Numerička analiza utjecaja smanjenja mase na promjenu nosivosti I - profila

Gorupić, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:510831

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Gorupić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Skozrit

Student:

Nikola Gorupić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da je ovaj rad isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način i da ne krši ničija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Ivici Skozritu na pruženoj pomoći, uloženom trudu i savjetima tijekom pisanja završnog rada.

Zahvaljujem roditeljima i obitelji na podršci tijekom cijelog obrazovanja.

Nikola Gorupić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Gorupić** Mat. br.: 0035205064

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza utjecaja smanjenja mase na promjenu nosivosti I - profila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Analysis of Mass Reduction Influence on the Load Capacity Change of I - profile**

Opis zadatka:

Primjena I - profila u strojarstvu i građevini izrazito je široka zbog velike nosivosti u odnosu na masu. Moment tromosti i moment otpora poprečnog presjeka I - profila izrazito su veliki u odnosu na ostale oblike poprečnog presjeka jednake površine. Često se koriste u konstrukcijama u kojima je glavno opterećenje konstrukcije težina same konstrukcije, npr. mostovi, krovne konstrukcije hala itd. te se zbog toga teži smanjenju mase konstrukcije tj. I - profila.

Za proizvoljno definirane dimenzije standardnog IPE - profila potrebno je analizirati promjenu nosivosti u ovisnosti sa smanjenjem mase. Smanjenje mase izvesti izrezivanjem materijala raznih geometrijskih oblika iz rebra profila. Geometrijske karakteristike izrezanog materijala potrebno je parametrizirati i dovesti u vezu sa standardnim dimenzijama profila te dati preporuke za optimalnu konstrukciju I - profila. Analizu je potrebno provesti numerički, a proračun provesti primjenom programskog paketa Abaqus® koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Za diskretizaciju profila koristiti dostupne konačne elemente iz baze programskog paketa. Za sve primijenjene konačne elemente izvršiti verifikaciju na jednostavnijim problemima te rezultate usporediti s analitičkim rješenjima.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Skozrit Ivica

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Ivica Skozrit

Rok predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. VERIFIKACIJA KONAČNIH ELEMENATA 3
2.1. Konačni elementi za 3D analizu u *Abaqusu* [6] 3
2.2. Analiza konzolno uležištene grede 5
2.2.1. Analitički proračun 6
2.2.2. Numerička analiza 3D konačnim elementima 7
3. UTJECAJ SMANJENJA MASE NA PROMJENU NOSIVOSTI I – PROFILA 13
3.1. Standardni IPE 300 profil 13
3.2. Analitički proračun standardnog IPE 300 profila 14
3.3. Numerički proračun standardnog IPE 300 profila 16
3.4. Analiza utjecaja veličine otvora 20
3.5. Analiza utjecaja razmaka otvora 26
4. ZAKLJUČAK 30
LITERATURA 32

POPIS SLIKA

Slika 1. a) Idealni oblik presjeka, b) Presjek I - profila [2] 1
Slika 2. Povećanje nosivosti I - profila rezanjem i ponovnim zavarivanjem [3] 2
Slika 3. Krovni I - profili s otvorima [4] 2
Slika 4. Estetska funkcija prošupljenih I – profila [5] 2
Slika 5. Najčešće korištene skupine konačnih elemenata [6] 3
Slika 6. Tetraedarski konačni element 1. reda (C3D4) [7] 4
Slika 7.Tetraedarski konačni element 2. reda (C3D10) [7] 4
Slika 8. Osnovni prizmatični konačni element (C3D8) [7] 5
Slika 9. Prizmatični konačni element 2. reda (C3D20) [7] 5
Slika 10. Odabrani primjer za verifikaciju konačnih elemenata 5
Slika 11. Numerički model za analizu 7
Slika 12. Diskretizacija konzole s 1175 C3D4 konačnih elemenata 8
Slika 13. Diskretizacija konzole s 3835 C3D10 konačnih elemenata 8
Slika 14. Diskretizacija konzole sa 100 C3D8R konačnih elemenata 8
Slika 15. Diskretizacija konzole sa 710 C3D20R konačnih elemenata 8
Slika 16. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu za diskretizaciju s 1175 C3D4 konačnih elemenata u MPa 9
Slika 17. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu za diskretizaciju s 3835 C3D10 konačnih elemenata u MPa 9
Slika 18. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu za diskretizaciju s 1875 C3D8R konačnih elemenata u MPa 10
Slika 19. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu za diskretizaciju s 405 C3D20R konačnih elemenata u MPa 10
Slika 20. Iznos i raspodjela pomaka na konzoli za diskretizaciju s 1175 C3D4 konačnih elemenata u mm 10
Slika 21. Iznos i raspodjela pomaka na konzoli za diskretizaciju s 3835 C3D10 konačnih elemenata u mm 11
Slika 22. Iznos i raspodjela pomaka na konzoli za diskretizaciju s 1875 C3D8R konačnih elemenata u mm 11
Slika 23. Iznos i raspodjela pomaka na konzoli za diskretizaciju s 405 C3D20R konačnih elemenata u mm 11
Slika 24. Konvergencija maksimalnog ekvivalentog naprezanja prema von Misesu u MPa ... 12

Slika 25. Konvergencija pomaka u smjeru osi *z* na mjestu djelovanja sile u mm 12
Slika 26. Presjek IPE profila [9] 13
Slika 27. Opterećenje standardnog IPE 300 profila za analizu 14
Slika 28. Numerički model IPE 300 nosača 16
Slika 29. a) Diskretizacija s 13667 C3D10 konačnih elemenata, b) detalj diskretizacije zaobljenja 17
Slika 30. a) Diskretizacija s 1600 C3D20R konačnih elemenata, b) detalj diskretizacije zaobljenja 17
Slika 31. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu dobivenih diskretizacijom s 13667 C3D10 konačnih elemenata u MPa 17
Slika 32. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu dobivenih diskretizacijom s 1600 C3D20R konačnih elemenata u MPa 18
Slika 33. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* dobivenih diskretizacijom s 13667 C3D10 konačnih elemenata u mm 18
Slika 34. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* dobivenih diskretizacijom s 1600 C3D20R konačnih elemenata u mm 18
Slika 35. Konvergencija maksimalnih ekvivalentih naprezanja prema von Misesu na mjestu *L*/2 u MPa 19
Slika 36. Konvergencija pomaka u smjeru osi *z* na mjestu *L*/2 u mm 20
Slika 37. IPE 300 profil s kružnim otvorima 20
Slika 38. Numerički model nosača za numeričku analizu utjecaja veličine otvora na promjenu nosivosti 21
Slika 39. Diskretizirani numerički model sa 7039 C3D10 konačnih elemenata za *D*/*h* = 0,4 . 21
Slika 40. Diskretizirani numerički model s 14594 C3D10 konačnih elemenata za *D*/*h* = 0,4 . 22
Slika 41. Diskretizirani numerički model s 28316 C3D10 konačnih elemenata za *D*/*h* = 0,4 . 22
Slika 42. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za *D*/*h* = 0,2 u MPa 22
Slika 43. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za *D*/*h* = 0,4 u MPa 23
Slika 44. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za *D*/*h* = 0,7 u MPa 23
Slika 45. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* za *D*/*h* = 0,2 u mm 23
Slika 46. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* za *D*/*h* = 0,4 u mm 24
Slika 47. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* za *D*/*h* = 0,7 u mm 24
Slika 48. Usporedba smanjenja mase i opterećenja s povećanjem veličine otvora u % 25
Slika 49. Ekvivalentno naprezanje prema von Misesu na različitim dijelovima nosača u ovisnosti s promjenom veličine otvora u MPa 25

Slika 50. Progib na mjestu $L/2$ u ovisnosti s veličinom otvora u mm 26
Slika 51. Dimenzije profila za analizu utjecaja razmaka između otvora 26
Slika 52. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za δ/h = 1,07 u MPa 27
Slika 53. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za δ/h = 0,53 u MPa 27
Slika 54. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za δ/h = 0,19 u MPa 27
Slika 55. Raspodjela pomaka u smjeru osi z za δ/h = 1,07 u mm 28
Slika 56. Raspodjela pomaka u smjeru osi z za δ/h = 0,53 u mm 28
Slika 57. Raspodjela pomaka u smjeru osi z za δ/h = 0,19 u mm 28
Slika 58. Usporedba promjene mase i dopuštenog opterećenja u ovisnosti s promjenom razmaka i broja otvora u % 29
Slika 59. Promjena progiba u smjeru osi z na mjestu $L/2$ u ovisnosti s promjenom razmaka i broja otvora u mm 29

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci za zadani primjer 5
Tablica 2. Dimenzije odabranog IPE 300 profila [10] 13
Tablica 3. Statičke karakteristike presjeka IPE 300 profila [10] 14
Tablica 4. Vrijednosti promjera otvora D u mm 21
Tablica 5. Razmak između otvora δ za omjere δ/h u mm 27

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Naziv
A	mm^2	površina presjeka
b	mm	širina presjeka
d	mm	visina rebra profila do zaobljenja
E	GPa	Youngov modul elastičnosti
F	N	sila
g	m/s^2	ubrzanje sile teže
h	mm	visina presjeka
h_1	mm	visina rebra I – profila između dva pojasa
I	cm^4	moment tromosti
I_y	cm^4	moment tromosti oko osi y
I_z	cm^4	moment tromosti oko osi z
L	mm	duljina nosača
m	kg	masa
M	Nmm	moment savijanja
M_y	Nmm	moment savijanja oko osi y
$M_{y,max}$	Nmm	maksimalni moment savijanja oko osi y
q	N/m^2	kontinuirano opterećenje
q_{max}	N/m^2	dopušteno kontinuirano opterećenje
R	mm	radijus zaobljenja
$R_{p0,2}$	MPa	granica razvlačenja
s	mm	debljina rebra
S	-	koeficijent sigurnosti
t	mm	debljina pojasa I - profila
u	mm	pomak u smjeru osi x
v	mm	pomak u smjeru osi y
w	mm	pomak u smjeru osi z
w_{max}	mm	maksimalni pomak u smjeru osi z
W	mm^3	moment otpora
W_y	mm^3	moment otpora oko osi y
W_z	mm^3	moment otpora oko osi z
x	-	koordinatna os
y	-	koordinatna os

z	-	koordinatna os
z_{max}	mm	najveća udaljenost presjeka u smjeru osi z
δ	mm	razmak između otvora na I - profilu
ρ	kg/m^3	gustoća
σ	MPa	normalno naprezanje
σ_{dop}	MPa	dopušteno normalno naprezanje
σ_{ekv}	MPa	ekvivalentno naprezanje
σ_x	MPa	normalno naprezanje u smjeru osi x
$\sigma_{x,max}$	MPa	maksimalno normalno naprezanje u smjeru osi x
σ_y	MPa	normalno naprezanje u smjeru osi y
σ_z	MPa	normalno naprezanje u smjeru osi z
τ	MPa	posmično naprezanje
τ_{xy}	MPa	posmično naprezanje u smjeru osi y
τ_{yz}	MPa	posmično naprezanje u smjeru osi z
τ_{zx}	MPa	posmično naprezanje u smjeru osi x
φ	rad	zakret
φ_x	rad	zakret oko osi x
φ_y	rad	zakret oko osi y
φ_z	rad	zakret oko osi z

SAŽETAK

Primjena I – profila u strojarstvu i građevini izrazito je široka zbog velike nosivosti u odnosu na masu. Moment tromosti i moment otpora poprečnog presjeka I – profila izrazito su veliki u odnosu na ostale oblike poprečnog presjeka jednake površine. Često se koriste u konstrukcijama u kojima je glavno opterećenje konstrukcije težina same konstrukcije, npr. mostovi, krovne konstrukcije hala itd., te se zbog toga teži smanjenju mase konstrukcije tj. I – profila.

U ovom radu provedena je numerička analiza utjecaja smanjenja mase IPE profila izrezivanjem otvora kružnih oblika po rebru profila na promjenu naprezanja i deformacija odnosno smanjenje nosivosti profila. Provedena je analiza utjecaja veličine otvora i razmaka između otvora te su dane preporuke za konstruiranje. Numerička analiza provedena je metodom konačnih elemenata u programskom paketu Abaqus®. Verifikacija konačnih elemenata provedena je na primjeru savijanja konzolnog nosača za koji su rješenja numeričke analize uspoređena s analitičkim rješenjima. U radu je proračunat standardni puni IPE profil analitičkom metodom i metodom konačnih elemenata čija su rješenja služila kao referentna za daljnju analizu.

Ključne riječi: I – profil, numerička analiza, metoda konačnih elemenata, smanjenje mase

SUMMARY

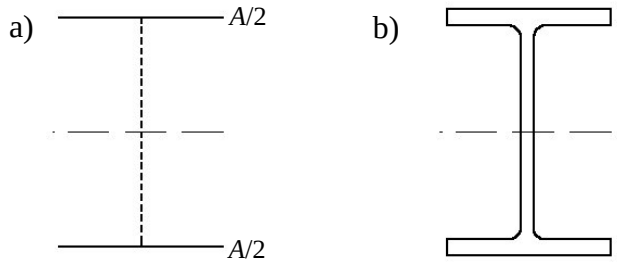
The application of I - profiles in mechanical engineering and construction is extremely wide due to its high load capacity in relation to mass. The moment of inertia and the moment of resistance of the cross section of the I - profile are extremely high compared to other cross - sections of the same cross section area. They are often used in structures where the main load of the structure is the weight of the structure itself, e. g. bridges, roof structures of halls, etc., and therefore, intention is to reduce the mass of the structure, i. e. the I - profile.

In this paper, a numerical analysis of the effect of reducing the mass of an IPE profile by cutting openings of circular shapes in the web of the profile on the change in stresses and deformations, respectively, decreases the load capacity of the profiles. An analysis of the effect of the size of the openings and the distance between the openings was performed and recommendations for the design were made. Numerical analysis was performed using the finite elements method in the Abaqus® software package. Finite elements verification was performed using the cantilever beam bending for which results of numerical analysis were compared with analytical results. The paper calculates a standard IPE profile by the analytical method and the finite elements method whose solutions have been used as a reference for further analysis.

Key words: I – profile, numerical analysis, finite elements method, mass reduction

1. UVOD

Od više poprečnih presjeka jednake površine veći moment tromosti i veći moment otpora imat će oni presjeci kod kojih je veći dio površine poprečnog presjeka udaljeniji od neutralne osi odnosno težišta presjeka. Najveći moment tromosti i moment otpora dobio bi se kad bi se površina poprečnog presjeka raspodijelila u obliku dviju tankih traka na način prikazan na [Slika 1 a)]. No, u stvarnosti te trake moraju imati neku debljinu i moraju biti povezane rebrom. Tako dolazimo do presjeka I - profila prikazanog na [Slika 1 b)]. [1]



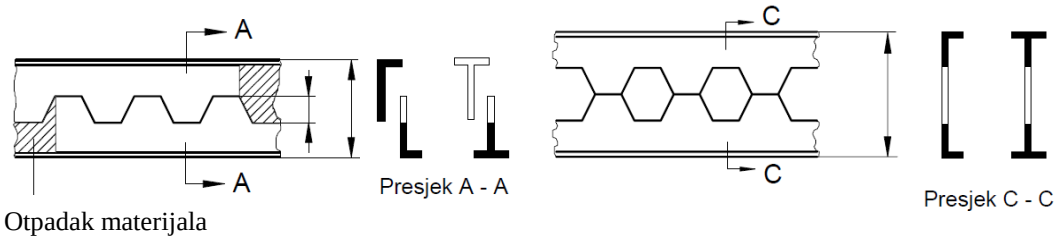
Slika 1. a) Idealni oblik presjeka, b) Presjek I - profila [2]

I – profili proizvode se tehnologijom valjanja, a moguće su i zavarene izvedbe. Toplo valjani profili su jeftini, no materijal često puta ima malu iskorištenost. Najčešće modifikacije standardnih I – profila su izrezivanje otvora u rebru profila i uzdužno rezanje profila s ponovnim zavarivanjem. Na [Slika 2] prikazano je modificiranje I – profila rezanjem i ponovnim zavarivanjem.

