

# Numeričko modeliranje zakovičnih spojeva zrakoplovnih konstrukcija

---

**Golub, Antonio**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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:235:489383>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-12**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering  
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Antonio Golub**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Darko Ivančević, mag. ing. aeroing.

Student:

Antonio Golub

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, doc.dr.sc. Darku Ivančeviću na stručnom vođenju i pomoći prilikom izrade diplomskog rada.

Također se želim zahvaliti svojoj obitelji na potpori tijekom cijelog studija.

Antonio Golub



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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Antonio Golub**

Mat. br.: 0035195373

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numeričko modeliranje zakovičnih spojeva zrakoplovnih konstrukcija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Modelling of Riveted Joints in Aircraft Structures**

Opis zadatka:

U radu je potrebno provesti numeričko modeliranje zakovičnih spojeva zrakoplovnih konstrukcija. Pritom je potrebno koristiti tri različita pristupa u modeliranju. Prvi način modeliranja predstavlja idealizirani spoj elemenata konstrukcije u kojemu su zanemareni spojni elementi te ovaj pristup predstavlja uobičajen način diskretizacije zrakoplovnih konstrukcija za proračun čvrstoće metodom konačnih elemenata. U drugom načinu modeliranja potrebno je koristiti kinematske veze koje se u tu svrhu koriste za diskretizaciju zakovičnih spojeva u dostupnoj literaturi. U trećem načinu modeliranja potrebno je spoj konstrukcija modelirati vrlo detaljno trodimenzionalnim konačnim elementima.

U radu je potrebno izvršiti usporedbu polja naprezanja i deformacija korištenjem navedenih načina modeliranja spojeva. Pritom je potrebno varirati parametre modela poput udaljenosti između zakovica te procijeniti njihov utjecaj na rezultate. Korištenjem detaljnog trodimenzionalnog načina modeliranja, potrebno je numerički odrediti utjecaj zračnosti između zakovice i provrta na koncentraciju naprezanja kod zakovičnog spoja. Numeričku metodologiju je potrebno validirati usporedbom s dostupnim eksperimentalnim podacima ili analitičkim modelima. U zaključku rada je potrebno kritički evaluirati dobivene rezultate za tri različita načina modeliranja.

U radu koristiti programe za računalno modeliranje, a numeričku analizu izvršiti korištenjem programa Abaqus/Standard. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

27. rujna 2018.

Rok predaje rada:

29. studenog 2018.

Predviđeni datumi obrane:

5., 6. i 7. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Darko Ivančević

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

## SADRŽAJ

Sadržaj .....	I
Popis slika.....	III
Popis tablica.....	V
Popis oznaka.....	VI
Sažetak.....	VII
Summary.....	VIII
1. Uvod .....	1
2. Numeričko modeliranje zakovičnih spojeva .....	3
2.1 Modeliranje idealnog spoja dijelova konstrukcije.....	3
2.2 Modeliranje zakovičnog spoja kinematskim vezama.....	3
2.2.1 Modeliranje spojeva nezavisno o mreži konačnih elemenata .....	3
2.2.2 Modeliranje spojeva kinematskim vezama na prethodno izrađenim provrtima ....	4
2.3 Detaljno modeliranje zakovičnih spojeva .....	5
2.4 Tehnički zahtjevi kod spajanja elemenata konstrukcije zakovicama [5] .....	6
2.4.1 Potrebna duljina zakovice .....	6
2.4.2 Čvrstoća zakovice .....	7
2.4.3 Korak zakovica kod zakivanja .....	7
2.4.4 Udaljenost od ruba .....	7
2.4.5 Korak između redova zakovica (razmak između redova).....	8
3. Opis modela.....	9
3.1 Opis pojedinih modela s obzirom na modelirani način spajanja.....	14
3.1.1 Opis modela panela krila.....	14
3.1.2 Opis modela br. 2 .....	16
3.1.3 Opis modela br. 3 .....	18
3.1.4 Opis modela br. 4 .....	18
3.2 Rubni uvjeti i opterećenja modela.....	19
3.2.1 Rubni uvjeti i opterećenja primjenjena na model br. 1 .....	19
3.2.2 Rubni uvjeti i opterećenja primjenjena na modelima br. 2 i br. 3.....	20
3.2.3 Rubni uvjeti i opterećenja primjenjena na modelu br. 4 .....	21
3.3 Korišteni konačni elementi.....	21
3.3.1 Opći konačni elementi za analizu ljuskastih modela .....	21

---

3.3.2	3D konačni elementi za analizu ljuska.....	22
3.3.3	Konačni elementi za analizu čvrstih tijela.....	23
4.	Rezultati.....	27
4.1.	Rezultati za različite načine modeliranja spoja uzdužnice i oplate.....	27
4.2	Rezultati modela br. 2 (elementi povezani kinematskim vezama).....	33
4.3	Rezultati modela br. 3.....	36
4.4	Rezultati modela br. 4.....	37
4.5.	Usporedba rezultata modela br. 2 i br. 3 s rezultatima iz [3].....	39
5.	Analiza utjecaja koraka i zračnosti zakovica na naprezanje i deformacije.....	43
5.1	Analiza utjecaja koraka zakovica na rezultate naprezanja i deformacija.....	43
5.2	Utjecaj zračnosti između zakovice i provrta na naprezanje i deformacije.....	44
6.	Zaključak.....	48

## POPIS SLIKA

Slika 1. Zakovični spoj konstrukcije trupa zrakoplova [1] .....	2
Slika 2. Kompozitni panel krila zrakoplova [1] .....	2
Slika 3. Modeliranje spojnog elementa [2] .....	4
Slika 4. Modeliranje zakovice kinematskim vezama .....	5
Slika 5. Detaljni zakovični spoj [4].....	6
Slika 6. Potrebna duljina zakovice [5] .....	7
Slika 7. Značajke zakovičnog spoja [5] .....	8
Slika 8. Hookeov dijagram nominalnih naprezanja i deformacija [8] .....	9
Slika 9. Rastavljanje stvarne deformacije na elastičnu i plastičnu komponentu [8] .....	12
Slika 10. Nominalna naprezanja za korištenu leguru 2024-T42 [7] .....	13
Slika 11. Stvarni Hookeov dijagram naprezanja i plastičnih deformacija u Abaqus-u za korišteni materijal [7] .....	13
Slika 12. Panel krila, [mm].....	14
Slika 13. Model br. 1.1- idealan spoj konstrukcije.....	15
Slika 14. Model br. 1.2.....	15
Slika 15. Model br. 1.3, dimenzije u [mm] .....	16
Slika 16. Modelirani preklopni spoj konstrukcije, [mm] .....	17
Slika 17. Različite debljine ploča modela br. 2.....	17
Slika 18. Različite debljine površina modela br. 3.....	18
Slika 19. Model br. 4, dimenzije u [mm] .....	19
Slika 20. Model br. 4 i detalj spoja zakovice i oplate .....	19
Slika 21. Način opterećenja panela krila i korišteni rubni uvjeti .....	20
Slika 22. Rubni uvjeti i opterećenja modela br. 2 .....	20
Slika 23. Rubni uvjeti i opterećenje modela br. 4 .....	21
Slika 24. S4R konačni element [2].....	22
Slika 25. 3D ljuskasti konačni element SC8R [2].....	23
Slika 26. Tetraedarski konačni element drugog reda [2] .....	24
Slika 27. Mreža konačnih elemenata modela br. 1.1, br. 1.2 i br. 1.3.....	25
Slika 28. Mreža konačnih elemenata za, a) model br. 2, b) model br. 3 .....	26
Slika 29. Mreža konačnih elemenata modela br. 4 .....	26



Slika 30. Ekvivalentna von Mises naprezanja za različito modelirane spojeve, [MPa].....	27
Slika 31. Naprezanja u smjeru osi $x$ , [MPa].....	28
Slika 32. Deformacije u smjeru osi $x$ , [-] .....	29
Slika 33. Presjek i mjesto očitavanja rezultata.....	30
Slika 34. Usporedba ekvivalentnih von Mises naprezanja, [MPa] .....	30
Slika 35. Usporedba pomaka u smjeru osi $z$ , [mm].....	31
Slika 36. Raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija, [-] .....	32
Slika 37. Ekvivalentna von Mises naprezanja, [MPa] .....	33
Slika 38. Naprezanja u smjeru osi $x$ modela br. 2, [MPa].....	34
Slika 39. Raspodjela pomaka Modela br. 2 u smjeru osi $x$ , [mm] .....	35
Slika 40. Deformacije u smjeru osi $x$ modela br. 2, [-] .....	36
Slika 41. Rezultati modela br. 3 a) ekvivalentna von Mises naprezanja, [MPa], b) naprezanja u smjeru opterećenja, [MPa], c) pomaci u smjeru opterećenja, [mm] .....	37
Slika 42. Ekvivalentna von Mises naprezanja modela br.4, [MPa] .....	38
Slika 43. Deformacije u smjeru osi $x$ , modela br.4 i zakovice, [-].....	38
Slika 44. Pomaci u smjeru osi $x$ , [mm] .....	39
Slika 45. Putanja za očitavanje rezultata.....	40
Slika 46. Usporedba naprezanja u smjeru opterećenja, [MPa] .....	40
Slika 47. Usporedba pomaka u smjeru opterećenja modela br. 2 i br. 3, [mm].....	41
Slika 48. Raspodjela pomaka u smjeru osi $x$ modela br. 2, [mm] uz faktor povećanja 20 .....	41
Slika 49. Usporedba deformacija u smjeru osi $x$ modela br. 2 i br. 3, [-] .....	42
Slika 50. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] za različiti korak zakovica, prikazani korak zakovica u [mm].....	43
Slika 51. Zakovica korištena za prikaz rezultata.....	44
Slika 52. Raspodjela naprezanja u smjeru opterećenja po zakovici za model bez zračnosti, [MPa].....	44
Slika 53. Raspodjela naprezanja u smjeru opterećenja po zakovici za model sa zračnošću, [MPa].....	45
Slika 54. Raspodjela naprezanja na zakovici u smjeru osi $x$ , [MPa], uz faktor uvećanja 4, a) model bez zračnosti, b) model sa zračnošću od 0.06 mm .....	45
Slika 55. Usporedba deformacija zakovice u smjeru osi $x$ , [-], a) model bez zračnosti, b) model sa zračnošću.....	46
Slika 56. Usporedba ekvivalentnih von Mises naprezanja modela bez i sa zračnošću, [MPa]	47

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva legure Al 2024-T42 [7].....	9
Tablica 2. Vrsta i broj konačnih elemenata za modele panela krila.....	24
Tablica 3. Vrsta i broj konačnih elemenata za modele br. 2 i br. 3.....	24
Tablica 4. Vrsta i broj konačnih elemenata korišteni za model br. 4.....	25

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$m^2$	stvarna površina presjeka epruvete
$E$	MPa	modul elastičnosti
$F$	N	stvarna sila
$l$	m	stvarna duljina epruvete
$l_0$	m	početna duljina epruvete
$p$	MPa	tlačno opterećenje
$q$	N/mm	kontinuirano opterećenje
$R_e$	MPa	granica razvlačenja
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
$t$	mm	debljina stijenke
$u, v, w$	mm	komponente pomaka u smjeru osi $x, y, z$
$x, y, z$	mm	Kartezijeve koordinate
$\varepsilon_{nom}$	-	nominalna deformacija
$\varepsilon^{pl}$	-	stvarna plastična deformacija
$\varepsilon^{el}$	-	stvarna elastična deformacija
$\varepsilon$	-	stvarna deformacija
$\varepsilon^t$	-	stvarna ukupna deformacija
$\nu$	-	Poissonov koeficijent
$\rho$	$kg/m^3$	gustoća
$\sigma$	$N/mm^2$	stvarno naprezanje
$\sigma_{0.2}$	$N/mm^2$	granica plastičnosti
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	rad	rotacije oko osi $x, y$ i $z$
$\phi$	mm	promjer

## SAŽETAK

Predmet ovog rada je usporedba različitih načina numeričkog modeliranja zakovičnih spojeva. U radu je generiran veći broj modela na kojim su spojevi modelirani na različite načine, i nakon provedbe numeričke analize uslijedila je usporedba dobivenih rezultata. U radu su korištena tri modela, prvi model predstavlja veći segment konstrukcije zrakoplova i na tome modelu su primijenjeni jednostavniji načini modeliranja zakovičnih spojeva. Drugi model predstavlja detalj konstrukcije i na posljeticu za najsloženije modeliranje zakovičnog spoja korišteni je preklopni spoj s dvije zakovice. Pošto je potrebno u postupku spajanja zakovicama poštivati određena pravila, također je analizirano kako korak zakovica i zračnost između zakovica i provrta utječu na rezultate.

Ključne riječi: postupak spajanja, numeričko modeliranje, zakovični spojevi, konstrukcija zrakoplova.

## **SUMMARY**

This thesis deals with comparison of different methods of riveted joint numerical modeling. In this work, several models were generated, in which the joints were modeled using different approaches. After the numerical analysis, a comparison of the obtained results was performed. Three models have been used in this paper, the first model represents a larger segment of the aircraft structure, and the simplest modeling of rivet joints has been applied to this model. The second model represents the detail of construction, and the lap joint with two rivets was used as the most detailed model. Since it is necessary to follow certain rules in the joining procedure, the effects of rivet pitch and clearance between rivet and bore on the numerical results have been analyzed in this work.

Key words: structural joining, numerical modeling, riveted joints, airframe.

## 1. Uvod

Konstrukcija zrakoplova je sastavljena od velikog broja elemenata, koji su izrađeni od ploča limova, cijevi, ekstrudiranih profila a većina dijelova se izrađuje postupkom lijevanja, kovanja ili pomoću strojne obrade. Tako izrađeni elementi se spajaju u podsklopove, koji se na kraju proizvodnje spajaju u jednu cjelinu i tvore konstrukciju zrakoplova. Veliki broj komponenata zrakoplova mora biti ugrađen tako da se omogući pristup toj komponenti, u svrhu radova redovitog održavanja, rastavljanja, popravaka i zamjene komponenata, a najčešće se komponente zrakoplova međusobno spajaju vijcima i zakovicama.

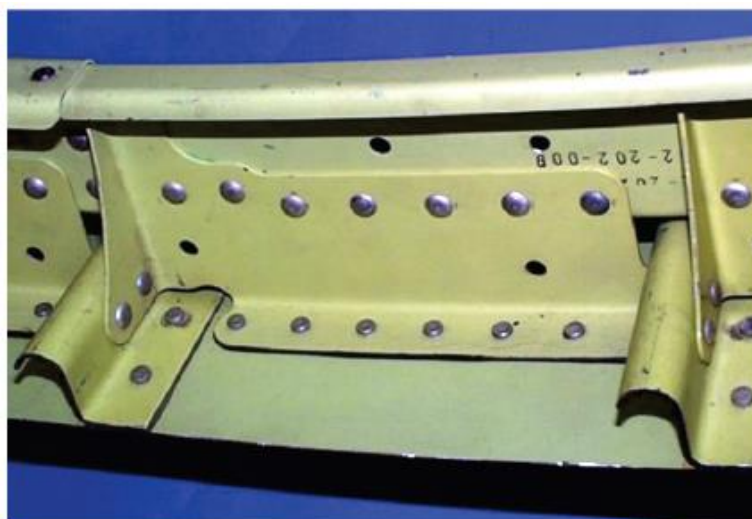
Idealna konstrukcija zrakoplova bila bi cjelina izvedena iz istog materijala koji uključuje jedan proizvodni postupak. Upotrebom kompozitnih materijala, koji sve više zamjenjuju legure aluminija i lake legure iz proizvodnje zrakoplova, moguće je smanjiti broj spojeva dijelova konstrukcije, ali nažalost nije moguće u potpunosti ukloniti spojeve.

Rast zračnog prometa i njegov veliki ekonomski značaj imaju čvrste poveznice s nastojanjem proizvođača zrakoplova da se poveća mogućnost preživljavanja u slučaju zrakoplovne nesreće. Osobito se sve više raspravlja o načinima međusobnog spajanja elemenata konstrukcije zrakoplova jer su spojevi najčešći izvori nesavršenosti konstrukcije koji kod primarnih dijelova konstrukcije mogu dovesti do katastrofalnog popuštanja konstrukcije zrakoplova. Stoga je važno prilikom projektiranja konstrukcije uzeti u obzir koncentracije naprezanja koje pojedini postupci spajanja unose u konstrukciju.

Najzastupljeniji postupak spajanja dijelova konstrukcije zrakoplova je pomoću zakovica. Osim u zrakoplovstvu, zakovični spojevi su prisutni i u ostalim granama industrije, ponajviše zahvaljujući svojim prednostima u usporedbi s ostalim postupcima spajanja dijelova konstrukcije. Uz prednosti, upotreba zakovičnih spojeva u postupcima spajanja također donosi i nedostatke, koji su sve izraženiji kod dugotrajne eksploatacije konstrukcije. Stoga proizvođači zrakoplova sve više nastoje unaprijediti postupak spajanja zakovicama, kako bi se izbjegle neželjene posljedice, koje su prouzročene postupkom spajanja dijelova konstrukcije. Pojediniosti koje sa sobom unose zakovični spojevi u konstrukciju teško su predvidivi,

zahtjevni kod ispitivanja na uređajima u laboratoriju zbog čega se često zanemaruju i kod analize čvrstoće konstrukcije pomoću numeričkih metoda. Takav pristup analizi ubrzava i olakšava proces projektiranja koji je često opravdan jer je potrebno konstrukciju pojednostaviti, ali s druge strane ne učiniti ju previše jednostavnom. Stoga će u ovom radu biti razmatrani različiti stupnjevi kompleksnosti spojeva konstrukcije i kakav utjecaj imaju na dobivene rezultate.

Na slici 1. je prikazana konstrukcija kod koje su elementi međusobno spojeni zakovicama, a na slici 2. je prikazan kompozitni panel krila, kod kojeg su uzdužnice lijepljene na oplatu ili su izvedene u jednom procesu u autoklavu zajedno s oplatom.



