeni otpornost na uzdužnu silu i otpornost na savijanje. Početna zadana uzdužna sila je 1 kN, sa početnim inkrementom nanošenja opterećenja 1 (1 kN), a maksimalnim inkrementom nanošenja opterećenja 5 (5 kN). Na slici B.3 prikazan je graf prirasta opterećenja, dok je na slici B.4 prikazan oblik elementa pri maksimalnoj sili. Deformirani oblik je uvećan nekoliko puta zbog jasnijeg prikaza.

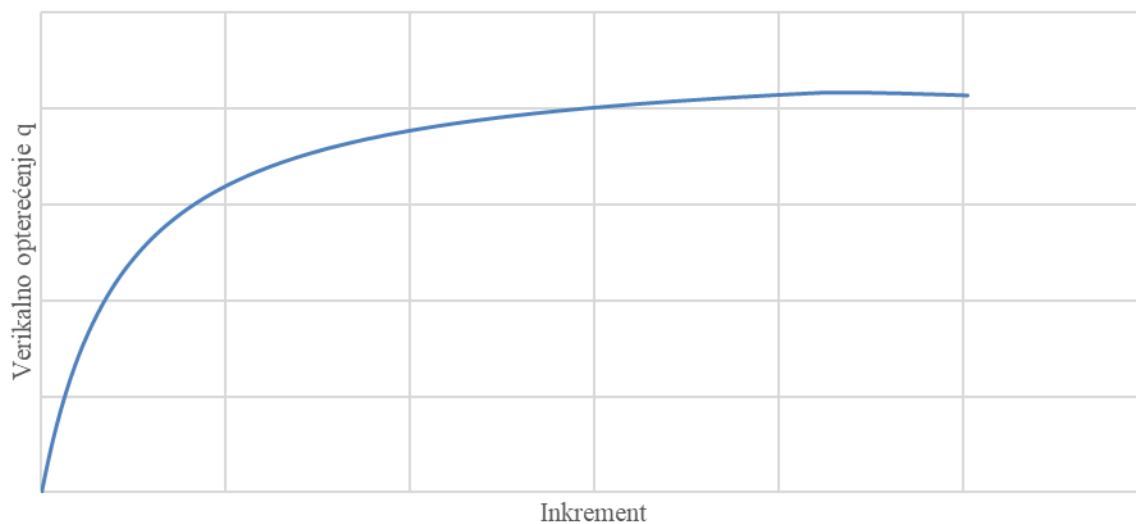


Slika B.3 – Prirast sile s inkrementima opterećenja

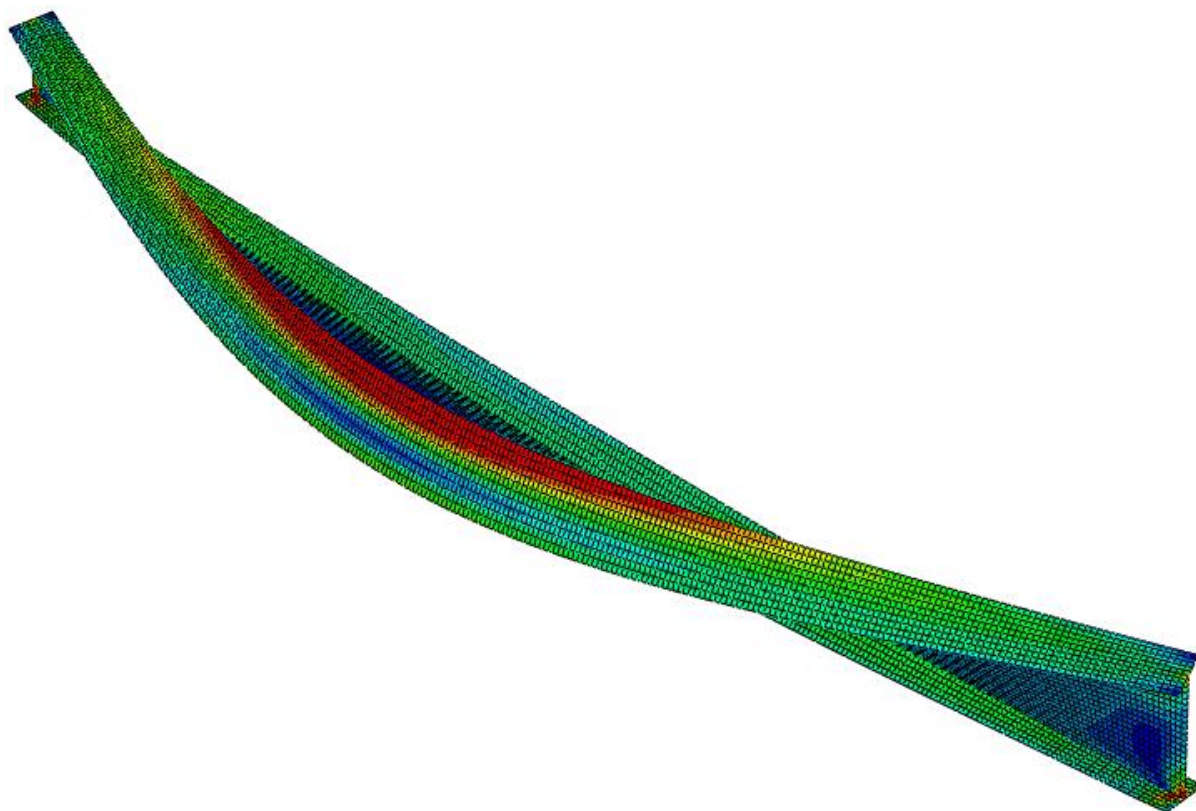


Slika B.4 – Oblik elementa pri maksimalno nanesejoj sili

Početno zadano vertikalno opterećenje iznosilo je $0,01 \text{ kN/m}^2$, sa početnim inkrementom nanošenja opterećenja $0,5$ ($0,05 \text{ kN/m}^2$) te maksimalnim inkrementom nanošenja opterećenja $0,5$ ($0,05 \text{ kN/m}^2$). Na slici B.5 prikazan je graf prirasta opterećenja, dok je na slici B.6 prikazan oblik elementa pri maksimalnoj sili. Deformirani oblik je uvećan nekoliko puta zbog jasnijeg prikaza.



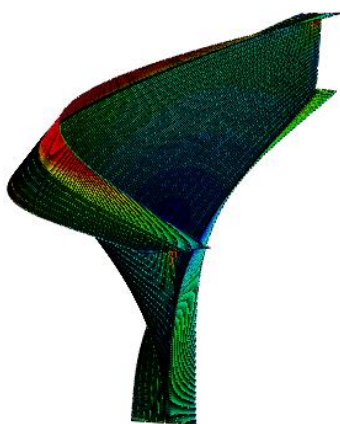
Slika B.5 – Prirast vertikalnog opterećenja s inkrementima opterećenja



Slika B.6 – Oblik elementa pri maksimalno nanesenom vertikalnom opterećenju

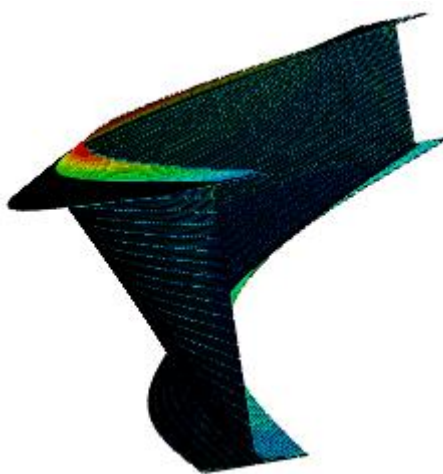
Kada su određeni maksimalna uzdužna sila i vertikalno opterećenje, provedene su ostale analize na slijedeći način:

- Element je opterećen maksimalnom uzdužnom silom i maksimalnim vertikalnim opterećenjem, te je zadan početni inkrement opterećenja 0,01, dok je maksimalni inkrement nanošenja opterećenja 0,04. Dobiven je maksimalni inkrement opterećenja koji pomnožen sa $N_{\max}$ i $M_{\max}$ daje točku krivulje. Element pri maksimalnom inkrementu opterećenja prikazan je na slici B.7.



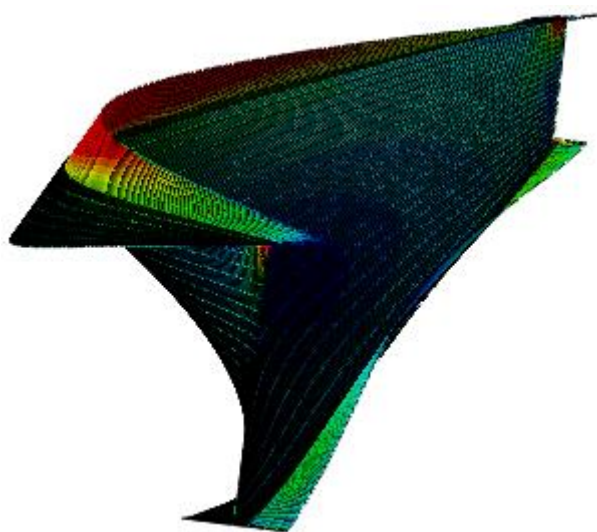
Slika B.7 – Oblik elementa pri maksimalno nanesejoj kombinaciji $N_{\max}$ i $M_{\max}$

- Element je opterećivan maksimalnom uzdužnom silom i postotkom vertikalnog opterećenja (od 5% do 95% vertikalnog opterećenja sa povećanjem 5 % u svakoj analizi), što daje 19 analiza. Na slici B.8 prikazan je element pri maksimalnom inkrementu opterećenja za jednu od 19 analiza (može se uočiti da je dominantan oblik otkazivanja izvijanje savijanjem zbog većeg djelovanja uzdužne sile). Početni inkrement opterećenja je 0,01, a maksimalni 0,04.



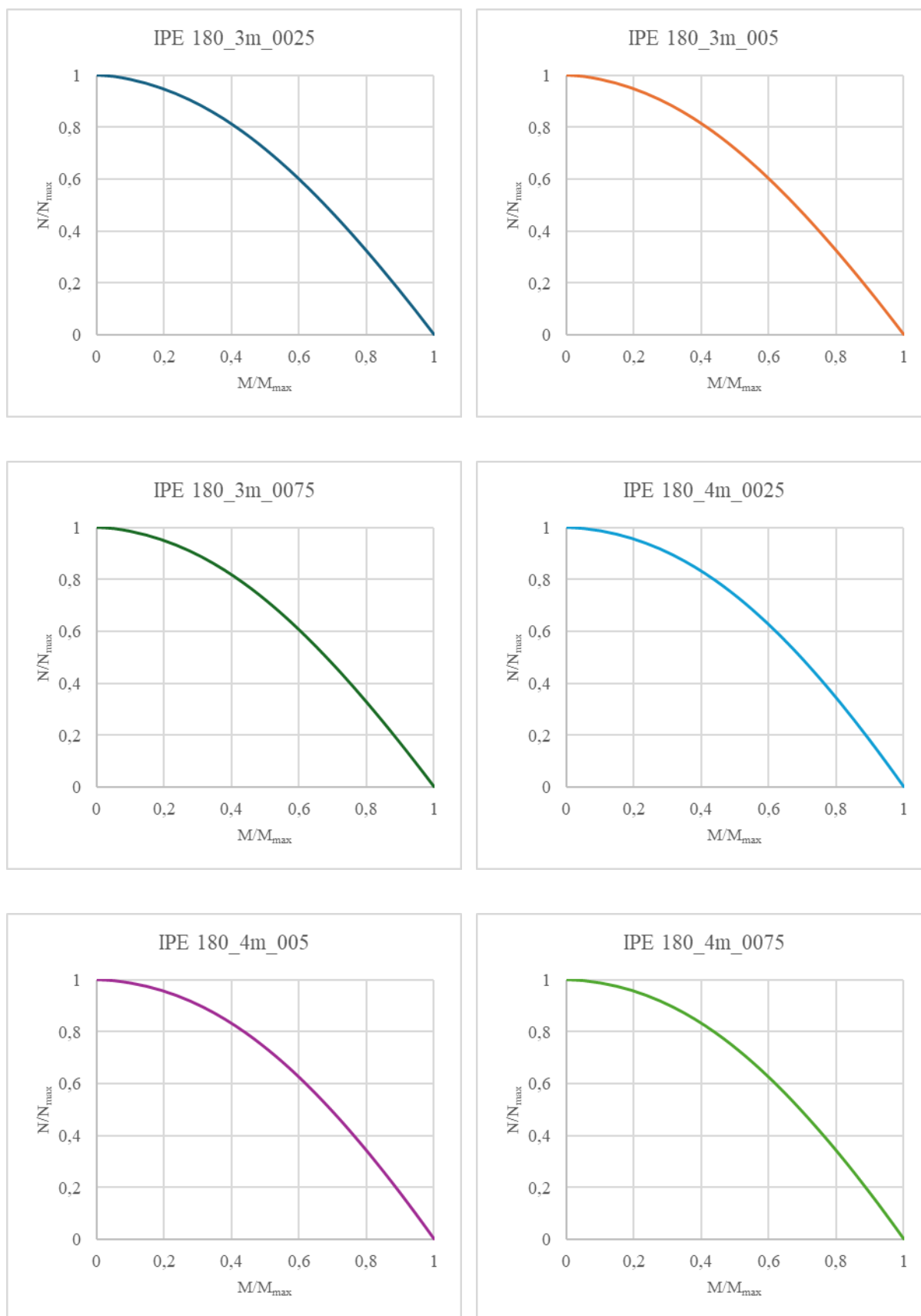
Slika B.8 – Oblik elementa pri maksimalno nanesejoj kombinaciji $N_{\max}$ i % $M_{\max}$

- Element je opterećivan maksimalnim vertikalnim opterećenjem i postotkom uzdužne sile (od 5% do 95% maksimalne uzdužne sile sa povećanjem 5 % u svakoj analizi), što daje 19 analiza. Na slici B.9 prikazan je element pri maksimalnom inkrementu opterećenja za jednu od 19 analiza (može se uočiti da je dominantan oblik otkaza bočno torzijsko izvijanje zbog većeg djelovanja vertikalnog opterećenja). Početni inkrement opterećenja je 0,01, a maksimalni 0,04.

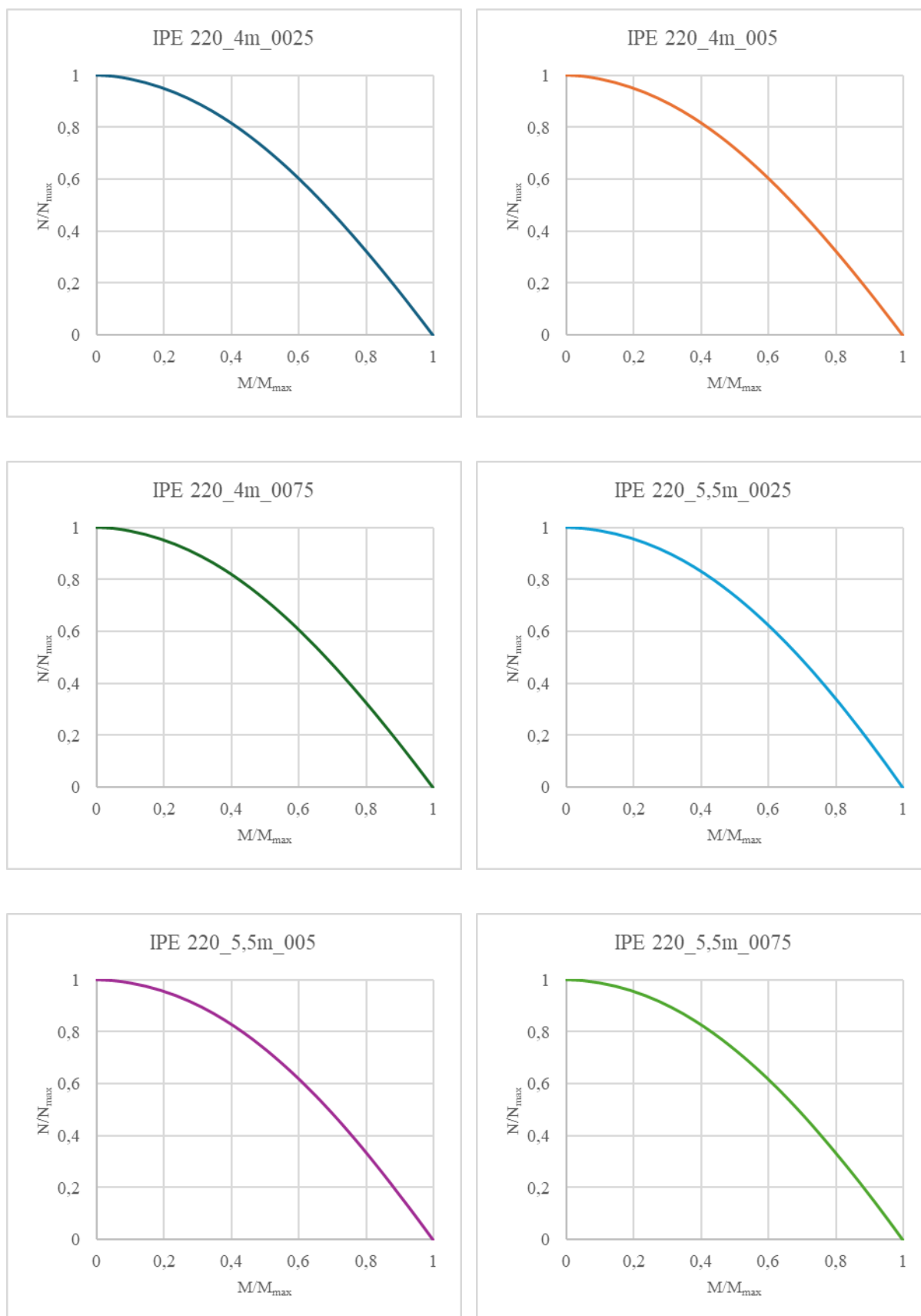


Slika B.9 – Oblik elementa pri maksimalno nanesejoj kombinaciji % N_{max} i M_{max}