Svrhe modifikacija I – profila:

- bolja iskoristivost materijala,
- smanjenje mase,
- povećanje krutosti profila (uz istu masu),
- omogućavanje prolaza za cijevi, električne kablove i druge instalacije kad se primjenjuju u građevini,
- ušteda na materijalu,
- estetski razlozi.

Primjeri primjene I – profila prikazani su na [Slika 3, Slika 4].



Slika 2. Povećanje nosivosti I - profila rezanjem i ponovnim zavarivanjem [3]



Slika 3. Krovni I - profili s otvorima [4]



Slika 4. Estetska funkcija prošupljenih I – profila [5]

2. VERIFIKACIJA KONAČNIH ELEMENATA

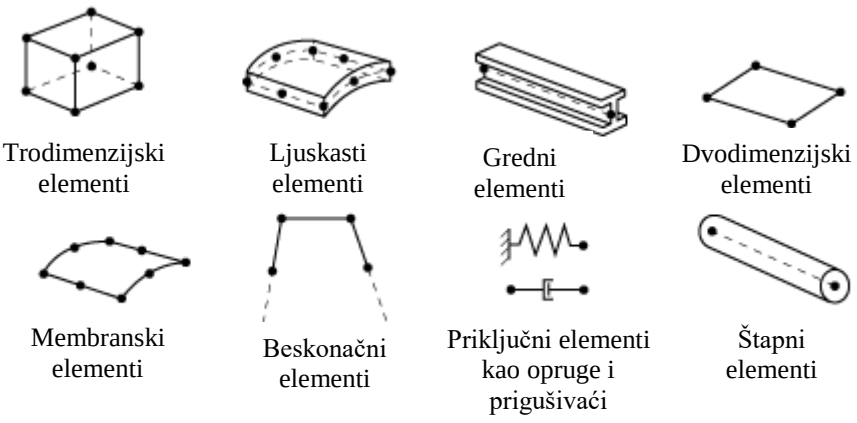
U ovom poglavlju prikazani su konačni elementi koji se najčešće koriste za trodimenzionalnu analizu. Konačni elementi su zatim testirani na proizvoljno odabranom jednostavnom modelu koji ima sličan način opterećenja kao i zadatak koji se rješava u ovom radu. Prije toga, za jednostavni model proveden je analitički proračun koji daje referentne vrijednosti s kojima se uspoređuju vrijednosti dobivene numeričkim analizama.

2.1. Konačni elementi za 3D analizu u *Abaqusu* [6]

Obilježja konačnih elementa koja određuju karakteristike svakog elementa:

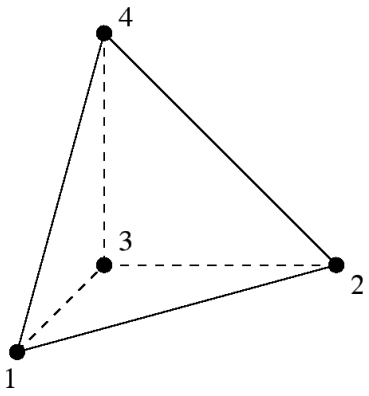
- skupina,
- stupnjevi slobode,
- broj čvorova,
- formulacija,
- integracija.

Svaki konačni element ima svoje jedinstveno ime koje označava svaki od pet obilježja elementa (npr. C3D8R). [Slika 5] prikazuje skupine konačnih elemenata koje se najčešće koriste u analizi naprezanja. Jedna od glavnih razlika između skupina konačnih elemenata je geometrija koju skupina predstavlja.



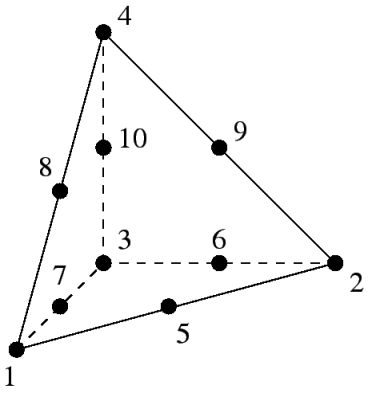
Slika 5. Najčešće korištene skupine konačnih elemenata [6]

Tetraedarski konačni elementi 1. reda su najjednostavniji elementi za trodimenzionalnu analizu s 4 čvora i 12 stupnjeva slobode u pravcu Kartezijevih koordinatnih osi *x, y, z*. U *Abaqusu* su označeni oznakom C3D4. Tetraedarski konačni element 1. reda prikazan je na [Slika 6].



Slika 6. Tetraedarski konačni element 1. reda (C3D4) [7]

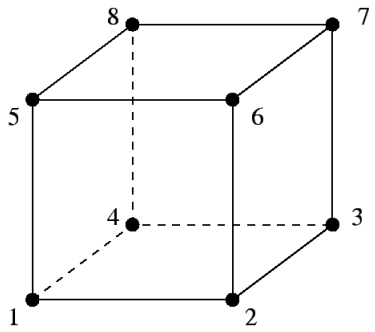
Tetraedarski konačni element 2. reda nastaje dodavanjem čvorova osnovnom tetraedarskom elementu, sadrži 10 čvorova i 30 stupnjeva slobode. Polje pomaka u elementu opisano je potpunim polinomom drugog stupnja. Tetraedarski konačni element 2. reda u *Abaqusu* ima naziv C3D10 i prikazan je na [Slika 7].



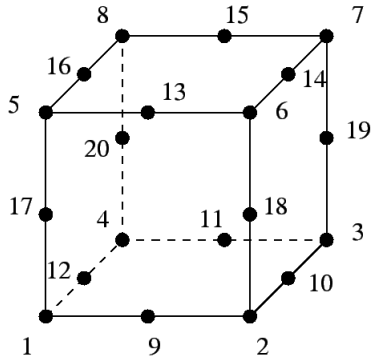
Slika 7.Tetraedarski konačni element 2. reda (C3D10) [7]

Osnovni prizmatični konačni element sadrži 8 čvorova i 24 stupnja slobode, u *Abaqusu* ima oznaku C3D8 i prikazan je na [Slika 8]. Prizmatični konačni element 2. reda s 20 čvorova i 60 stupnjeva slobode prikazan je na [Slika 9].

Prizmatični ili heksaedarski konačni elementi bolji su za trodimenzionalnu analizu od tetraedarskih konačnih elemenata jer brže konvergiraju točnom rješenju i nisu osjetljivi na orijentaciju u mreži. Međutim, tetraedarski elementi bolje opisuju kompliciranu geometriju.



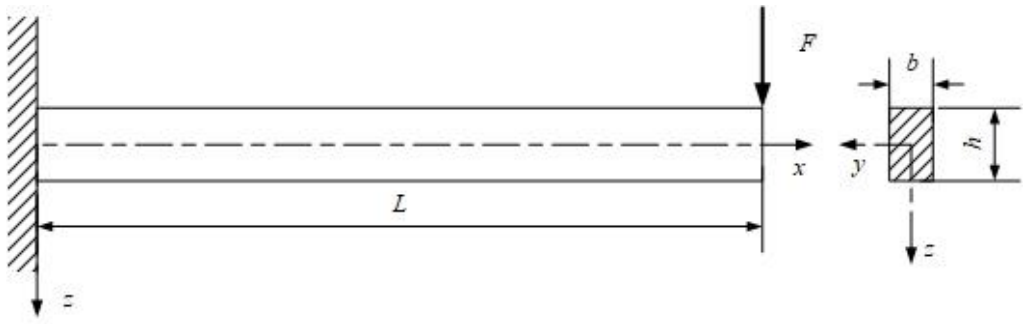
Slika 8. Osnovni prizmatični konačni element (C3D8) [7]



Slika 9. Prizmatični konačni element 2. reda (C3D20) [7]

2.2. Analiza konzolno uležištene grede

Za gredu zadanu i opterećenu prema [Slika 10] određeno je najveće normalno naprezanje i najveći progib. Materijal grede je čelik S235JR.



Slika 10. Odabrani primjer za verifikaciju konačnih elemenata

U [Tablica 1] navedeni su podaci potrebni za rješavanje prikazanog primjera na [Slika 10].

Tablica 1. Podaci za zadani primjer

F / N	*L* / mm	*b* / mm	*h* / mm

100	1000	20	40

2.2.1. Analitički proračun

Proračun je proveden prema [1]. Maksimalno naprezanje $\sigma_{x,\max}$ nalazi se na mjestu uklještenja i računa se prema sljedećem izrazu:

$$\sigma_{x,\max} = \frac{M_{y,\max}}{I_y} \cdot z_{\max}, \tag{2.1}$$

gdje je:

$M_{y,\max}$ – maksimalni moment savijanja oko osi *y,*

I_y – aksijalni moment tromosti presjeka oko osi *y,*

$z_{\max}$ – najveća udaljenost presjeka od neutralne osi u smjeru osi *z.*

Maksimalni moment savijanja oko osi *y* $M_{y,\max}$ određuje se prema sljedećem izrazu:

$$M_{y,\max} = F \cdot L, \tag{2.2}$$

gdje je:

F – sila koja djeluje na nosač,

L – duljina nosača.

Nakon uvrštavanja vrijednosti u izraz (2.2) dobiva se maksimalni moment savijanja oko osi *y*:

$$M_{y,\max} = 100 \cdot 1000 = 100000 \text{ Nmm}. \tag{2.3}$$

Aksijalni moment tromosti presjeka I_y za pravokutni poprečni presjek računa se prema izrazu:

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12}, \tag{2.4}$$

gdje je:

b – širina poprečnog presjeka,

h – visina poprečnog presjeka.

Nakon uvrštavanja vrijednosti u izraz (2.4) moment tromosti presjeka oko osi *y* iznosi:

$$I_y = \frac{20 \cdot 40^3}{12} = 106666{,}67 \text{ mm}^4. \tag{2.5}$$

Uvrštavanjem izraza (2.3), (2.5) te vrijednosti z_{max} u izraz (2.1) naprezanje iznosi:

$$\sigma_{x,\max} = \frac{100000}{106666,67} \cdot 20 = 18,75 \text{ N/mm}^2, \text{ tj. } \sigma_{x,\max} = 18,75 \text{ MPa}. \quad (2.6)$$

Maksimalni progib za ovaj slučaj opterećenja nalazi se na mjestu djelovanja sile *F* te se računa prema sljedećem izrazu:

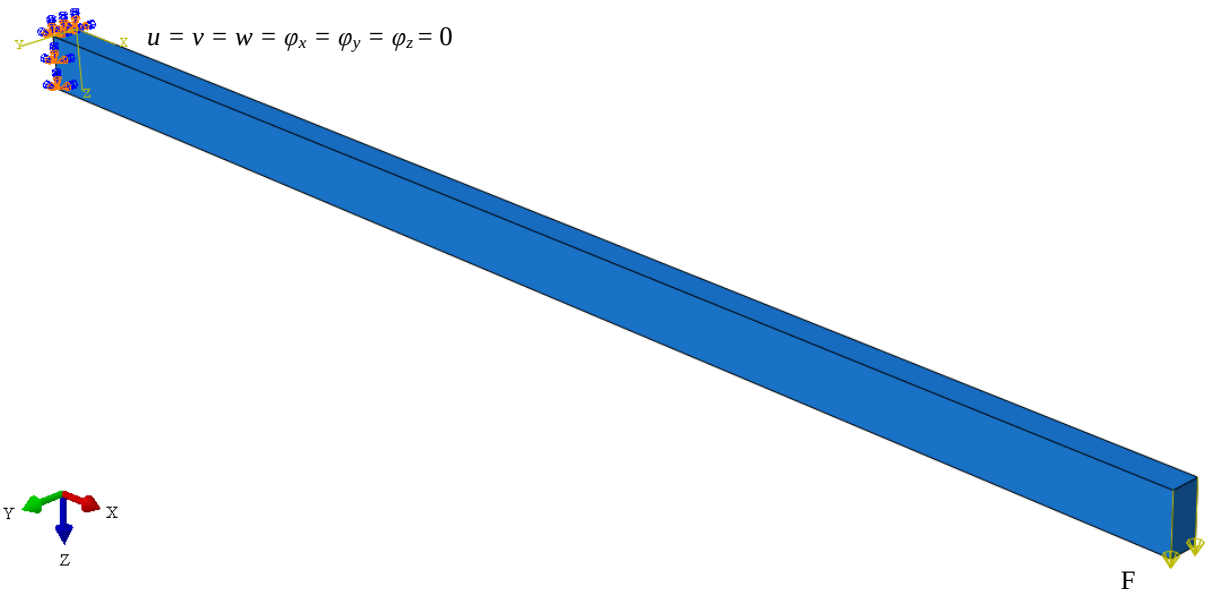
$$w_{\max} = \frac{F \cdot L^3}{3EI_y}, \quad (2.7)$$

gdje je *E* Youngov modul elastičnosti za odabrani materijal, a iznosi 210 GPa [8]. Nakon uvrštavanja vrijednosti u izraz (2.7) progib na mjestu djelovanja sile iznosi:

$$w_{\max} = \frac{100 \cdot 1000^3}{3 \cdot 210000 \cdot 106666,67} = 1,49 \text{ mm}. \quad (2.8)$$

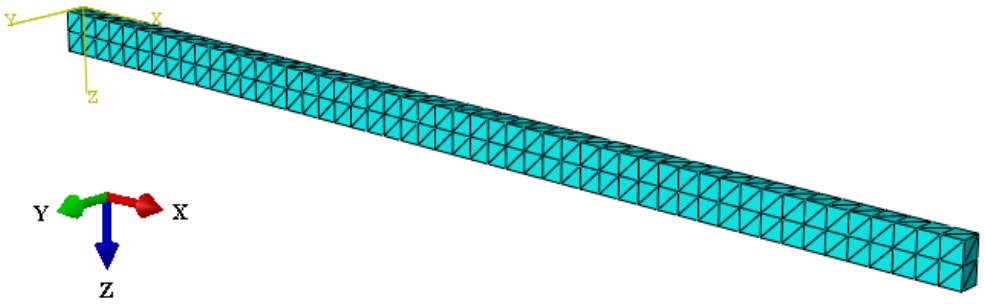
2.2.2. Numerička analiza 3D konačnim elementima

Na [Slika 11] nalazi se model nosača za numeričku analizu zadan prema [Slika 10].

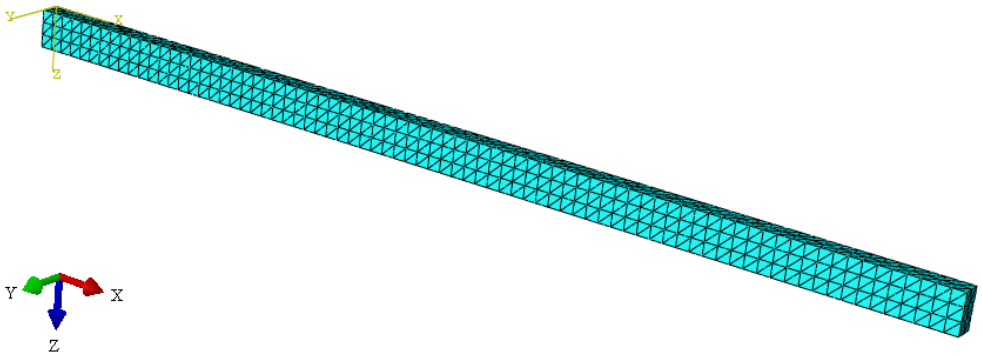


Slika 11. Numerički model za analizu

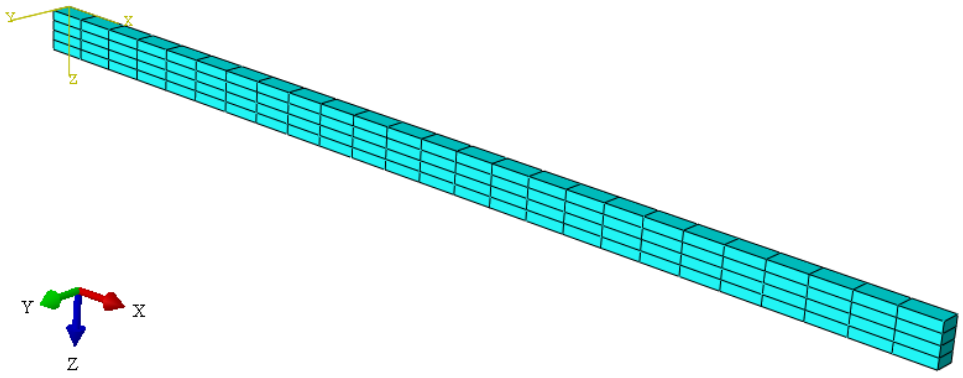
Za diskretizaciju problema koristit će se 3D konačni elementi. Diskretizacije različitim konačnim elementima prikazane su na slikama [Slika 12, Slika 13, Slika 14, Slika 15].