**Slika 1. Zakovični spoj konstrukcije trupa zrakoplova [1]**



**Slika 2. Kompozitni panel krila zrakoplova [1]**

## 2. Numeričko modeliranje zakovičnih spojeva

### 2.1 Modeliranje idealnog spoja dijelova konstrukcije

Prilikom analize čvrstoće modela kod kojih je dimenzija spojnih elemenata znatno manja u odnosu na dijelove koji se međusobno spajaju zanemaruju se spojni elementi i mjesto spajanja elemenata se smatra idealnim. Ovakav način modeliranja spojnih elemenata je legitiman s obzirom na kompleksnost koju bi u analizu čvrstoće cjelokupne konstrukcije unio postupak modeliranja spojnih elemenata. Uz samo potrebno vrijeme modeliranja, potrebno vrijeme za provedbu analize bi se višestruko povećalo što bi na kraju dovelo u upit smisao provedbe analize.

U svrhu analize idealiziranog spoja, u ovome radu će se analizirati panel krila zrakoplova. Panel krila predstavlja konstrukciju zrakoplova koja se sastoji od oplata i uzdužnica, i njihovo međusobno spajanje kod metalnih konstrukcija se izvodi pomoću zakovica.

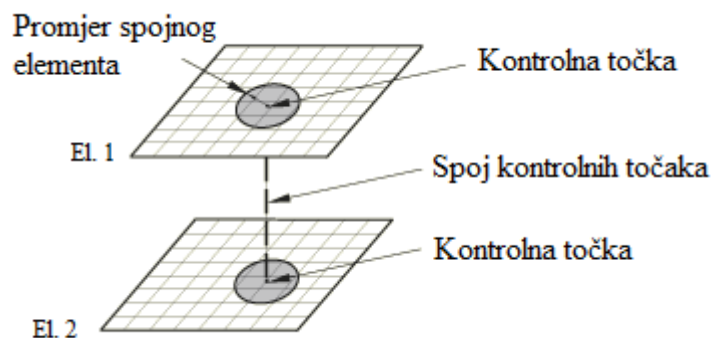
### 2.2 Modeliranje zakovičnog spoja kinematskim vezama

#### 2.2.1 Modeliranje spojeva nezavisno o mreži konačnih elemenata

U programskom paketu *Abaqus* dostupne su kinematske veze koje služe za modeliranje mjesta spojeva elemenata. Elementi se mogu spajati po cijeloj dužini (*attachment line*) ili samo u jednoj ili više točaka (*attachment point*) [2]. Spajanjem modela u točkama moguće je modelirati različite vrste spojeva kao što su točkasti zavari, vijci, zatici i zakovice. U modelu je prvo potrebno kreirati kontrolne točke po plohama koje se međusobno spajaju, pošto se zakovični spojevi izrađuju poštivajući određena pravila kao što su udaljenost zakovica od ruba, korak između zakovica, naredbom (*Create attachment points by choosing edges and offsets*) zadaju se prethodno navedeni parametri [2]. Nakon kreiranja kontrolnih točaka slijedi definiranje veza između kontrolnih točaka. U ovom slučaju su kontrolne točke na plohama međusobno povezane grednim elementom (*MPC Beam*) [2]. Ovakav način modeliranja se u ovome radu odnosi na modeliranje panela krila pod oznakom Model br. 1.2 koji je opisan u



potpoglavlju 3.1.2. Na slici 3. je prikazan način modeliranja spojeva neovisno o mreži konačnih elemenata, koji je korišten za model br. 1.2 [2].



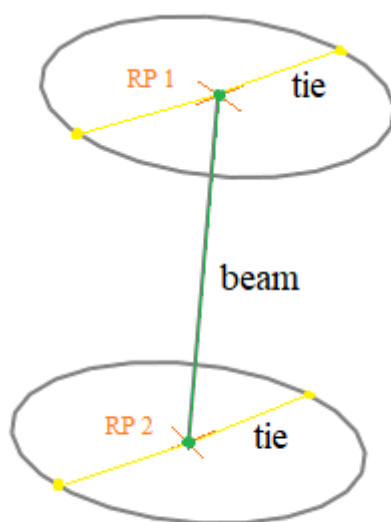
Slika 3. Modeliranje spojnog elementa [2]

*MPC (multi point constraint)* su kinematske veze u kojima se zajedno povezuju različiti čvorovi i stupnjevi slobode gibanja. U programskom paketu *Abaqus/Standard* kinematičkim ograničenjima se onemogućuju pojedini stupnjevi slobode na zavisnim čvorovima. Nakon što se stupanj slobode gibanja eliminira, na to ograničenje nije više moguće zadati drugo ograničenje. U programskom paketu postoji više vrsta *MPC (Beam, Cylsym, Link, Pin, Revolute, Tie i Universal)*, koji se koriste zavisno od problema koji se opisuje. Prekomjerno povezivanje ograničenja kinematičkih veza i ograničavajućih jednadžbi se ne preporučuje i može rezultirati degradacijom performansi tijekom pretprocesiranja analize. Kada god je moguće, najbolje je povezati ponašanje nekoliko čvorova (grupiranih u skup čvora) na jednu referentnu točku [2].

### 2.2.2 Modeliranje spojeva kinematskim vezama na prethodno izrađenim provrtima

U analizi od ponuđenih ograničenja upotrebljena su ograničenja vrste *MPC Beam* i *MPC Tie*, ovakav način modeliranja korišten je u znanstvenom radu [3] koji je u ovom radu korišten za validaciju numeričkog pristupa. Najprije je potrebno za svaki provrt u modelu postaviti referentnu točku, referentna točka je postavljena u središte provrta, u svrhu kontrole ponašanja provrta i mogućnosti što boljeg modeliranja zakovica. Za povezivanje referentne točke s čvorovima po obodu provrta korišteni su *MPC Tie*, a u svrhu međusobnog povezivanja referentnih točaka dvaju elemenata koji se spajaju u cjelinu korišteni su *MPC*

*Beam*. Ograničenje MPC *Tie* povezuje odabrane čvorove u jednu cjelinu i tako tvore plohu. U ovome slučaju krug u kojem se središnja referentna točka giba zajedno s čvorovima na obodu provrta i tako predstavljaju završetak glave zakovice koja svojim pritiskom spaja elemente. Za međusobno povezivanje referentnih točaka u pojedinim provrtima korišteno je ograničenje MPC *Beam*, zato što ono predstavlja ograničenje koje ostvaruje krutu vezu između pomaka referentnih točaka, a i rotacija, i tako oponaša tijelo zakovice. Ovakav način modeliranja korišten je u modelima pod oznakom model br. 1.3 i model br. 2. Na slici 4. je prikazan način modeliranja zakovica kinematskim vezama koji je korišten u modelima br. 1.3 koji je opisan u potpoglavlju 3.1.1 i modelu br. 2 koji je opisan u potpoglavlju 3.1.2.

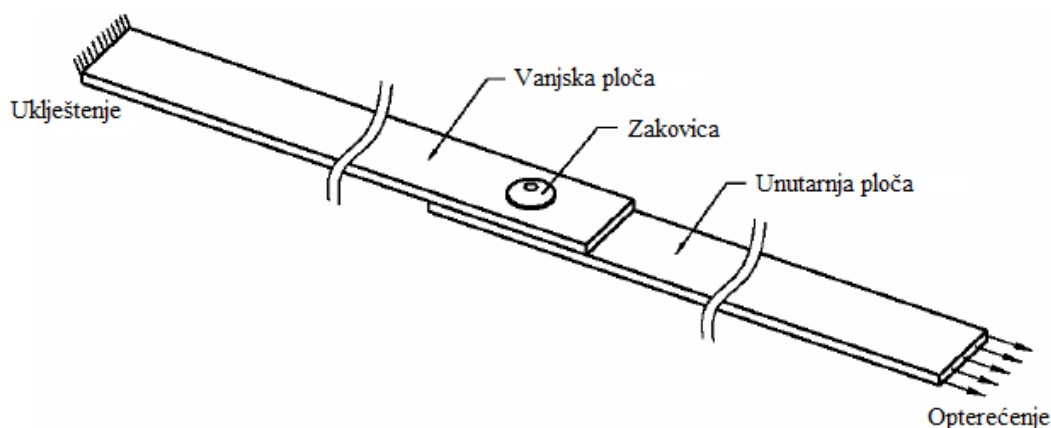


Slika 4. Modeliranje zakovice kinematskim vezama

### 2.3 Detaljno modeliranje zakovičnih spojeva

Detaljni modeli zakovičnog spoja se primjenjuju na manjim segmentima konstrukcije, najčešće su to preklopni spojevi izvedeni s jednom do dvije zakovice. Takva detaljna analiza služi za analizu zaostalih napreznja nakon završetka postupka spajanja. Osim analize zaostalih napreznja [4], kod modela s dvije zakovice moguće je varirati parametre zakovičnog spoja, kao što je na primjer međusobna udaljenost između zakovica i tako odrediti

vrijednost koraka zakovica kod kojeg će izvedeni spoj imati zadovoljavajuću nosivost uz što je moguće manju koncentraciju naprezanja u svrhu izbjegavanja pojave zamora spoja koji će naposljetku dovesti do popuštanja konstrukcije [4]. Na slici 5. je prikazan primjer preklopnog zakovičnog spoja.



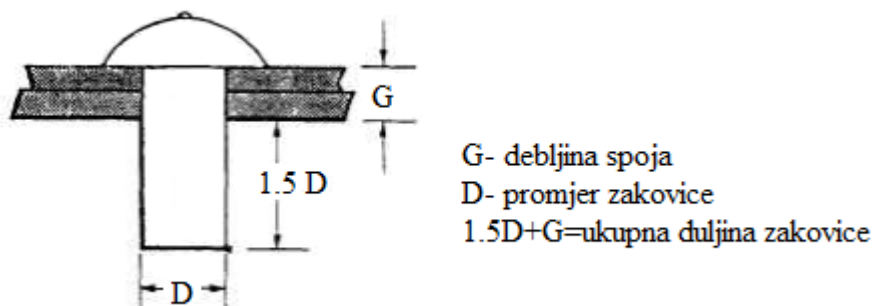
Slika 5. Detaljni zakovični spoj [4]

## 2.4 Tehnički zahtjevi kod spajanja elemenata konstrukcije zakovicama [5]

Prilikom izrade numeričkog modela zakovičnog spoja za analizu čvrstoće, kao i tijekom izvođenja postupka spajanja zakovicama, potrebno je poštivati određene tehničke zahtjeve kako bi ti spojevi bili pravilno izvedeni. Stoga će u ovom poglavlju biti navedeni i opisani zahtjevi koje treba slijediti.

### 2.4.1 Potrebna duljina zakovice

Za određivanje potrebne duljine zakovice, važno je poznavati debljinu elemenata koji se spajaju u cjelinu. Duljina tijela zakovice jednaka je zbroju debljina elemenata koji se spajaju i dodatka potrebnog za formiranje glave zakovice, čija duljina je jednaka 1.5 promjera zakovice [5]. Na slici 6. je prikazana zakovica sa svim dimenzijama koje se moraju uzeti u obzir kod određivanja potrebne duljine tijela zakovice.



Slika 6. Potrebna duljina zakovice [5]

### 2.4.2 Čvrstoća zakovice

Danas postoje zakovice izrađene iz različitih vrsta metala kako bi bile prigodne za široku primjenu. Stoga je važno da zakovice budu izrađene iz materijala čija je čvrstoća jednaka ili viša od elemenata koji se spajaju.

### 2.4.3 Korak zakovica kod zakivanja

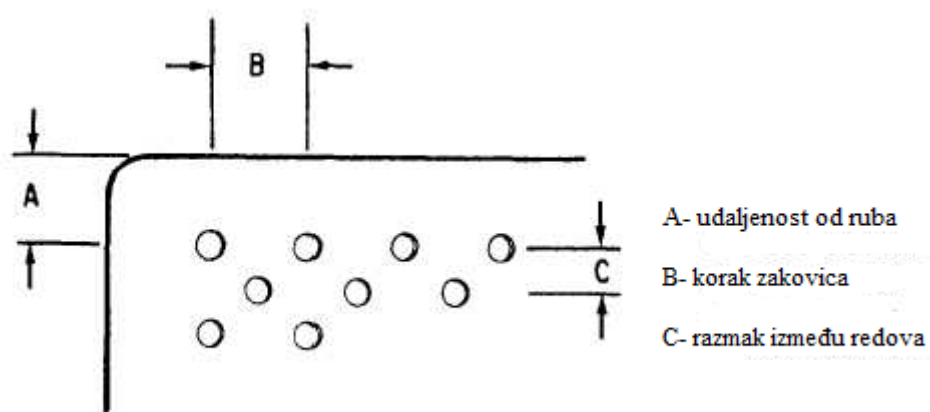
Korak zakovica je udaljenost koja se mjeri između provrta za zakovice koje se nalaze u istom redu. Minimalan korak između ispučenih zakovica ne bi smio biti manji od 3.5 promjera zakovice, a kod zakovica s ravnom glavom ta značajka ne bi smjela biti manja od 4 promjera zakovice [6].

### 2.4.4 Udaljenost od ruba

Udaljenost koja se mjeri od centra prvog provrta zakovice pa do ruba. Generalno navodeći ta udaljenost ne bi smjela biti manja od dva ni veća od četiri promjera zakovice. Ako se zakovica ugradi preblizu ruba elemenata koji se spajaju može doći do pojave pukotina i popuštanja spoja [6].

### 2.4.5 Korak između redova zakovica (razmak između redova)

Uobičajeni razmak između redova zakovica je 75% koraka zakovica. Najmanji dozvoljeni razmak između redova iznosi  $2\frac{1}{2}$  promjera zakovice. Razmak između redova je često jednak koraku zakovica. Na slici 7. su prikazane gore opisane značajke zakovičnih spojeva.



Slika 7. Značajke zakovičnog spoja [5]

### 3. Opis modela

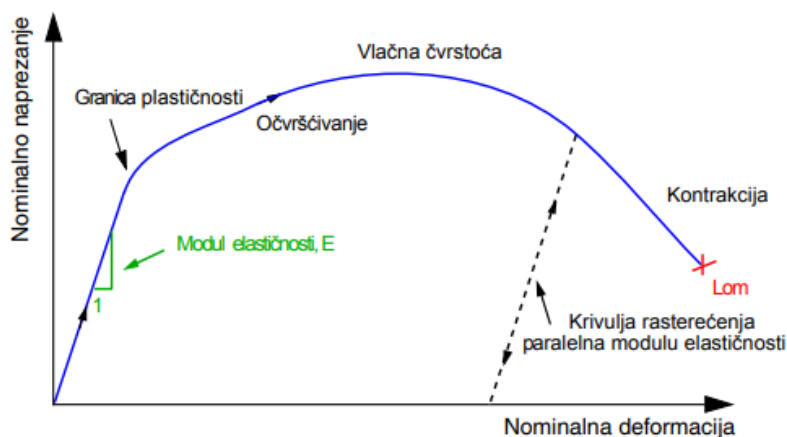
U ovom poglavlju će biti opisani modeli koji su korišteni prilikom analize zakovičnih spojeva ovisno o stupnju složenosti konstrukcije. U radu su generirane četiri vrste modela za tri načina modeliranja zakovičnih spojeva. Svakome modelu su dodijeljena mehanička svojstva aluminijske legure 2024-T42. U svim modelima, između elemenata koji se nalaze u spoju je zanemareno trenje, a također u analizi nisu uzeta u obzir zaostala naprezanja nakon završetka procesa formiranja zakovica. Takav pristup je također korišten u radu [3]. Sve provedene analize u radu su statički i dinamički linearne. U tablici 1. su navedena mehanička svojstva korištene legure Al 2024-T42.

**Tablica 1. Mehanička svojstva legure Al 2024-T42 [7]**

$\rho$ , [kg/m <sup>3</sup> ]	$E$ , [GPa]	$R_m$ , [MPa]	$R_e$ , [MPa]	$\nu$ , [-]
2770	72	395	235	0.33

Elastično ponašanje metala definira se u Abaqus-u unošenjem modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta, no s obzirom na to da se će se analizirati i plastično ponašanje modela potrebno je i definirati plastična svojstva metala.

Većina metala pokazuje približno linearno ponašanje pri malim veličinama deformacija, te je ovisnost naprezanje-deformacije, konstantna. Ovakvo ponašanje nazivamo elastičnim. Povećanjem naprezanja (i deformacija), metali počinju pokazivati nelinearno, neelastično ponašanje odnosno plastičnost.



**Slika 8. Hookeov dijagram nominalnih naprezanja i deformacija [8]**

Prijelaz iz elastičnog u plastično područje materijala se događa pri granici plastičnosti (na slici 8.). Kod većine metala naprezanje na granici plastičnosti iznosi 0.05 do 0.1% modula elastičnosti. Za aluminijske legure krivulja u Hookeovom dijagramu je kontinuirana, bez naglih skokova i lomova te se granicom plastičnosti smatra naprezanje koje uzrokuje relativno produljenje od 0.2% ( $\sigma_{0.2}$ ) [9].

Naprezanje koje odgovara djelovanju sile na nedeformirani presjek naziva se nominalno, ono uzrokuje nominalne deformacije koje odgovaraju promjeni duljine po nedeformiranoj duljini. Kod suženja presjeka, nominalno naprezanje u metalu je manje od njegove vlačne čvrstoće. Ovakvo ponašanje materijala je uzrokovano geometrijom ispitivanog uzorka (epruvete), vrste ispitivanja te načinom mjerenja naprezanja i deformacija. Kod tlačnog ispitivanja dobivena krivulja u Hookeovom dijagramu nema područje kontrakcije, jer se metal ne sužava pri tlačnom opterećenju. Matematički model koji opisuje plastično ponašanje metala trebao bi uzeti u obzir razlike vlačnog i tlačnog ponašanja neovisno o ispitivanoj geometriji ili primijenjenom opterećenju. To se postiže tako da se poznate veličine nominalnog naprezanja ( $F/A_0$ ) i nominalne deformacije ( $\Delta l/l_0$ ), zamijene novim, izmjerenim veličinama naprezanja i deformacije koje uzimaju u obzir promjenu presjeka tijekom konačnih deformacija [9].