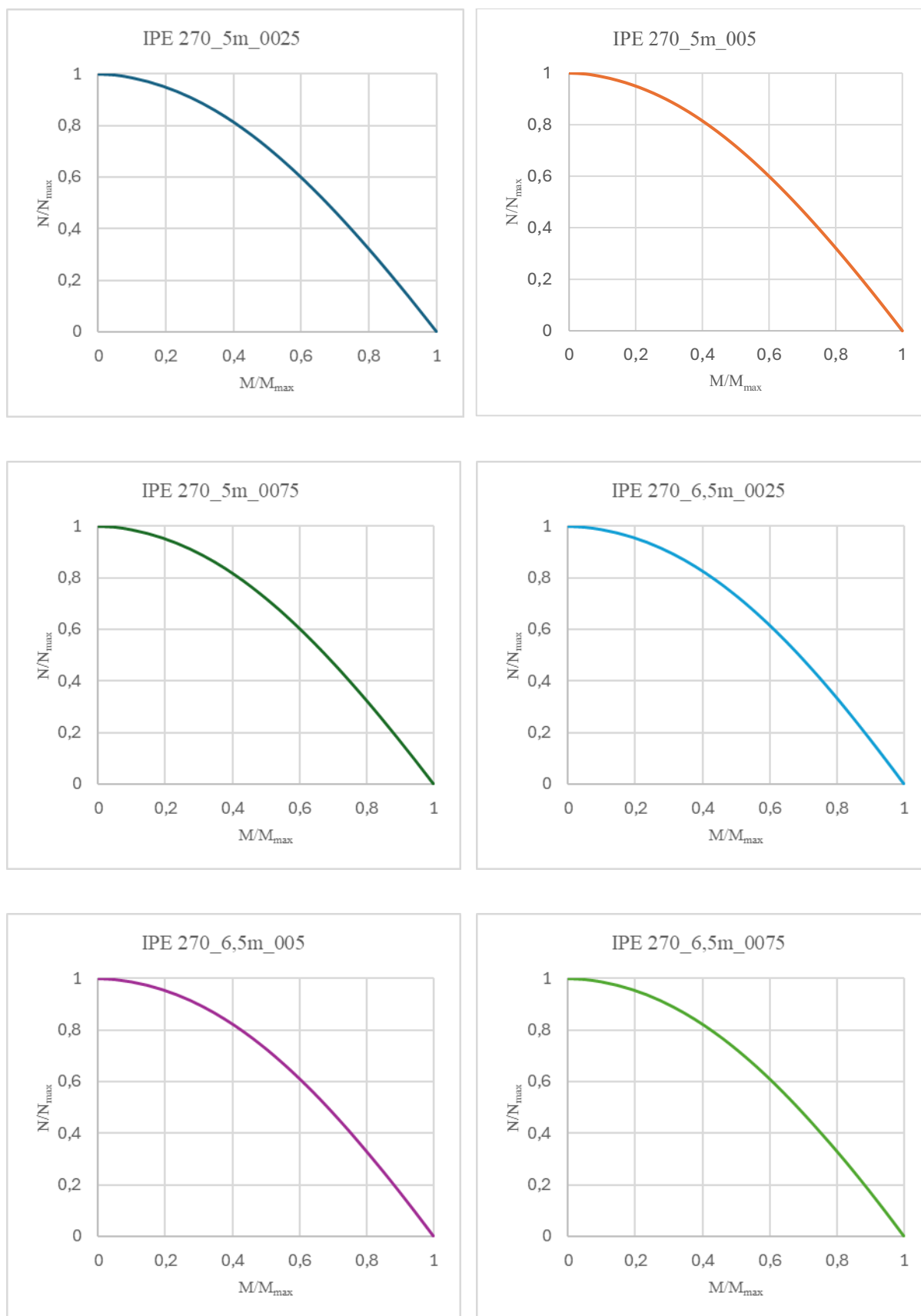
Ukupno su provedene 2 GMNIA analize za pronalazak otpornosti na uzdužnu silu i moment savijanja, 39 GMNIA analiza sa različitim kombinacijama maksimalne uzdužne sile i momenta savijanja te 1 LBA analiza, što ukupno daje 42 numeričke analize za formiranje M – N interakcijske krivulje jednog elementa. Promatrano je 30 elemenata što ukupno daje 1260 provedenih numeričkih analiza. Za dobiti rezultate svih analiza bilo je potrebno oko 25 dana, a prosječno su se simulirale 16 sati dnevno. Veličina rezultata svih analiza iznosi 2686,6 gigabajta. Na slikama B.10 – B.14 prikazane su krivulje svih promatranih elemenata.



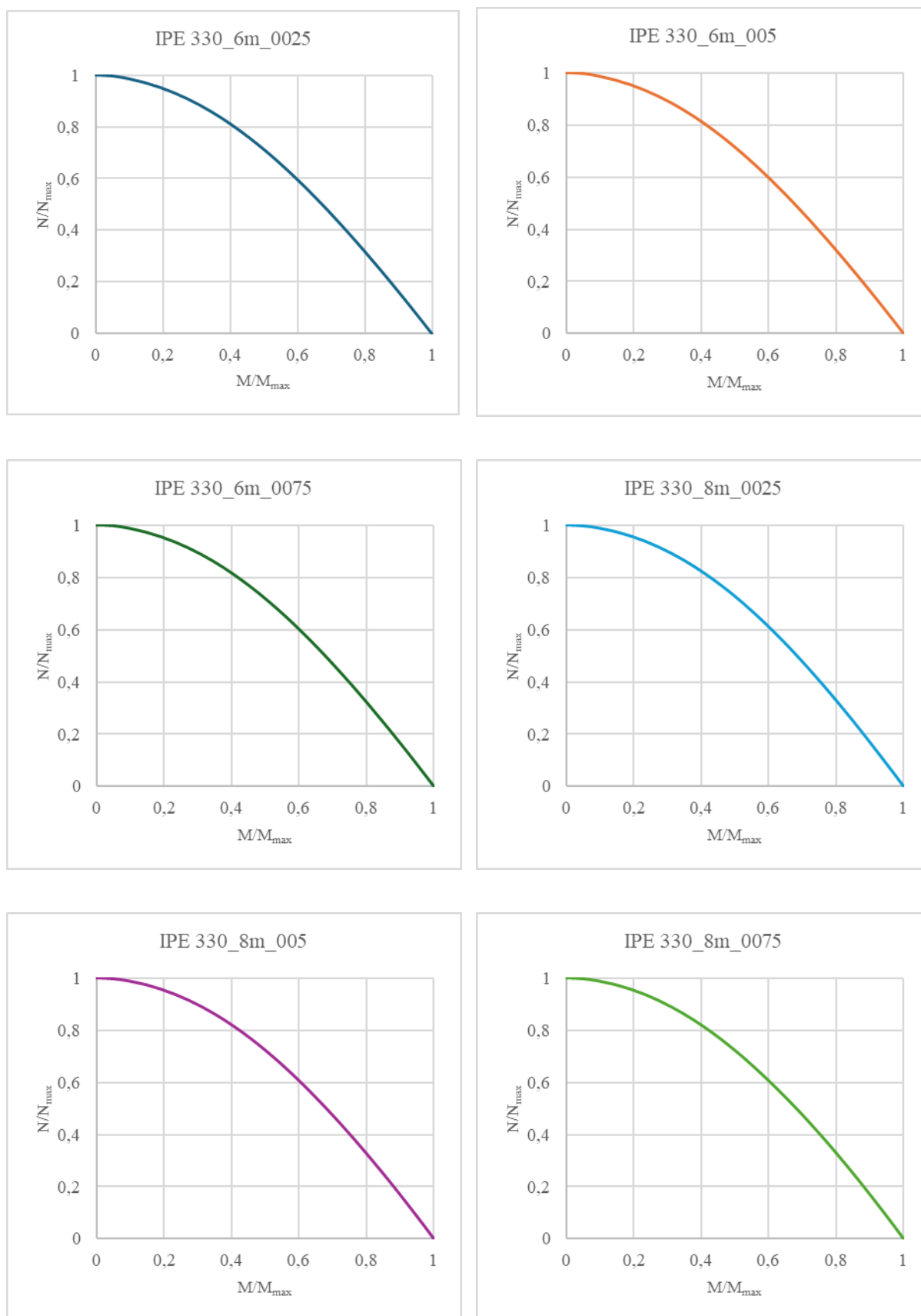
Slika B.10 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 180



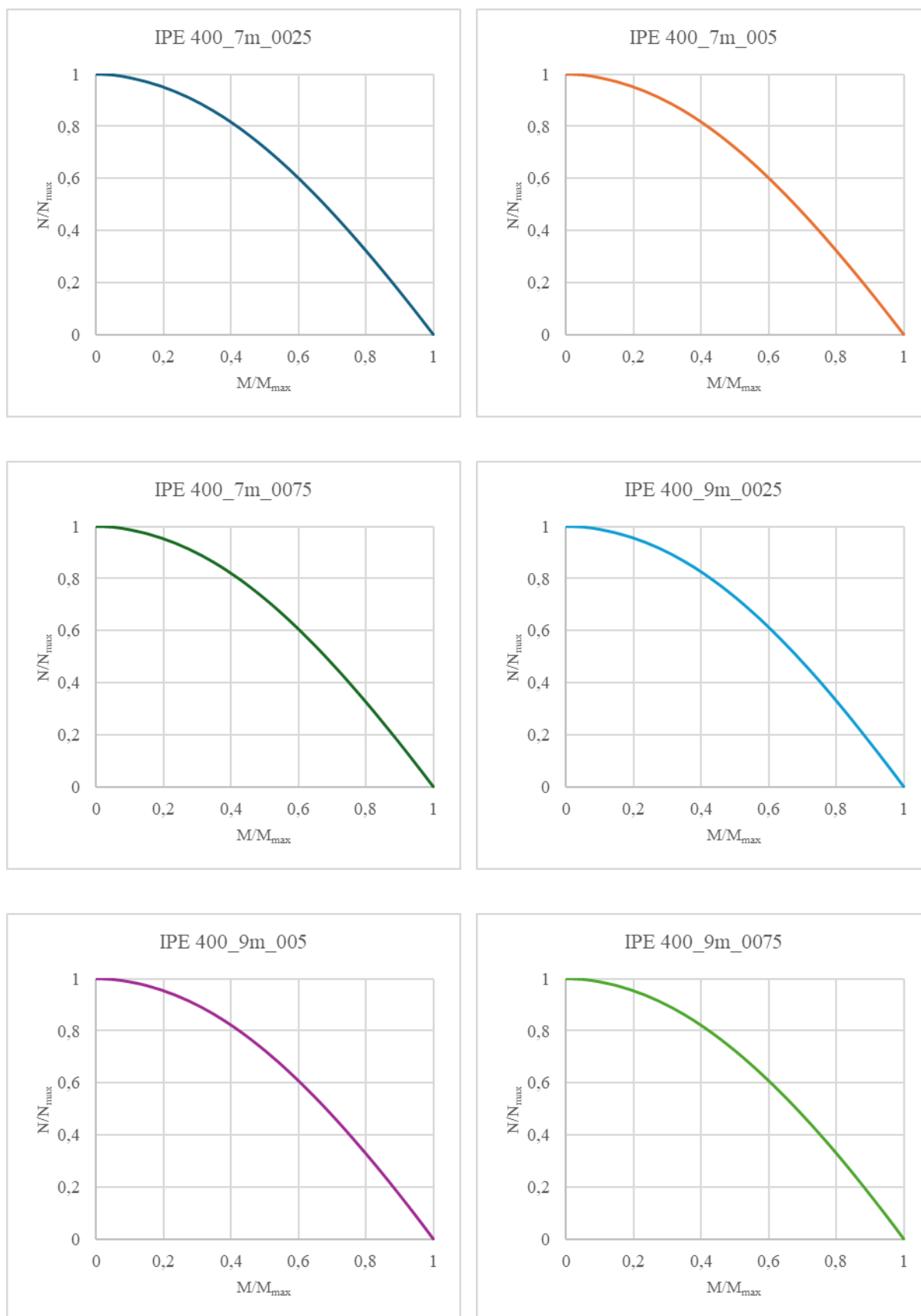
Slika B.11 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 220



Slika B.12 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 270



Slika B.13 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 330



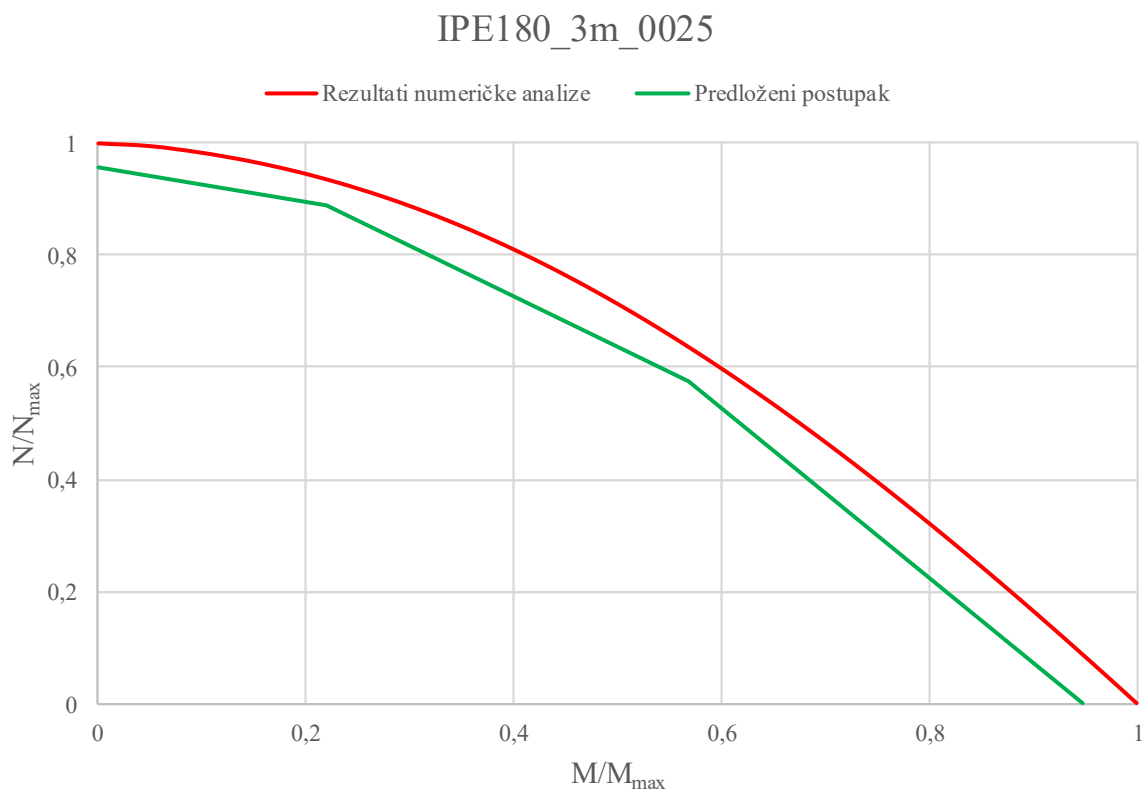
Slika B.14 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 400

Prilog C: Usporedba predloženog postupka i numeričke analize

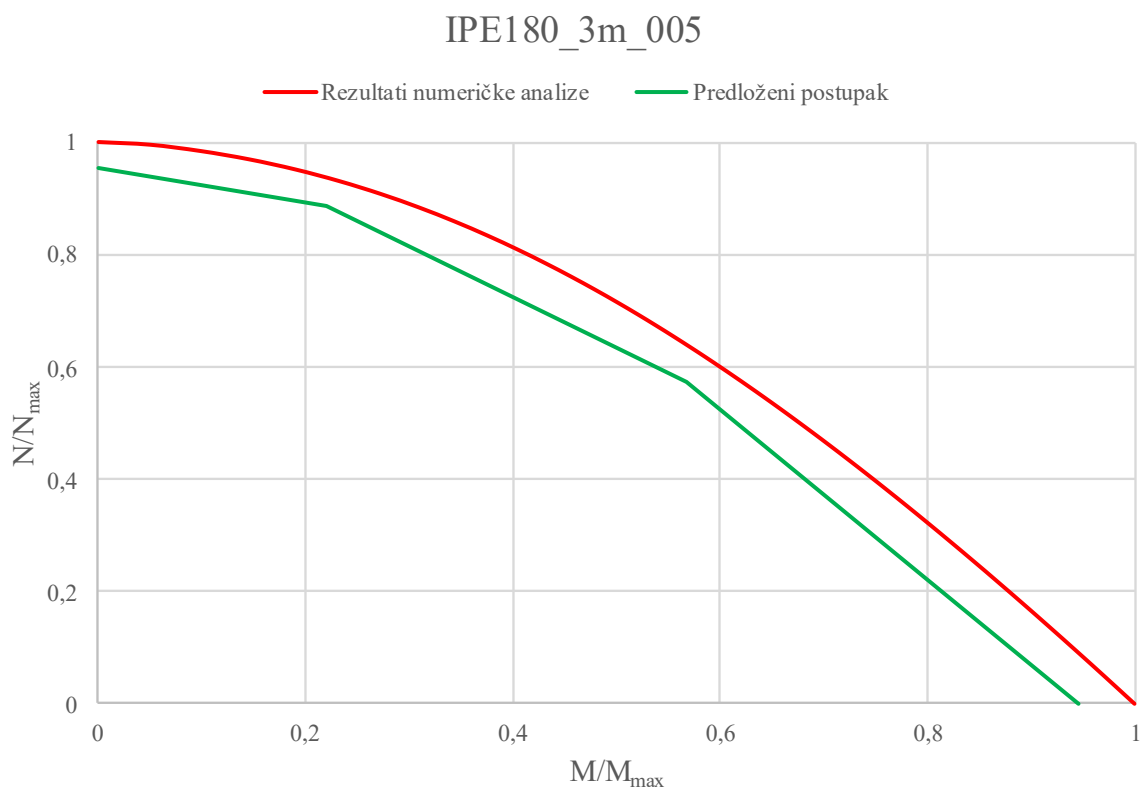
U ovom prilogu dane su usporedbe krivulja svih 30 promatranih elemenata dobivenih numeričkom analizom u odnosu na krivulje dobivene predloženim postupkom proračuna neprizmatičnih elemenata. Svaka krivulja je normalizirana, odnosno na osima su prikazane vrijednosti omjera između djelujuće sile i maksimalne uzdužne sile ($N/N_{\max}$) te momenta savijanja ($M/M_{\max}$). Kao $N_{\max}$ i $M_{\max}$ uzete su otpornosti dobivene numeričkom analizom, s obzirom da su te vrijednosti najveće.