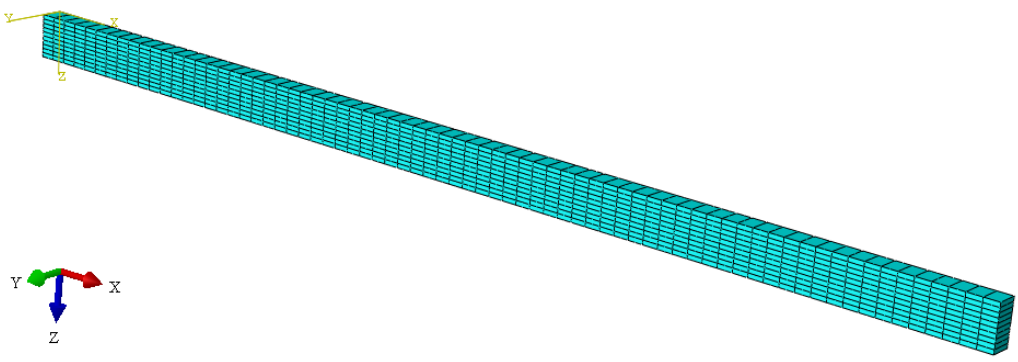
Slika 12. Diskretizacija konzole s 1175 C3D4 konačnih elemenata



Slika 13. Diskretizacija konzole s 3835 C3D10 konačnih elemenata

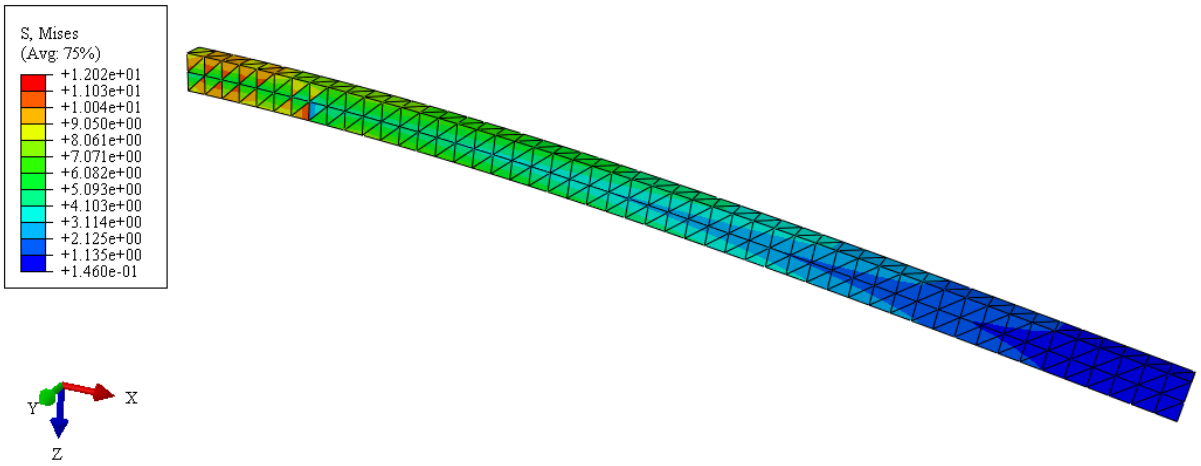


Slika 14. Diskretizacija konzole sa 100 C3D8R konačnih elemenata

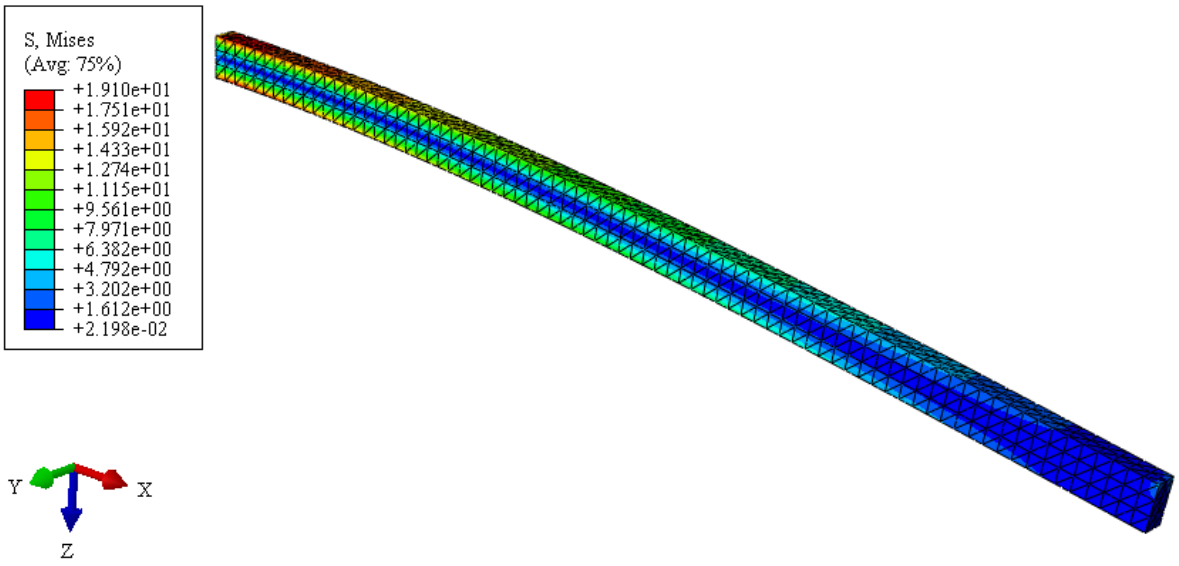


Slika 15. Diskretizacija konzole sa 710 C3D20R konačnih elemenata

Deformirani oblici modela i raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu u MPa za različite diskretizacije modela prikazani su na slikama [Slika 16, Slika 17, Slika 18, Slika 19].

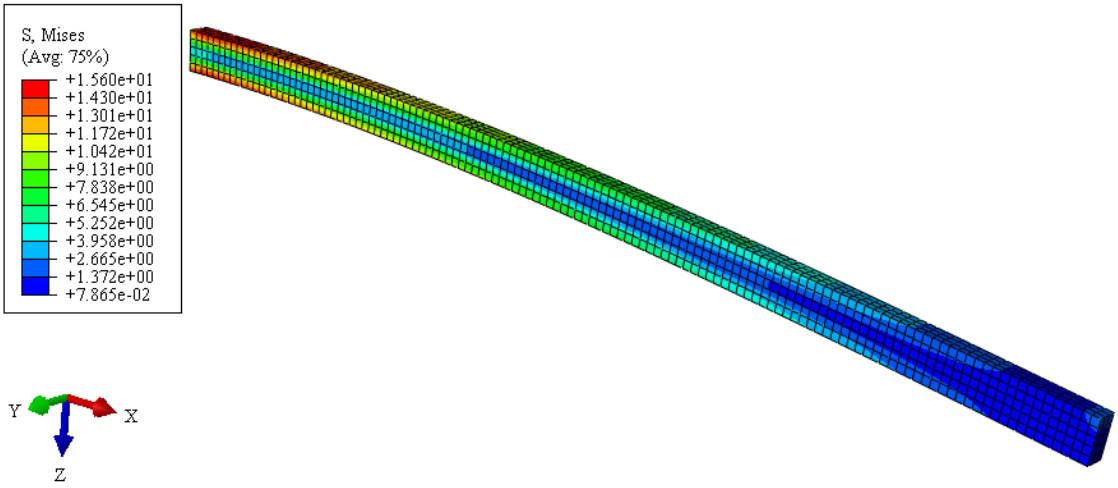


Slika 16. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu za diskretizaciju s 1175 C3D4 konačnih elemenata u MPa

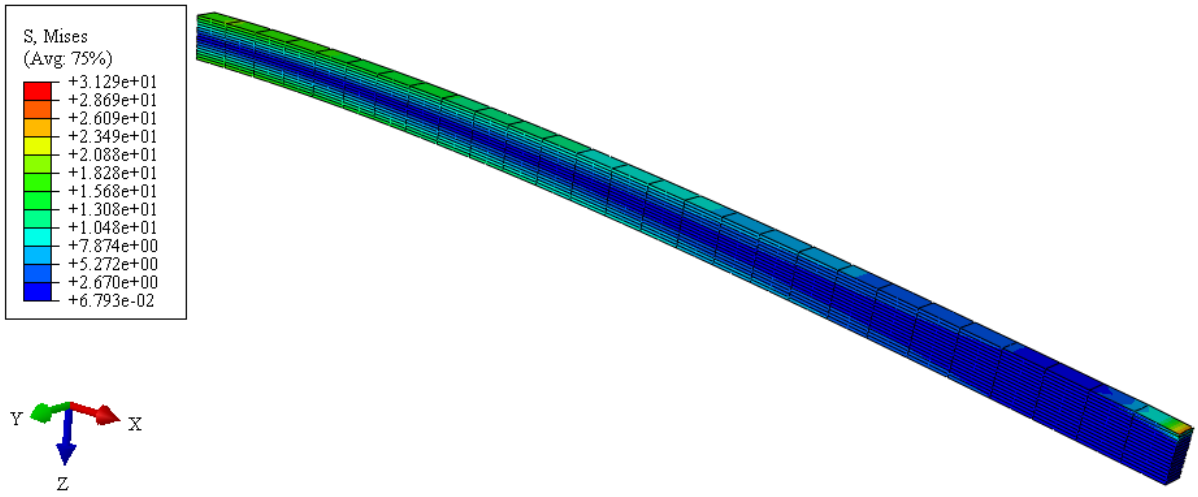


Slika 17. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu za diskretizaciju s 3835 C3D10 konačnih elemenata u MPa

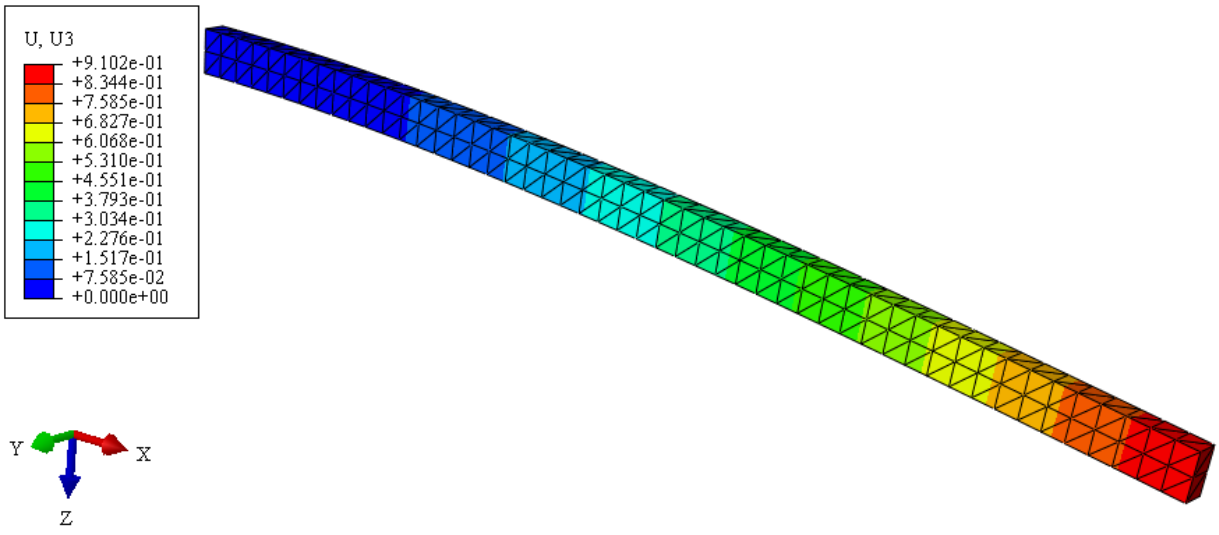
Iznos i raspodjela pomaka u smjeru osi *z* po modelu u mm za različite diskretizacije modela prikazana je na slikama [Slika 20, Slika 21, Slika 22, Slika 23].



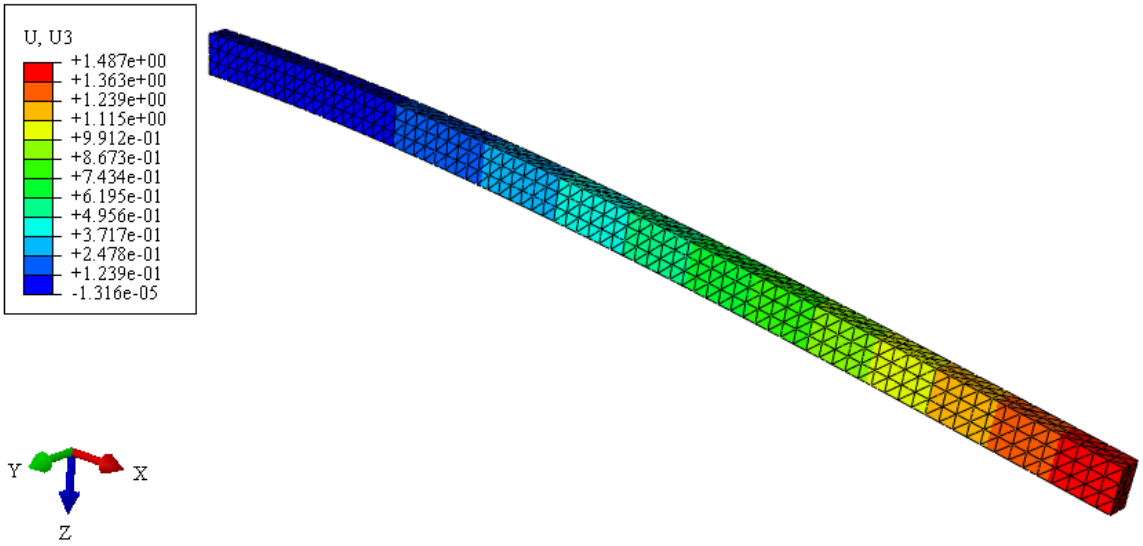
Slika 18. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu za diskretizaciju s 1875 C3D8R konačnih elemenata u MPa



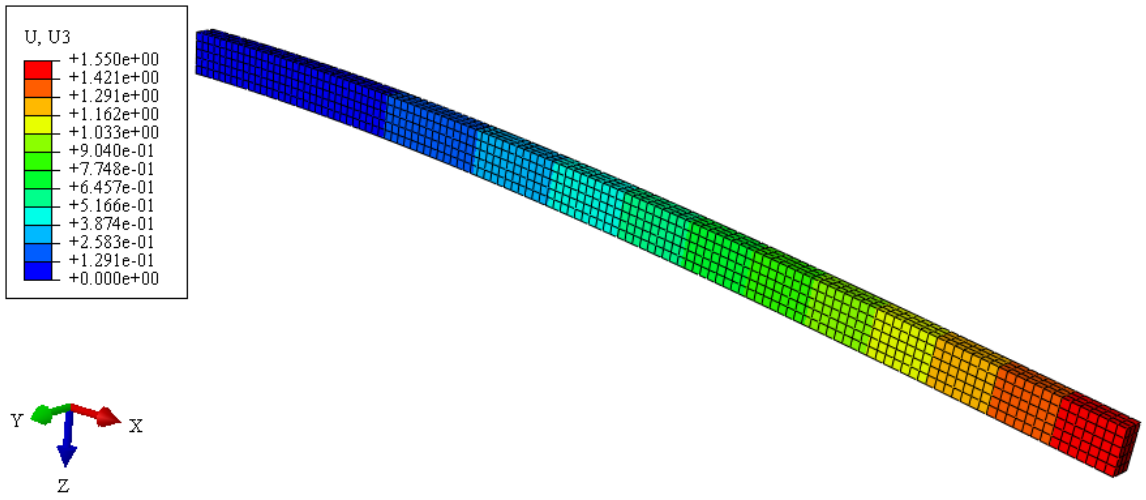
Slika 19. Raspodjela ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu za diskretizaciju s 405 C3D20R konačnih elemenata u MPa