### Stvarne deformacije i naprezanja

Kod tlačnih i vlačnih naprezanja, deformacije su jednake ako se razmatraju uz pretpostavke:  $\Delta l \rightarrow dl \rightarrow 0$ , tj.

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (1)$$

te

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right), \quad (2)$$

gdje je  $l$  trenutna duljina,  $l_0$  početna duljina i  $\varepsilon$  stvarna (logaritamska) deformacija. Naprezanje koje je povezano sa stvarnim deformacijama naziva se stvarno naprezanje i definirano je kao omjer stvarne sile i stvarne površine. Duktilni metali podvrgnuti konačnim deformacijama imaju jednaku ovisnost deformacija o naprezanju u vlačnom i tlačnom

području, ako se rezultati prikazuju u dijagramu sa stvarnim napreznjima i deformacijama [9].

### Definiranje plastičnosti u programu Abaqus

Kako je već ranije navedeno, da bi se dobio mogući plastični odziv promatrane konstrukcije, potrebno je unijeti podatke o plastičnim deformacijama i napreznjima kod kojih te deformacije nastaju. Te dvije skupine podataka su stvarna napreznja i stvarne deformacije. U radu je korišten kriterij plastičnog tečenja prema von Misesovom ekvivalentnom napreznju. U dostupnoj literaturi su prikazani podaci za nominalna napreznja i deformacije te ih je potrebno pretvoriti u stvarne vrijednosti.

Veza između stvarne i nominalne deformacije definira se izrazom

$$\varepsilon_{nom} = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad . \quad (3)$$

Sređivanjem ovog izraza i logaritmiranjem se dobije

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{max}) \quad . \quad (4)$$

Uz pretpostavku nestlačivosti materijala, veza stvarnog i nominalnog napreznja zapisuje se kao

$$l_0 A_0 = l A \quad . \quad (5)$$

Trenutna površina poprečnog presjeka određena je izrazom

$$A = A_0 \frac{l_0}{l} \quad , \quad (6)$$

a zamjenom ovog izraza u izrazu za stvarno napreznje određeno je

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0} = \sigma_{nom} \left( \frac{l}{l_0} \right) \quad , \quad (7)$$

gdje  $\frac{l}{l_0}$  može biti zapisano kao

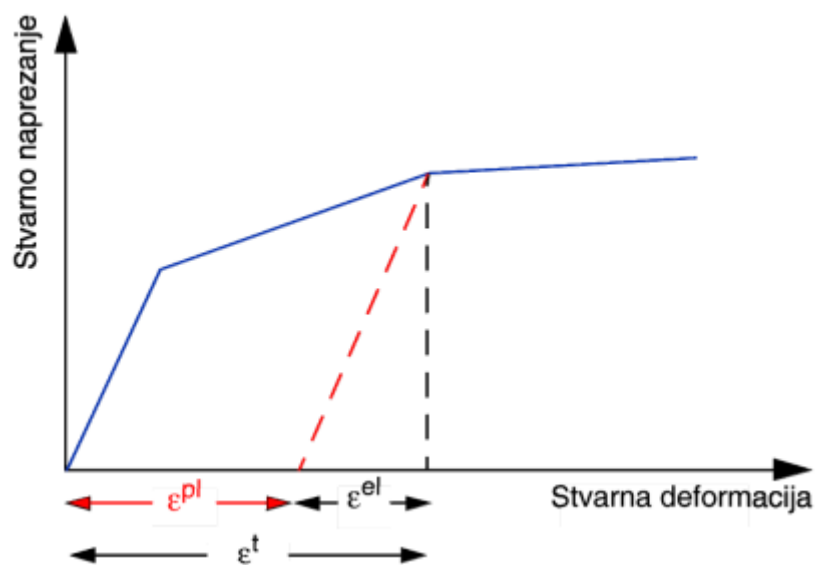
$$1 + \varepsilon_{nom} \quad . \quad (8)$$

Zadnja supstitucija omogućuje definiranje odnosa između stvarnog napreznja s nominalnim napreznjem i deformacijom

$$\sigma = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad . \quad (9)$$



Model plastičnosti u Abaqus-u opisuje plastično ponašanje većine metala. Abaqus glatku krivulju ponašanja metala u Hookeovom dijagramu aproksimira nizom ravnih linija koje spajaju unešene točke. Broj unešenih točaka nije ograničen, stoga je moguće dovoljno dobro aproksimirati stvarno ponašanje materijala. Podaci o plastičnosti definiraju ovisnost stvarnog naprezanja na granici plastičnosti o stvarnoj plastičnoj deformaciji. Podaci o deformacijama ispitivanih materijala ne sadrže informaciju o plastičnim deformacijama, već o ukupnim deformacijama. Rastavljanje stvarne deformacije na elastičnu i plastičnu komponentu prikazano je na slici 9 [9].



Slika 9. Rastavljanje stvarne deformacije na elastičnu i plastičnu komponentu [8]

Rastavljanje stvarne deformacije na elastičnu i plastičnu komponentu

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^t - \varepsilon^{el} = \varepsilon^t - \frac{\sigma}{E} , \quad (10)$$

gdje su

$\varepsilon^{pl}$ , stvarne plastične deformacije,

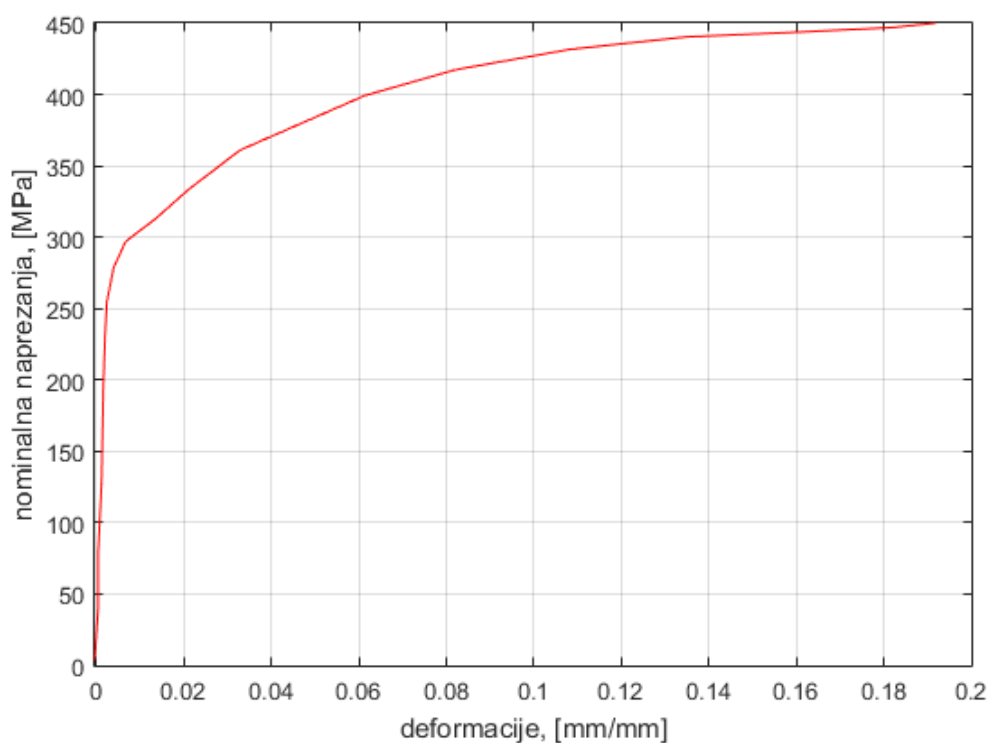
$\varepsilon^t$ , stvarne ukupne deformacije,

$\varepsilon^{el}$ , stvarne elastične deformacije,

$\sigma$ , stvarno naprezanje,

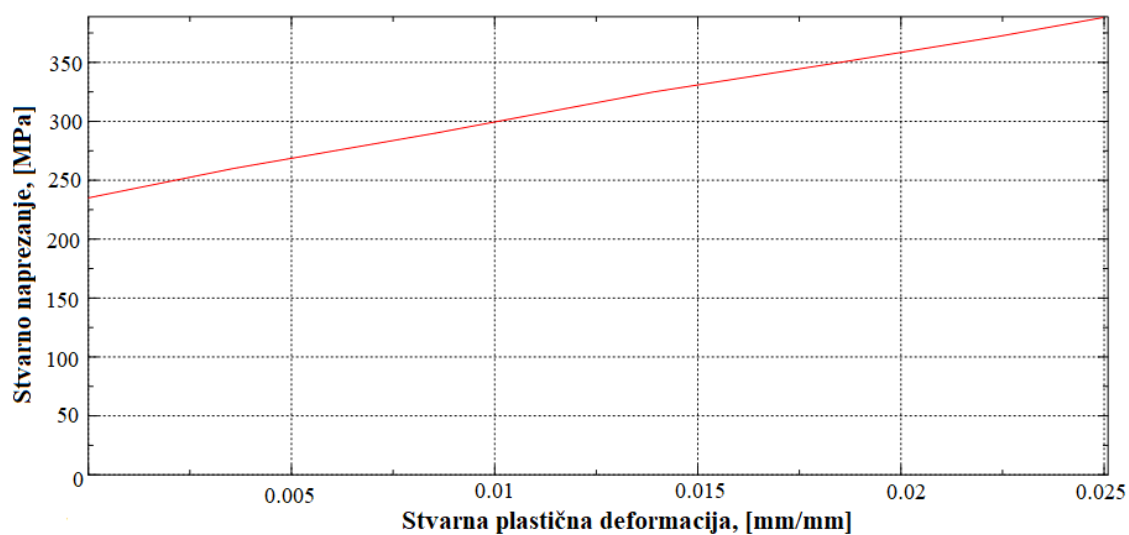
$E$ , modul elastičnosti .

Na slici 10. je prikazana ovisnost nominalnih napreznja o nominalnim deformacijama za materijal korišten u analizi.



Slika 10. Nominalna napreznja za korištenu leguru 2024-T42 [7]

Na slici 11. je prikazana ovisnost stvarnih napreznja i deformacija.

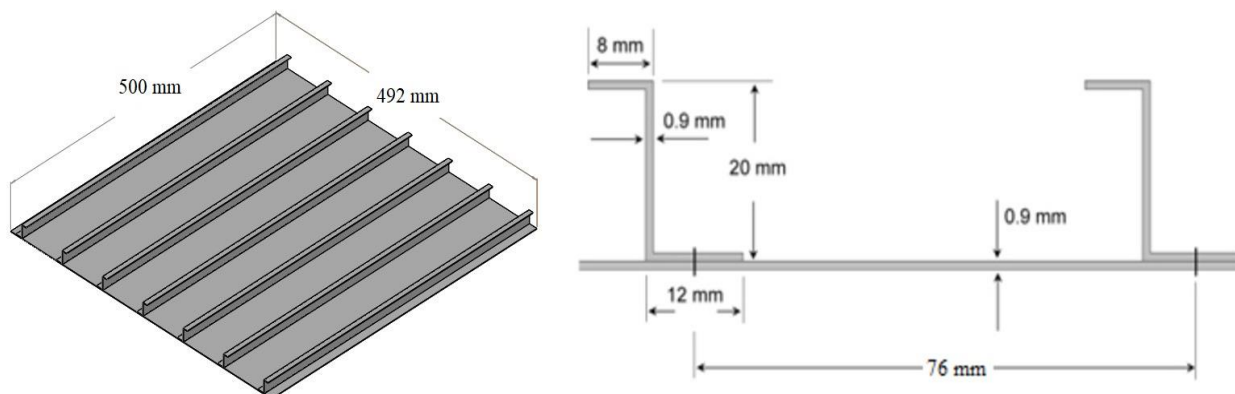


Slika 11. Stvarni Hookeov dijagram napreznja i plastičnih deformacija u Abaqus-u za korišteni materijal [7]

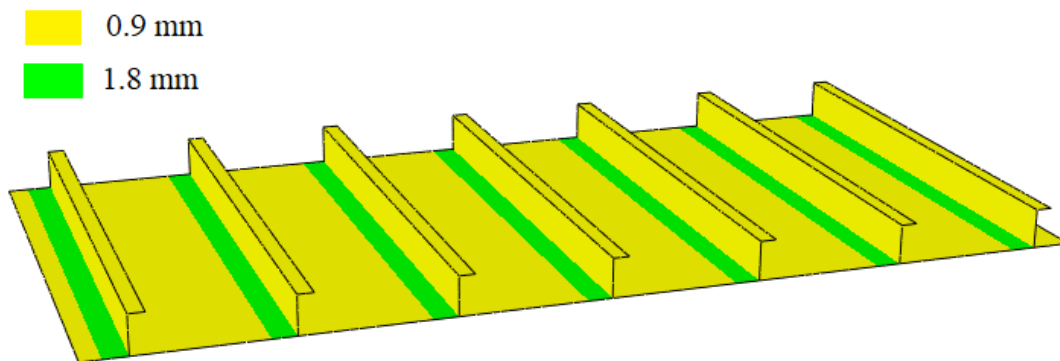
### 3.1 Opis pojedinih modela s obzirom na modelirani način spajanja

#### 3.1.1 Opis modela panela krila

Panel konstrukcije zrakoplova se sastoji od oplata i uzdužnice. Kod metalnih konstrukcija oplata i uzdužnice se međusobno najčešće spajaju zakovicama. Ovakav tip konstrukcije logičan je tijekom razvoja u nastojanju smanjenja mase uz zadržavanje čvrstoće konstrukcije. U ovom radu će panel krila poslužiti kao model za analizu tri načina modeliranja zakovičnih spojeva konstrukcije zrakoplova. Prvi način će biti tako izveden da će se spoj elemenata smatrati idealnim, odnosno zanemaruju se zakovice. Ovaj pristup predstavlja uobičajeni način diskretizacije konstrukcije za proračun čvrstoće metodom konačnih elemenata. Također će se u svrhu usporedbe rezultata za različite načine modeliranja zakovičnih spojeva dodatno modelirati dva panela krila. Jedan u kojem će zakovice biti modelirane pomoću kinematskih veza ali u modelu neće biti prisutni provrti (*model br. 1.2*), a utjecaj provrta će biti uzet u obzir kod trećeg modela panela krila (*model br. 1.3*) u kojem će se zakovice modelirati pomoću kinematskih veza ali u prethodno modeliranim provrtima. Panel krila je tankostijena konstrukcija, pa će modeli panela biti diskretizirani ljuskastim elementima. Na slici 12. je prikazan model panela krila, na kojoj su vidljive dimenzije panela koje su proizvoljno odabrane. Također je prikazan detalj, na kojem su prikazane dimenzije uzdužnica, korak uzdužnica i debljina elemenata.

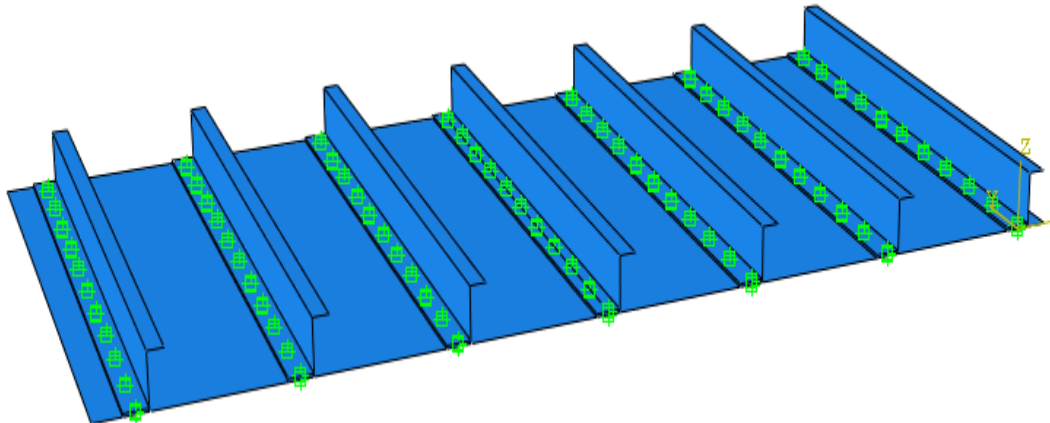


Slika 12. Panel krila, [mm]



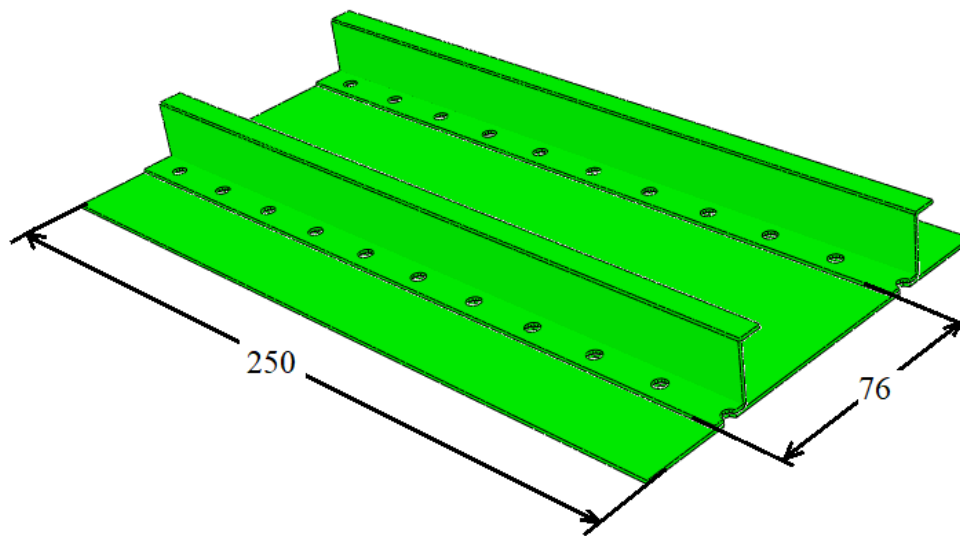
**Slika 13. Model br. 1.1- idealan spoj konstrukcije**

Na slici 13. je prikazan model panela krila koji će se koristiti za analizu idealnog spoja konstrukcije, također slikom su prikazane različite debljine konstrukcije. Model je kreiran kao tankostijena konstrukcija. Mjesto spoja oplate i uzdužnice jednako je zbroju debljine oplate i uzdužnice, zbog čega postoje dvije debljine konstrukcije.