Tablica C.1 – Popis i karakteristike promatranih elemenata

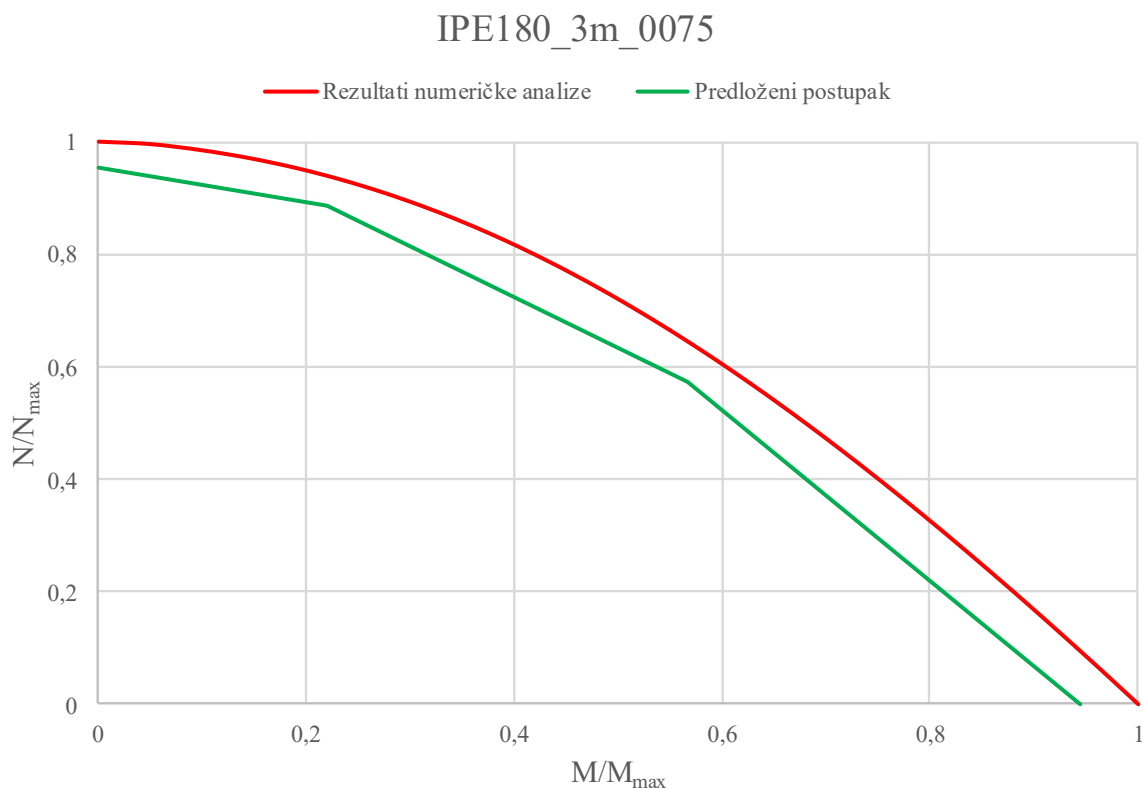
	Profil	Raspon [m]	a _{t.r.}	Naziv elementa
1	IPE 180	3	0,025	IPE180_L3.0m_TR0025
2	IPE 180	3	0,05	IPE180_L3.0m_TR0050
3	IPE 180	3	0,075	IPE180_L3.0m_TR0075
4	IPE 180	4	0,025	IPE180_L4.0m_TR0025
5	IPE 180	4	0,05	IPE180_L4.0m_TR0050
6	IPE 180	4	0,075	IPE180_L4.0m_TR0075
7	IPE 220	4	0,025	IPE220_L4.0m_TR0025
8	IPE 220	4	0,05	IPE220_L4.0m_TR0050
9	IPE 220	4	0,075	IPE220_L4.0m_TR0075
10	IPE 220	5,5	0,025	IPE220_L5.5m_TR0025
11	IPE 220	5,5	0,05	IPE220_L5.5m_TR0050
12	IPE 220	5,5	0,075	IPE220_L5.5m_TR0075
13	IPE 270	5	0,025	IPE270_L5.0m_TR0025
14	IPE 270	5	0,05	IPE270_L5.0m_TR0050
15	IPE 270	5	0,075	IPE270_L5.0m_TR0075
16	IPE 270	6,5	0,025	IPE270_L6.5m_TR0025
17	IPE 270	6,5	0,05	IPE270_L6.5m_TR0050
18	IPE 270	6,5	0,075	IPE270_L6.5m_TR0075
19	IPE 330	6	0,025	IPE330_L6.0m_TR0025
20	IPE 330	6	0,05	IPE330_L6.0m_TR0050
21	IPE 330	6	0,075	IPE330_L6.0m_TR0075
22	IPE 330	8	0,025	IPE330_L8.0m_TR0025
23	IPE 330	8	0,05	IPE330_L8.0m_TR0050
24	IPE 330	8	0,075	IPE330_L8.0m_TR0075
25	IPE 400	7	0,025	IPE400_L7.0m_TR0025
26	IPE 400	7	0,05	IPE400_L7.0m_TR0050
27	IPE 400	7	0,075	IPE400_L7.0m_TR0075
28	IPE 400	9	0,025	IPE400_L9.0m_TR0025
29	IPE 400	9	0,05	IPE400_L9.0m_TR0050
30	IPE 400	9	0,075	IPE400_L9.0m_TR0075



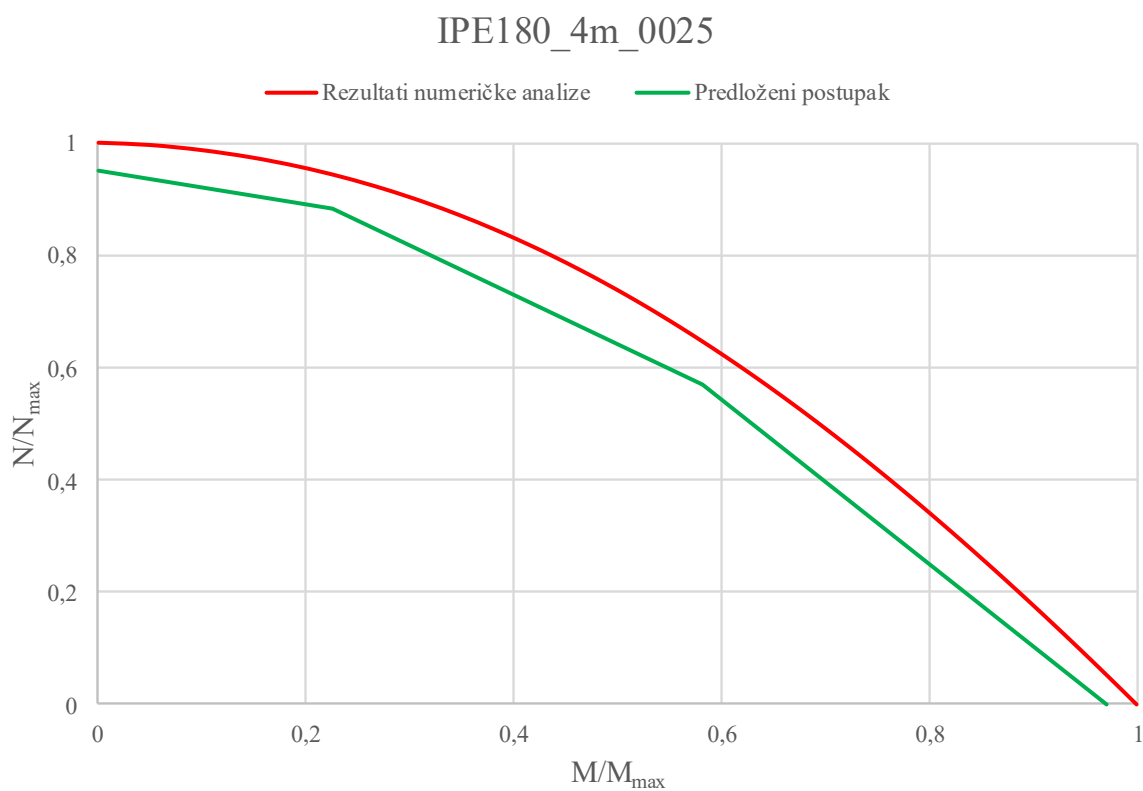
Slika C.1 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 1 iz tablice C1



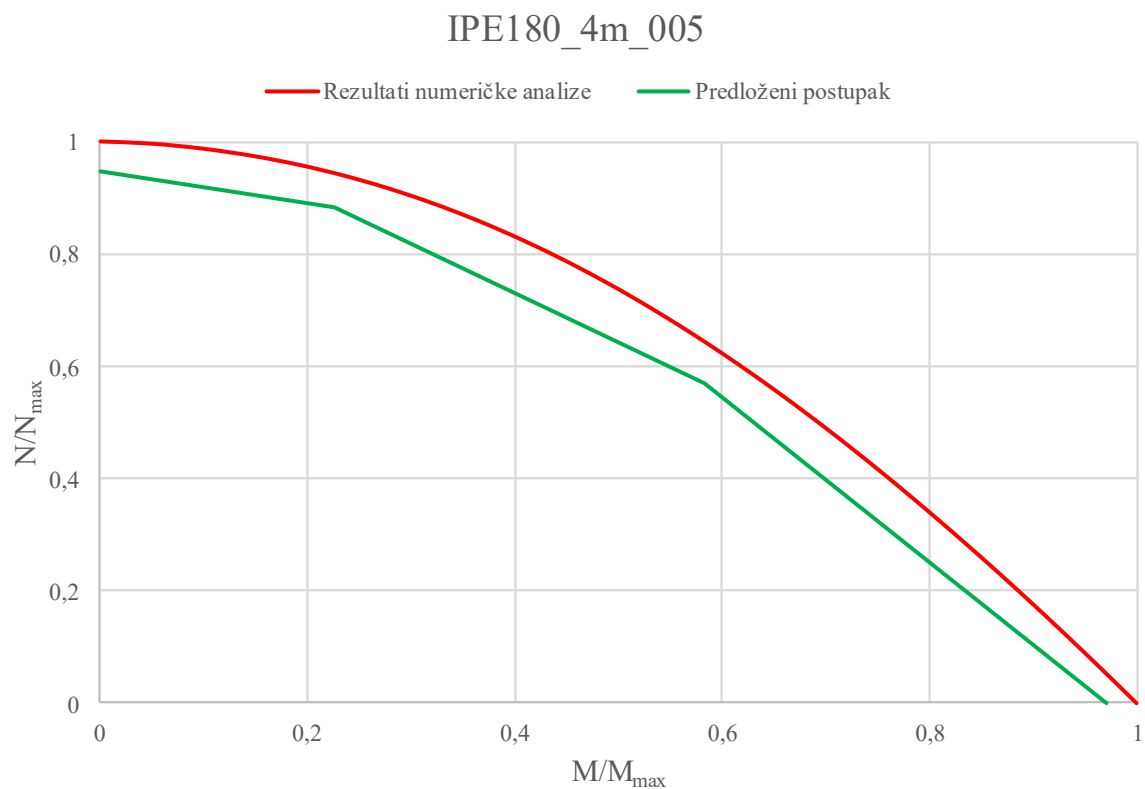
Slika C.2 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 2 iz tablice C1



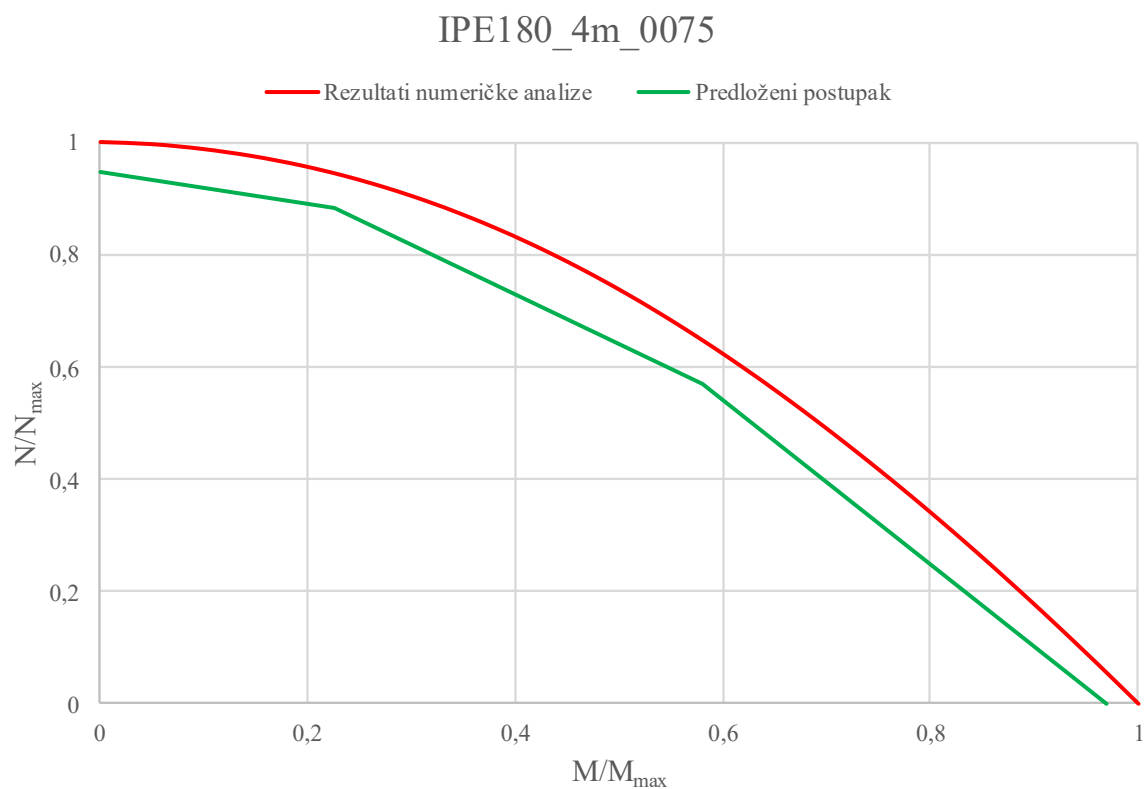
Slika C.3 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 3 iz tablice CI



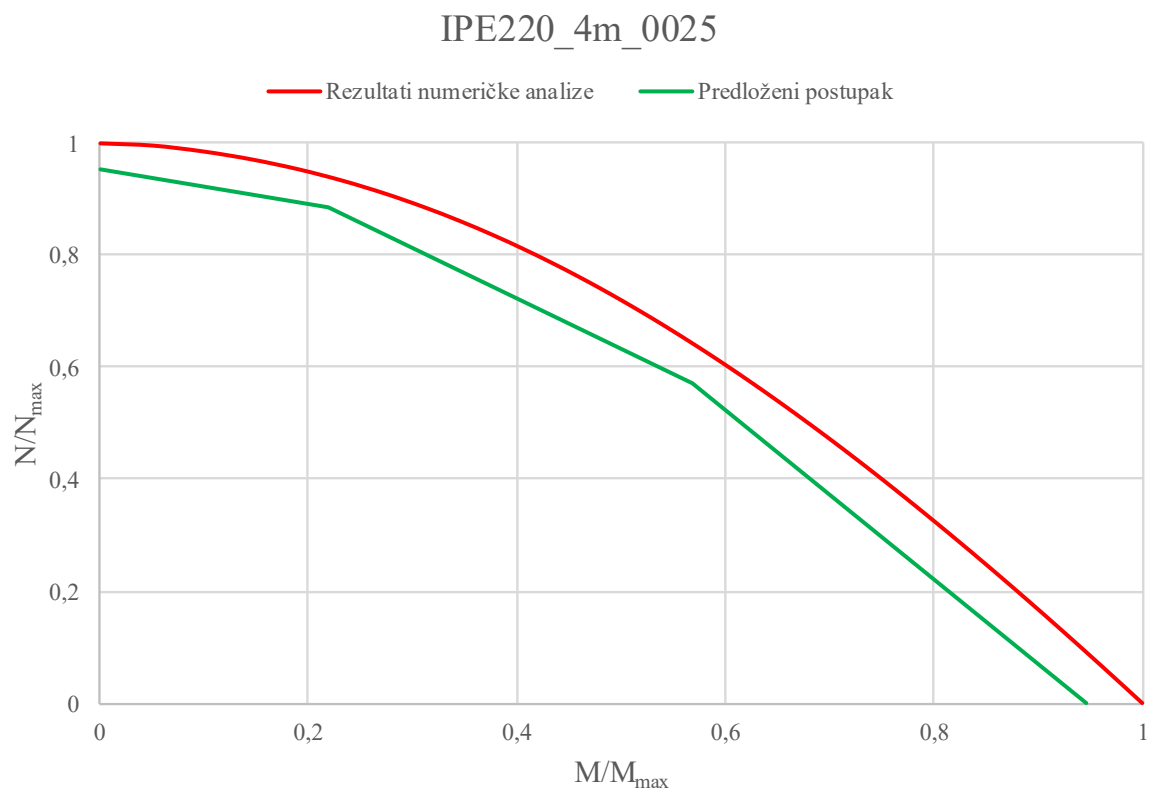
Slika C.4 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 4 iz tablice CI