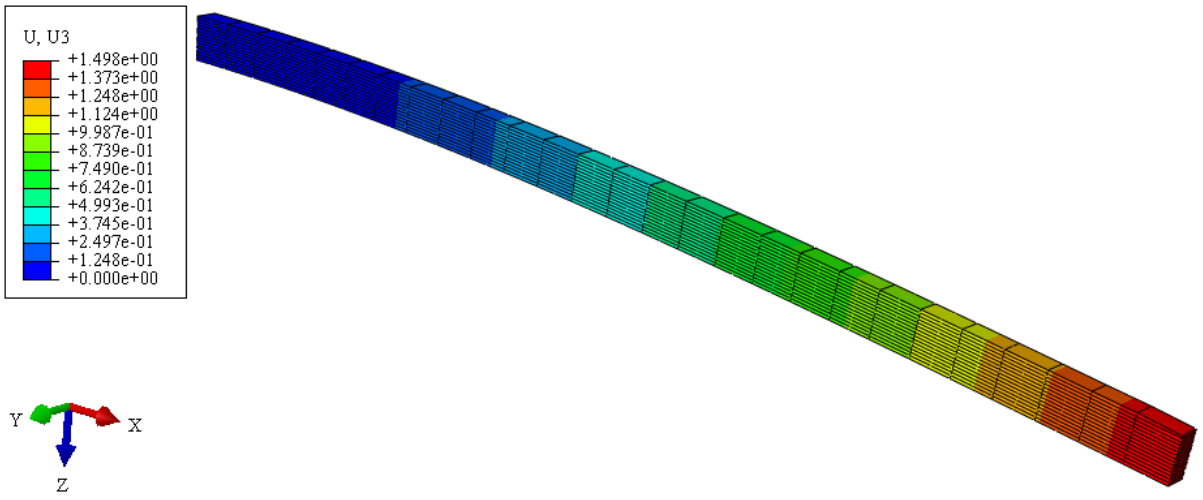
Slika 20. Iznos i raspodjela pomaka na konzoli za diskretizaciju s 1175 C3D4 konačnih elemenata u mm



Slika 21. Iznos i raspodjela pomaka na konzoli za diskretizaciju s 3835 C3D10 konačnih elemenata u mm

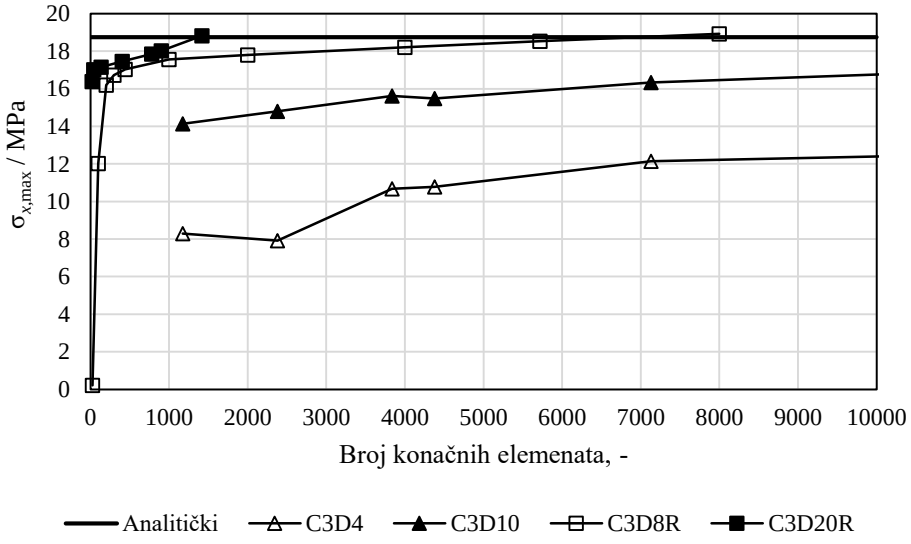


Slika 22. Iznos i raspodjela pomaka na konzoli za diskretizaciju s 1875 C3D8R konačnih elemenata u mm



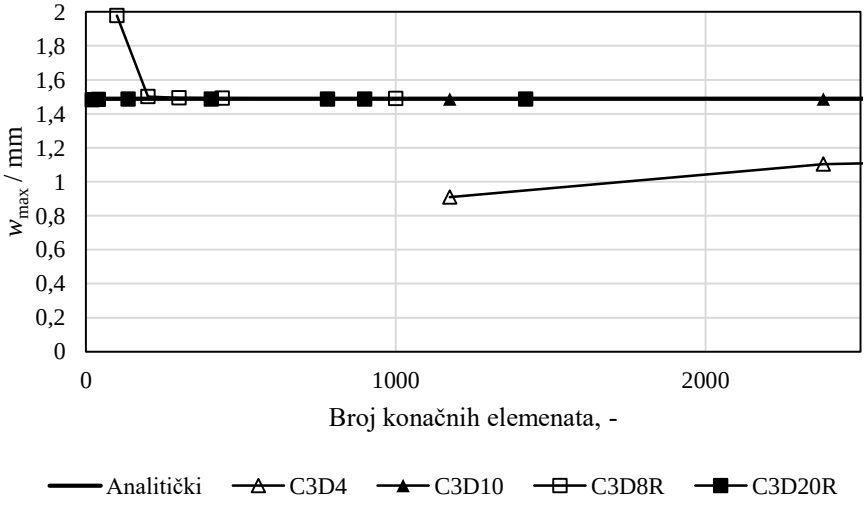
Slika 23. Iznos i raspodjela pomaka na konzoli za diskretizaciju s 405 C3D20R konačnih elemenata u mm

Na [Slika 24] prikazane su konvergencije maksimalnih ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu dobivene diskretizacijom s različitim brojem i vrstom konačnih elemenata te analitičko rješenje kao referentno. Vidi se da konačni elementi 2. reda i elementi s većim brojem stupnjeva slobode brže konvergiraju i daju točnija rješenja već i za diskretizacije s manjim brojem konačnih elemenata. Također, vidi se da prizmatični konačni elementi bolje opisuju pravokutni presjek, što je i logično, te daju bolja rješenja za zadani primjer.



Slika 24. Konvergencija maksimalnog ekvivalentog naprezanja prema von Misesu u MPa

Na [Slika 25] prikazane su konvergencije pomaka za diskretizacije s različitim brojem konačnih elemenata i analitičko rješenje kao referentno. Iz slike se vidi da svi konačni elementi brzo konvergiraju i daju dovoljno točna rješenja, osim tetraedarskih konačnih elemenata 1. reda (C3D4) koji jako sporo konvergiraju i ne daju dovoljno točna rješenja.



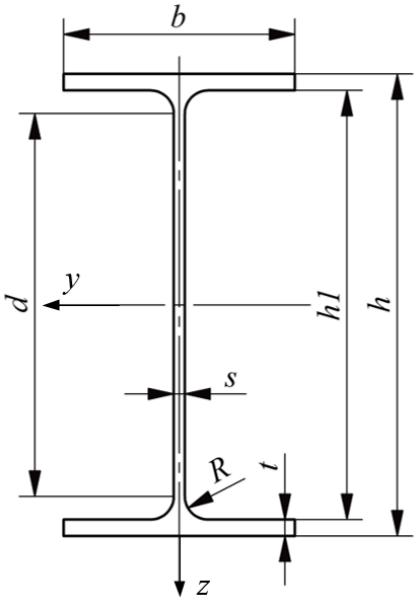
Slika 25. Konvergencija pomaka u smjeru osi *z* na mjestu djelovanja sile u mm

3. UTJECAJ SMANJENJA MASE NA PROMJENU NOSIVOSTI I – PROFILA

U ovom poglavlju provedena je analiza smanjenja mase i nosivosti I - profila na način da su u rebru profila izrezani otvori kružnog oblika. Pri tome je analizirano kako veličina i razmak između otvora utječu na promjenu naprezanja i deformacije u profilu. Na početku je odabran i analitički proračunat nosač standardnog punog IPE profila koji služi za verifikaciju konačnih elemenata i daje referentne iznose za masu, nosivost, naprezanja i deformacije.

3.1. Standardni IPE 300 profil

Za provedbu analize odabran je IPE 300 profil kao srednja veličina standardnih IPE profila. Opći presjek IPE profila prikazan je na [Slika 26], a dimenzije i statičke karakteristike presjeka IPE 300 profila navedene su u [Tablica 2] i [Tablica 3]. Materijal profila je čelik S235JR.



Slika 26. Presjek IPE profila [9]

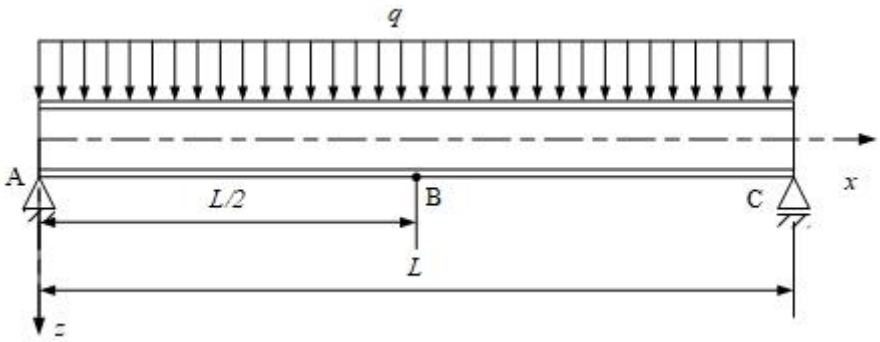
Tablica 2. Dimenzije odabranog IPE 300 profila [10]

Oznaka	b / mm	h / mm	s / mm	t / mm	R / mm	h_1 / mm	d / mm
IPE 300	150	300	7,1	10,7	15	278,6	248,6

Tablica 3. Statičke karakteristike presjeka IPE 300 profila [10]

Oznaka	I_y / cm^4	I_z / cm^4	W_y / cm^3	W_z / cm^3	A / mm^2
IPE 300	8356	604	557	125	5380

Analiza će se provoditi na jednostavno oslonjenom IPE profilu s površinskim kontinuiranim opterećenjem standardne proizvodne duljine od 6 m prikazanim na [Slika 27].



Slika 27. Opterećenje standardnog IPE 300 profila za analizu

Za čelik S235JR granica razvlačenja prema [8] iznosi $R_{p0,2}$ = 235 N/mm^2. Dopušteno naprezanje prema [1] za faktor sigurnosti S = 1,5 računa se prema sljedećem izrazu:

$$\sigma_{dop} = \frac{R_{p0,2}}{S} = \frac{235}{1,5} = 156,67 \text{ N/mm}^2, \text{ tj. } \sigma_{dop} = 156,67 \text{ MPa} . \tag{2.9}$$

Prema podacima iz [8] gustoća čelika iznosi ρ = 7850 kg/m^3. Masa IPE 300 profila iznosi:

$$m = A \cdot L \cdot \rho = 5380 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 7850 = 253,398 \text{ kg}. \tag{2.10}$$

3.2. Analitički proračun standardnog IPE 300 profila

Uvjet čvrstoće prema [1] je:

$$\sigma_{ekv} \leq \sigma_{dop} , \tag{2.11}$$

gdje je σ_{ekv} ekvivalentno naprezanje prema teoriji najveće distorzijske energije tj. HMH teoriji, a računa se prema sljedećem izrazu:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^{\ 2} + \tau_{yz}^{\ 2} + \tau_{zx}^{\ 2})\right]} . \tag{2.12}$$

Za ovakav način opterećenja vrijedi sljedeći izraz za naprezanja u nosaču:

$$\sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0\,. \tag{2.13}$$

Budući da su kod ovakvog načina opterećenja na mjestu najvećih normalnih naprezanja posmična naprezanja τ_{xy} jednaka nuli, izraz (2.12) možemo zapisati na sljedeći način:

$$\sigma_{\text{ekv}} = \sigma_{x,\max} \text{ tj. } \sigma_{x,\max} \le \sigma_{\text{dop}}. \tag{2.14}$$

Maksimalno normalno naprezanje prema izrazu iz [1] iznosi:

$$\sigma_{x,\max} = \frac{M_{y,\max}}{W_y}\,, \tag{2.15}$$

gdje je W_y moment otpora presjeka oko osi y.

Prema izrazima (2.14) i (2.15) najveći moment opterećenja smije iznositi:

$$M_{y,\max} \le \sigma_{\text{dop}} \cdot W_y\,. \tag{2.16}$$

Nakon uvrštavanja veličina u izraz (2.16) dobivamo sljedeće:

$$M_{y,\max} \le 156,67 \cdot 557 \cdot 10^3 = 87265190 \text{ Nmm}\,. \tag{2.17}$$

Najveći moment opterećenja nalazi se na mjestu $L/2$. Za kontinuirano površinsko opterećenje moment se računa prema izrazu iz [1]:

$$M_{y,\max} = q_{\max} \cdot \frac{L^2}{8} \cdot b\,, \tag{2.18}$$

gdje je:

q – površinsko kontinuirano opterećenje u N/m^2,

b – širina profila prema [Tablica 2].

Uvrštavanjem vrijednosti u izraz (2.18) te uzimajući u obzir izraz (2.17) slijedi:

$$q_{\max} \le \frac{8M_y}{L^2 \cdot b} = \frac{8 \cdot 87265190}{6000^2 \cdot 150} = 0,12928176 \text{ N/mm}^2 = 129281,76 \text{ N/m}^2 \tag{2.19}$$

što predstavlja najveće dopušteno opterećenje. Ako bismo površinsku silu pretvorili u masu koja opterećuje profil prema [8] dobili bismo sljedeće:

$$M_{\max} = \frac{q_{\max}}{g} \cdot b \cdot L = \frac{129281,76}{9,80665} \cdot 0,15 \cdot 6 = 11864,76 \text{ kg}\,, \tag{2.20}$$

što predstavlja nosivost IPE 300 profila za zadani način opterećenja.

Najveći progib za ovakav način opterećenja i uležištenja nalazi se na sredini nosača, odnosno u točki B prema [Slika 27], a prema [1] računa se prema sljedećem izrazu:

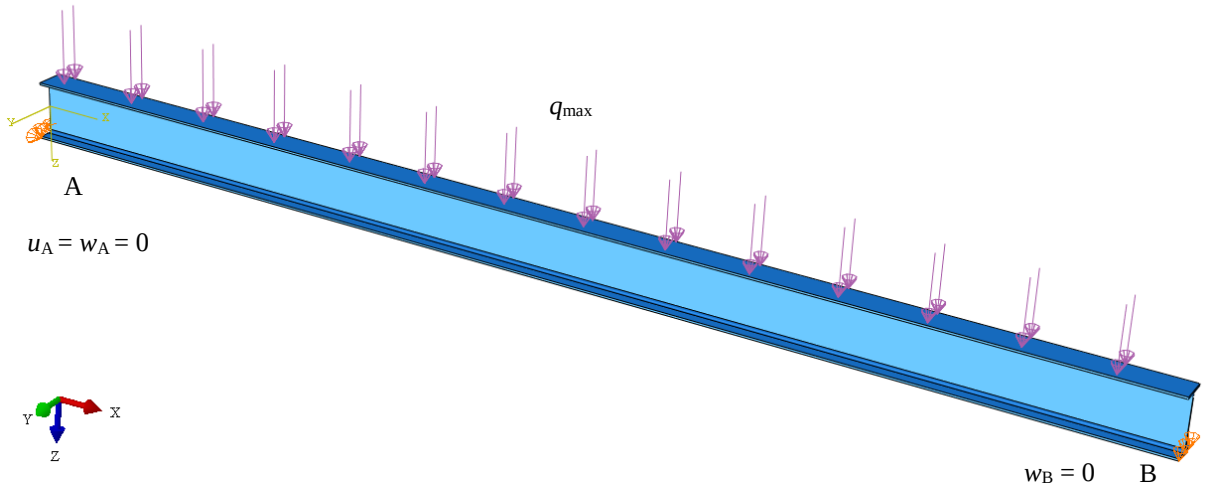
$$w_{\max} = \frac{5}{384} \frac{q_{\max} \cdot b \cdot L^4}{E \cdot I_y}. \tag{2.21}$$

Nakon uvrštavanja veličina u izraz (2.21) dobivamo sljedeće:

$$w_{\max} = \frac{5}{384} \frac{0{,}1292817 \cdot 150 \cdot 6000^4}{210000 \cdot 8356 \cdot 10^4} = 18{,}65 \text{ mm}. \tag{2.22}$$

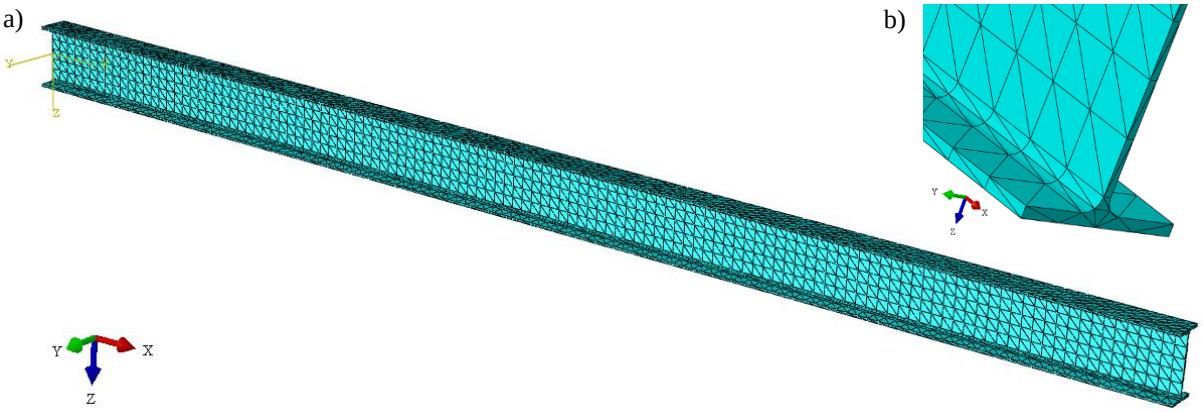
3.3. Numerički proračun standardnog IPE 300 profila

Modeliranje opterećenja i oslonaca u programskom paketu *Abaqus* za standardni IPE 300 profil prikazano je na [Slika 28]. Numerička analiza provedena je na način da je nosač opterećen kontinuiranim opterećenjem $q_{\max}$ dobiveno analitičkim proračunom u izrazu (2.19) za dopušteno naprezanje σ_{dop}. Dobivena naprezanja i pomaci uspoređeni su s vrijednostima dobivenim analitičkim proračunom.