**Slika 14. Model br. 1.2**

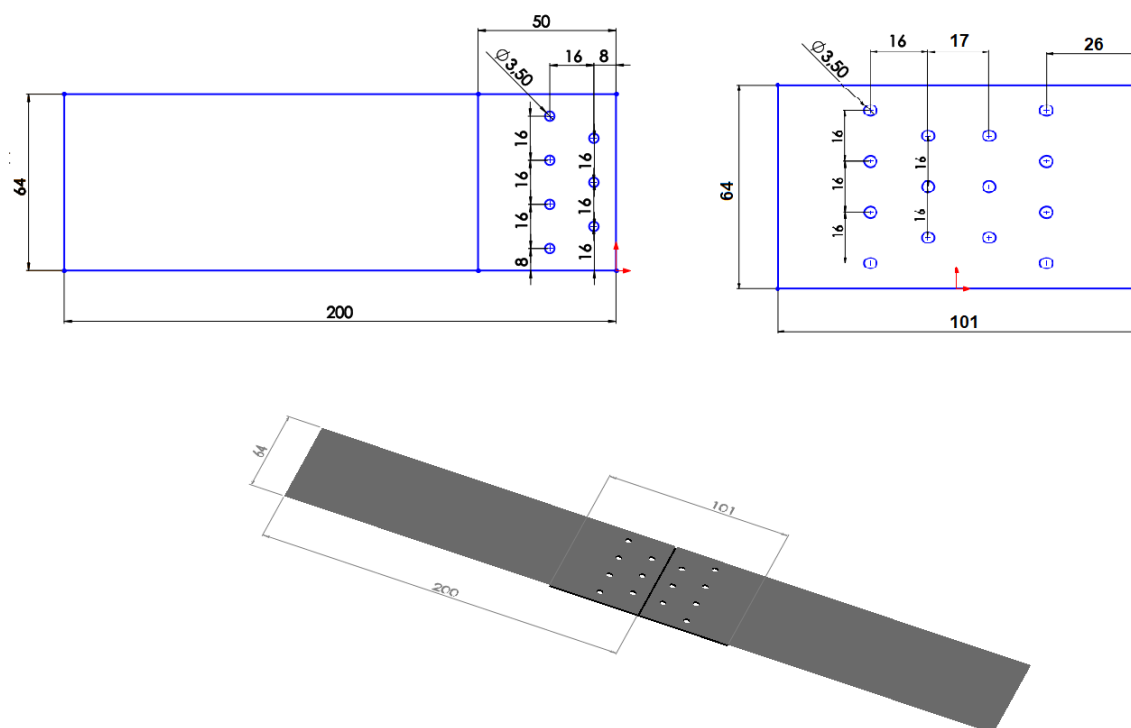
Slikom 14. je prikazan model panela krila br. 1.2 kod kojeg su uzdužnice i oplate modelirane kao zasebne površine kojima je kasnije dodijeljena odgovarajuća debljina, u svrhu kreiranja tankostijene konstrukcije. Spoj između uzdužnica krila i oplate je izveden kinematskim vezama MPC *Beam*, ali u modelu nisu izrađeni provrti, kao što je to izvedeno u modelu br. 1.3 koji je prikazan slikom 15. Kod modela br. 1.2 i 1.3 su korištene zakovice promjera  $\phi=4,8$  mm, i korak između zakovica od 23,8 mm.



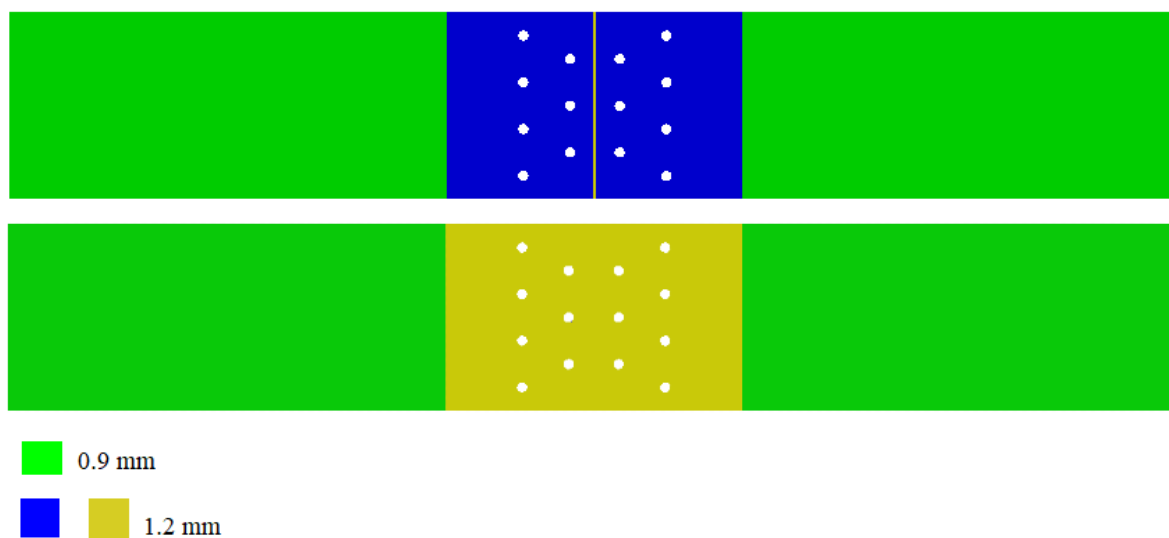
Slika 15. Model br. 1.3, dimenzije u [mm]

### 3.1.2 Opis modela br. 2

Model br. 2 je generiran za potrebe analize zakovičnih spojeva koji su modelirani pomoću kinematskih veza, koje su opisane u potpoglavlju 2.2.2. Model br. 2 predstavlja preklopni spoj elemenata konstrukcije, model se sastoji od dvije jednake metalne pločice, koje se spajaju trećim elementom koji ih povezuje i povećava krutost. Dijelovi modela su generirani kao tankostijene konstrukcije. Ovaj model će poslužiti u svrhu usporedbe rezultata s vrijednostima dostupnim iz [3]. Na slici 16. su prikazani dijelovi koji nakon spajanja čine model br. 2.



Slika 16. Modelirani preklopni spoj konstrukcije, [mm]



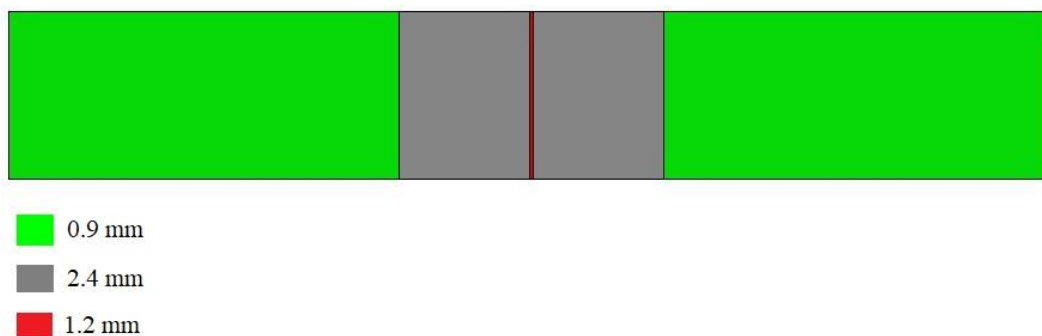
Slika 17. Različite debljine ploča modela br. 2

Slikom 17. je prikazan spoj konstrukcije i različite debljine limova, plavom i zelenom bojom su označene pločice koje se međusobno spajaju ojačanjem, koje je prikazano žutom bojom. Pločice su izrađene iz jednog komada ali su različite debljine, dio koji se nalazi u spoju s

ojačanjem je debljine  $t=1,2$  mm kao i ojačanje, a dio koji je podalje od spoja je debljine od 0,9 mm. Na gornjem dijelu slike 17. prikazan je pogled odozgo na model br. 2, a na donjem dijelu pogled odozdo.

### 3.1.3 Opis modela br. 3

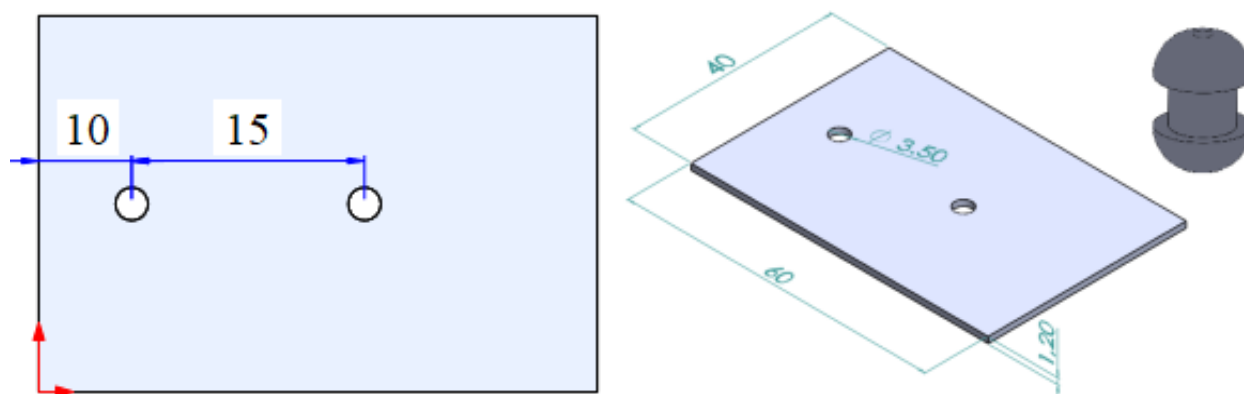
Model br. 3 predstavlja idealizirani spoj elemenata konstrukcije, prema dimenzijama je jednak modelu br. 2, i poslužit će za usporedbu rezultata dobivenih modelom br. 2, odnosno za analizu utjecaja zakovica na dobivene rezultate. Model je izrađen kao tankostjena konstrukcija. Na slici 18. su prikazane različite debljine površina modela br. 3.



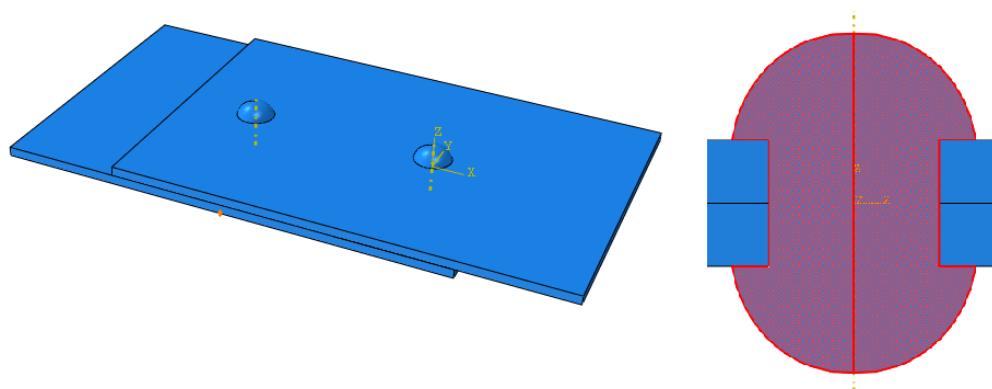
Slika 18. Različite debljine površina modela br. 3

### 3.1.4 Opis modela br. 4

Model br. 4 predstavlja preklopni spoj konstrukcije s dvije zakovice promjera 3,5 mm, koji je detaljno diskretiziran trodimenzionalnim konačnim elementima. Ovaj model će biti korišten za analizu utjecaja parametara zakovičnih spojeva (korak zakovica, udaljenost zakovice od ruba, zračnost između zakovice i provrta) na naprezanja i deformacije spoja. Spoj između zakovica i ploča definiran je opcijom glavna površina-sporedna površina (*master-slave surface*). Površina tijela zakovica je odabrana kao glavna, a ploče kao sporedne površine[10]. Na slici 19. su prikazani elementi i njihove dimenzije koje čine model br. 4, prikazan na slici 20. uz detalj spoja zakovice i ploča.



Slika 19. Model br. 4, dimenzije u [mm]



Slika 20. Model br. 4 i detalj spoja zakovice i oplata

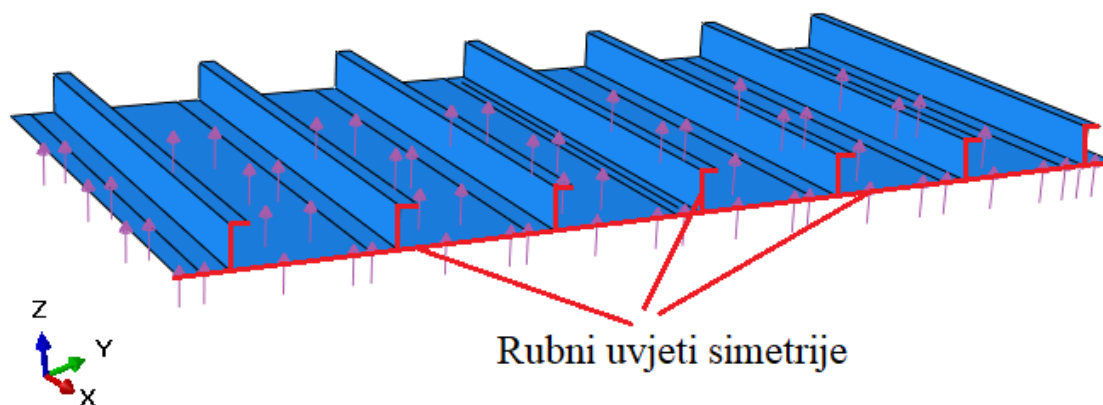
### 3.2 Rubni uvjeti i opterećenja modela

#### 3.2.1 Rubni uvjeti i opterećenja primjenjena na model br. 1

Za analizu je korišten segment krila između dva rebra, stoga će se na krajevima panela po rubovima koji su okomiti na smjer uzdužnica onemogućiti svi pomaci  $u, v$  i  $w$ , dok će rotacije oko pripadajućih osi  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  i  $\varphi_z$  biti moguće. Narinuto opterećenje je tlačno opterećenje od  $p=0,15$  MPa, u smjeru kao što je prikazano na slici 21. Pošto je model simetričan, iskorišteni su i rubni uvjeti simetrije, stoga nije modelirana cijela dužina panela od 500 mm,



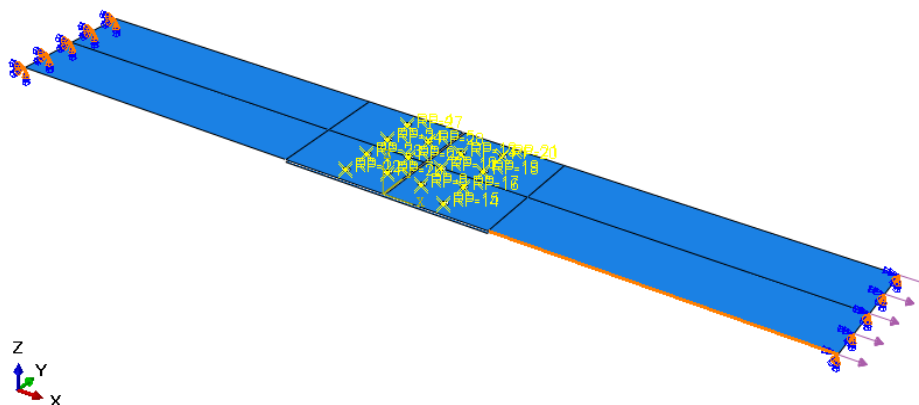
već polovica. Pošto je model simetričan u  $yz$  ravnini, u toj ravnini simetrije onemogućeni su pomaci  $u$  u smjeru osi  $x$ , i rotacije oko osi  $y$   $\varphi_y$ , i osi  $z$   $\varphi_z$ .



Slika 21. Način opterećenja panela krila i korišteni rubni uvjeti

### 3.2.2 Rubni uvjeti i opterećenja primjenjena na modelima br. 2 i br. 3

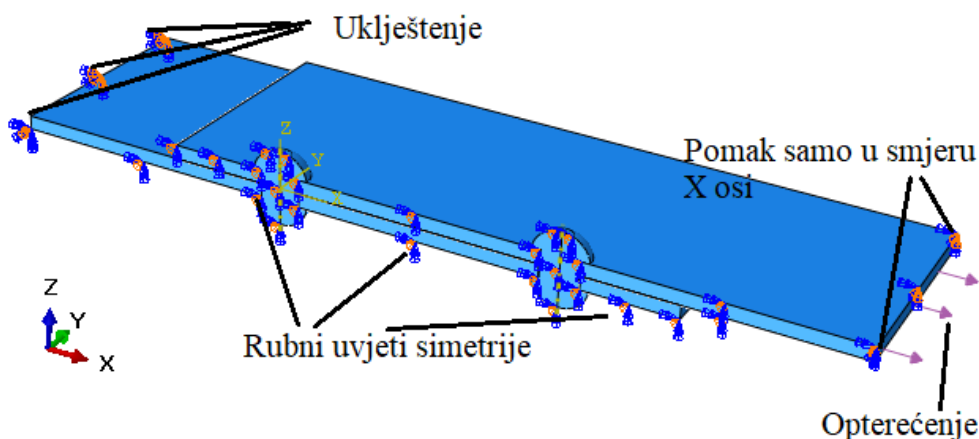
Kao što je prethodno navedeno, modeli br. 2 i br. 3 su prema dimenzijama identični. Pošto će se njihovi rezultati međusobno uspoređivati, korišteni su i identični rubni uvjeti za oba modela. Prema orijentaciji modela na slici 22. na lijevom rubu modela onemogućeni su svi pomaci i rotacije (uklještenje), a na desnom rubu modela omogućeni su pomaci samo u smjeru osi  $x$ , dok su ostali pomaci i rotacije onemogućene. Opterećenje je postavljeno kao kontinuirano opterećenje duž desnog ruba iznosa  $q=33,5$  N/mm. Na slici 22. je prikazan model br. 2 s prikazom opisanog načina opterećenja i postavljenim rubnim uvjetima.