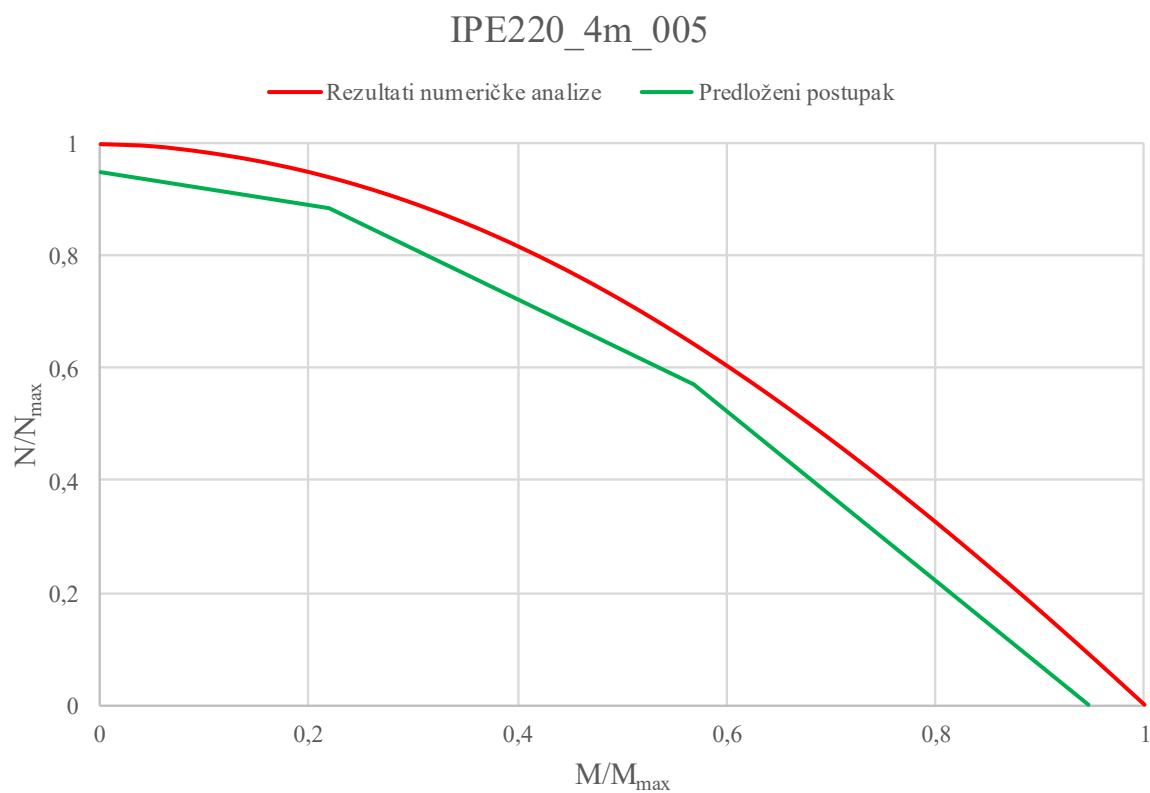
Slika C.5 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 5 iz tablice C1



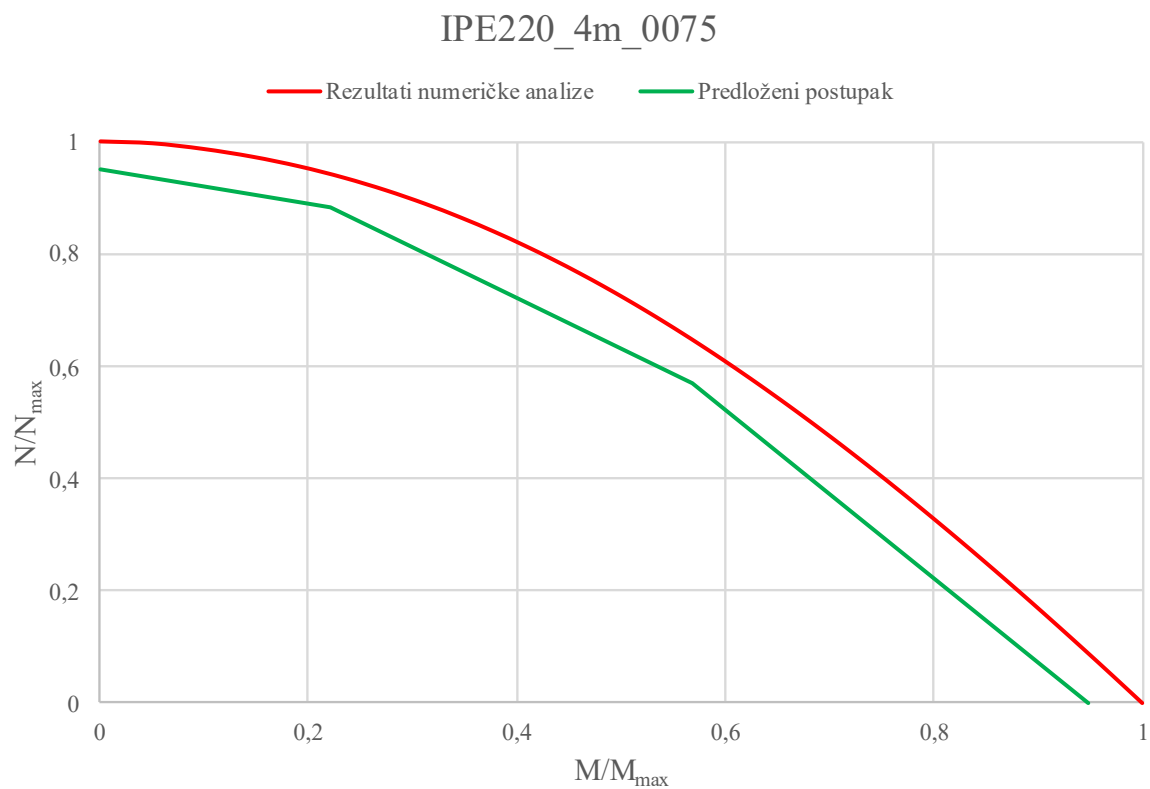
Slika C.6 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 6 iz tablice C1



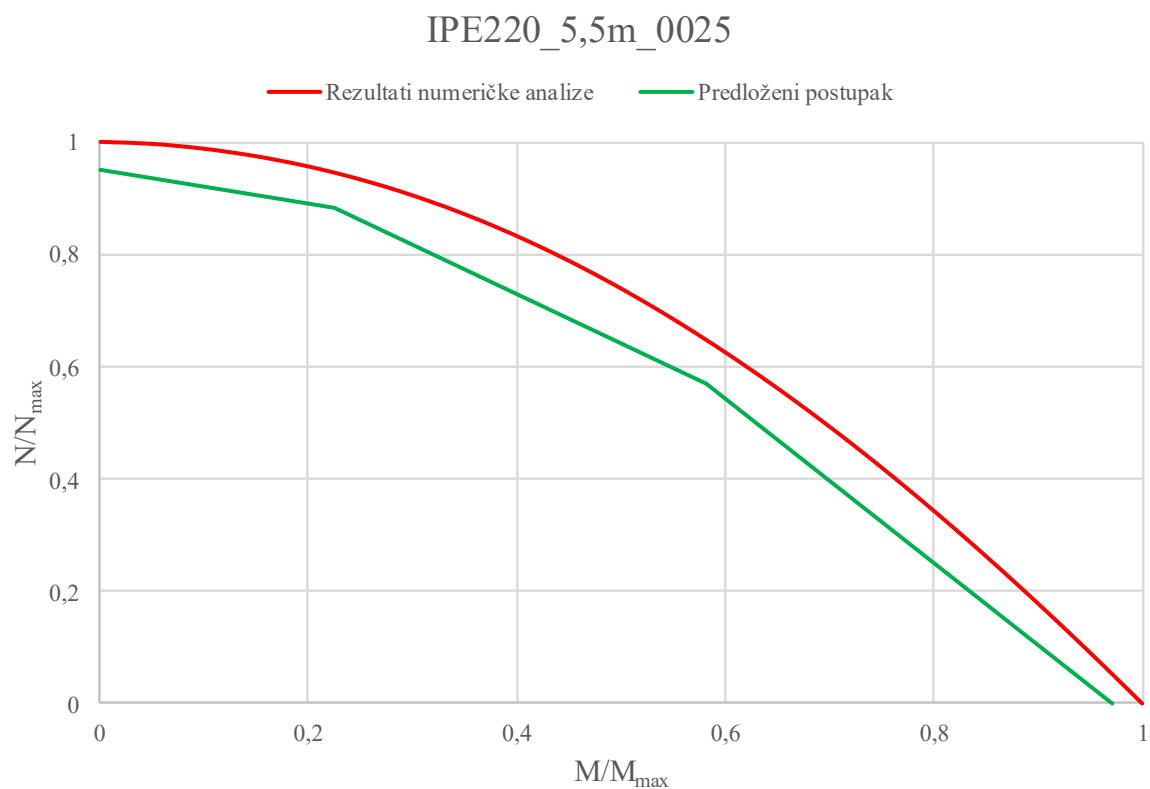
Slika C.7 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 7 iz tablice C1



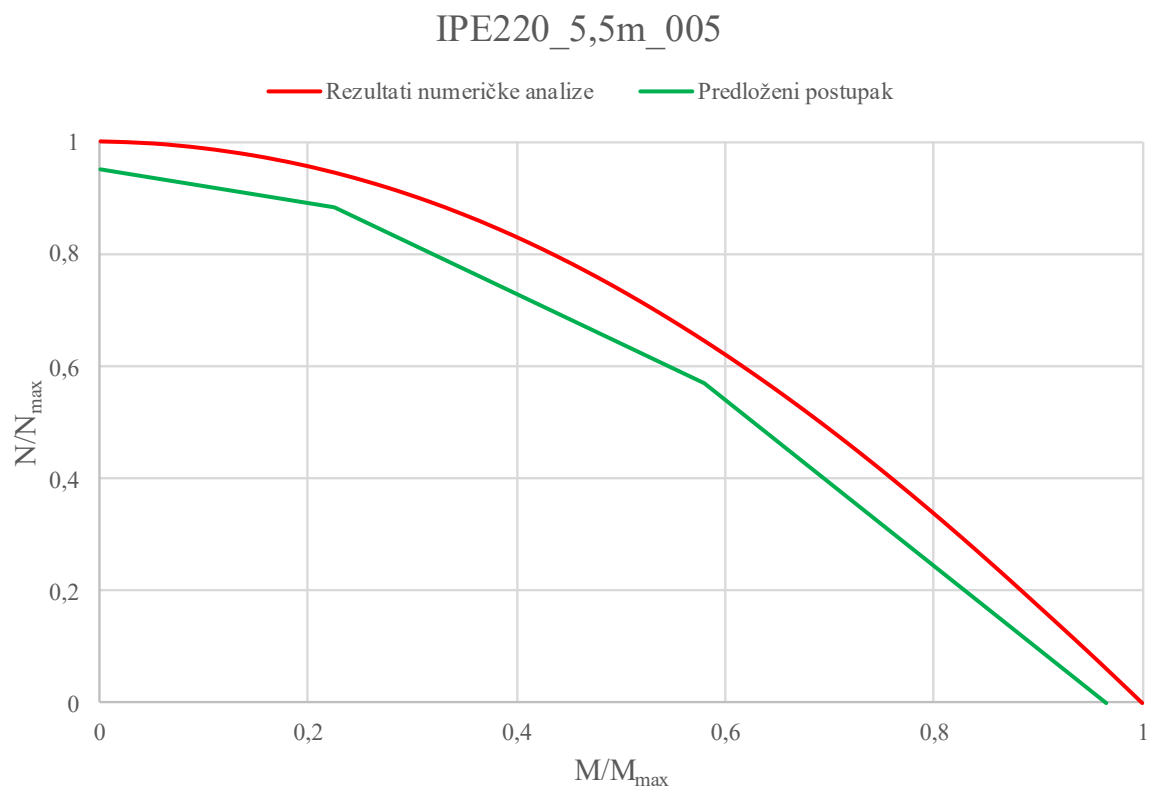
Slika C.8 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 8 iz tablice C1



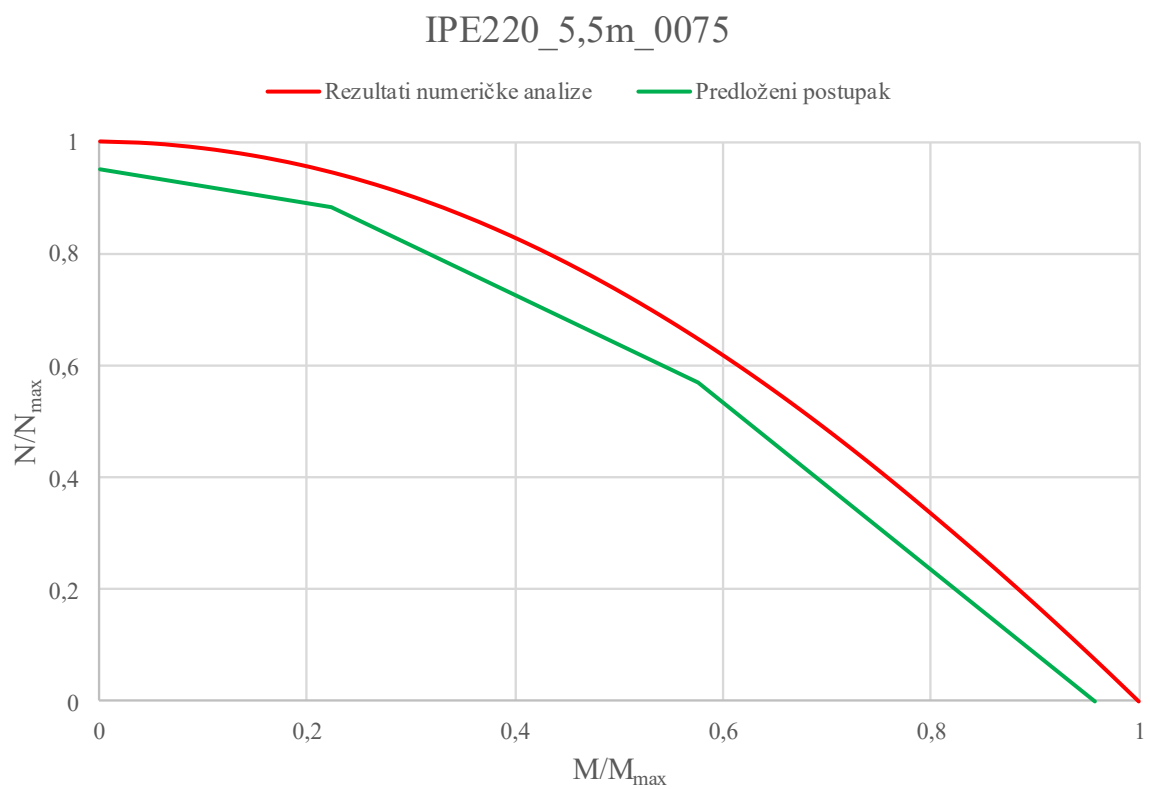
Slika C.9 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 9 iz tablice C1



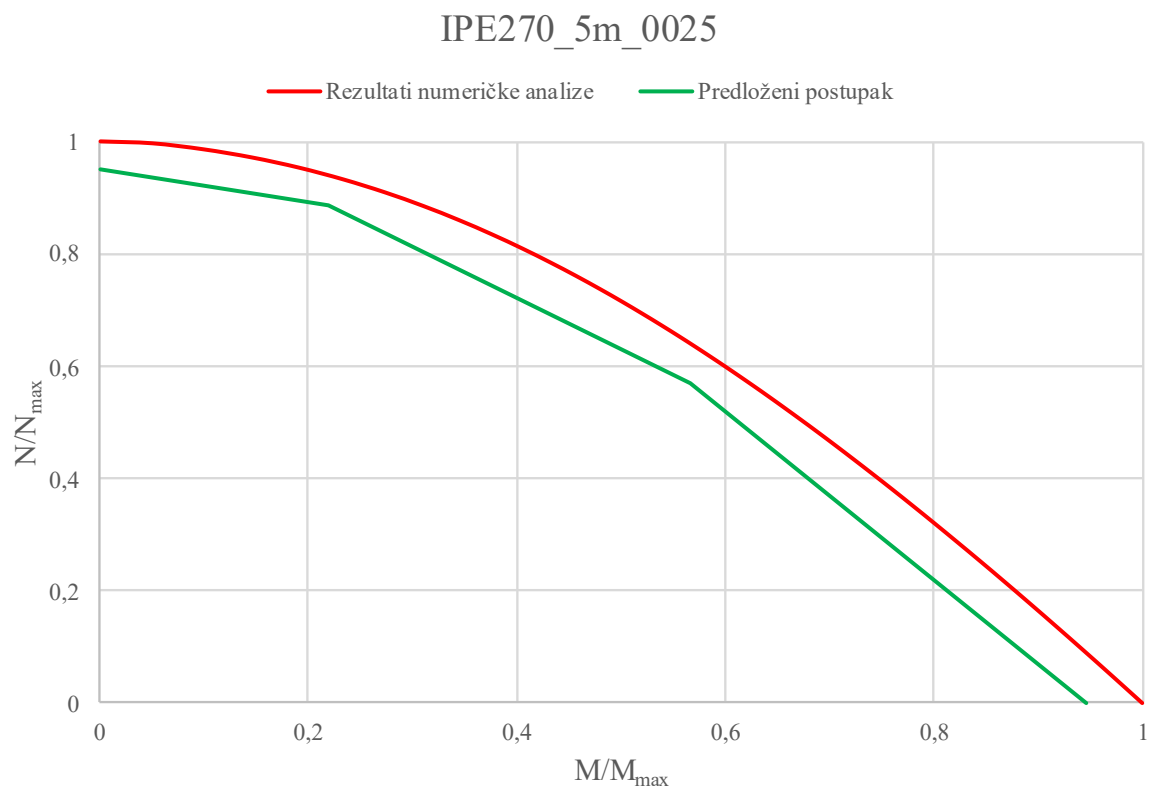
Slika C.10 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 10 iz tablice C1