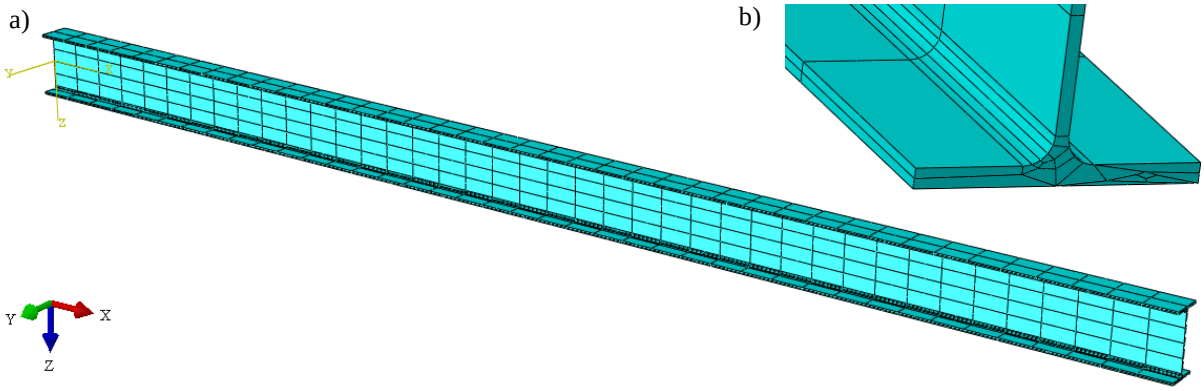


Slika 28. Numerički model IPE 300 nosača

Diskretizirani model nosača s tetraedarskim konačnim elementima 2. reda i detalj diskretizacije zaobljenja prikazani su na [Slika 29]. Diskretizirani model nosača s prizmatičnim konačnim elementima 2. reda i detalj diskretizacije zaobljenja prikazan je na [Slika 30].

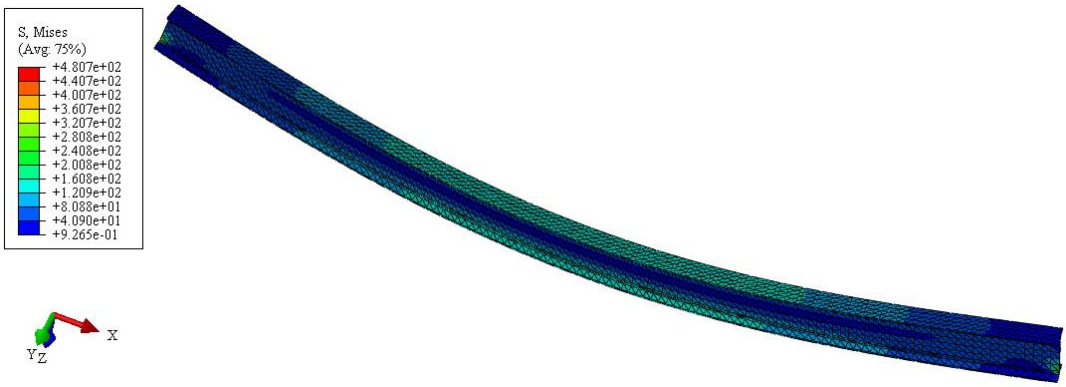


Slika 29. a) Diskretizacija s 13667 C3D10 konačnih elemenata, b) detalj diskretizacije zaobljenja



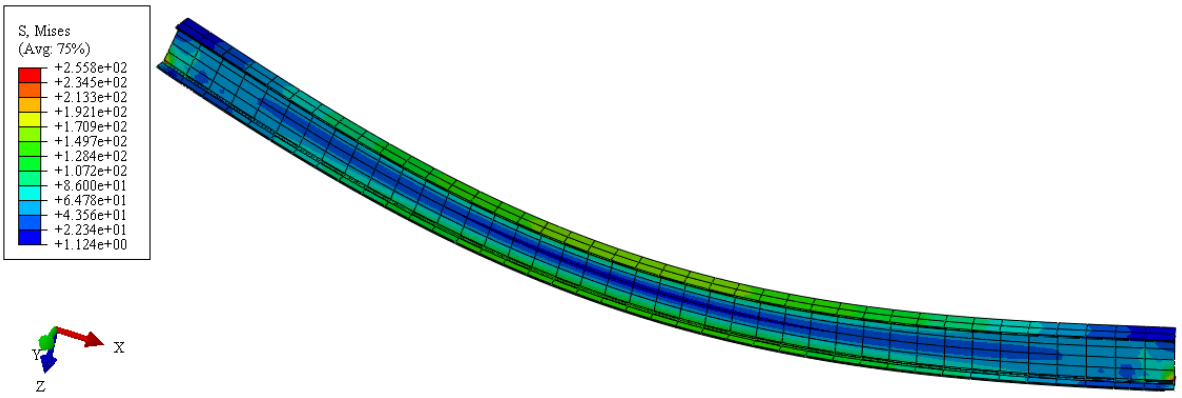
Slika 30. a) Diskretizacija s 1600 C3D20R konačnih elemenata, b) detalj diskretizacije zaobljenja

Na [Slika 31] prikazan je deformirani oblik i raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu dobivenih diskretizacijom s 13667 tetraedarskih konačnih elemenata 2. reda, a na [Slika 33] prikazana je raspodjela pomaka za istu mrežu konačnih elemenata.

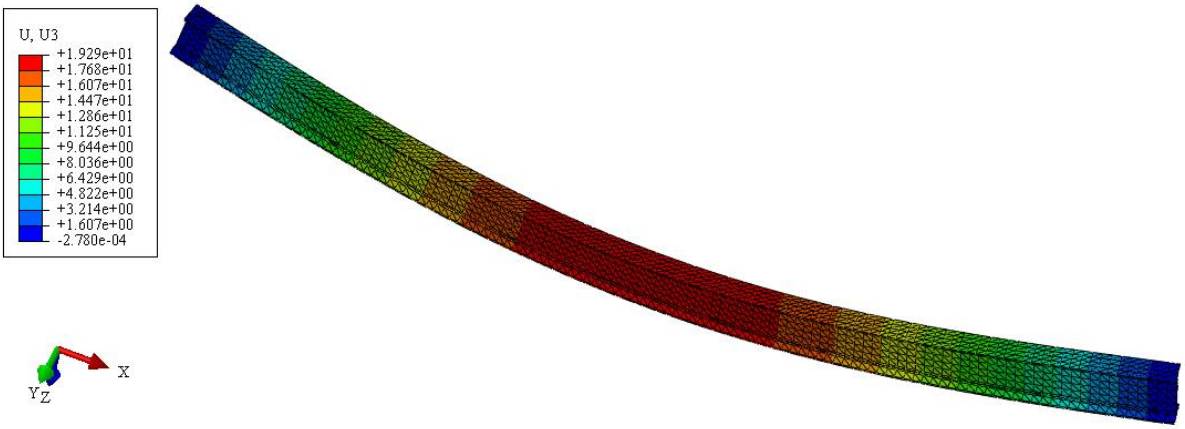


Slika 31. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu dobivenih diskretizacijom s 13667 C3D10 konačnih elemenata u MPa

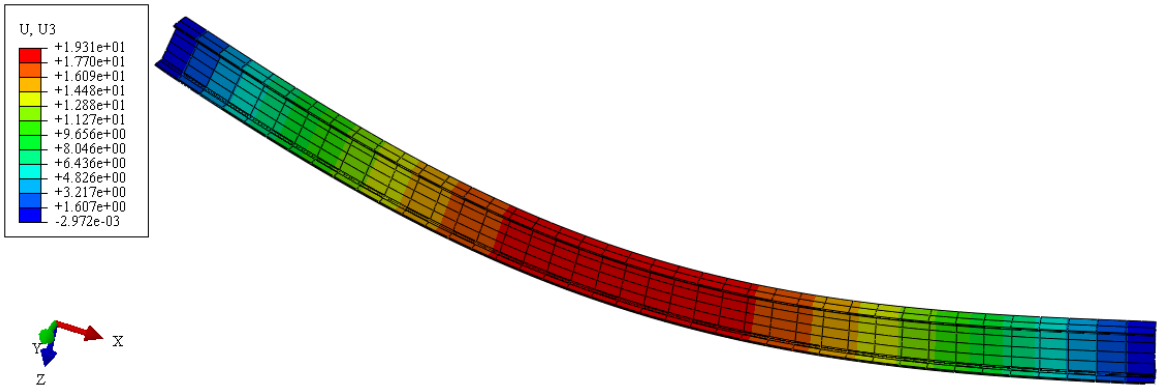
Na [Slika 32] prikazan je deformirani oblik i raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu dobivenih diskretizacijom s 1600 prizmatičnih konačnih elemenata 2. reda, a na [Slika 34] prikazana je raspodjela pomaka za istu mrežu konačnih elemenata.



Slika 32. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu dobivenih diskretizacijom s 1600 C3D20R konačnih elemenata u MPa

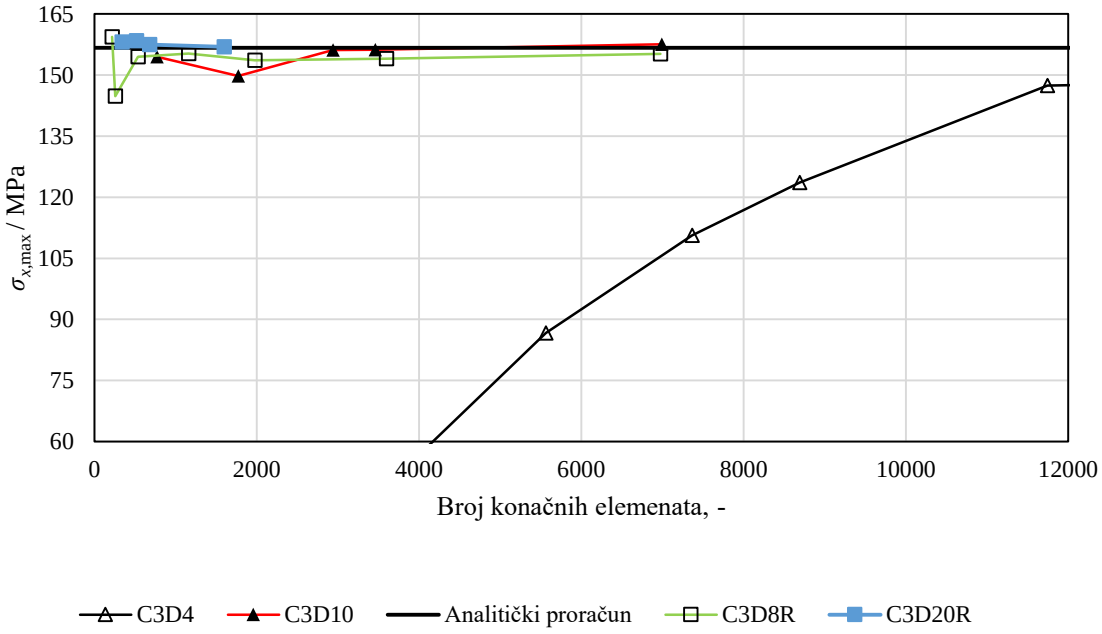


Slika 33. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* dobivenih diskretizacijom s 13667 C3D10 konačnih elemenata u mm



Slika 34. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* dobivenih diskretizacijom s 1600 C3D20R konačnih elemenata u mm

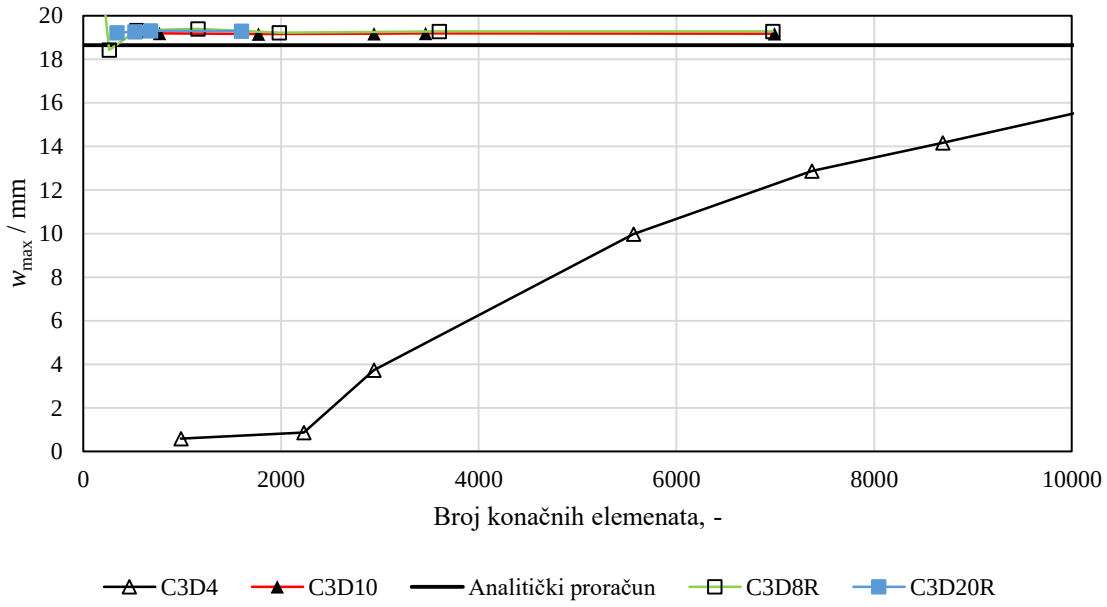
Na [Slika 35] prikazana je konvergencija maksimalnih ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu na mjestu *L*/2 za diskretizacije IPE 300 profila s različitim vrstama i brojem konačnih elemenata. Na slici je prikazano i analitičko rješenje. Uočeno je da svi konačni elementi brzo konvergiraju, osim tetraedarskih konačnih elemenata 1. reda koji konvergiraju jako sporo i s diskretizacijom s velikim brojem konačnih elemenata.