Slika 22. Rubni uvjeti i opterećenja modela br. 2

### 3.2.3 Rubni uvjeti i opterećenja primjenjena na modelu br. 4

Zbog potrebe detaljnog modeliranja, guste mreže konačnih elemenata i nastojanju smanjenja vremena trajanja analize prilikom modeliranja modela br. 4, iskorišteni su rubni uvjeti simetrije za ravninu  $zx$ . U toj ravnini na površinama koje leže u njoj onemogućeni su pomaci  $v$  u smjeru osi  $y$ , i rotacije oko pripadajućih osi ravnine simetrije  $\varphi_x$  i  $\varphi_z$ . Uz rubni uvjet simetrije, također su i na krajevima modela postavljeni rubni uvjeti. Na lijevom rubu je postavljeno uklještenje, onemogućeni su svi pomaci i rotacije, a na desnom rubu je mogući samo pomak  $u$ , u smjeru osi  $x$ . Na slici 23. je prikazan model br. 4 s opisanim rubnim uvjetima i opterećenjem.



Slika 23. Rubni uvjeti i opterećenje modela br. 4

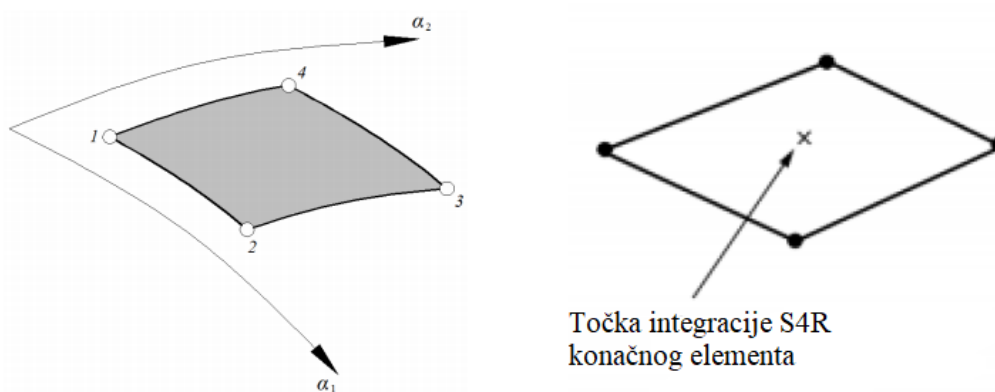
## 3.3 Korišteni konačni elementi

### 3.3.1 Opći konačni elementi za analizu ljuskastih modela

Prva tri opisana modela su u potpunosti modelirani kao tankostjene konstrukcije, odnosno pomoću ljuskastih konačnih elemenata. U programskom paketu Abaqus ugrađen je veliki broj konačnih elemenata za analizu ljusaka. Za potrebe ove analize korišteni su opći konačni elementi za analizu ljusaka oznake S4R i pokoji trokutasti konačni element za analizu ljusaka oznake S3. Trokutastim konačnim elementima su diskretizirana područja oko provrta u modelu br. 2.

S4R je dvostruko zakrivljeni četverokutni ljuskasti konačni element prvog reda. Sadrži četiri čvora smještena u vrhovima elemenata. Svaki čvor ima šest stupnjeva slobode, tri translacije i tri rotacije oko pripadajućih osi. S obzirom na to da ovaj element primjenjuje reduciranu integraciju, sadrži samo jednu točku integracije [2].

S3 konačni element ima tri čvora smještena u vrhovima trokuta. Svaki od čvorova sadrži šest stupnjeva slobode, tri translacije i tri rotacije oko pripadnih osi [2]. Na slici 24. je prikazan S4R konačni element s pripadajućom točkom integracije.

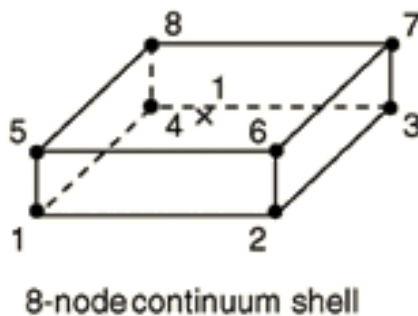


Slika 24. S4R konačni element [2]

### 3.3.2 3D konačni elementi za analizu ljuska

U modelu br. 4 za diskretizaciju ploča koje su međusobno spajane korišteni su 3D ljuskasti konačni elementi, oznake SC8R. Za razliku od konvencionalnih ljuskastih konačnih elemenata kod kojih se diskretizira tijelo definirajući srednju plohu s naknadnim zadavanjem debljine elementa, primjenom 3D elemenata modelirano je čitavo tijelo i debljina je definirana geometrijom čvorova. Ova vrsta konačnih elemenata primjenjiva je za tanke i debele ljuske te su pogodne za analizu nelinearnih ponašanja konstrukcije.

SC8R je trodimenzionalan ljuskasti konačni element kvadratičnog oblika s osam čvorova, u svakome vrhu po jedan, od kojih svaki ima tri translacijska stupnja slobode gibanja, što čini ukupno 24 stupnja slobode. Na slici 25. je prikazan SC8R ljuskasti konačni element s pripadajućim čvorovima [2].

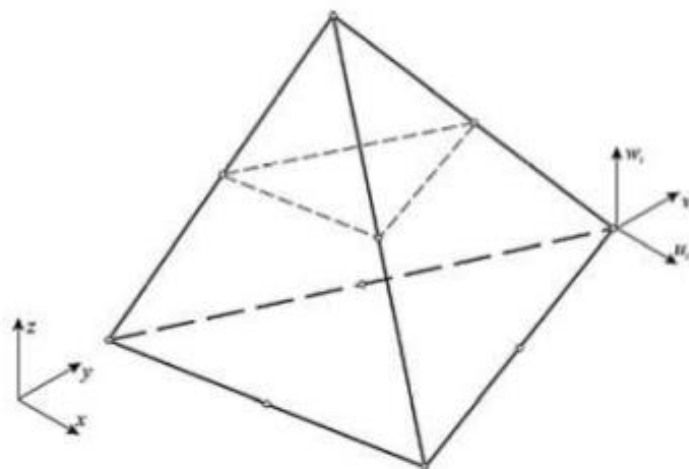


Slika 25. 3D ljuskasti konačni element SC8R [2]

### 3.3.3 Konačni elementi za analizu čvrstih tijela

U ovom radu je samo u modelu br. 4 dio konstrukcije diskretiziran konačnim elementima za analizu trodimenzionalnih tijela i to samo zakovica kao spojni element. Predstavnicima su standardnih volumnih elemenata, mogu biti sastavljeni od jednog homogenog materijala ili mogu uključivati nekoliko slojeva različitih materijala za analizu kompozita, te daju točnija rješenja ako elementi nisu iskrivljeni prilikom generiranja mreže konačnih elemenata na modelu koji se analizira. To znači da konačni elementi moraju što bolje odgovarati svome referentnom obliku prilikom opisivanja zadanog problema. Trokutni i tetraedarski elementi su manje osjetljivi na iskrivljenja.

U svrhu diskretizacije zakovice korišteni su tetraedarski konačni elementi drugog reda, oznake C3D10, koji imaju deset čvorova s po tri translacijska stupnja slobode gibanja. Čvorovi se nalaze u vrhovima tetraedra i na polovici stranica, a sveukupni broj stupnjeva slobode koji element sadrži jednak je 30. C3D10 je element koji se koristi za razne proizvoljno opterećene konstrukcije [2]. Na slici 26. je prikazan tetraedarski konačni element drugog reda C3D10, s pripadajućih čvorovima.



Slika 26. Tetraedarski konačni element drugog reda [2]

Tablica 2. Vrsta i broj konačnih elemenata za modele panela krila

Model	Vrsta elementa	Broj konačnih elemenata
1.1	S4R	17380
1.2	S4R	36496
1.3	S4R	13941
	S3	282

U tablici 2. su prikazani korišteni konačni elementi i broj konačnih elemenata kojima su diskretizirani modeli panela krila.

Tablica 3. Vrsta i broj konačnih elemenata za modele br. 2 i br. 3

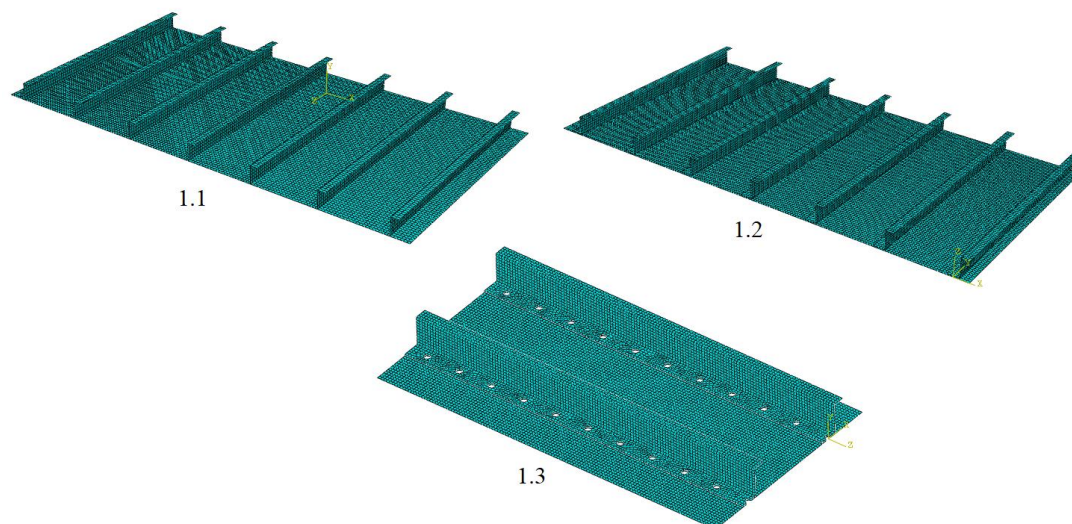
Model	Vrsta elementa	Broj konačnih elemenata
br. 2	S4R	35754
	S3	794
br. 3	S4R	11214

U tablici 3. su prikazani korišteni konačni elementi i broj konačnih elemenata kojima su diskretizirani modeli br. 2 i br. 3.

U tablici 4. su prikazani korišteni konačni elementi i broj konačnih elemenata kojima je diskretiziran model br. 4.

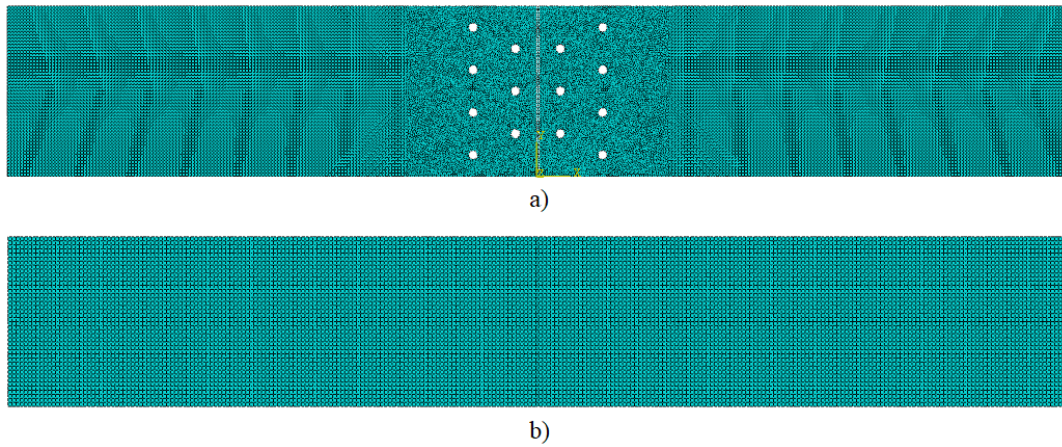
**Tablica 4. Vrsta i broj konačnih elemenata korišteni za model br. 4**

Dijelovi modela br. 4	Vrsta elementa	Broj konačnih elemenata
Pločica	SC8R	15129
Zakovica	C3D10	6136



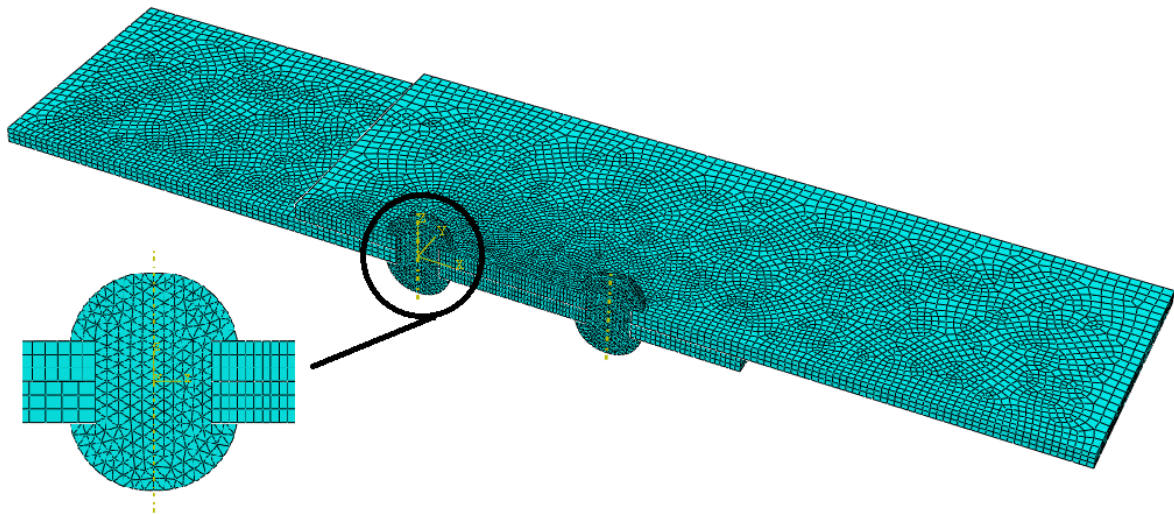
**Slika 27. Mreža konačnih elemenata modela br. 1.1, br. 1.2 i br. 1.3**

Na slici 27. je prikazana mreža konačnih elemenata korištenih za diskretizaciju modela panela krila.



**Slika 28. Mreža konačnih elemenata za, a) model br. 2, b) model br. 3**

Na slici 28. je prikazana mreža konačnih elemenata kojima su diskretizirani modeli br. 2 i br. 3.



**Slika 29. Mreža konačnih elemenata modela br. 4**

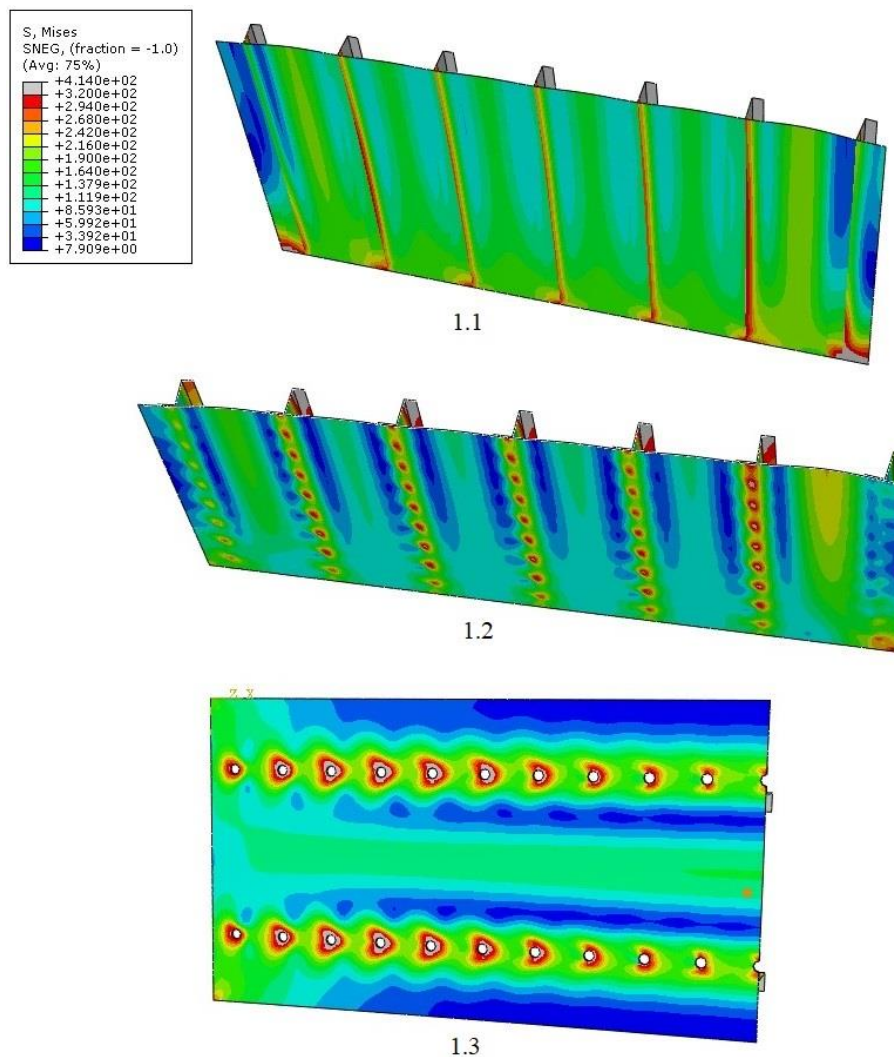
Na slici 29. je prikazana mreža konačnih elemenata kojom je diskretiziran model br. 4.