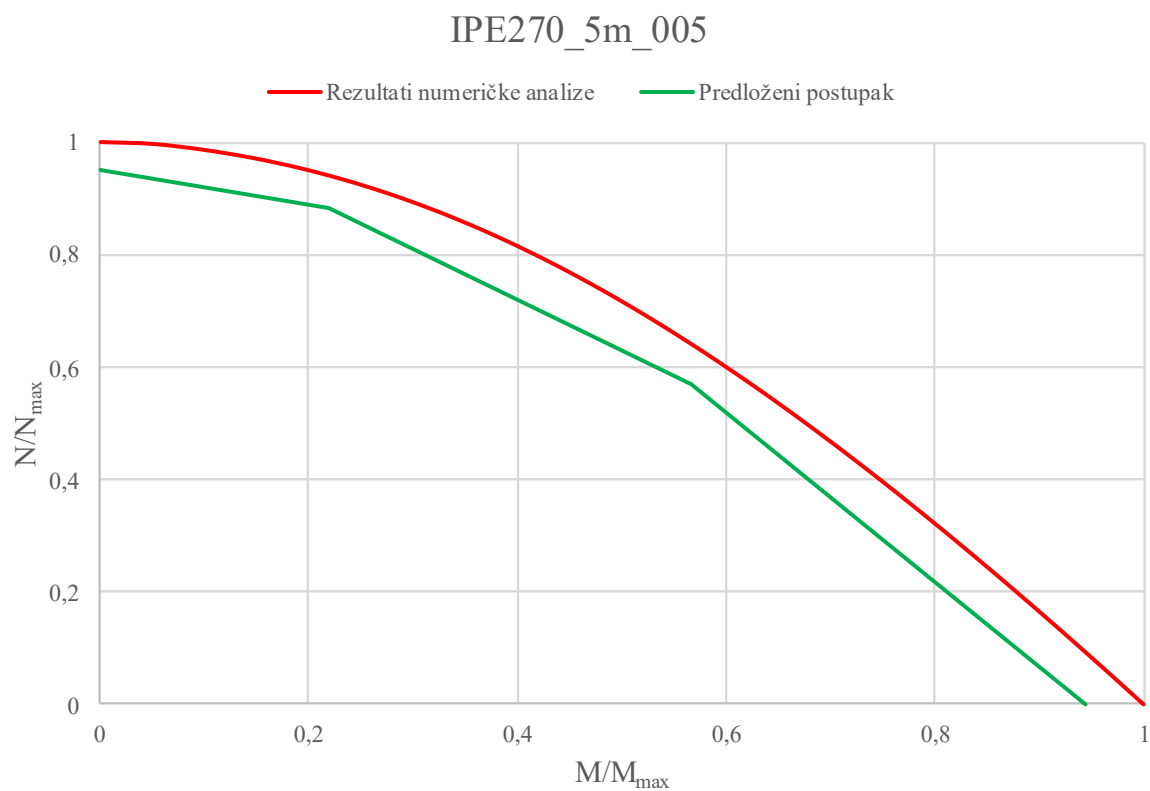
Slika C.11 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 11 iz tablice C1



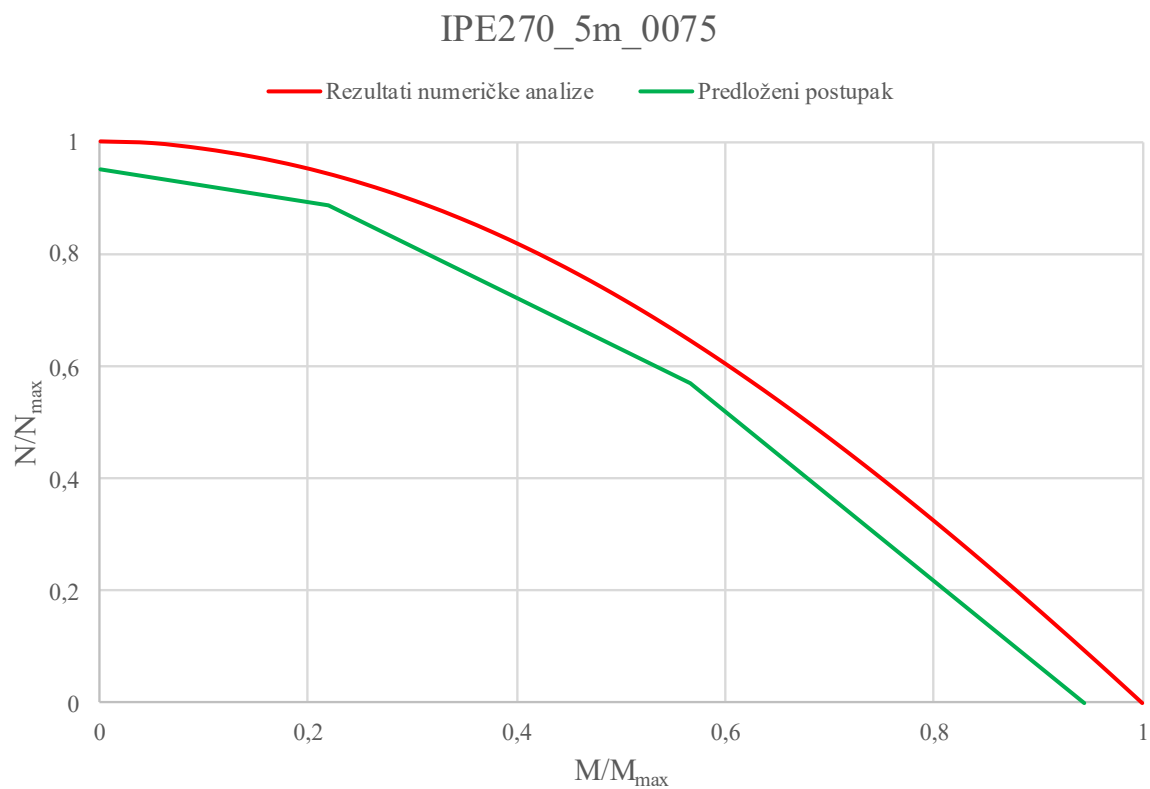
Slika C.12 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 12 iz tablice C1



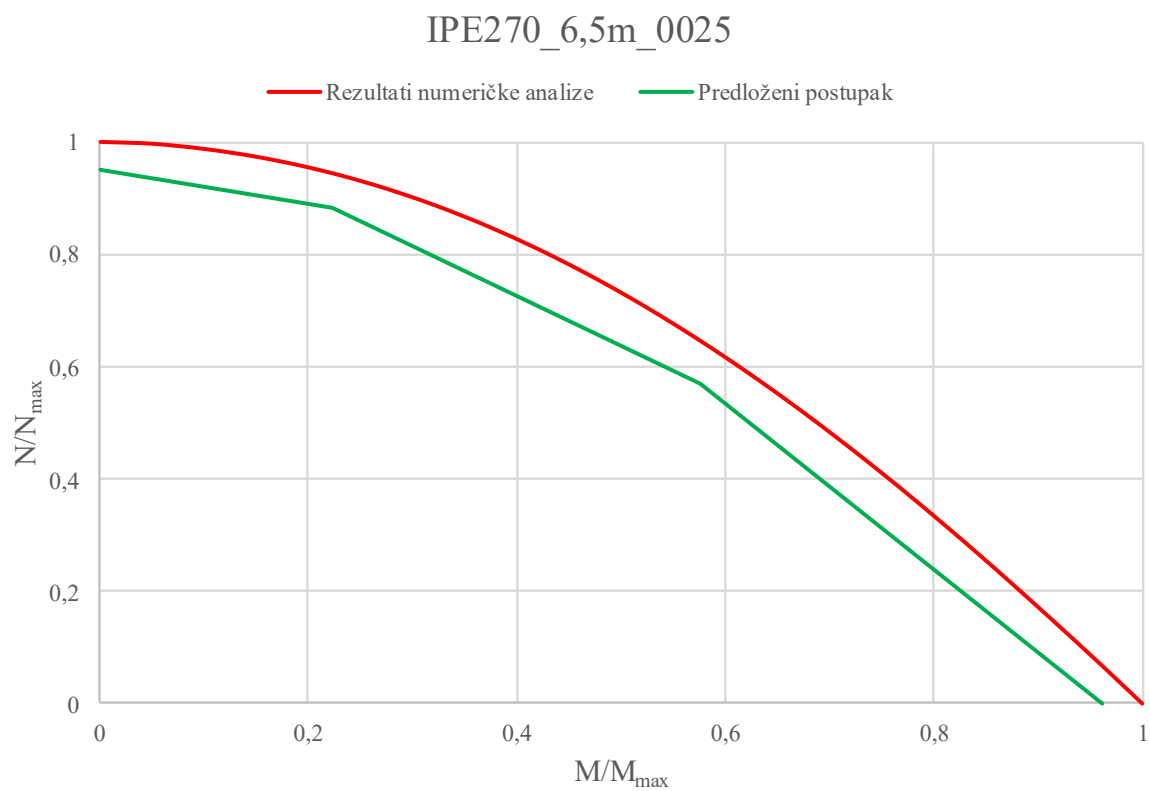
Slika C.13 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 13 iz tablice C1



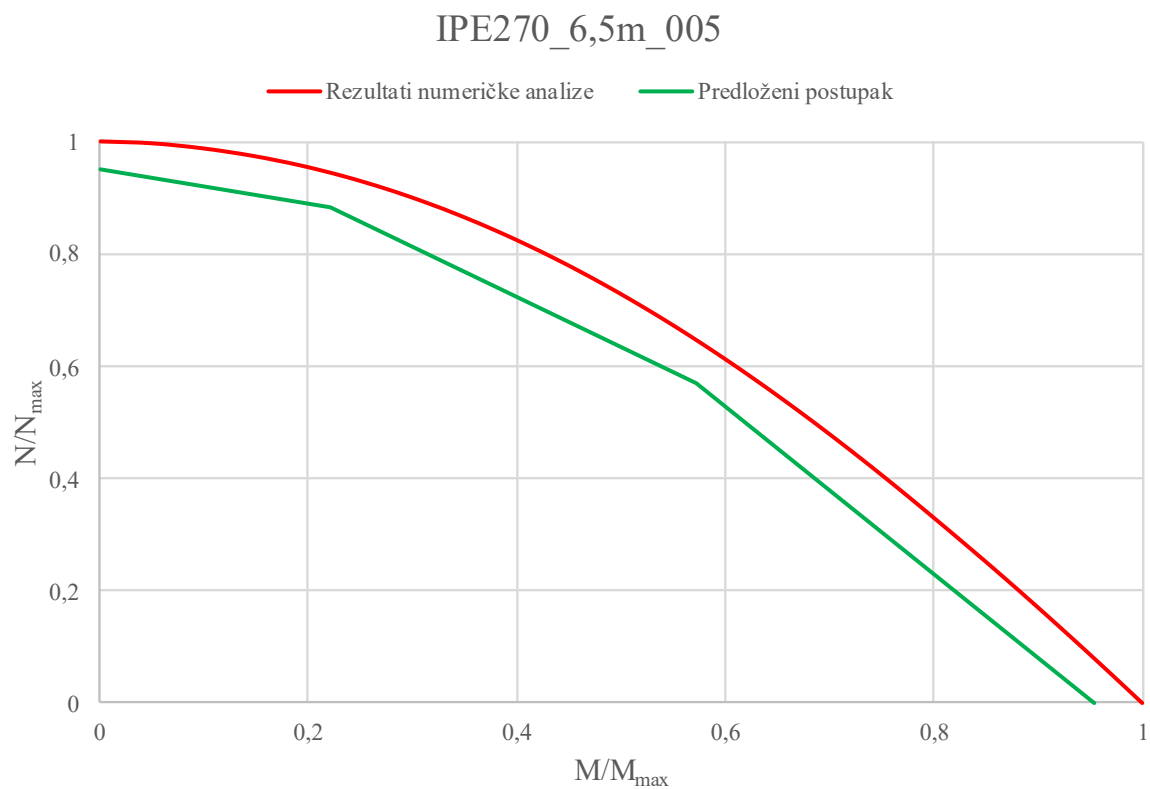
Slika C.14 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 14 iz tablice C1



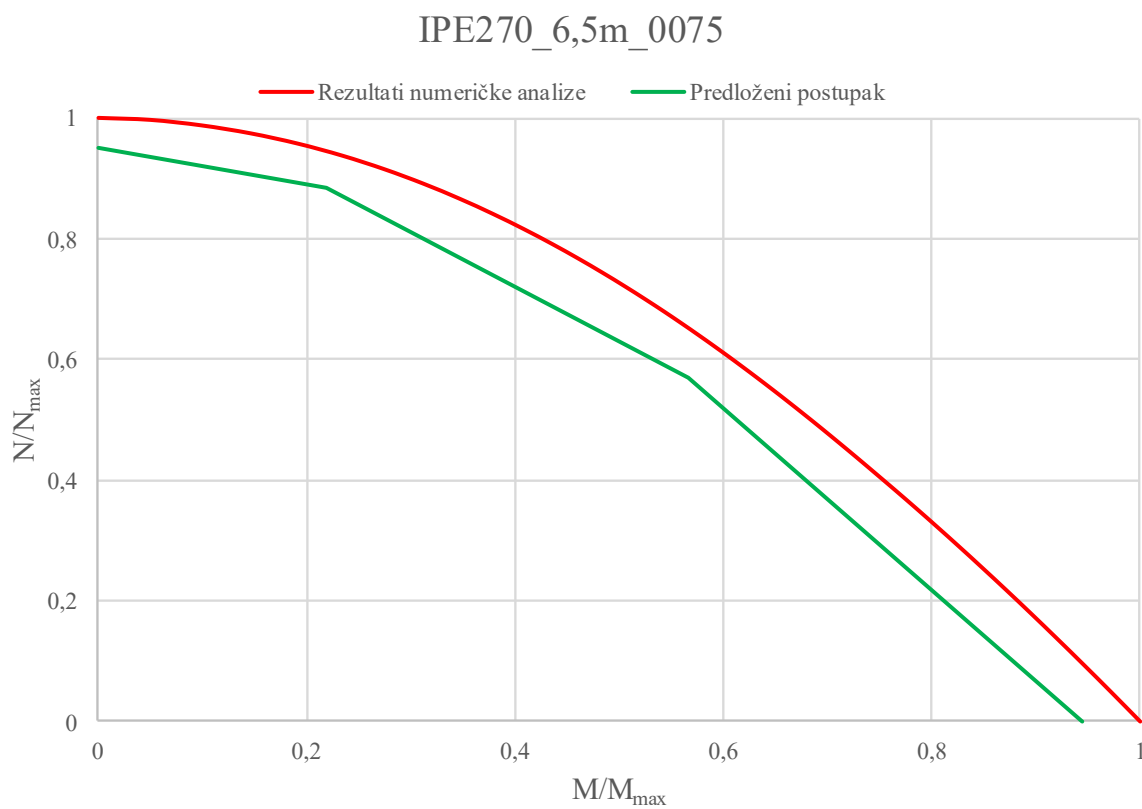
Slika C.15 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 15 iz tablice C1



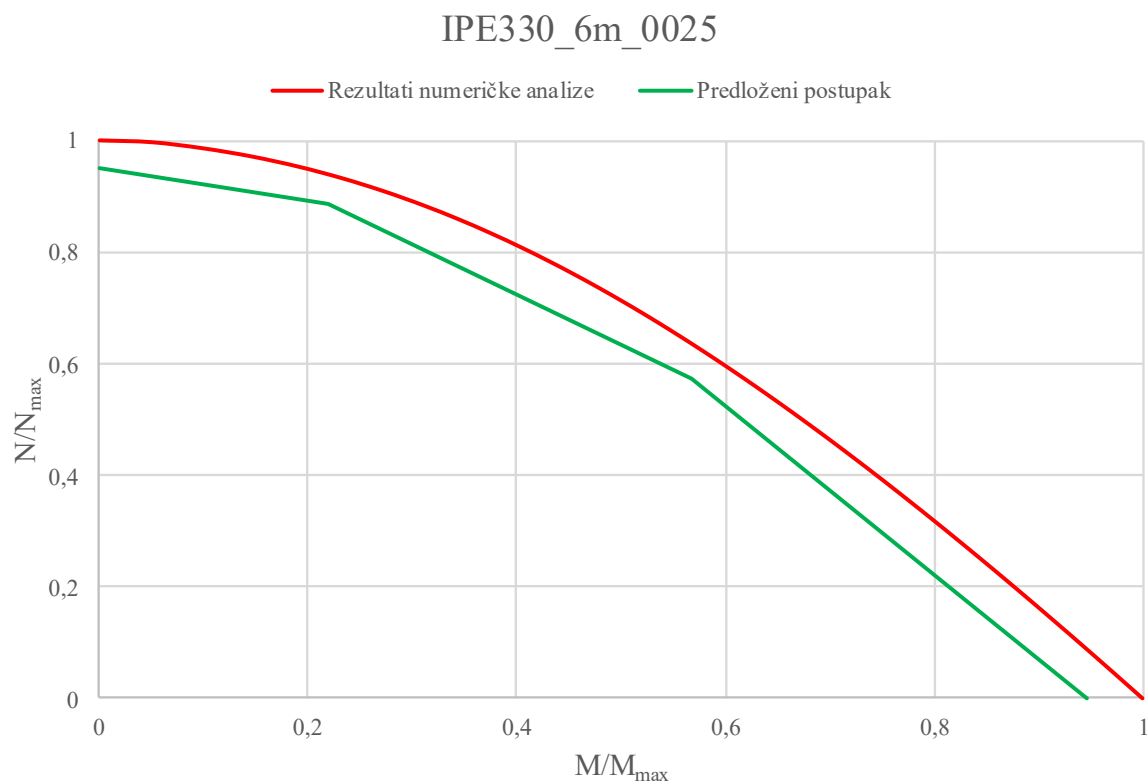
Slika C.16 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 16 iz tablice C1