Slika 35. Konvergencija maksimalnih ekvivalentih naprezanja prema von Misesu na mjestu *L*/2 u MPa

Na [Slika 36] prikazana je konvergencija pomaka na mjestu *L*/2 za diskretizacije s različitim vrstama i brojem konačnih elemenata. Za razliku od tetraedarskih konačnih elemenata 2. reda i prizmatičnih konačnih elemenata koji daju točna rješenja i za diskretizacije s malim brojem konačnih elemenata, tetraedarski konačni elementi 1. reda konvergiraju tek s jako velikim brojem konačnih elemenata i ne daju dovoljno točna i pouzdana rješenja.

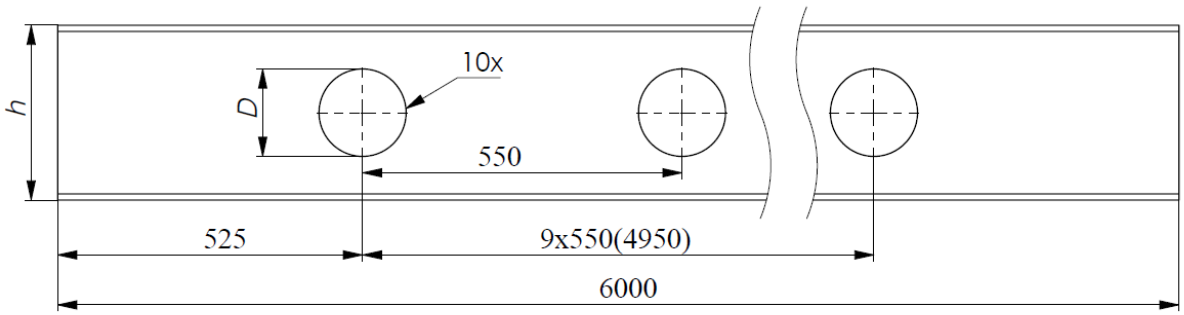
Prizmatični konačni elementi daju najtočnije rezultate i konvergiraju već s malim brojem konačnih elemenata. Iako dobro opisuju geometriju standardnog IPE profila, teže opisuju geometriju kružnih oblika od tetraedarskih konačnih elemenata. Zato su u analizi IPE profila s otvorima korišteni tetraedarski konačni elementi 2. reda koji mogu dobro opisati geometriju i dati dovoljno točne rezultate.



Slika 36. Konvergencija pomaka u smjeru osi *z* na mjestu *L*/2 u mm

3.4. Analiza utjecaja veličine otvora

U ovom poglavlju provedena je analiza utjecaja veličine otvora kružnog oblika u rebru IPE profila na smanjenje mase, promjenu raspodjele naprezanja i deformacija te smanjenje nosivosti. U rebru IPE 300 profila napravljeno je 10 otvora promjera *D* na udaljenosti od 550 mm jedan od drugog tako da se smanji utjecaj na naprezanja na susjednom otvoru, a krajnji otvori udaljeni su 525 mm od krajeva nosača. Analizirani IPE 300 profil s kružnim otvorima i dimenzijama prikazan je na [Slika 37].



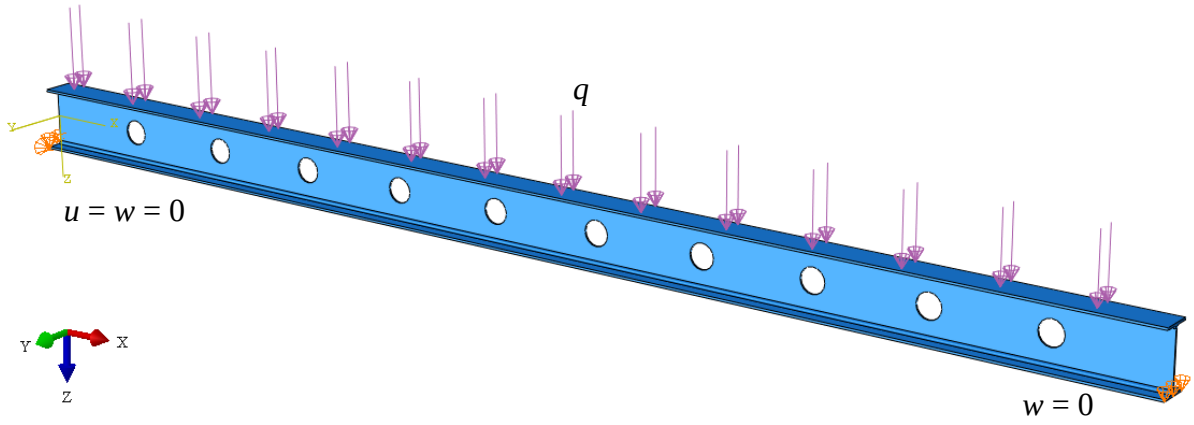
Slika 37. IPE 300 profil s kružnim otvorima

Veličine kružnih otvora promatrane su kao omjer promjera otvora *D* i visine profila *h*, *tj*. *D*/*h*. Veličine otvora navedene su u [Tablica 4].

Tablica 4. Vrijednosti promjera otvora *D* u mm

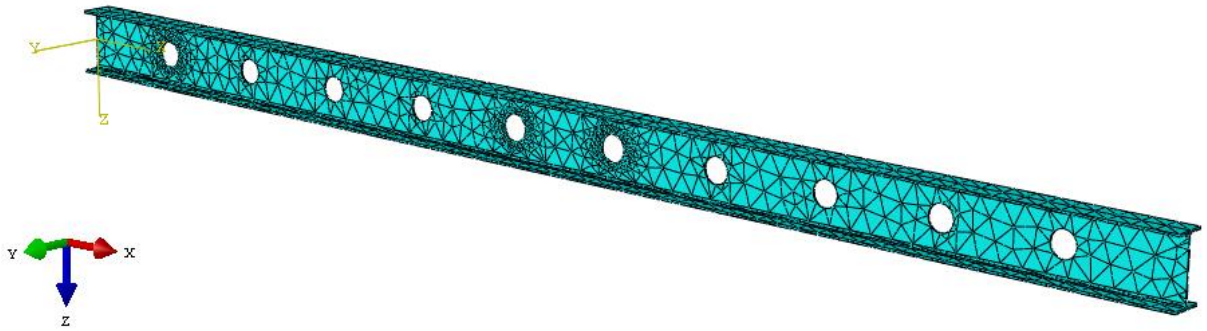
D*/*h	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
***D* / mm**	30	60	90	120	150	180	210	240

Na [Slika 38] prikazan je numerički model nosača za *D*/*h* = 0,4 zajedno s opterećenjem i osloncima za numeričku analizu utjecaja veličine otvora na promjenu nosivosti.



Slika 38. Numerički model nosača za numeričku analizu utjecaja veličine otvora na promjenu nosivosti

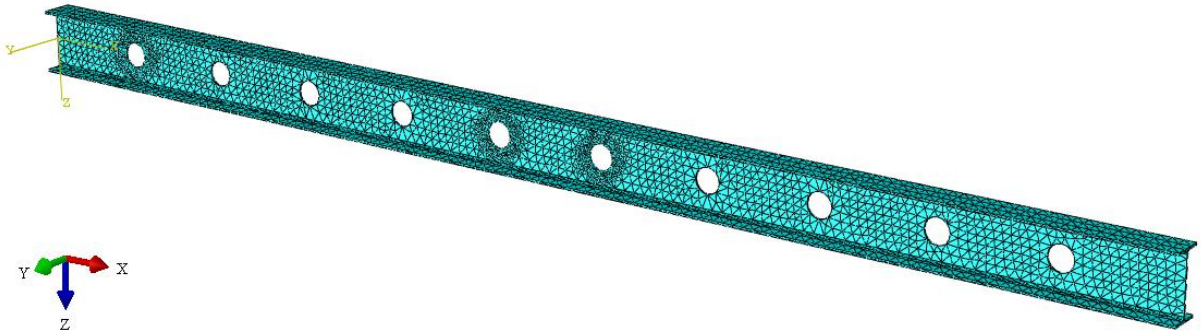
Kako je objašnjeno u prethodnom poglavlju, numerički modeli će biti diskretizirani s tetraedarskim konačnim elementima 2. reda. Diskretizacija numeričkog modela za *D*/*h* = 0,4 je prikazana na [Slika 39, Slika 41, Slika 41]. Na otvorima u sredini nosača i jednom otvoru blizu oslonca korištena je gušća mreža konačnih elemenata kako bi se točnije moglo odrediti kako se mijenja naprezanje na tim mjestima.



Slika 39. Diskretizirani numerički model sa 7039 C3D10 konačnih elemenata za *D*/*h* = 0,4

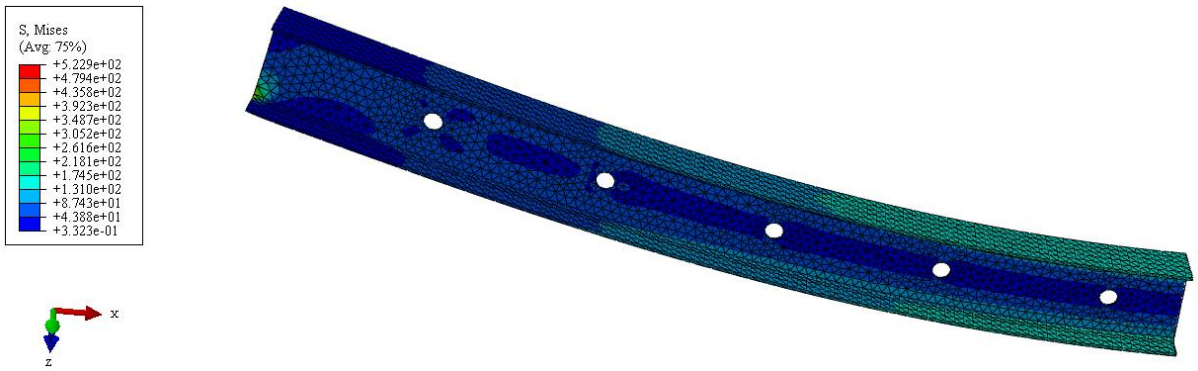


Slika 40. Diskretizirani numerički model s 14594 C3D10 konačnih elemenata za *D*/*h* = 0,4

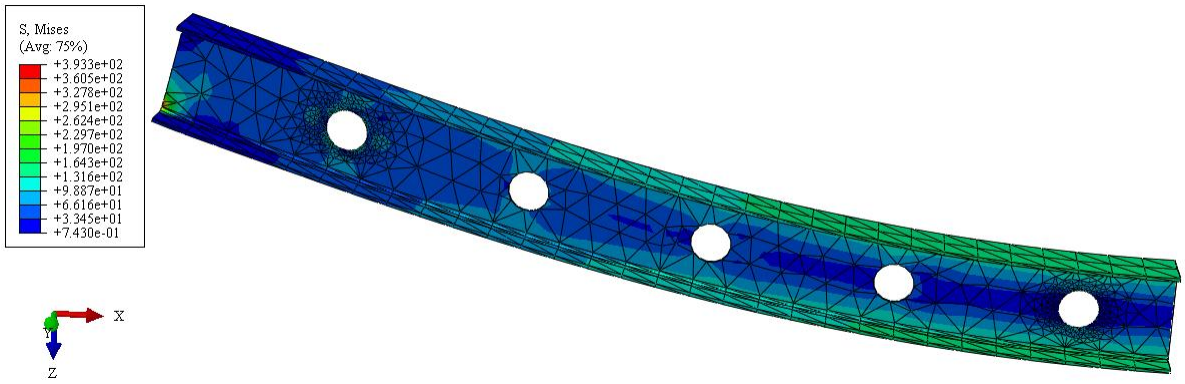


Slika 41. Diskretizirani numerički model s 28316 C3D10 konačnih elemenata za *D*/*h* = 0,4

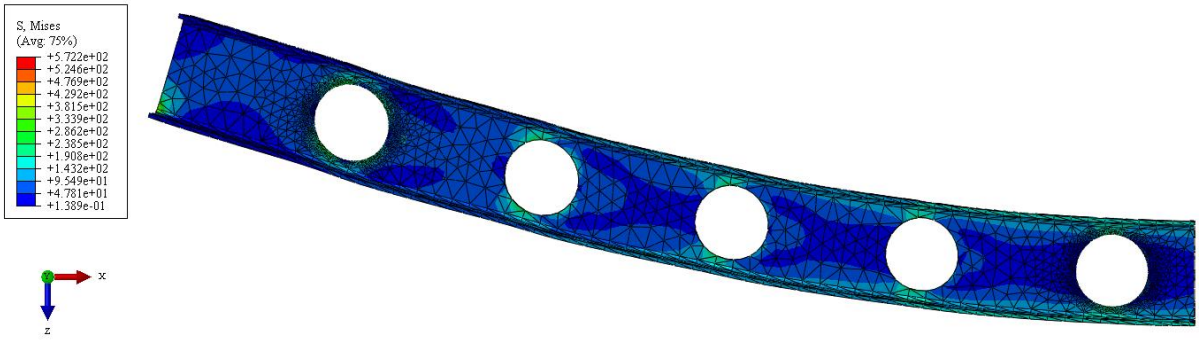
Na [Slika 42, Slika 43, Slika 44] prikazana je raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za diskretizaciju s C3D10 konačnim elementima i otvore veličine $D = 0{,}2h$, $D = 0{,}4h$, $D = 0{,}7h$. Na [Slika 45, Slika 46, Slika 47] prikazane su raspodjele pomaka u smjeru osi z za iste veličine otvora. Raspodjele su prikazane samo na polovici nosača zbog bolje preglednosti.



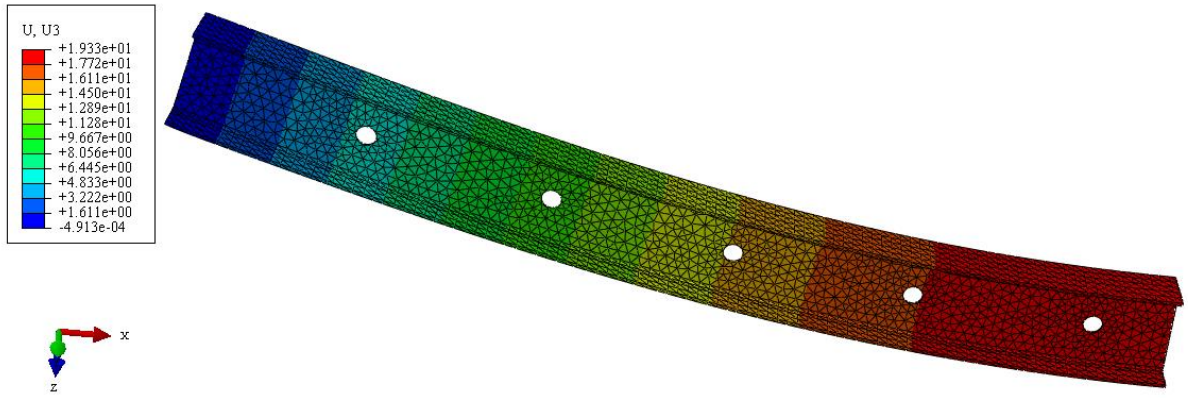
Slika 42. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za *D*/*h* = 0,2 u MPa



Slika 43. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za *D*/*h* = 0,4 u MPa

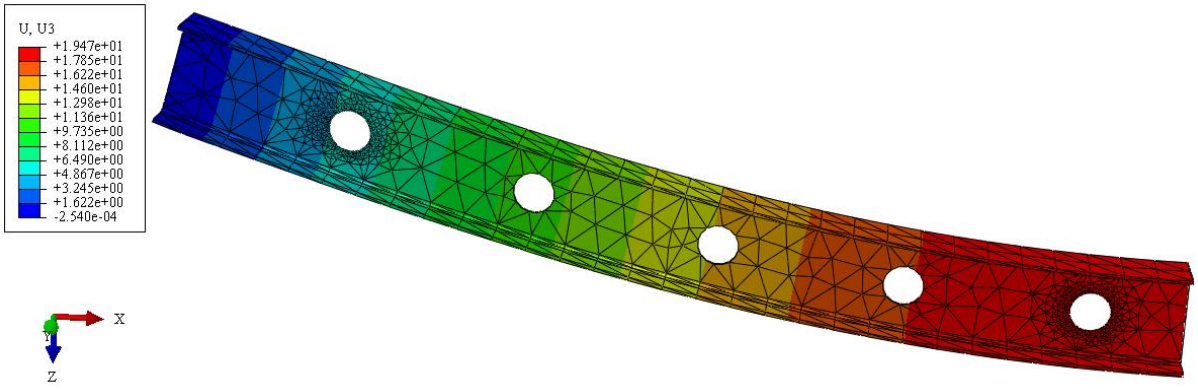


Slika 44. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za *D*/*h* = 0,7 u MPa

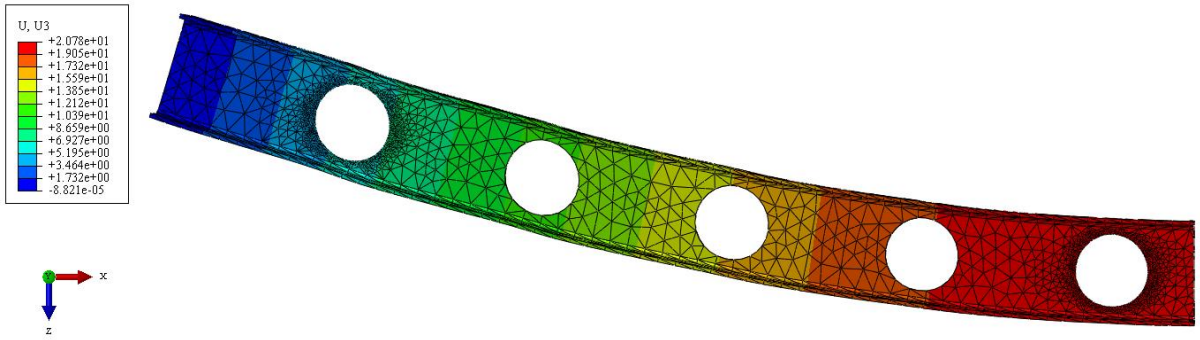


Slika 45. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* za *D*/*h* = 0,2 u mm

Masa, naprezanje, deformacije i dopušteno opterećenje (nosivost) na dijagramima su izraženi kao postotak od vrijednosti dobivene numeričkim proračunom za standardni IPE 300 profil.