## 4. Rezultati

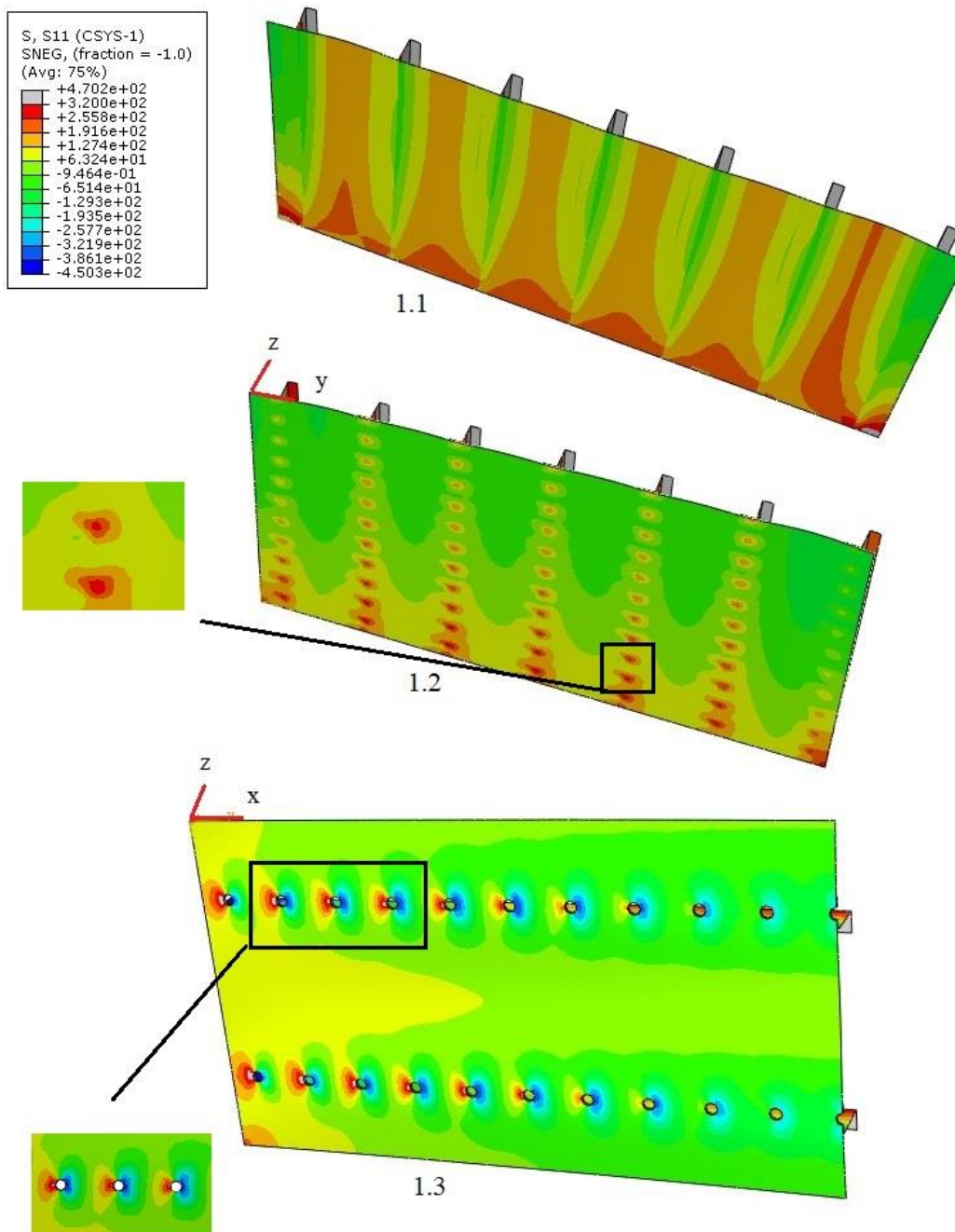
### 4.1. Rezultati za različite načine modeliranja spoja uzdužnice i oplate

Slikom 30. su prikazana ekvivalentna naprezanja za svaki modelirani način spajanja oplate i uzdužnice panela. Model br. 1.1 predstavlja uobičajeni način modeliranja spojeva zrakoplovnih konstrukcija, takav spoj se smatra idealnim, model br. 1.2 i 1.3 predstavljaju složenije načine modeliranja zakovičnih spojeva, pa samim time omogućuju modeliranje složenije raspodjele naprezanja. Modeli su opterećeni s vanjske strane oplate, tlakom. Međusobno uspoređujući modele, vidljivo je da su vršna naprezanja slična, međutim u svim modelima nisu prisutne koncentracije naprezanja.



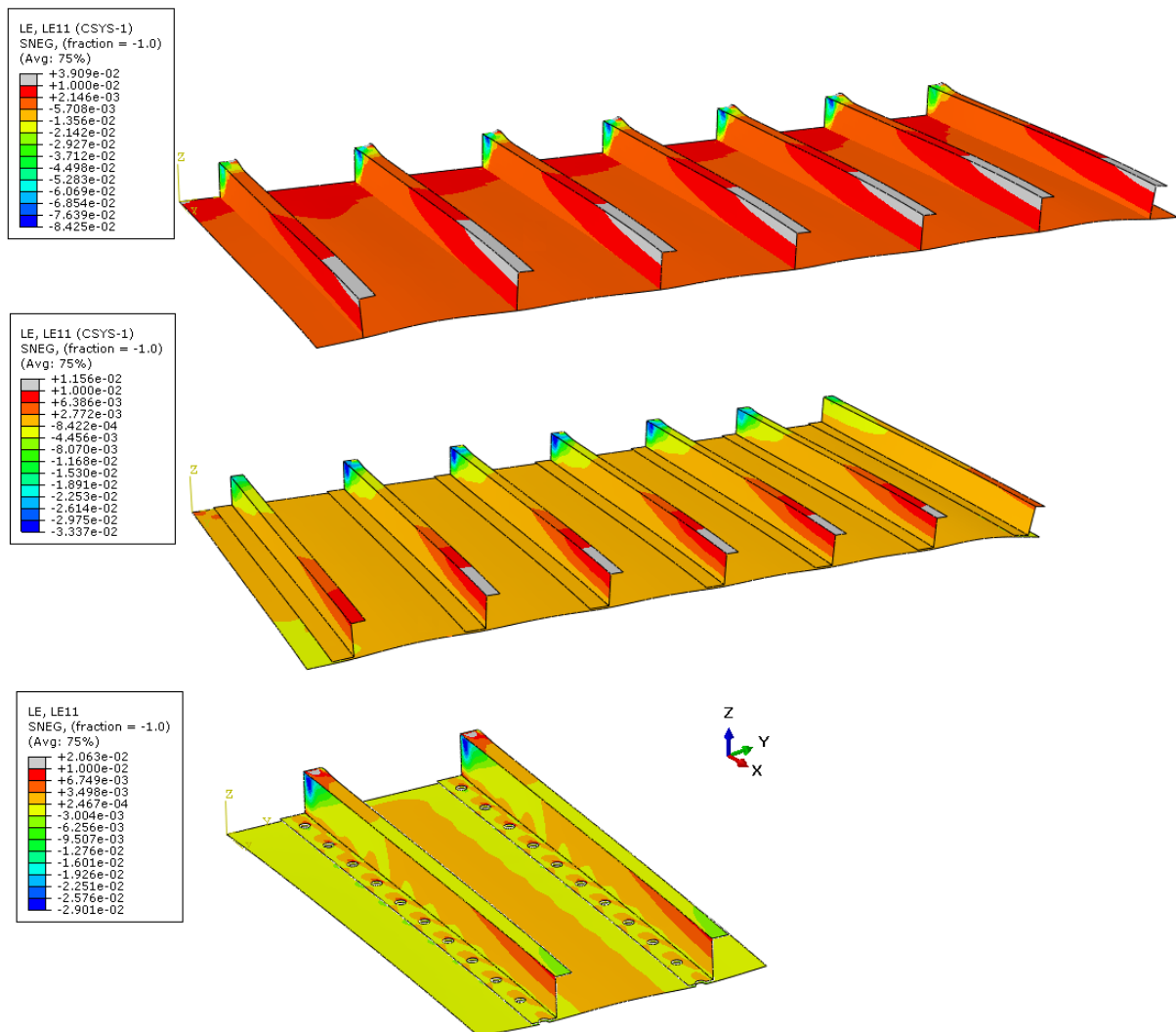
Slika 30. Ekvivalentna von Mises naprezanja za različito modelirane spojeve, [MPa]





Slika 31. Naprezanja u smjeru osi  $x$ , [MPa]

Na slici 31. su prikazana naprezanja u smjeru osi  $x$ , za različite načine modeliranja spoja uzdužnice i oplate panela, os  $x$  se proteže duž uzdužnica i kod modela br 1.1 i 1.2 nema promjenjivog opterećenja (vlak-tlak) na spoju. Kod modela 1.3 vidljiva je promjena opterećenja u području oko zakovice.



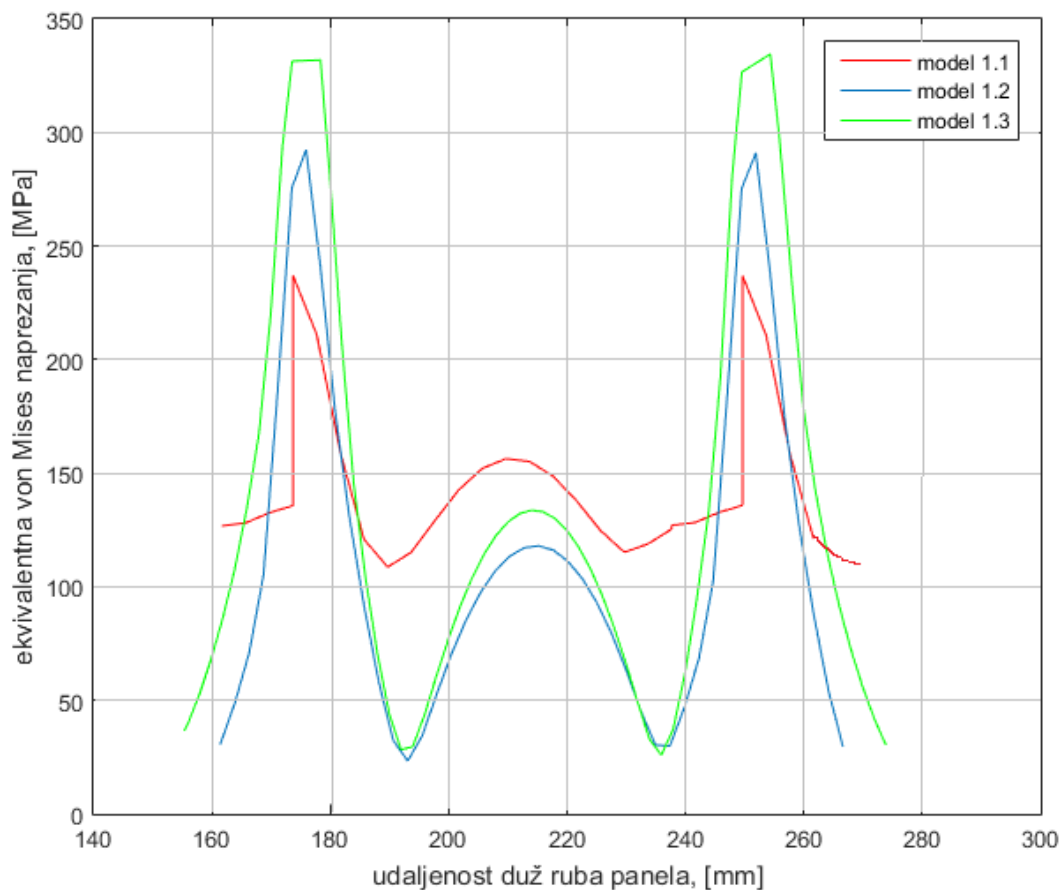
Slika 32. Deformacije u smjeru osi x, [-]

Na slici 32. su prikazane deformacije za svaki model pojedinačno, vidljivo je da se najveće deformacije javljaju kod modela br. 1.1 i to na pojasu i struku uzdužnice koji nisu u kontaktu s oplatom. Takav model bi bio prikladan za analizu gubitka stabilnosti panela, no u ovome slučaju su od interesa deformacije na samom kontaktu oplata i uzdužnice i za te potrebe nužno je koristiti složeniji način modeliranja zakovičnih spojeva kao što je u modelu br. 1.3.

U svrhu jasnije predodžbe razlike naprezanja i pomaka za različite načine modeliranja zakovičnih spojeva, u svakom modelu je izrađen presjek paralelan yz ravnini udaljen 50 mm od ravnine simetrije, na kojem su očitani rezultati naprezanja i pomaka panela. Presjek je prikazan na slici 33.

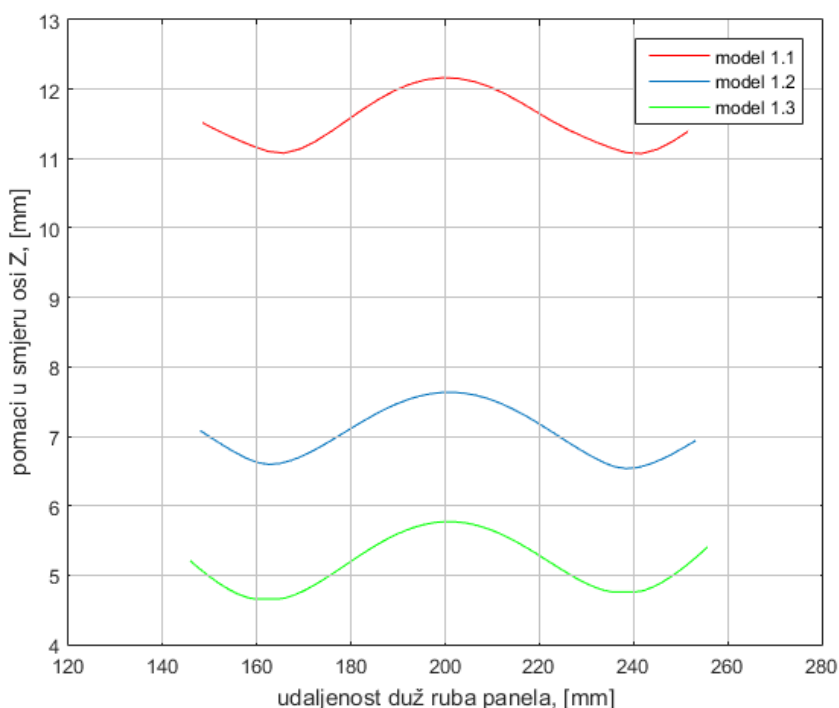


Slika 33. Presjek i mjesto očitavanja rezultata



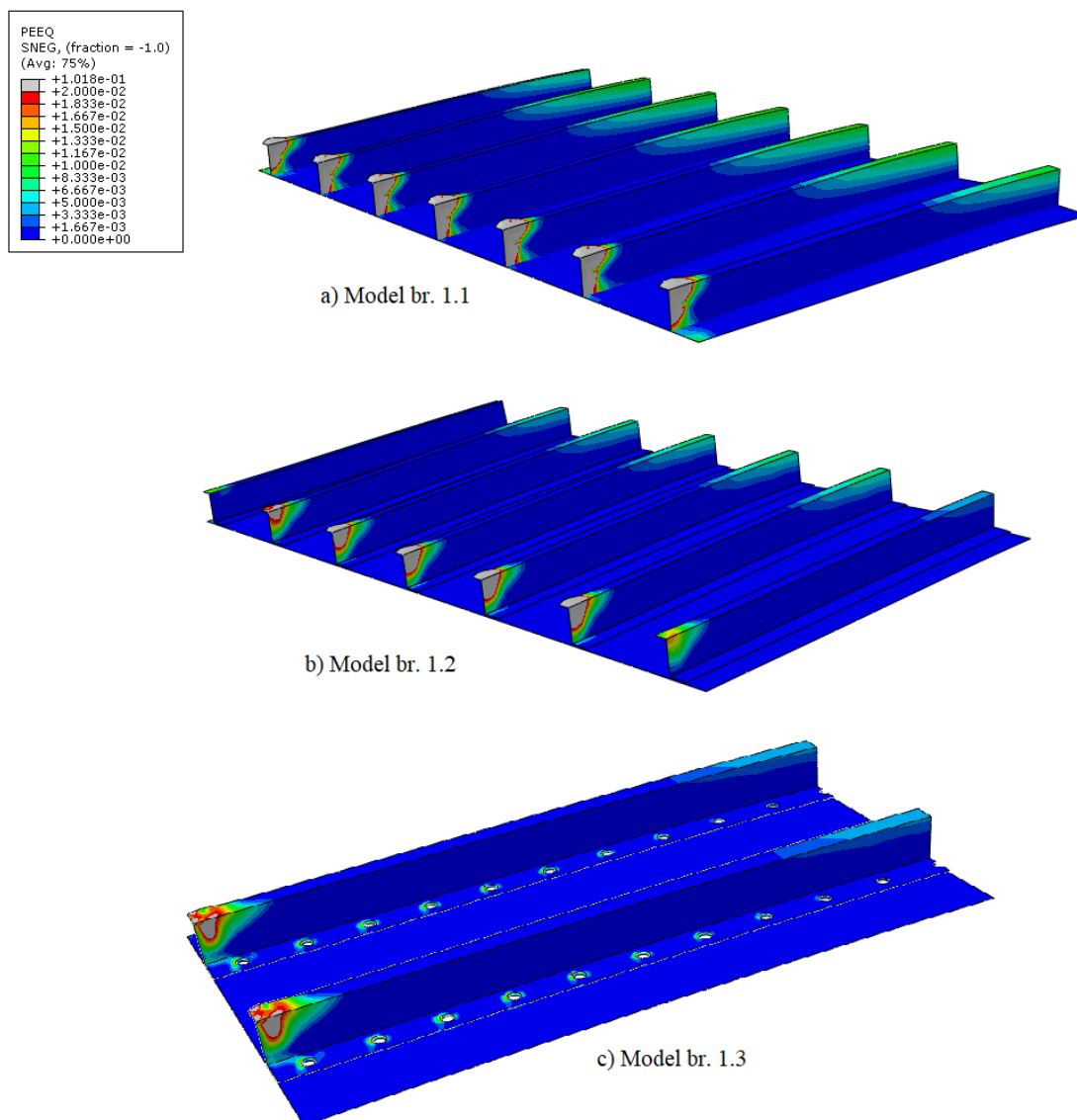
Slika 34. Usporedba ekvivalentnih von Mises naprezanja, [MPa]

Iz slike 34. vidljiva je raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja duž širine oplate. Može se uočiti razliku u raspodjeli naprezanja ovisno o stupnju složenosti modeliranja spoja konstrukcije. Na mjestima spoja oplate s uzdužnicom sva tri modela daju približno jednaka rješenja, uz to da model br. 1.3 na mjestu spoja ima najširu raspodjelu i najveća vršna naprezanja.