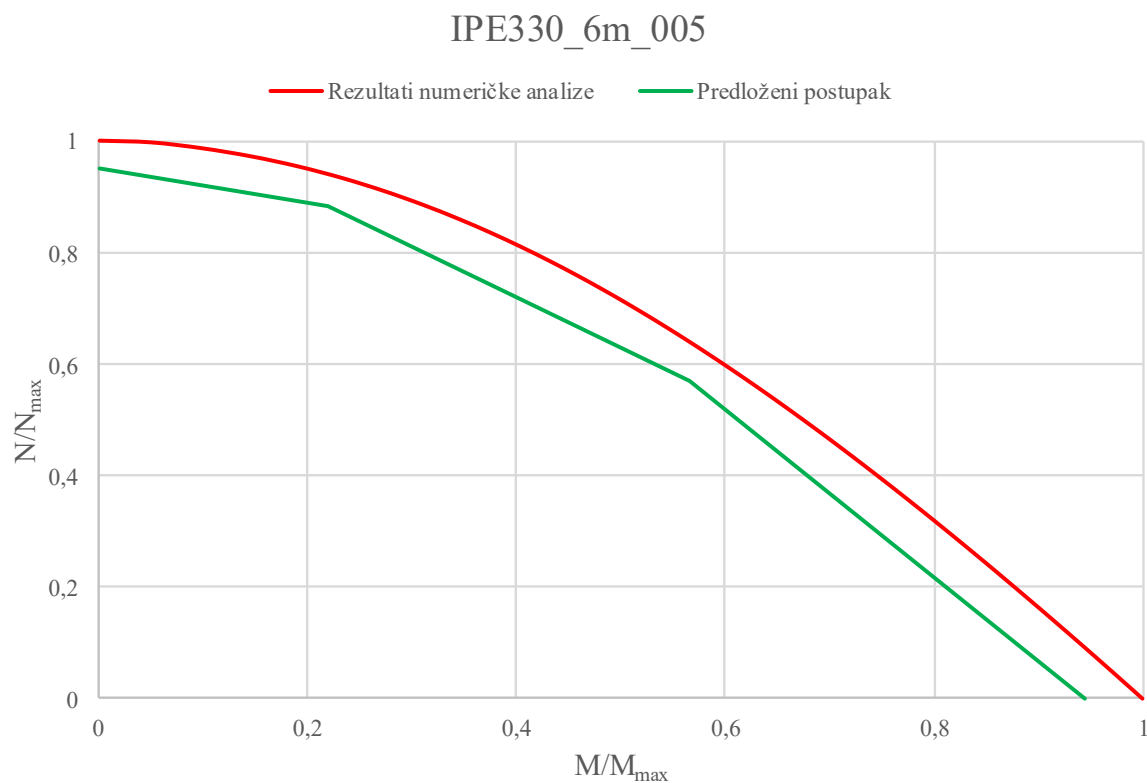
Slika C.17 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 17 iz tablice C1



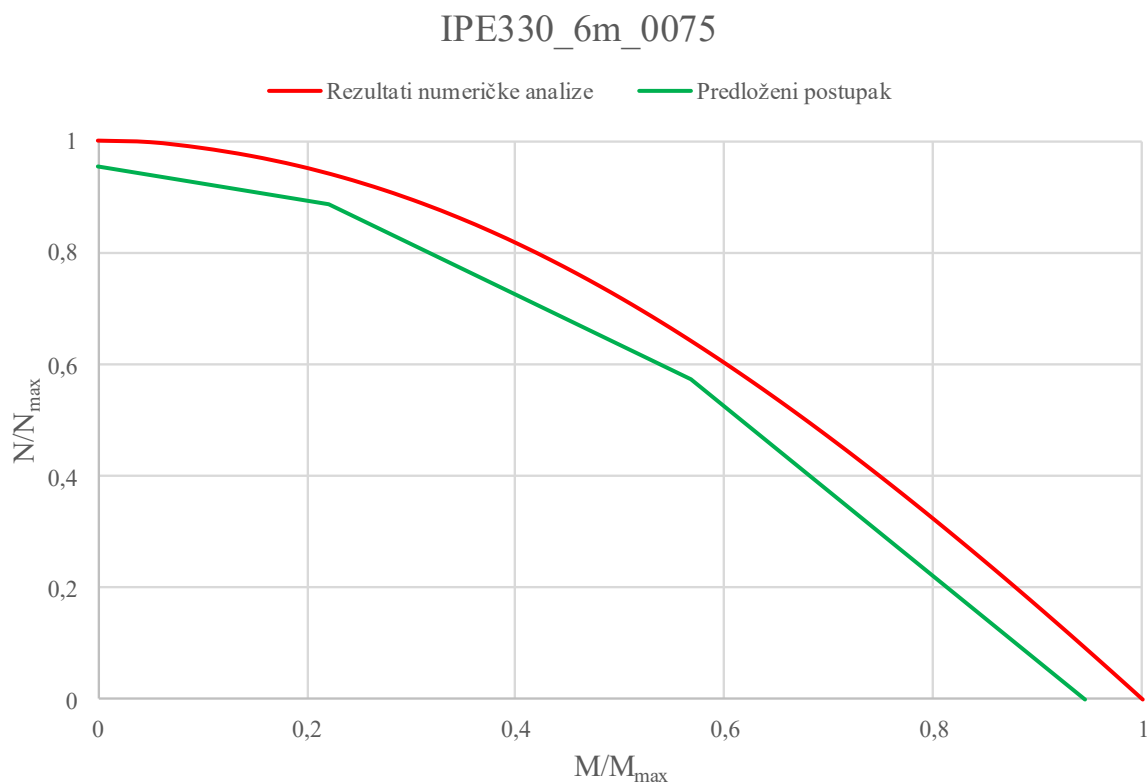
Slika C.18 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 18 iz tablice C1



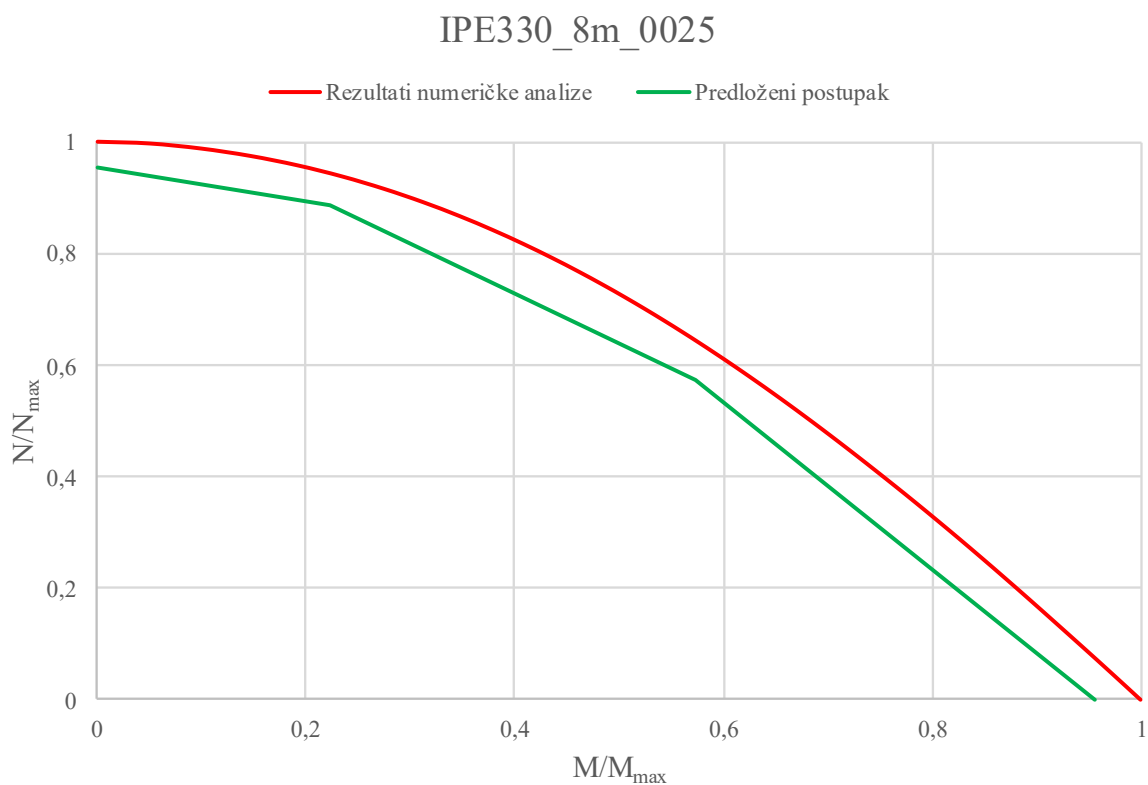
Slika C.19 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 19 iz tablice C1



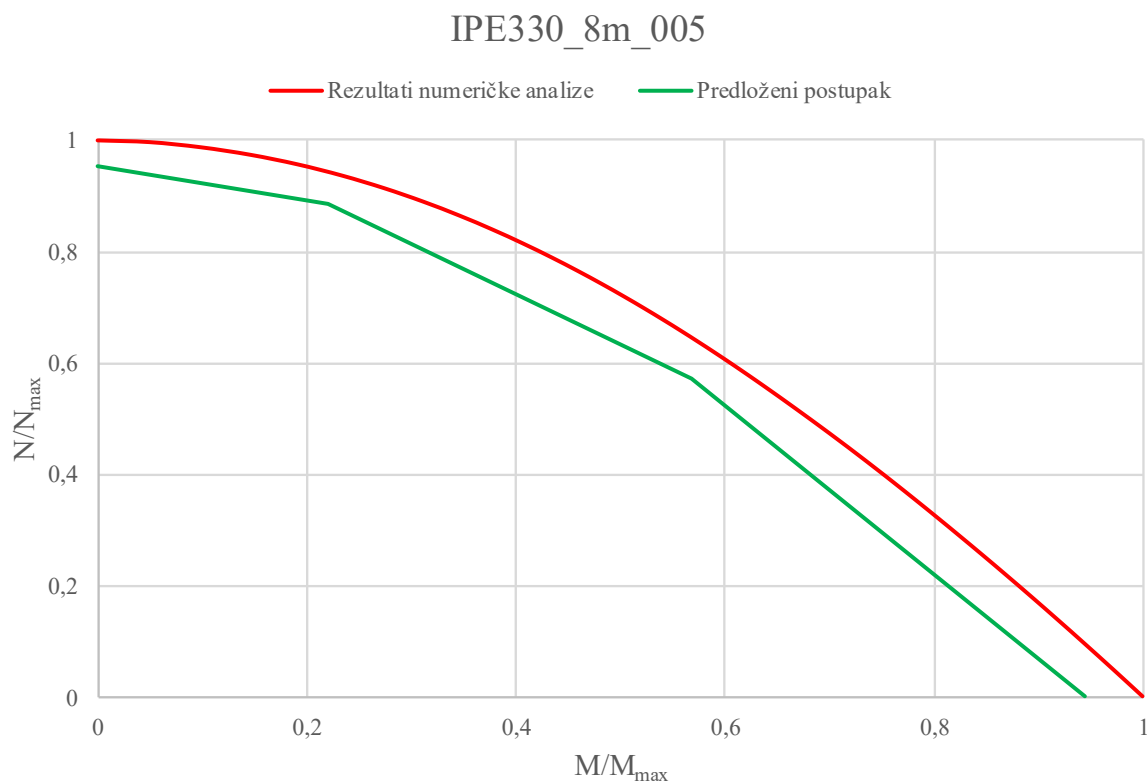
Slika C.20 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 20 iz tablice C1



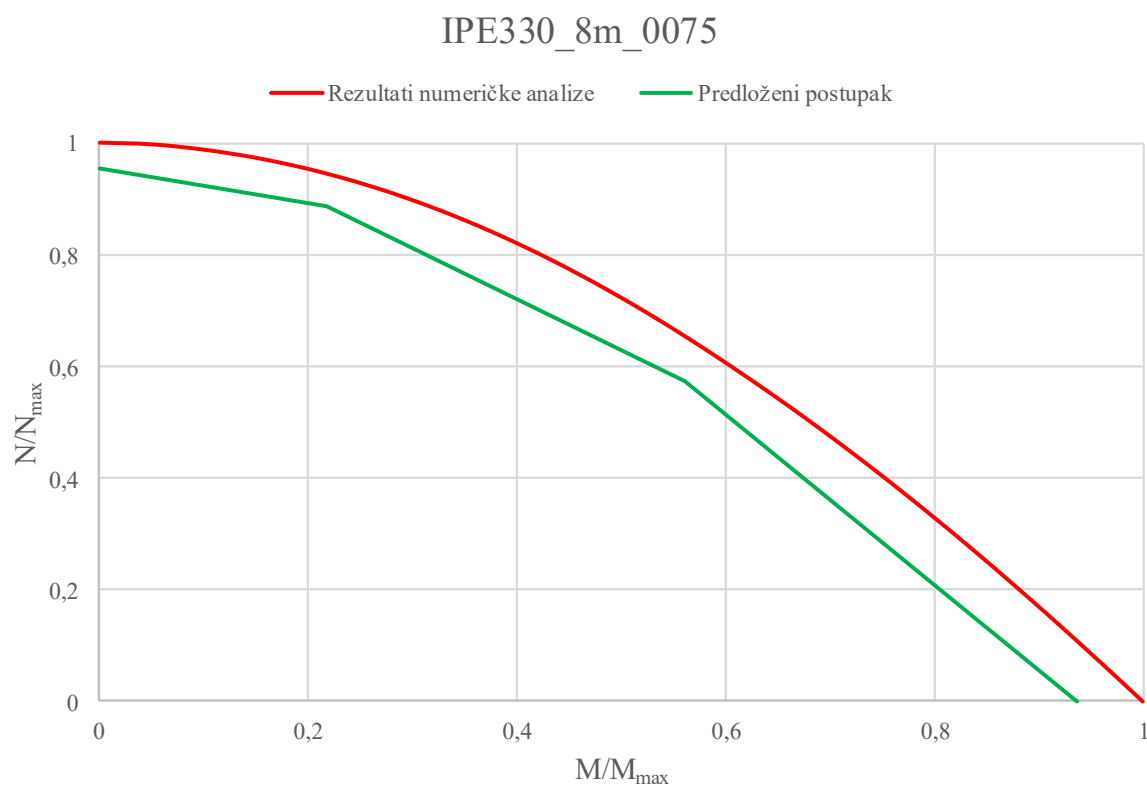
Slika C.21 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 21 iz tablice C1



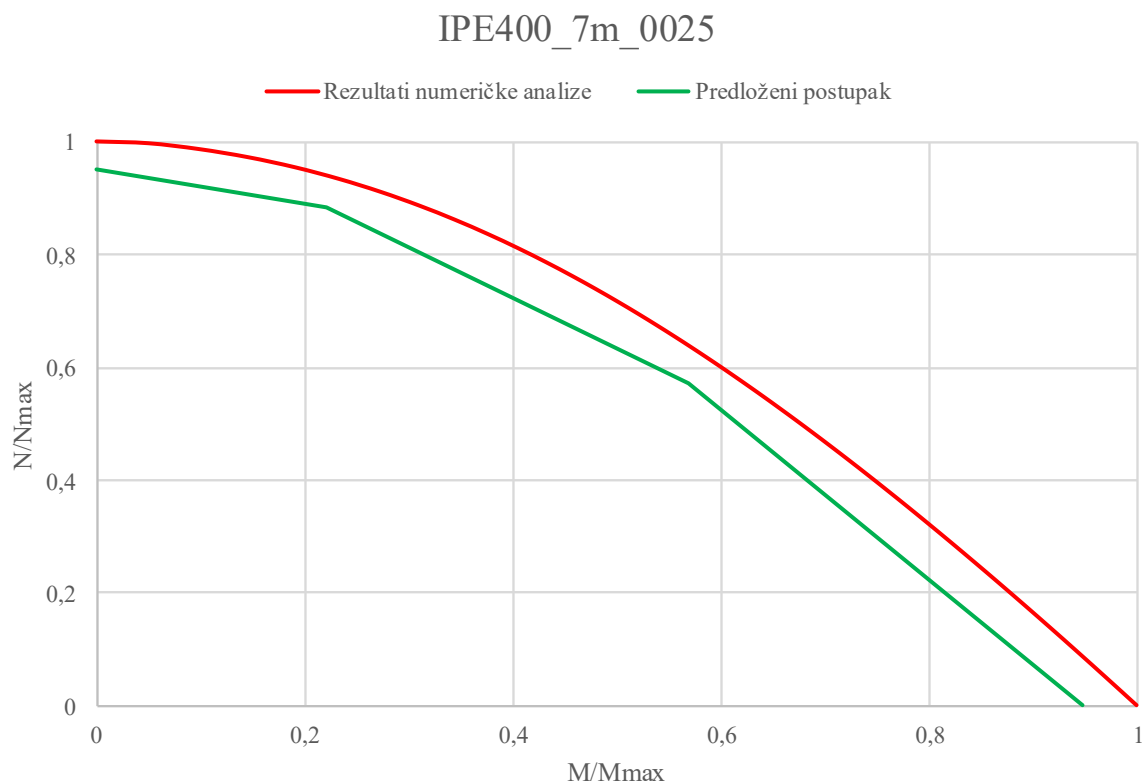
Slika C.22 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 22 iz tablice C1