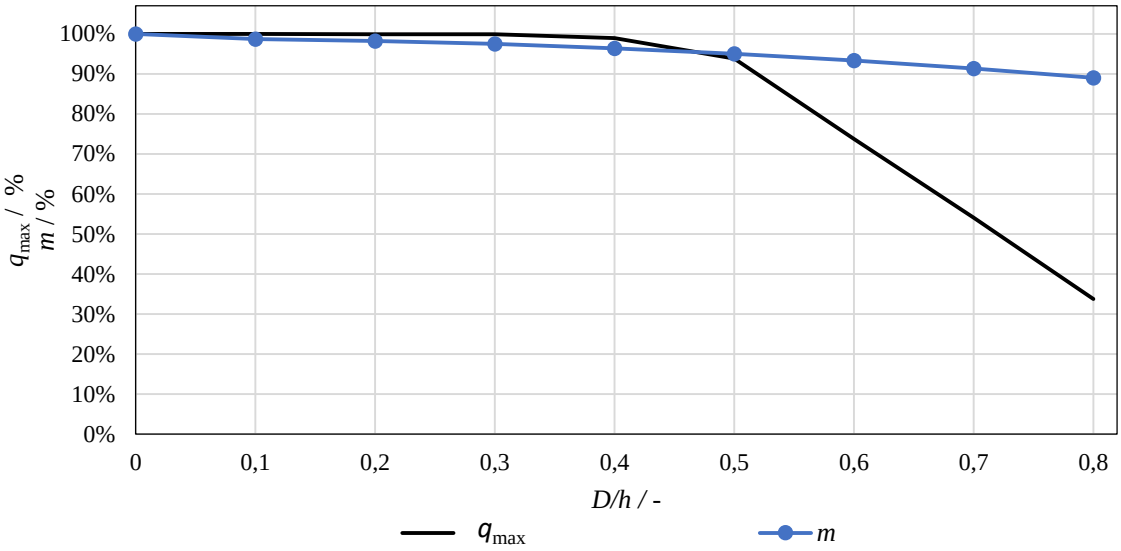
Slika 46. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* za *D*/*h* = 0,4 u mm



Slika 47. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* za *D*/*h* = 0,7 u mm

Na [Slika 48] prikazano je smanjenje mase i smanjenje najvećeg dopuštenog opterećenja u ovisnosti s promjenom veličine otvora, odnosno omjera D/h. Uočeno je da se masa profila smanjuje brže od najvećeg dopuštenog opterećenja za otvore do veličine $D = 0{,}4h$ te da imaju podjednak postotni pad za veličinu otvora $D = 0{,}5h$. Za otvore veće od $D = 0{,}5h$ masa se nastavlja polako smanjivati dok dopušteno opterećenje naglo pada.

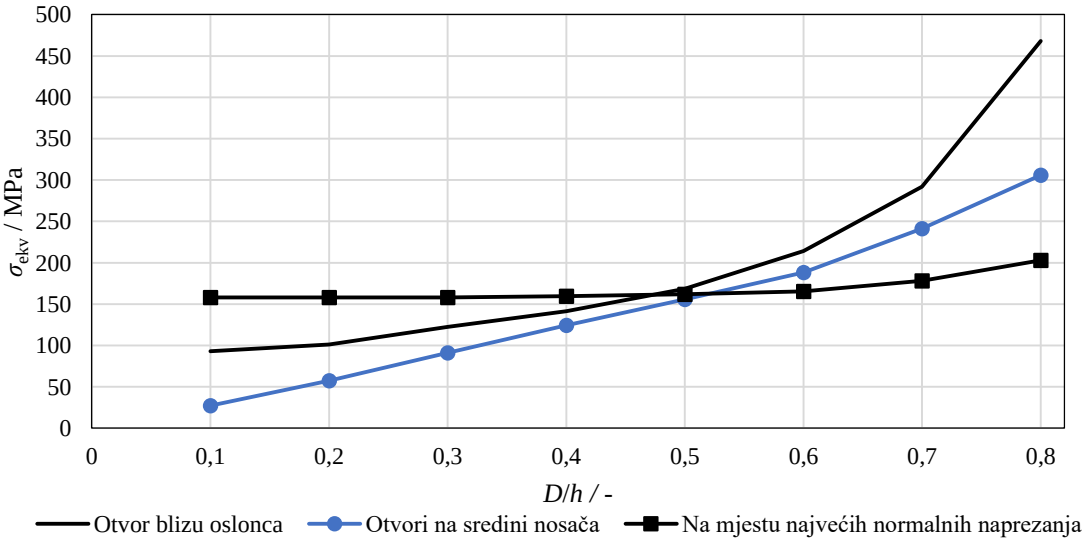
Na [Slika 49] prikazana je promjena ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu na različitim dijelovima nosača u ovisnosti s promjenom veličine otvora za početno dopušteno opterećenje dobiveno analitičkim proračunom u izrazu (2.19). Iz tog dijagrama vidimo da normalna naprezanja σ_x na mjestu $L/2$ do veličine otvora $D = 0{,}6h$ gotovo da ne mijenjaju iznos te nemaju utjecaj na pad nosivosti s porastom veličine otvora. Naprezanja na otvoru blizu oslonca jako brzo rastu i postaju mjerodavna za otvore veće od $D = 0{,}5h$ te uzrokuju veliki pad nosivosti profila. Naprezanja na otvorima na sredini profila kontinuirano rastu, ali ni u jednom trenutku nisu mjerodavna za nosivost profila. Iz toga zaključujemo da su otvori koji se nalaze u području velike posmične sile mjerodavni za nosivost profila.



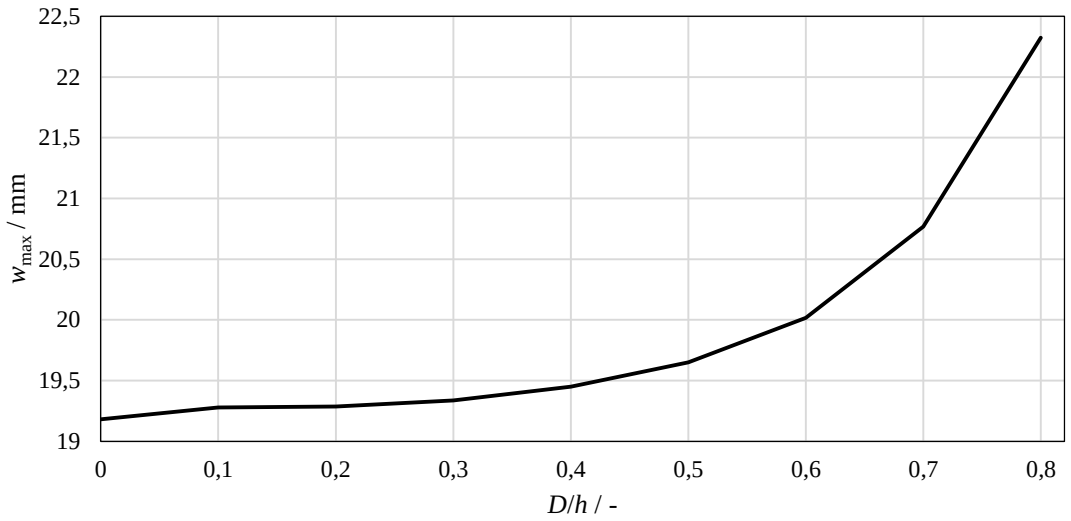
Slika 48. Usporedba smanjenja mase i opterećenja s povećanjem veličine otvora u %

Na [Slika 50] prikazan je progib na mjestu $L/2$ u ovisnosti s promjenom veličine otvora. Uočeno je da veličina otvora nema veliki utjecaj na progib. Do veličine otvora $D = 0{,}6h$ progib raste relativno polako, a nakon toga počinje značajnije rasti.

Za promjer otvora $D = 0{,}4h$ najveća je razlika između postotnog smanjenja mase i smanjenja nosivosti te je zbog toga ta dimenzija otvora odabrana za daljnju analizu te je ispitan utjecaj razmaka između otvora na promjenu istih veličina.



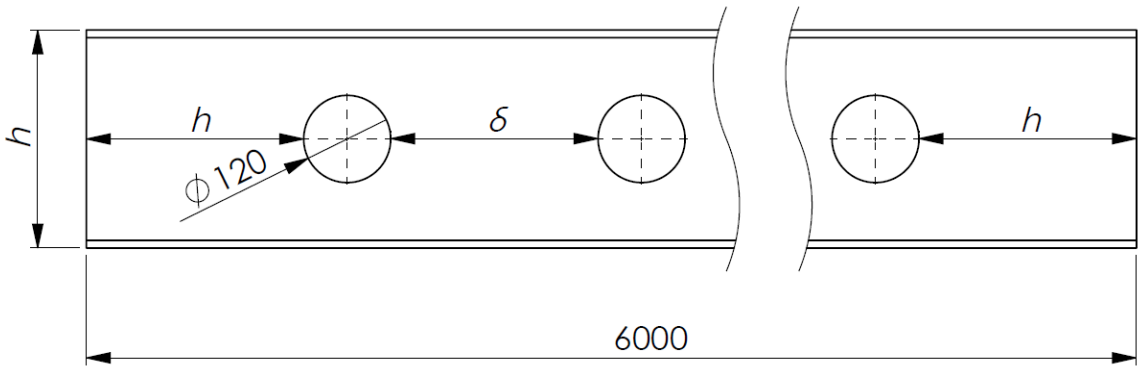
Slika 49. Ekvivalentno naprezanje prema von Misesu na različitim dijelovima nosača u ovisnosti s promjenom veličine otvora u MPa



Slika 50. Progib na mjestu *L*/2 u ovisnosti s veličinom otvora u mm

3.5. Analiza utjecaja razmaka otvora

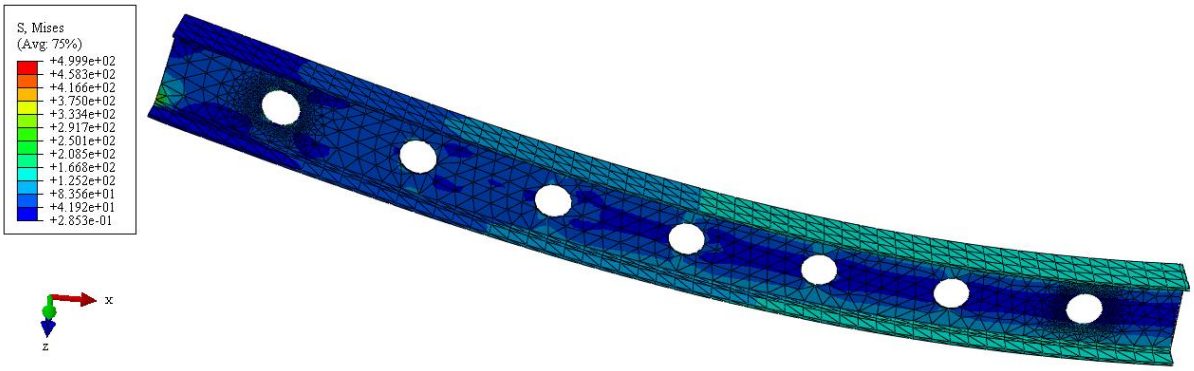
U ovom poglavlju analiziran je utjecaj razmaka otvora u odabranom IPE profilu na promjenu naprezanja i deformacija te smanjenje nosivosti. Važne dimenzije profila za analizu prikazane su na [Slika 51]. Analiza je provedena na način da su otvori na krajevima nosača uvijek udaljeni za visinu profila *h* od kraja nosača. Razmak između otvora smanjivan je na način da su se dodavali novi otvori istog promjera. Razmak otvora promatra se kao omjer razmaka otvora δ i visine profila *h*, tj. δ/h. Masa i opterećenje profila promatraju se kao postotni dio veličina dobivenih numeričkim proračunom za standardni IPE 300 profil. Numerički model i diskretizacija nosača isti su kao i za analizu utjecaja veličine otvora. U [Tablica 5] prikazane su dimenzije razmaka između otvora δ za pojedine omjere δ/h. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja po polovici nosača prikazana je na [Slika 52, Slika 53, Slika 54].