**Slika 35. Usporedba pomaka u smjeru osi z, [mm]**

Iz slike 35. je vidljivo da se najveći pomaci javljaju kod najjednostavnijeg modeliranja spojeva, model br. 1.3 nije pogodan za usporedbu vrijednosti pomaka s ostalim modelima, jer je to model manjih dimenzija. Model 1.1 predstavlja idealan spoj konstrukcije, iz usporedbe njegovih pomaka s pomacima modela br. 1.2 u kojem su spojevi modelirani kinematskim vezama zaključujemo da način modeliranja primijenjen kod modela br. 1.2 nije prikladan za ovaj problem, jer je u modelu br. 1.2 prema rezultatima sa slike 35. krutost konstrukcije veća nego kod idealnog spoja, što nije moguće. U analizi je provjeren utjecaj mreže konačnih elemenata i različiti načini zadavanja kinematskih veza.

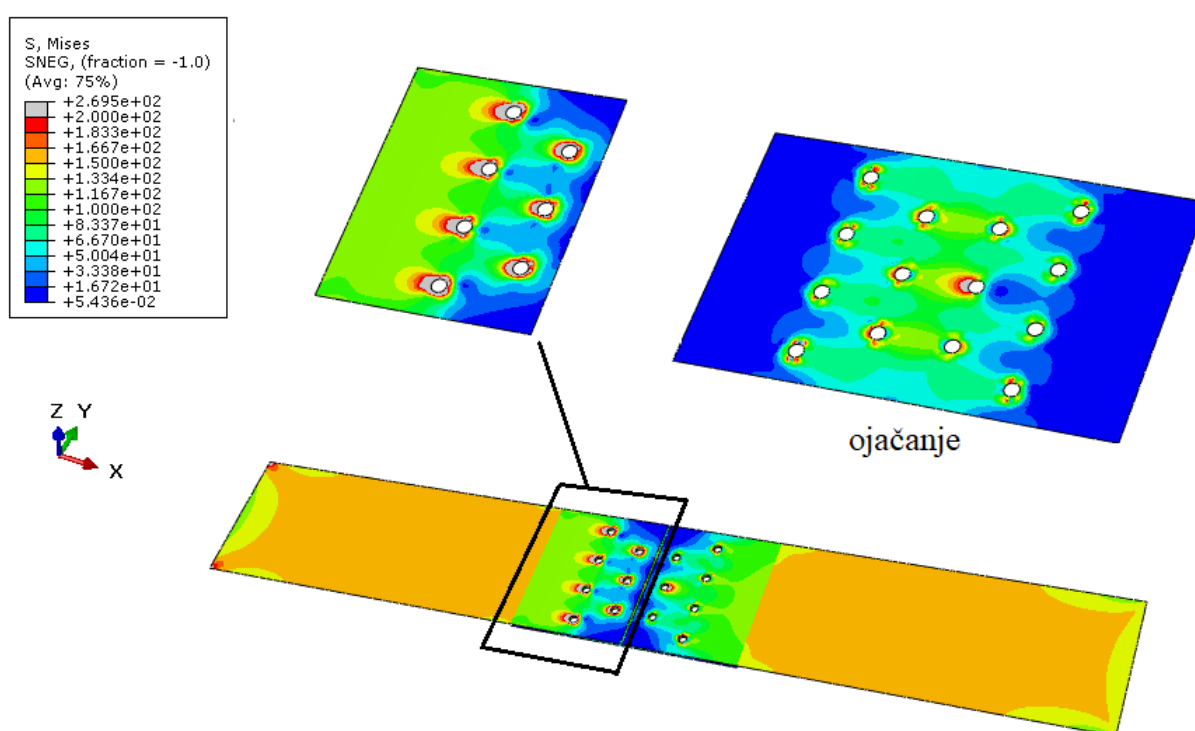


**Slika 36. Raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija, [-]**

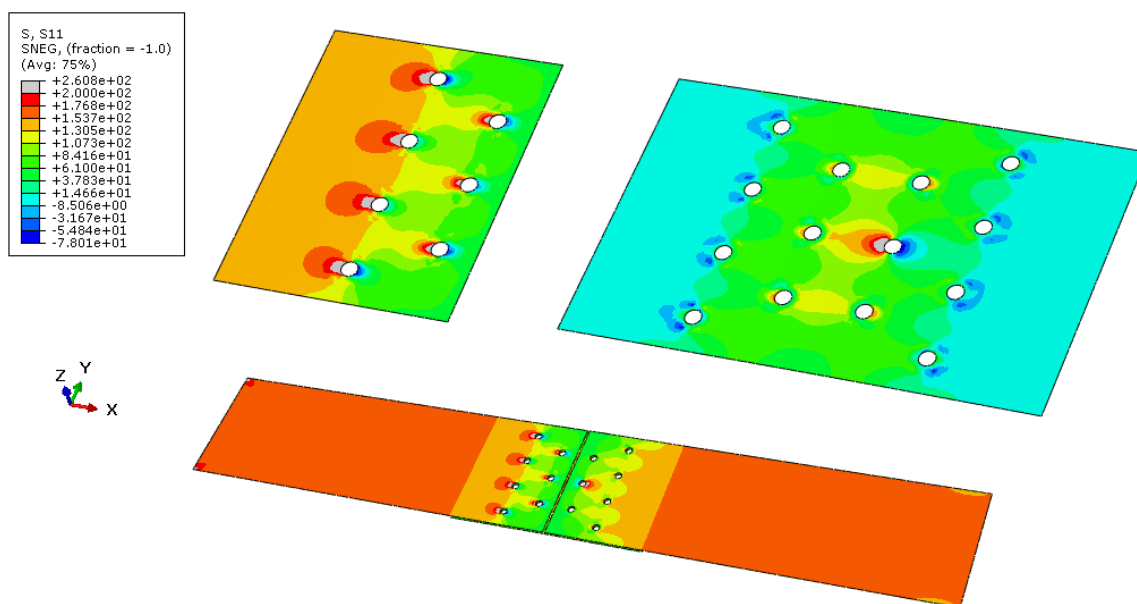
Slikom 36. su prikazani rezultati ekvivalentnih plastičnih deformacija. Iz rezultata je vidljivo da se najveće područje ekvivalentnih plastičnih deformacija javlja kod idealnog spoja elemenata konstrukcije, najveća razlika u načinu modeliranja spojeva je vidljiva kod modela br. 1.3 kod kojeg su vidljive plastične deformacije u području oko provrta. Pošto su te plastične deformacije malih vrijednosti ne bi trebale predstavljati problem u smislu narušavanja integriteta konstrukcije.

#### 4.2 Rezultati modela br. 2 (elementi povezani kinematskim vezama)

Na slici 37. je prikazana raspodjela ekvivalentnih napreznja preklopnog spoja zakovica. Može se uočiti veliki skok napreznja oko mjesta zakovica, najveća napreznja se javljaju kod pločica i to kod pločice koja je bliža uklještenju što je i očekivano. Kod ojačanja koje spaja pločice napreznja su niža, ali svejedno su vidljive koncentracije napreznja.

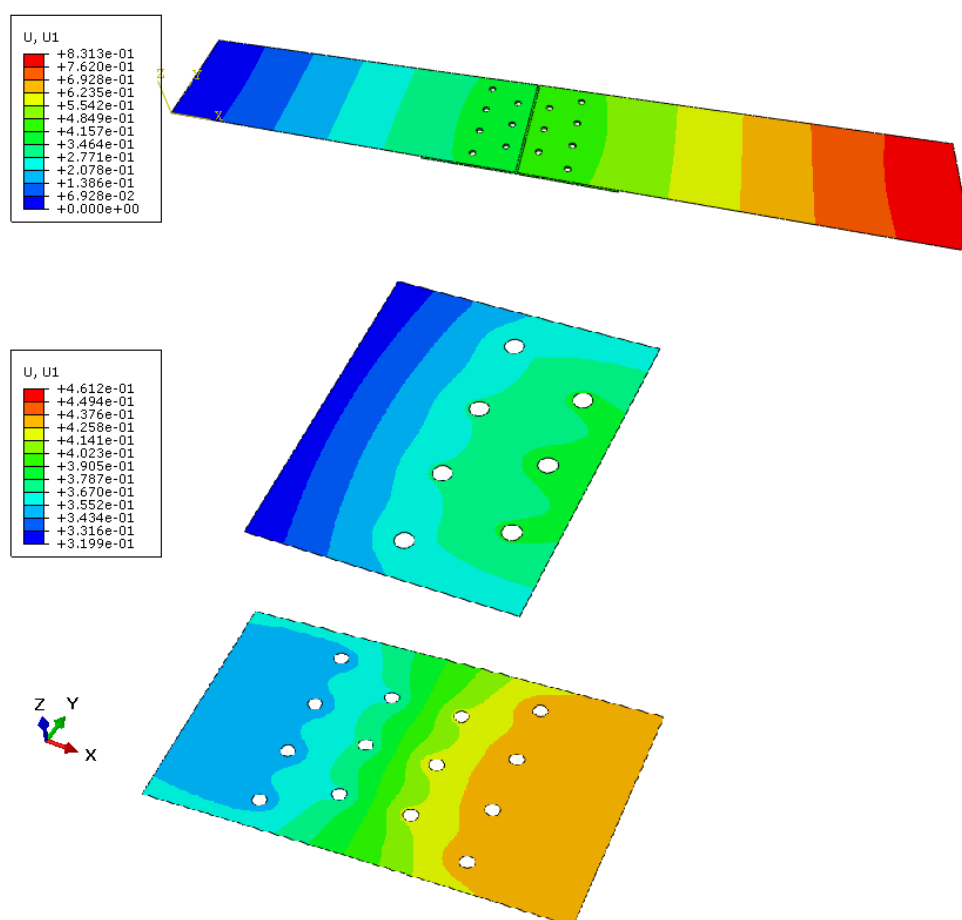


Slika 37. Ekvivalentna von Mises napreznja, [MPa]



Slika 38. Naprezanja u smjeru osi  $x$  modela br. 2, [MPa]

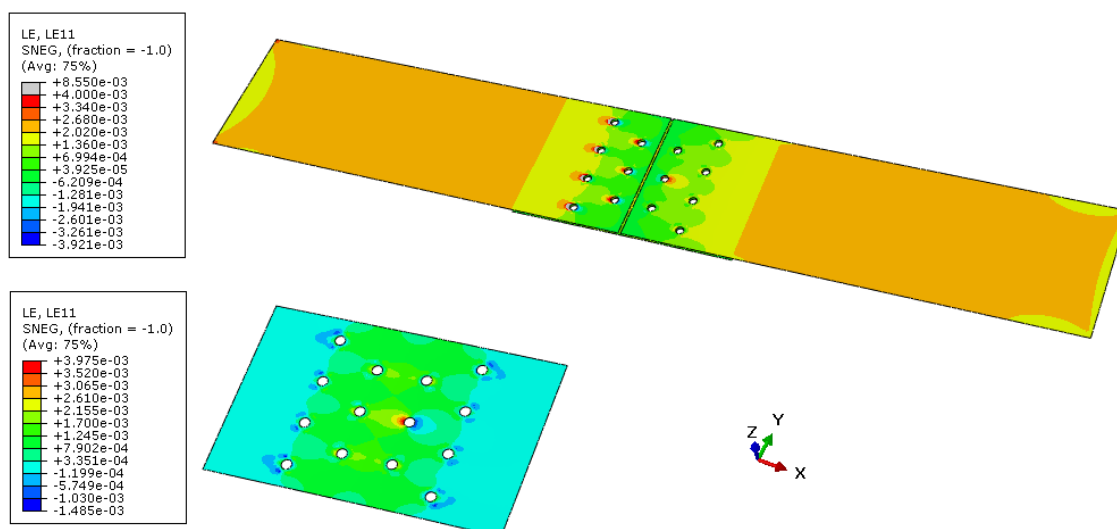
Na slici 38. su prikazana naprezanja u smjeru osi  $x$ . Iz modela su izdvojeni dijelovi koji se međusobno nalaze u spoju. Može se uočiti koncentracija naprezanja i promjenjivo opterećenje oko provrta, vidljivo je da su vlačna naprezanja daleko veća od tlačnih zbog primijenjenog načina opterećenja.



**Slika 39. Raspodjela pomaka Modela br. 2 u smjeru osi  $x$ , [mm]**

Slikom 39. su prikazani rezultati pomaka u smjeru osi  $x$ , u lijevom kraju spoja je postavljeno uklještenje pa u njemu ni nema pomaka, a najveći pomak je na desnom kraju modela. Na slici su također prikazani i segmenti elemenata koji su u spoju, prvi segment je dio pločice koji se nalazi u spoju s ojačanjem koje je cijelo prikazano na slici. Može se uočiti slična raspodjela pomaka elemenata što je bilo očekivano kod modela koji se nalaze u međusobnom kontaktu.



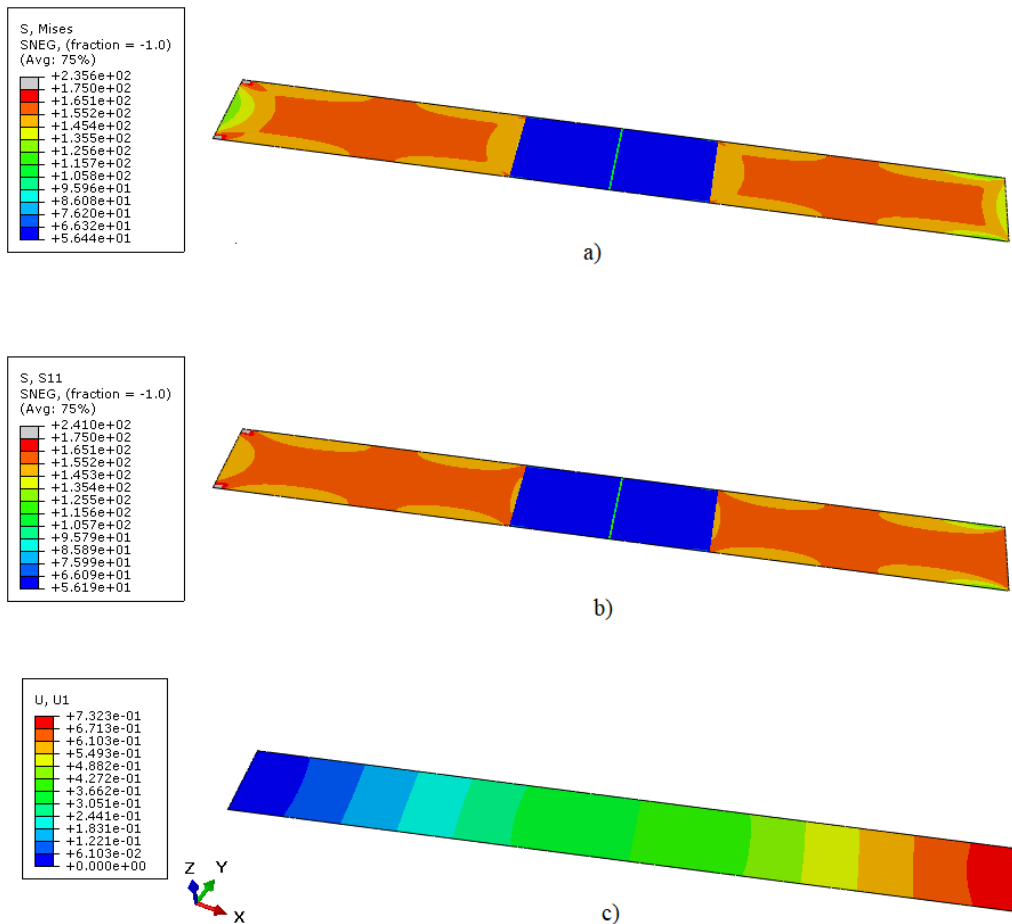


Slika 40. Deformacije u smjeru osi  $x$  modela br. 2, [-]

Na slici 40. su prikazane deformacije model br. 2. Također je prikazana i raspodjela deformacija ojačanja koje spaja pločice. Veće deformacije su prisutne kod pločica, a nešto manja kod ojačanja. Iz rezultata je vidljivo i suženje modela. Može se uočiti da raspodjela deformacija kod ojačanja nije simetrična, jer dolazi do savijanja modela na središnjem dijelu koje je prikazano na slici 48.