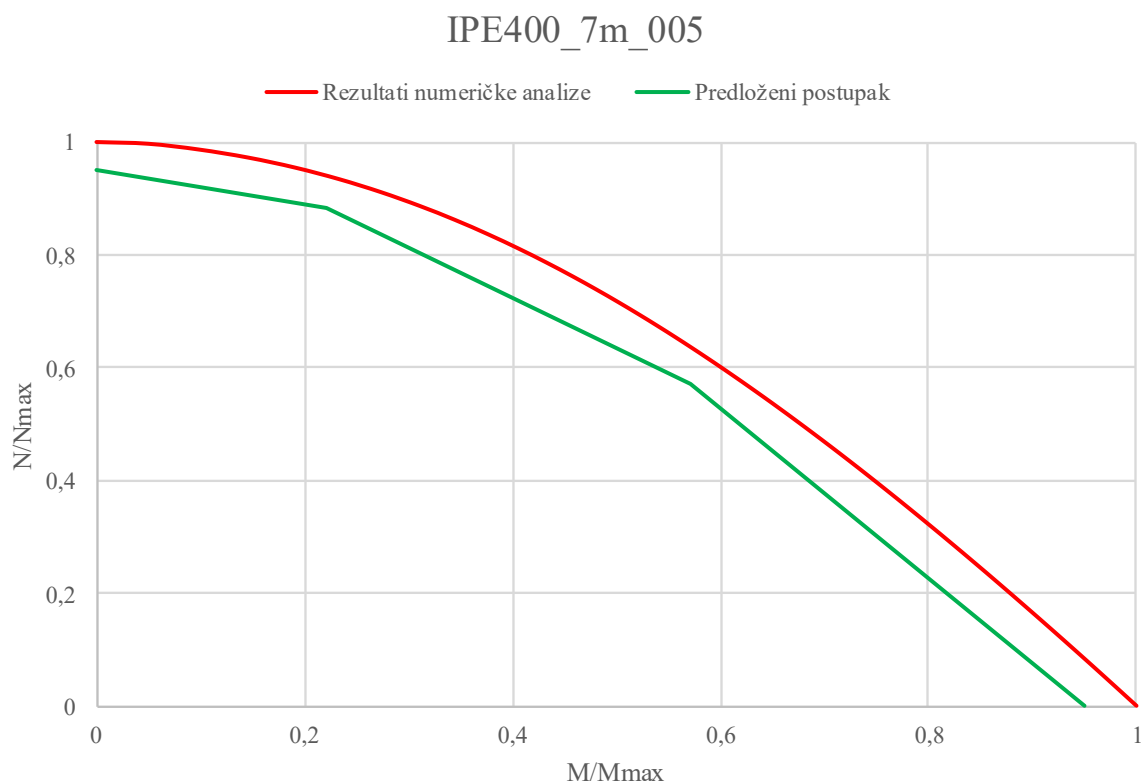
Slika C.23 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 23 iz tablice C1



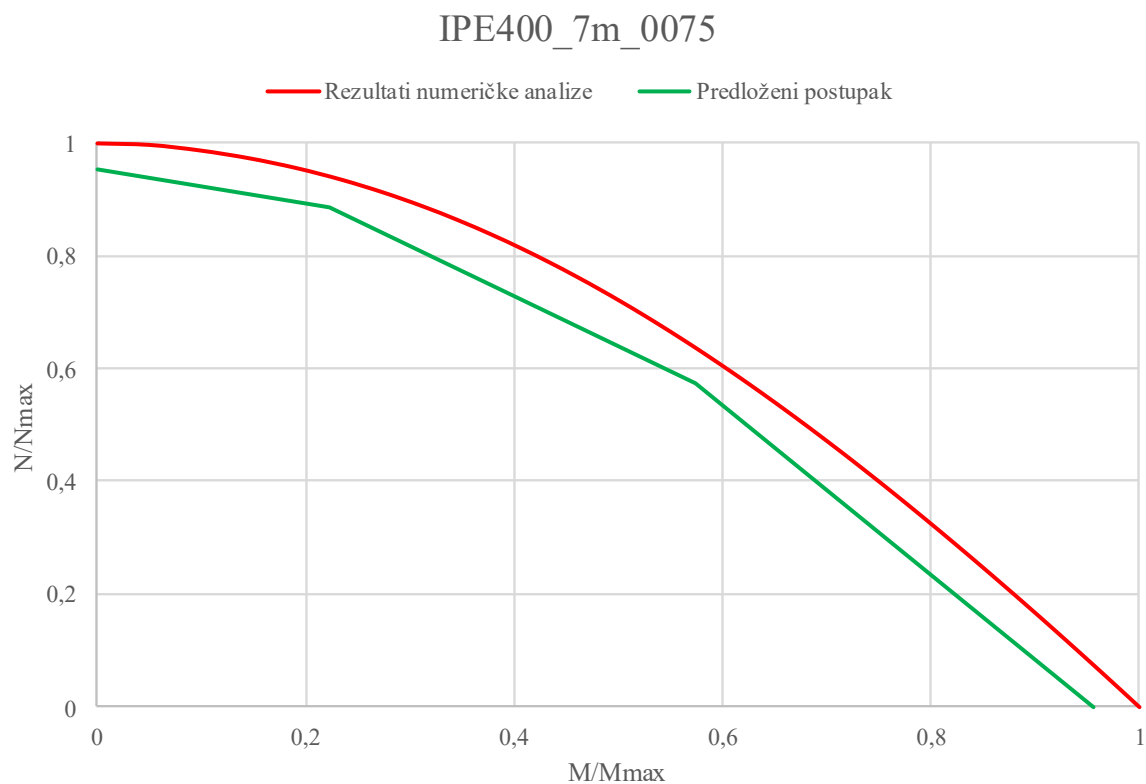
Slika C.24 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 24 iz tablice C1



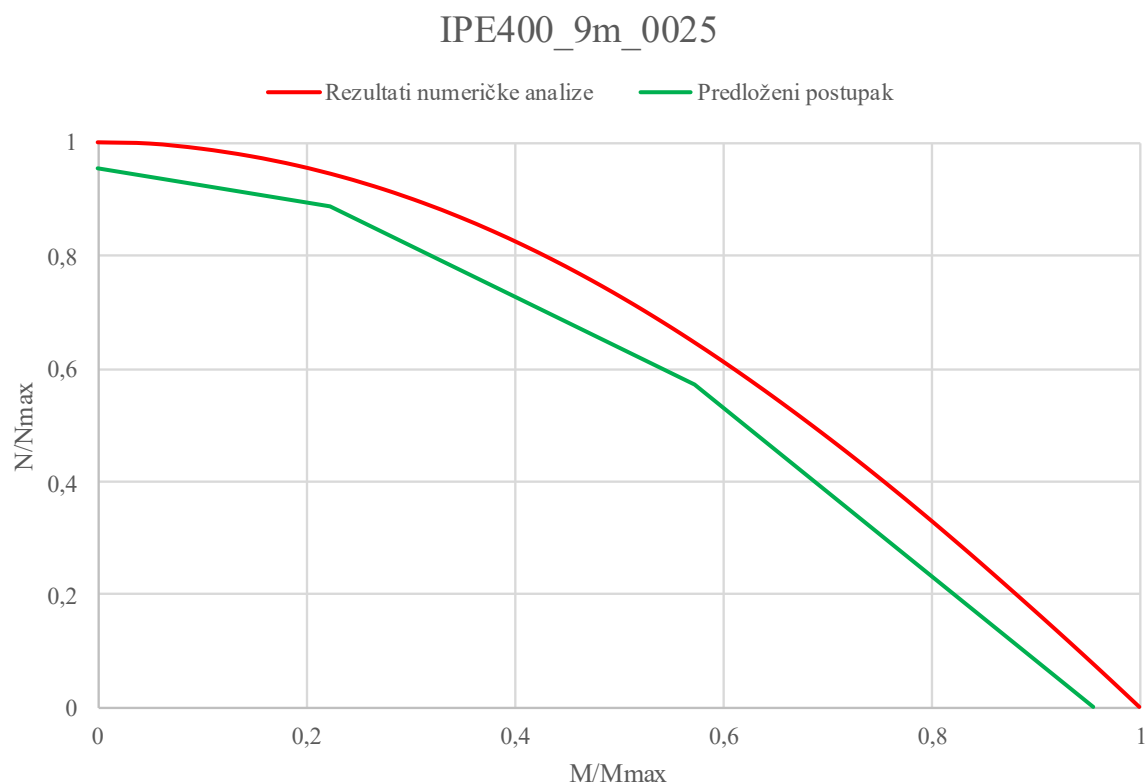
Slika C.25 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 25 iz tablice C1



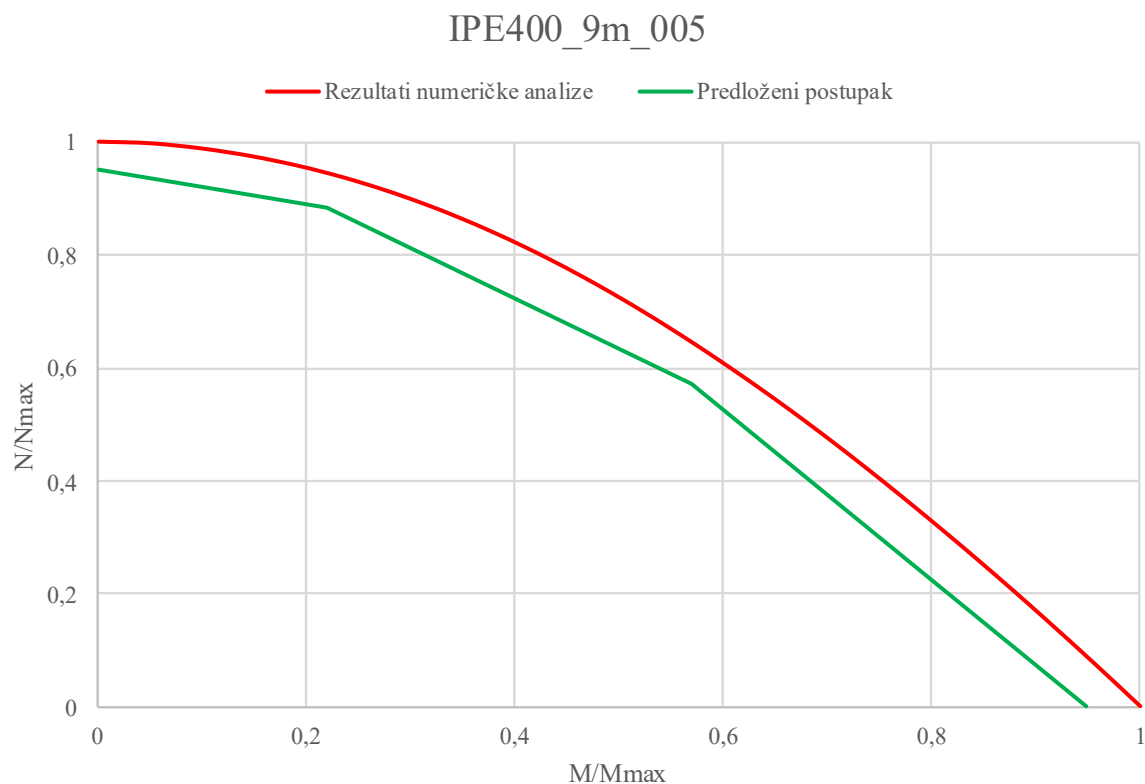
Slika C.26 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 26 iz tablice C1



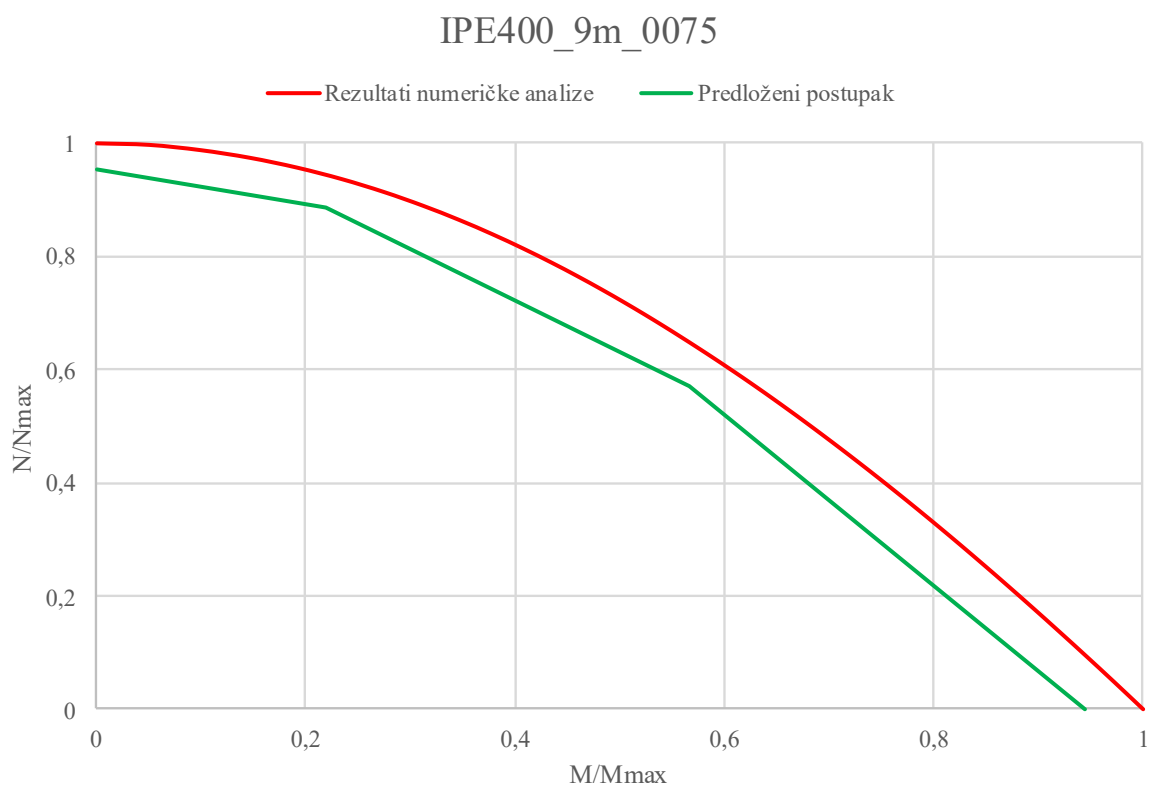
Slika C.27 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 27 iz tablice C1



Slika C.28 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 28 iz tablice C1



Slika C.29 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 29 iz tablice C1



Slika C.30 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 30 iz tablice C1

POPIS SLIKA

<i>Slika 1.1 – Raznovrsnost primjene čelika u građevinarstvu [2 – 5]</i>	<i>1</i>
<i>Slika 1.2 – Porast udjela recikliranog čelika u ukupnoj proizvodnji čelika na području Europske unije [8]</i>	<i>2</i>
<i>Slika 1.3 – Neprizmatični element</i>	<i>3</i>
<i>Slika 1.4 – Željeznički kolodvor, Geneva (lijevo); čelična hala (desno) [9]</i>	<i>3</i>
<i>Slika 1.5 – Stadion Etihad, Manchester, Engleska [10]</i>	<i>3</i>
<i>Slika 1.6 – Estádio do Dragão, Porto, Portugal.....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 1.7 – Multi-sport complex – Coimbra, Portugal [11]</i>	<i>4</i>
<i>Slika 3.1 – Struktura istraživanja.....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 4.1 – Neprizmatični element za primjer klasifikacije</i>	<i>10</i>
<i>Slika 4.2 – Klasifikacija elementa za $N = 200 \text{ kN}$ i $q = 10 \text{ kN/m}$</i>	<i>11</i>
<i>Slika 4.3 – Klasifikacija elementa za $N = 100 \text{ kN}$ i $q = 15 \text{ kN/m'}$</i>	<i>11</i>
<i>Slika 4.4 – Klasifikacija elementa za $N = 20 \text{ kN}$ i $q = 20 \text{ kN/m'}$</i>	<i>11</i>
<i>Slika 4.5 – Različiti presjeci neprizmatičnog elementa</i>	<i>12</i>
<i>Slika 4.6 – Dijagram toka za identifikaciju kritičnog presjeka neprizmatičnog elementa</i>	<i>13</i>
<i>Slika 5.1 – Grafički prikaz tipova analiza [18]</i>	<i>19</i>
<i>Slika 5.2 – Grafički prikaz rezultata GMNIA analize.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 5.3 – Ljuskasti elementi prije formiranja neprizmatičnog elementa</i>	<i>21</i>
<i>Slika 5.4 – Neprizmatični element</i>	<i>21</i>
<i>Slika 5.5 – linearno elastično ponašanje čelika (lijevo) i bilinearno ponašanje čelika (desno)</i>	<i>22</i>
<i>Slika 5.6 – Modelirani uvjeti oslanjanja elementa</i>	<i>22</i>
<i>Slika 5.7 – Modelirani uvjeti oslanjanja elementa u softveru</i>	<i>23</i>
<i>Slika 5.8 – Detalj uvjeta oslanjanja (lijevo) i prijenos uvjeta s referentne točke na cijeli presjek (desno)</i>	<i>23</i>
<i>Slika 5.9 – Modeliranje opterećenja u računalnom programu.....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 5.10 – Prikaz modeliranog prijenosa tlačne sile sa točke na cijeli poprečni presjek</i>	<i>24</i>
<i>Slika 5.11 – Ponašanje hrpta unosom sile u jednoj točki ljuske (lijevo) i prijenosom sile na cijeli rubni presjek (desno)</i>	<i>25</i>
<i>Slika 5.12 – Imperfekcije modela</i>	<i>25</i>
<i>Slika 6.1 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 1 iz tablice 6.1</i>	<i>30</i>
<i>Slika 6.2 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 2 iz tablice 6.1</i>	<i>31</i>