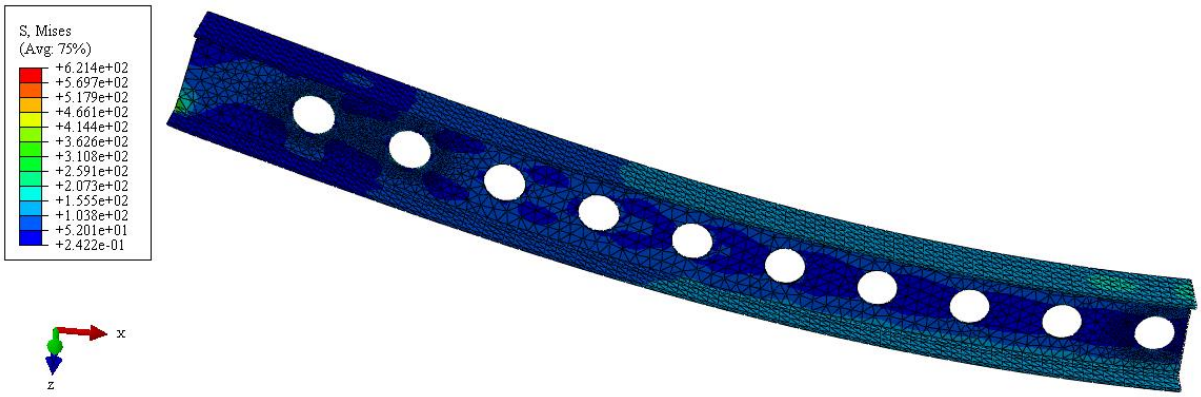
Slika 51. Dimenzije profila za analizu utjecaja razmaka između otvora

Tablica 5. Razmak između otvora δ za omjere δ/h u mm

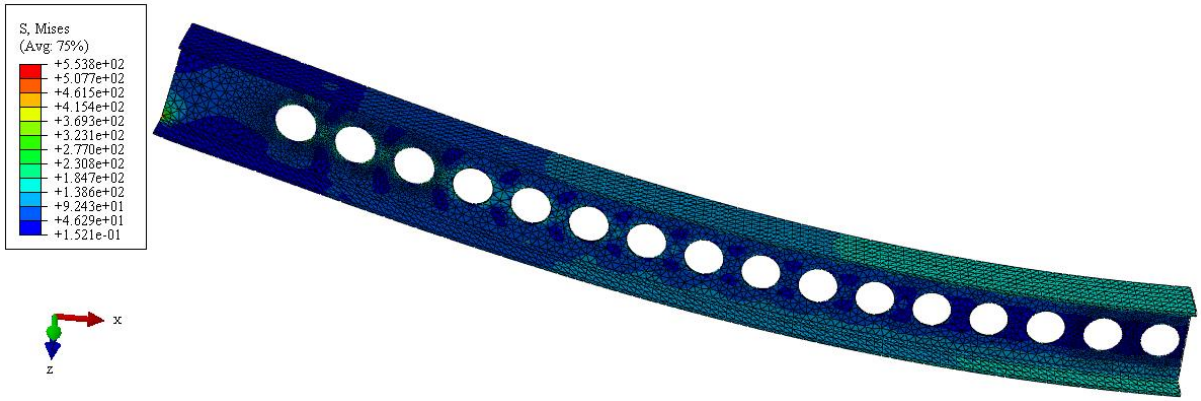
δ/h	1,07	0,95	0,86	0,7	0,63	0,52	0,4	0,33	0,19
δ / mm	440	406	377	330	310,6	293,3	240	220	176



Slika 52. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za δ/h = 1,07 u MPa

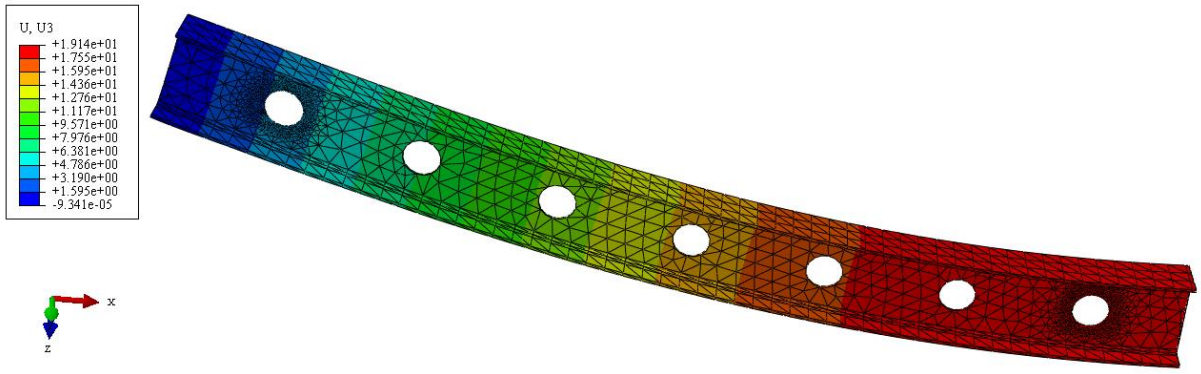


Slika 53. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za δ/h = 0,53 u MPa

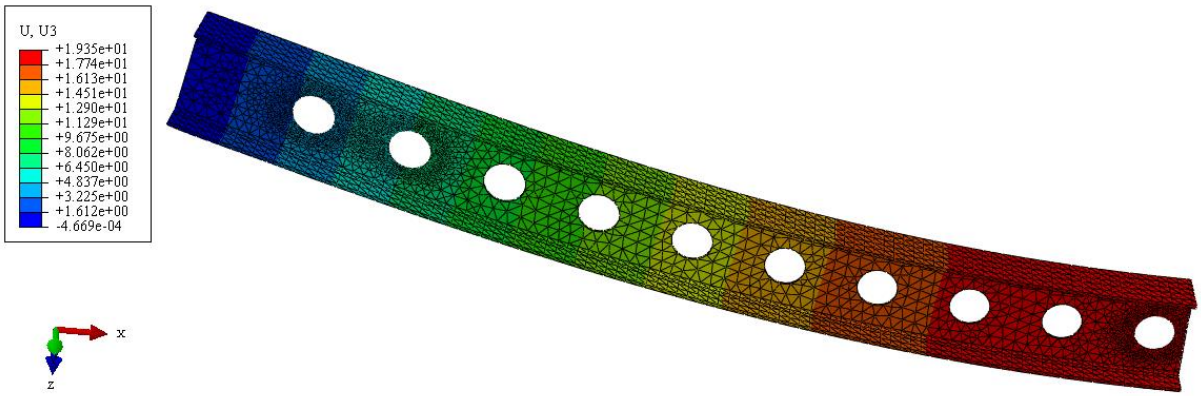


Slika 54. Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema von Misesu za δ/h = 0,19 u MPa

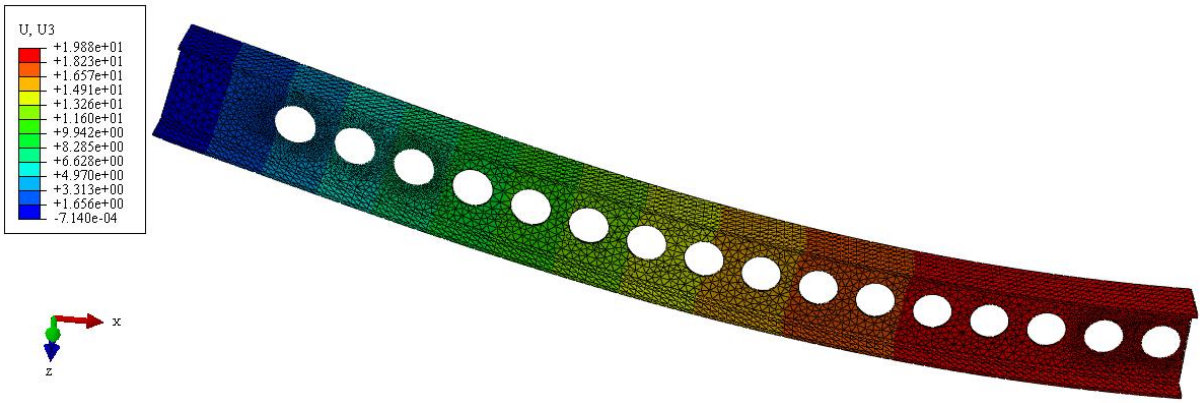
Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* po polovici nosača prikazana je na [Slika 55, Slika 56, Slika 57].



Slika 55. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* za δ/h = 1,07 u mm



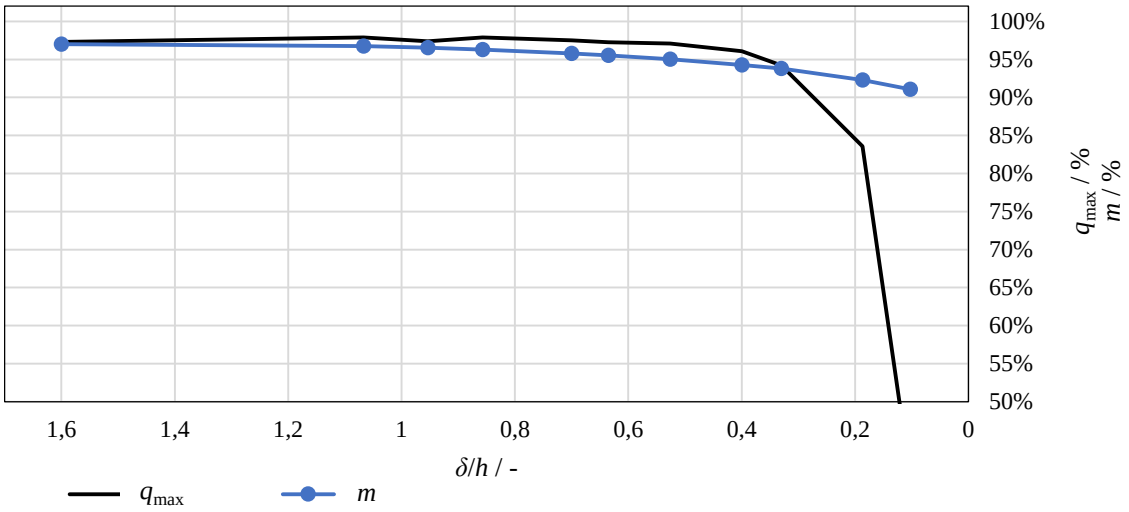
Slika 56. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* za δ/h = 0,53 u mm



Slika 57. Raspodjela pomaka u smjeru osi *z* za δ/h = 0,19 u mm

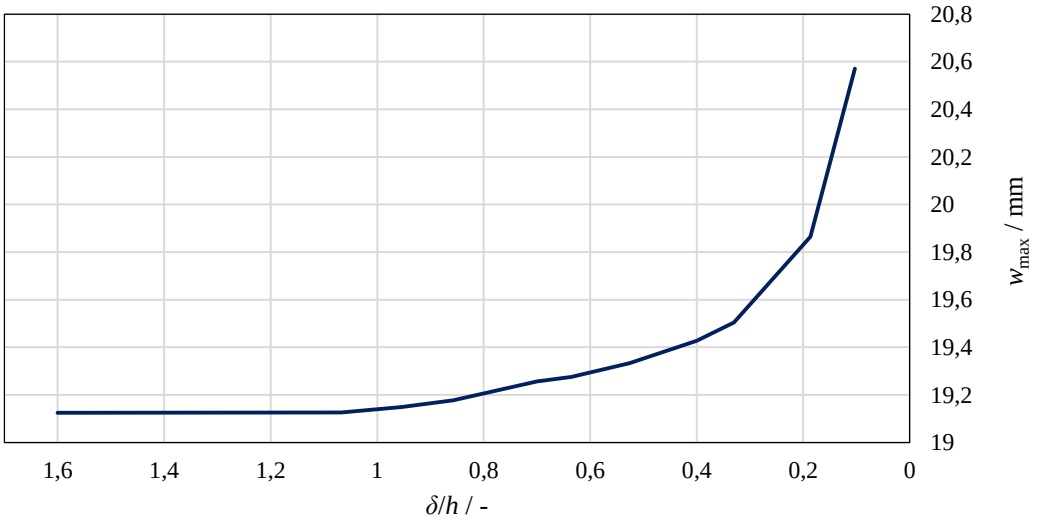
Na [Slika 58] prikazana je ovisnost mase i dopuštenog opterećenja sa smanjenjem razmaka između otvora odnosno povećanjem broja otvora za promjer otvora $D = 0{,}4h = 120$ mm. Uočeno je da se masa smanjuje brže od dopuštenog opterećenja sve do razmaka otvora od $\delta = 0{,}4h = 120$ mm. Optimalno područje razmaka δ je od $0{,}4h$ do h jer u tom području je najveća

razlika između postotnog smanjenja mase i postotnog smanjenja dopuštenog opterećenja. Razmak između otvora ima smisla smanjivati do $\delta = 0{,}25h$, a nakon toga dopušteno opterećenje naglo pada.



Slika 58. Usporedba promjene mase i dopuštenog opterećenja u ovisnosti s promjenom razmaka i broja otvora u %

Na [Slika 59] prikazana je ovisnost progiba na mjestu $L/2$ odnosno w_{max} o razmaku između otvora. Progib se počinje povećavati tek za razmake manje od $\delta = h$. Za razmak $\delta = 0{,}2h$ progib naraste samo 4%. Razmaci između otvora manji od $\delta = 0{,}2h$ jako utječu na povećanje progiba i naprezanja te smanjuju nosivost profila.



Slika 59. Promjena progiba u smjeru osi *z* na mjestu *L*/2 u ovisnosti s promjenom razmaka i broja otvora u mm

4. ZAKLJUČAK

U radu je izvršena numerička analiza utjecaja smanjenja mase na smanjenje nosivosti IPE 300 profila čiji se zaključci mogu primijeniti i na ostale dimenzije IPE profila. Provedena je parametarska analiza utjecaja veličine otvora i razmaka između otvora na IPE profilu za jednostavno oslonjeni nosač s površinskim kontinuiranim opterećenjem. Numerička analiza provedena je metodom konačnih elemenata u programskom paketu Abaqus®. Verifikacija konačnih elemenata provedena je na primjeru savijanja konzolnog nosača za koji su rješenja numeričke analize uspoređena s analitičkim rješenjima. U radu je proračunat standardni puni IPE profil analitičkom metodom i metodom konačnih elemenata čija su rješenja služila kao referentna za daljnju analizu. Analizom utjecaja veličine otvora uočeno je da se masa profila smanjuje brže od najvećeg dopuštenog opterećenja za otvore do veličine $D = 0{,}4h$ te da imaju podjednak postotni pad za veličinu otvora $D = 0{,}5h$. Za otvore veće od $D = 0{,}5h$ masa se nastavlja polako smanjivati dok dopušteno opterećenje naglo pada. Analizom utjecaja razmaka između otvora uočeno je da se masa smanjuje brže od dopuštenog opterećenja sve do razmaka otvora od $\delta = 0{,}4h = 120$ mm. Optimalno područje razmaka δ je od $0{,}4h$ do h jer je u tom području najveća razlika između postotnog smanjenja mase i postotnog smanjenja dopuštenog opterećenja.

Na temelju provedenog istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Otvori na profilu na mjestima gdje djeluje velika posmična sila, tj. otvori na krajevima nosača, jako smanjuju nosivost profila, dok na mjestima opterećenim samo momentom savijanja (sredina nosača) nemaju veliki utjecaj na nosivost.
- Za veličine otvora do $0{,}4h$ postotno smanjenje mase veće je nego smanjenje nosivosti. Otvori veći od $0{,}5h$ jako smanjuju nosivost profila te se ne preporučaju.
- Preporučeni razmak između otvora profila je od h do $0{,}4h$, a moguće ga je smanjiti do $0{,}3h$. Za razmake između otvora od $0{,}5h$ do $0{,}6h$ smanjenje mase veće je nego smanjenje nosivosti. Razmaci manji od $0{,}3h$ nikako se ne preporučuju jer jako smanjuju nosivost profila te dolazi do koncentracije naprezanja na rubovima otvora.
- Primjenom navedenih smjernica moguće je smanjiti masu profila do 6% s gotovo neprimjetnim smanjenjem nosivosti.

Na ovaj rad moguća su daljnja istraživanja, a preporučeni su sljedeći smjerovi:

- analiza otvora drugih oblika na promjenu nosivosti i mase profila,

- analiza utjecaja otvora istovremenim mijenjanjem parametara veličine otvora i razmaka između otvora,
- optimizacija mase profila,
- optimizacija iskorištenosti materijala za pojedine slučajeve opterećenja,
- razvoj optimiziranog I – profila koji bi se proizvodio aditivnim tehnologijama.

LITERATURA

[1.] Alfirević, I., Nauka o čvrstoći I, Zagreb: Tehnička knjiga, 1995.

[2.] Preuzeto sa: http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~/pmoze/esdep/master/wg07/l0820.htm Pristupljeno: [veljača 2020.].

[3.] Preuzeto sa: https://www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/obl_zav.pdf Pristupljeno: [veljača 2020.].

[4.] Preuzeto sa: https://www.kloecknermetalsuk.com/latest-news/choose-westok-cellular-beams/ Pristupljeno: [veljača 2020.].

[5.] Fares, S., Coulson, J., Dinehart, D., Castellated and Cellular Beam Design, American Institute of Steel Construction, 2016.

[6.] ABAQUS, *Abaqus Documentation: Version 6.14*. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE.

[7.] MIT, Preuzeto sa: http://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node32.html Pristupljeno: [veljača 2020.].

[8.] Kraut, B., Strojarski priručnik, Zagreb: Tehnička knjiga, 1988.

[9.] Norma DIN 1025-5

[10.] B2B Metal, Preuzeto sa: http://www.b2bmetal.eu/i-sections-ipe-specification Pristupljeno: [veljača 2020.]

[11.] ABAQUS, *Abaqus Software: Version 6.14*. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE.

[12.] SOLIDWORKS 2017, *Solidworks Software: Education Edition,* 2017, Dassault Systemes SolidWorks Corporation, a Dassault Systèmes SE company, 175 Wyman Street, Waltham, Mass. 02451 USA.

[13.] Sorić, J., Metoda konačnih elemenata, Zagreb: Golden marketing – Tehnička knjiga, 2004.