<i>Slika 6.3 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 3 iz tablice 6.1</i>	<i>32</i>
<i>Slika 6.4 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 4 iz tablice 6.1</i>	<i>33</i>
<i>Slika 6.5 – Rezultati proračuna i numeričke analize za promatrani profil 5 iz tablice 6.1</i>	<i>34</i>
<i>Slika 7.1 – Geometrija promatranog okvira [25]</i>	<i>35</i>
<i>Slika 7.2 – Dimenzije vute [25]</i>	<i>36</i>
<i>Slika 7.3 – Momentni dijagram okvira</i>	<i>37</i>
<i>Slika 7.4 – Geometrija okvira</i>	<i>37</i>
<i>Slika 7.5 – Modelirani dijelovi okvira</i>	<i>38</i>
<i>Slika 7.6 – Okvirni sustav</i>	<i>39</i>
<i>Slika 7.7 – Detalj uvjeta oslanjanja (lijevo) i prijenos uvjeta s referentne točke na cijeli presjek (desno)</i>	<i>40</i>
<i>Slika 7.8 – Zadavanje bočnih pridržanja</i>	<i>40</i>
<i>Slika 7.9 – Modeliranje opterećenja u računalnom programu</i>	<i>41</i>
<i>Slika 7.10 – Oblik globalne imperfekcije okvira</i>	<i>41</i>
<i>Slika 7.11 – Zadavanje globalne imperfekcije okvira</i>	<i>42</i>
<i>Slika 7.12 – Zadavanje lokalne imperfekcije prečke</i>	<i>42</i>
<i>Slika 7.13 – Zadavanje lokalne imperfekcije stupova</i>	<i>43</i>
<i>Slika 7.14 – Oblik okvira pri otkazivanju</i>	<i>43</i>
<i>Slika 8.1 – Potrebne dimenzije za određivanje stope promjene visine</i>	<i>51</i>
<i>Slika 8.2 – Slijed proračuna prema predloženom postupku</i>	<i>53</i>
<i>Slika 8.3 – Formiranje $M - N$ krivulje</i>	<i>55</i>
<i>Slika 8.4 – Područja $M - N$ krivulje</i>	<i>56</i>
<i>Slika 8.5 – Rezultati proračuna prema drugoj generaciji norme EN 1993-1-1 [12]</i>	<i>58</i>
<i>Slika 8.6 – Rezultati numeričke analize</i>	<i>58</i>
<i>Slika 8.7 – Rezultati prema novo predloženom postupku</i>	<i>60</i>
<i>Slika 8.8 – Rekapitulacija rezultata svih postupaka</i>	<i>61</i>
<i>Slika 9.1 – $M - N$ krivulje otpornosti prema točki 8.3.3. EN norme za elemente 1 i 2 iz poglavlja 6</i>	<i>63</i>
<i>Slika 9.2 – $M - N$ krivulje otpornosti prema točki 8.3.3. EN norme za elemente 3 i 4 iz poglavlja 6</i>	<i>63</i>
<i>Slika 9.3 – $M - N$ krivulja otpornosti prema točki 8.3.3. EN norme za element 5 iz poglavlja 6</i>	<i>64</i>
<i>Slika 9.4 – Skok u otpornosti zbog nagle promjene kritičnog presjeka</i>	<i>64</i>

<i>Slika 9.5 – M – N krivulje otpornosti prema točki 8.3.4. EN norme za elemente 1 i 2 iz poglavlja 6</i>	<i>65</i>
<i>Slika 9.6 – M – N krivulje otpornosti prema točki 8.3.4. EN norme za elemente 3 i 4 iz poglavlja 6</i>	<i>65</i>
<i>Slika 9.7 – M – N krivulja otpornosti prema točki 8.3.4. EN norme za element 5 iz poglavlja 6</i>	<i>66</i>
<i>Slika 9.8 – Usporedba M – N krivulje otpornosti prema. EN normi za elemente 1 i 2 iz poglavlja 6</i>	<i>67</i>
<i>Slika 9.9 – Usporedba M – N krivulje otpornosti prema. EN normi za elemente 3 i 4 iz poglavlja 6</i>	<i>67</i>
<i>Slika 9.10 – Usporedba M – N krivulje otpornosti prema. EN normi za element 5 iz poglavlja 6.....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 9.11 – Nagli pad otpornosti pri vrijednostima opterećenja blizu N_{max} i M_{max}.....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 9.12 – Usporedba utroška materijala okvirnih sustava</i>	<i>69</i>
<i>Slika 9.13 – Usporedba emisija ugljikovog dioksida okvirnih sustava</i>	<i>70</i>
<i>Slika 9.14 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 1</i>	<i>72</i>
<i>Slika 9.15 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 2</i>	<i>72</i>
<i>Slika 9.16 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 3</i>	<i>73</i>
<i>Slika 9.17 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 4</i>	<i>73</i>
<i>Slika 9.18 – Usporedba predloženog postupka sa postupcima proračuna prema drugoj generaciji norme EN za element 5</i>	<i>74</i>
<i>Slika 9.19 – Rezultati za primjer proračuna elementa 3 prema svim postupcima za zadano opterećenje.....</i>	<i>75</i>
<i>Slika A.1 – Grafički prikaz klasa presjeka duž elementa</i>	<i>83</i>
<i>Slika A.2 – Grafički prikaz djelotvorne površine duž elementa</i>	<i>84</i>
<i>Slika A.3 – Grafički prikaz iskoristivosti presjeka na uzdužnu tlačnu silu</i>	<i>84</i>
<i>Slika A.4 – Grafički prikaz djelotvornog momenta otpora duž elementa</i>	<i>85</i>
<i>Slika A.5 – Grafički prikaz iskoristivosti duž elementa</i>	<i>87</i>
<i>Slika B.1 – Rezultati LBA analize, 3D pogled</i>	<i>96</i>
<i>Slika B.2 – Rezultati LBA analize, pogled odozgo i sa strane</i>	<i>96</i>

<i>Slika B.3 – Prirast sile s inkrementima opterećenja</i>	<i>97</i>
<i>Slika B.4 – Oblik elementa pri maksimalno nanesej sili</i>	<i>97</i>
<i>Slika B.5 – Prirast vertikalnog opterećenja s inkrementima opterećenja</i>	<i>98</i>
<i>Slika B.6 – Oblik elementa pri maksimalno nanesejnom vertikalnom opterećenju</i>	<i>98</i>
<i>Slika B.7 – Oblik elementa pri maksimalno nanesejnoj kombinaciji N_{max} i M_{max}</i>	<i>99</i>
<i>Slika B.8 – Oblik elementa pri maksimalno nanesejnoj kombinaciji N_{max} i % M_{max}</i>	<i>99</i>
<i>Slika B.9 – Oblik elementa pri maksimalno nanesejnoj kombinaciji % N_{max} i M_{max}</i>	<i>100</i>
<i>Slika B.10 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 180</i>	<i>101</i>
<i>Slika B.11 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 220</i>	<i>102</i>
<i>Slika B.12 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 270</i>	<i>103</i>
<i>Slika B.13 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 330</i>	<i>104</i>
<i>Slika B.14 – Rezultati analiza elemenata čiji je osnovni profil IPE 400</i>	<i>105</i>
<i>Slika C.1 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 1 iz tablice C1</i>	<i>107</i>
<i>Slika C.2 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 2 iz tablice C1</i>	<i>107</i>
<i>Slika C.3 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 3 iz tablice C1</i>	<i>108</i>
<i>Slika C.4 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 4 iz tablice C1</i>	<i>108</i>
<i>Slika C.5 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 5 iz tablice C1</i>	<i>109</i>
<i>Slika C.6 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 6 iz tablice C1</i>	<i>109</i>
<i>Slika C.7 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 7 iz tablice C1</i>	<i>110</i>
<i>Slika C.8 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 8 iz tablice C1</i>	<i>110</i>
<i>Slika C.9 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 9 iz tablice C1</i>	<i>111</i>
<i>Slika C.10 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 10 iz tablice C1</i>	<i>111</i>
<i>Slika C.11 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 11 iz tablice C1</i>	<i>112</i>

<i>Slika C.12 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 12 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	112
<i>Slika C.13 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 13 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	113
<i>Slika C.14 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 14 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	113
<i>Slika C.15 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 15 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	114
<i>Slika C.16 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 16 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	114
<i>Slika C.17 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 17 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	115
<i>Slika C.18 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 18 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	115
<i>Slika C.19 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 19 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	116
<i>Slika C.20 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 20 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	116
<i>Slika C.21 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 21 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	117
<i>Slika C.22 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 22 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	117
<i>Slika C.23 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 23 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	118
<i>Slika C.24 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 24 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	118
<i>Slika C.25 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 25 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	119
<i>Slika C.26 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 26 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	119
<i>Slika C.27 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 27 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	120
<i>Slika C.28 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 28 iz tablice</i>	
<i>C1</i>	120

<i>Slika C.29 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 29 iz tablice</i>	
<i>CI</i>	121
<i>Slika C.30 – Usporedba predloženog postupka i numeričke analize za element 30 iz tablice</i>	
<i>CI</i>	121

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1.1 – Proizvodnja čelika i udio recikliranog čelika u proizvodnji u milijunima tona u EU [8]</i>	<i>2</i>
<i>Tablica 4.1 – Mjerodavna otpornost ovisno o klasi poprečnog presjeka.....</i>	<i>9</i>
<i>Tablica 5.1 – Karakteristike korištenog materijala u numeričkom modelu</i>	<i>22</i>
<i>Tablica 6.1 – Popis i karakteristike promatranih elemenata</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 7.1 – Rekapitulacija rezultata LCA za okvir 1</i>	<i>47</i>
<i>Tablica 7.2 – Rekapitulacija rezultata LCA za okvir 2.....</i>	<i>50</i>
<i>Tablica 8.1 – Popis i karakteristike promatranih elemenata</i>	<i>52</i>
<i>Tablica 8.2 – Karakteristike promatranog elementa</i>	<i>57</i>
<i>Tablica A.1 – Karakteristike materijala i elementa</i>	<i>82</i>
<i>Tablica A.2 – Karakteristike kritičnog presjeka</i>	<i>87</i>
<i>Tablica C.1 – Popis i karakteristike promatranih elemenata</i>	<i>106</i>

SAŽETAK

Nikola Oreb

Neprizmatični čelični konstrukcijski elementi – validacija postojećih i prijedlog novog proračunskog postupka

Građevinska struka susreće se s brojnim izazovima, kao što su značajni ekonomski troškovi, generiranje građevinskog otpada i emisije ugljikovog dioksida. U cilju napretka građevinarstva je kontinuirano otkrivanje i razvoj konstrukcijskih rješenja koja mogu odgovoriti na izazove koje moderna arhitektura i zahtjevi održivog razvoja donose. Nedostatak, ili konzervativnost normi je jedan od problema koji usporava primjenu novih konstrukcijskih rješenja.

U ovom radu detaljno su analizirani neprizmatični elementi, konstrukcijsko rješenje koje može pomoći u prethodno spomenutim izazovima. Prikazan je pregled metoda proračuna neprizmatičnih elemenata koje daje druga generacija norme EN 1993-1-1. U svrhu usporedbe i validacije metoda proračuna razvijeni su numerički modeli na kojima je proveden velik broj numeričkih analiza uz varijaciju ulaznih parametara, kao što su visina i tip profila, nagib pojasnice, raspon, opterećenje. Model je validiran na temelju različitih primjera numeričkih modela iz dostupne literature te su odstupanja minimalna i na strani sigurnosti. U detaljno opisanom postupku modeliranja prikazani su korišteni plošni konačni elementi, način modeliranja zglobnih uvjeta oslanjanja, kao i nanošenje opterećenja i uzimanje u obzir globalnih i lokalnih imperfekcija. Numerički model proširen je na okvirni sustav kako bi se ispitalo ponašanje neprizmatičnih elemenata u realnim konstrukcijskim sustavima. Uspoređeni su okvir s vutama i prizmatičnim elementima i okvir formiran od neprizmatičnih elemenata. Nadalje je na temelju brojnih numeričkih analiza, u cilju smanjenja konzervativnosti, uz zadržavanje pouzdanosti i jednostavnosti, razvijen novi postupak proračuna neprizmatičnih elemenata.

Zaključeno je da je trenutno najbolja od dostupnih analitičkih metoda proračuna, opća metoda uz modifikaciju množitelja kritičnog opterećenja za izvijanje izvan ravnine. Međutim, rezultati su pokazali da su sve promatrane metode proračuna neprizmatičnih elemenata, pa tako i opća metoda, konzervativne i značajno podcjenjuju njihovu otpornost. Proširenje analize neprizmatičnih elemenata na okvirne sustave pokazalo je mogućnosti značajne uštede

materijala, redukcije ugljikovog dioksida kao i ekonomske prednosti upotrebe neprizmatičnih elemenata u realnim konstrukcijskim sustavima. Nadalje, predloženi novi postupak proračuna dao je rezultate koji pokazuju gotovo idealno podudaranje sa rezultatima numeričkih analiza, gdje su razlike u otpornosti manje od 0,001 %. Svi rezultati i zaključci rada mogu poslužiti kao temelj za unaprjeđenje metode proračuna neprizmatičnih elemenata. Proširenje područja istraživanja, potkrepljeno eksperimentalnim istraživanjima i probabilističkim analizama će potvrditi njegovu pouzdanost, a može i dodatno poboljšati predloženi postupak. Tako razvijeni postupak proračuna neprizmatičnih elemenata će rezultirati povećanjem njihove upotrebe, a time i smanjenja troškova, emisija ugljikovog dioksida kao i građevinskog otpada u budućnosti što omogućuje bolji razvoj i napredak građevinske industrije.

Ključne riječi: neprizmatični elementi, čelične konstrukcije, numeričko modeliranje, LCA, razvoj proračunskog postupka

SUMMARY

Nikola Oreb

Non-prismatic Steel Structural Elements – Validation of Existing and Proposal of a New Design Method

The construction industry faces multiple challenges, including substantial economic costs, the generation of construction waste, and elevated carbon dioxide emissions. Advancements in the field aim to continuously identify and develop structural solutions that can address the demands of contemporary architecture and sustainable development. One factor impeding the adoption of innovative construction methods is the absence of, or excessive conservatism in, design standards.

This paper presents a comprehensive analysis of non-prismatic structural elements as a sustainable solution to challenges in modern construction, including high economic costs, construction waste, and carbon dioxide emissions. Existing calculation methods from the second-generation EN 1993-1-1 standard were reviewed, and extensive numerical models were developed for validation and parametric studies, varying parameters such as element height, profile type, taper ratio, span, and applied loads. The models were validated against literature examples, demonstrating minimal conservative deviations. The modelling approach incorporated shell finite elements, hinged supports, load application, and consideration of global and local imperfections. The numerical model was extended to a frame system to examine the behaviour of non-prismatic elements in real structural configurations. Comparisons were made between a frame with prismatic elements and a frame composed of non-prismatic elements. Furthermore, based on numerous numerical analyses, a new design method for non-prismatic elements has been developed to reduce conservatism, while preserving reliability and simplicity.

Among current methods, the general method, which incorporates a modified critical load multiplier for out-of-plane buckling, proved the most accurate; however, all methods evaluated were conservative and consistently underestimated the resistance of non-prismatic elements. Extensions to frame systems allowed evaluation of non-prismatic elements in realistic structural configurations, revealing potential material savings, reduced emissions, and economic advantages compared to conventional prismatic frames. A proposed new design

method shows near-perfect agreement with numerical analyses (differences less than 0.001%) and provides a robust, straightforward, and practically applicable method. These findings provide a foundation for further refinement through experimental validation and reliability analysis. The widespread adoption of non-prismatic elements is expected to enhance structural reliability, lower costs, and reduce both carbon emissions and construction waste, thereby supporting sustainable development in the construction industry.

Keywords: non-prismatic elements, steel structures, numerical modelling, LCA, development of a new design method

ŽIVOTOPIS

Nikola Oreb rođen je 15.9.2001. godine u Splitu. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja upisuje Opću gimnaziju Marko Marulić u Splitu koju i završava 2020. godine. Iste godine upisuje Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Dana 26. rujna 2023. godine završava prijediplomski studij građevinarstva, obranom završnog rada na temu „Problem stabilnosti stupova“, pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Marka Bartolca. Nikola Oreb je trenutno student pete godine Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na konstruktorskom usmjerenju. Tijekom studiranja dobio je 3 Dekanove nagrade za ostvareni uspjeh, kao i Dekanovu nagradu za promicanje ugleda Fakulteta. 2024. godine dobio je Rektorovu nagradu u kategoriji a s radom na temu „Analiza održive gradnje ponovnom upotrebom čeličnih platformi toranjskih skela Zagrebačke katedrale“.