### 4.3 Rezltati modela br. 3

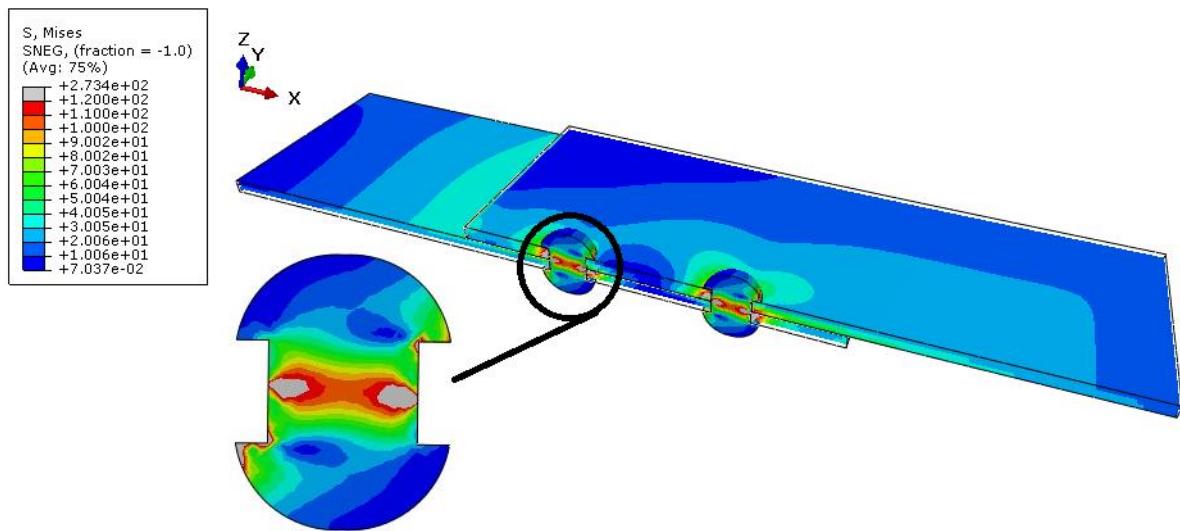
Na slici 41. su prikazani rezultati za model br. 3. Iz rezultata je vidljivo da su najmanja naprezanja u središnjem dijelu modela, iz razloga što na tom dijelu model ima najveću debljinu. Jednako kao i kod modela br. 2, i kod modela br. 3 najveći pomaci su u desnom kraju.



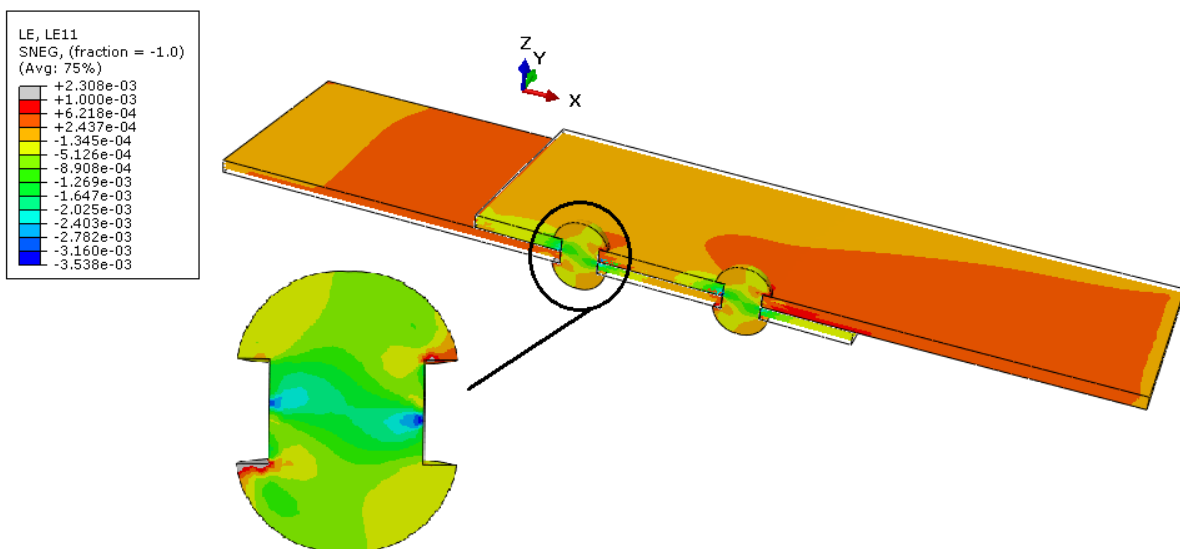
**Slika 41. Rezultati modela br. 3 a) ekvivalentna von Mises naprezanja, [MPa], b) naprezanja u smjeru opterećenja, [MPa], c) pomaci u smjeru opterećenja, [mm]**

#### 4.4 Rezultati modela br. 4

Slikom 42. su prikazana ekvivalentna von Mises naprezanja modela br. 4, i detaljno je prikazana raspodjela naprezanja na zakovici. Možemo uočiti koncentraciju naprezanja oko spoja zakovice i ploča. Također je vidljiva složena raspodjela naprezanja kod zakovica.

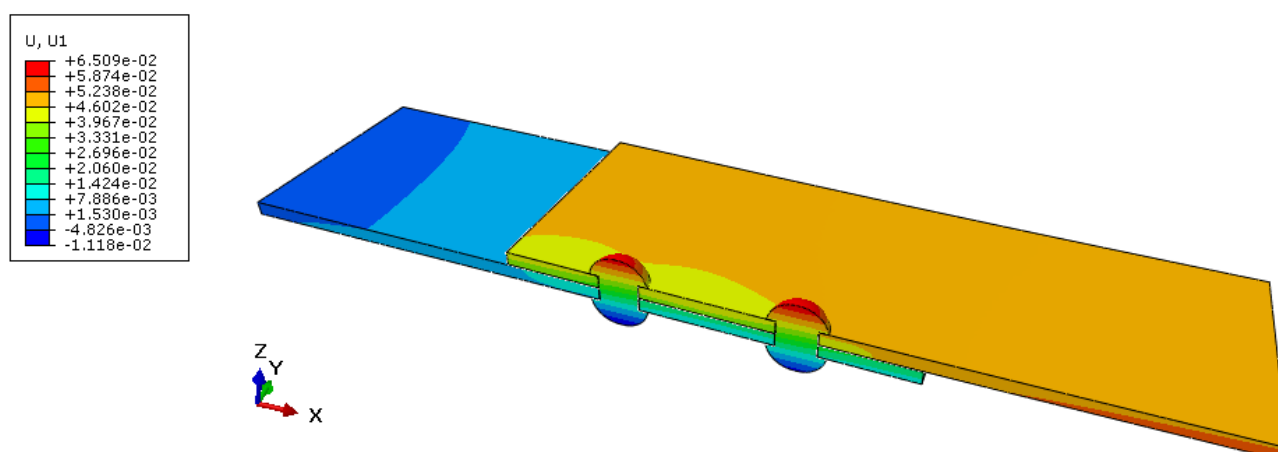


Slika 42. Ekvivalentna von Mises naprezanja modela br.4, [MPa]



Slika 43. Deformacije u smjeru osi x, modela br.4 i zakovice, [-]

Na slici 43. su prikazane deformacije modela br. 4 u smjeru osi  $x$ , također je kao detalj, prikazana raspodjela deformacija u smjeru osi  $x$  na zakovici. Može se vidjeti da se najviše deformiraju krajevi glava zakovica koje se nalaze u kontaktu s pločama. Dodatno može se uočiti da se dijelovi ploča koje se nalaze podalje od spoja također deformiraju u većoj mjeri. Dijelovi ploča oko zakovica imaju veću krutost zbog zakovica pa se taj dio manje deformira.

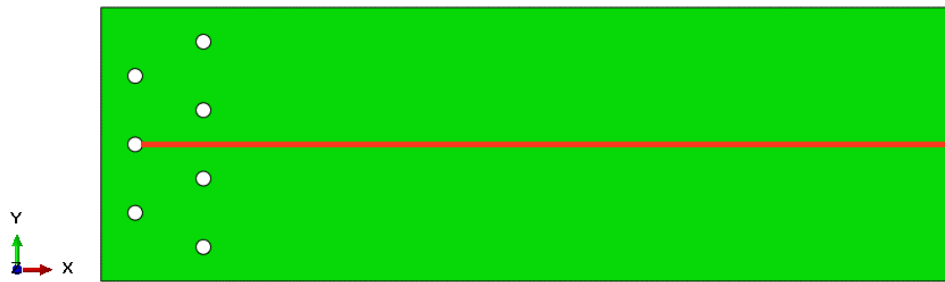


Slika 44. Pomaci u smjeru osi  $x$ , [mm]

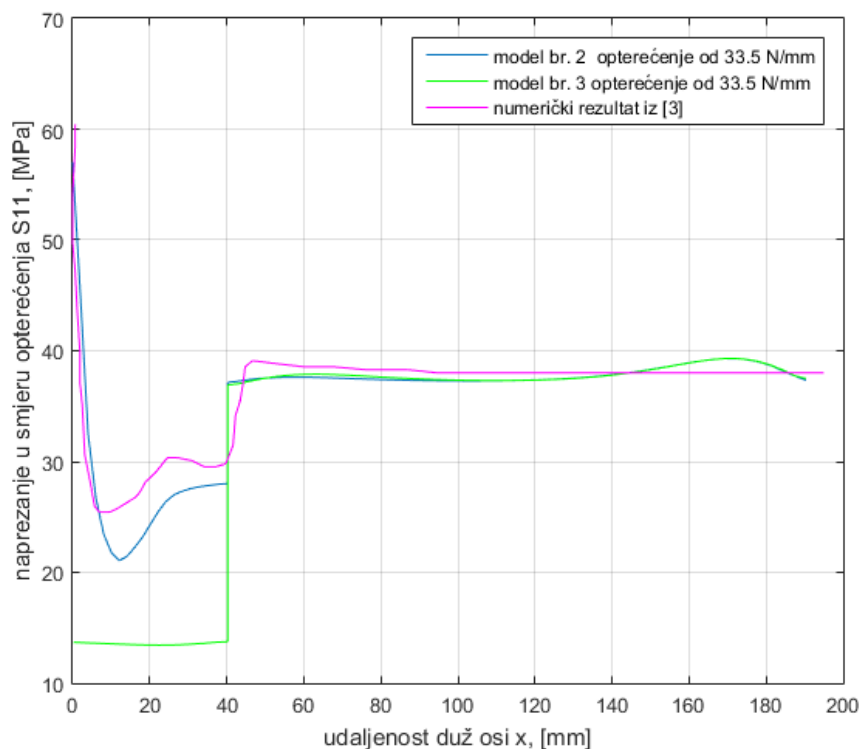
Na slici 44. su prikazani pomaci u smjeru osi  $x$  modela br. 4. Iz rezultata je vidljivo da se najviše pomaknu vrhovi zakovica. Razlog tome je što su u ravnini  $zx$ , vrhovi zakovica najudaljenije točke, te zbog savijanja modela dolazi do zakretanja vrhova zakovica.

#### 4.5. Usporedba rezultata modela br. 2 i br. 3 s rezultatima iz [3]

U svrhu usporedbe rezultata između modela br. 2 i br. 3 s numeričkim rezultatima dostupnim iz [3], u modelima je kreirana putanja za očitavanje rezultata, koja je prikazana na slici 45. U analizi iz [3] korišteni model je jednak modelu br. 2, razlika je u korištenom materijalu za analizu, i kod modela iz [3] u desnom kraju modela nema rubnih uvjeta. Da bi se ostvarilo ponašanje desnog ruba slično kao i kod ispitivanja na kidalici uvedeni su rubni uvjeti.

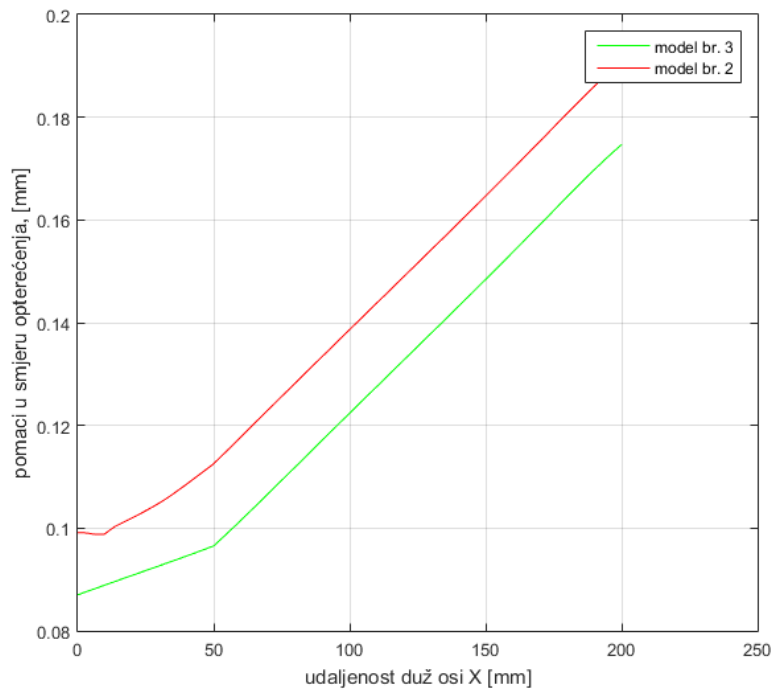


Slika 45. Putanja za očitavanje rezultata



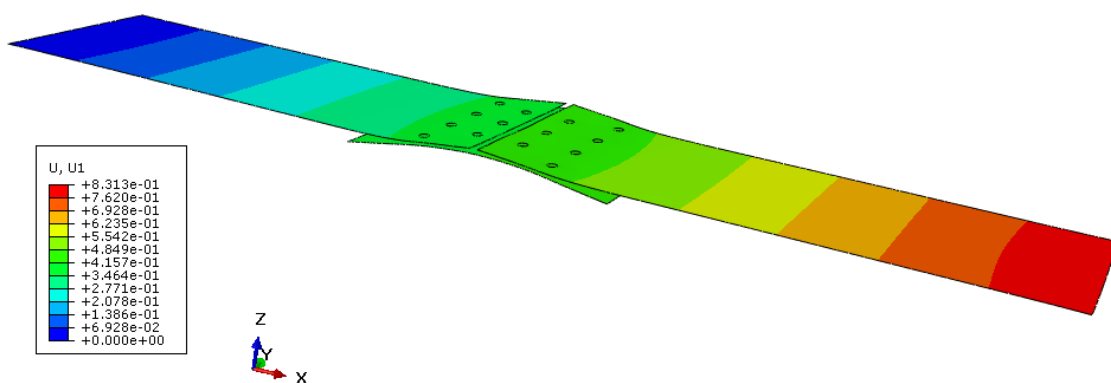
Slika 46. Usporedba napreznja u smjeru opterećenja, [MPa]

Iz rezultata na slici 46. je vidljiva raspodjela napreznja u području oko zakovice i podalje od nje, ako se analiziraju rezultati podalje od zakovice sva tri modela daju približno jednake rezultate, u slučaju potrebe analize napreznja u području oko zakovica model br. 3 nije za to prikladan, već je potrebno koristiti model koji je detaljnije modeliran, kao što je model br. 2, čije je rješenje zbog validacije uspoređeno s rezultatom iz [3]. Iz analize možemo zaključiti da rezultati modela br. 2 i rezultati iz [3], unatoč manjim razlikama slično opisuju analizirani problem.



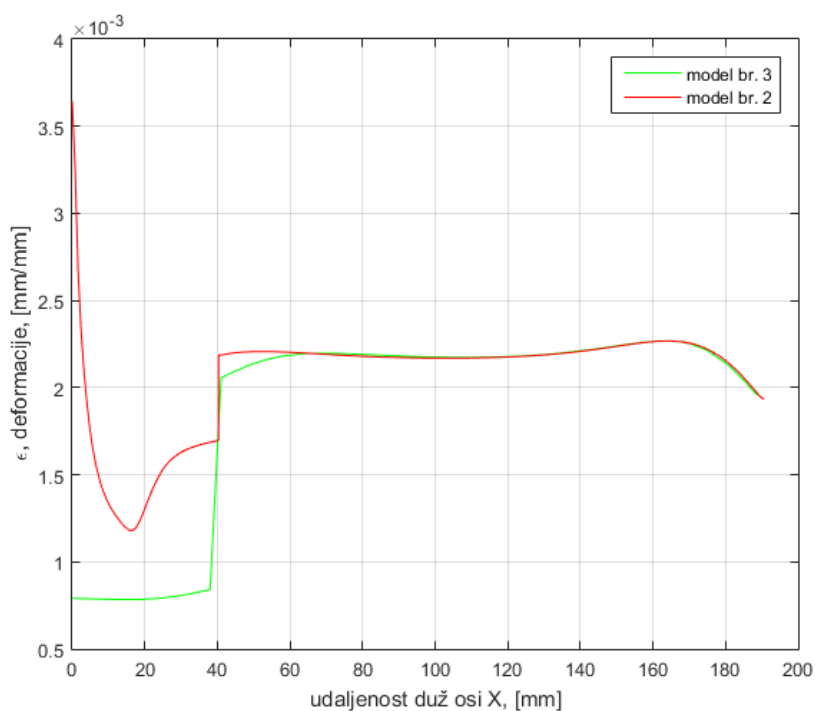
**Slika 47. Usporedba pomaka u smjeru opterećenja modela br. 2 i br. 3, [mm]**

Iz slike 47. možemo uočiti veliku ali konstantnu razliku u rezultatima pomaka u smjeru opterećenja za modele br. 2 i 3. Zato što elementi koji se međusobno spajaju kod modela br. 2 nisu u istoj ravnini kao što je to slučaj kod modela br. 3, dolazi do pojave momenta savijanja između elemenata na spoju koje dovodi do povećanja pomaka konstrukcije.



**Slika 48. Raspodjela pomaka u smjeru osi x modela br. 2, [mm] uz faktor povećanja 20**

Na slici 48. je prikazana raspodjela pomaka modela br. 2 u smjeru osi x uz faktor povećanja 20.



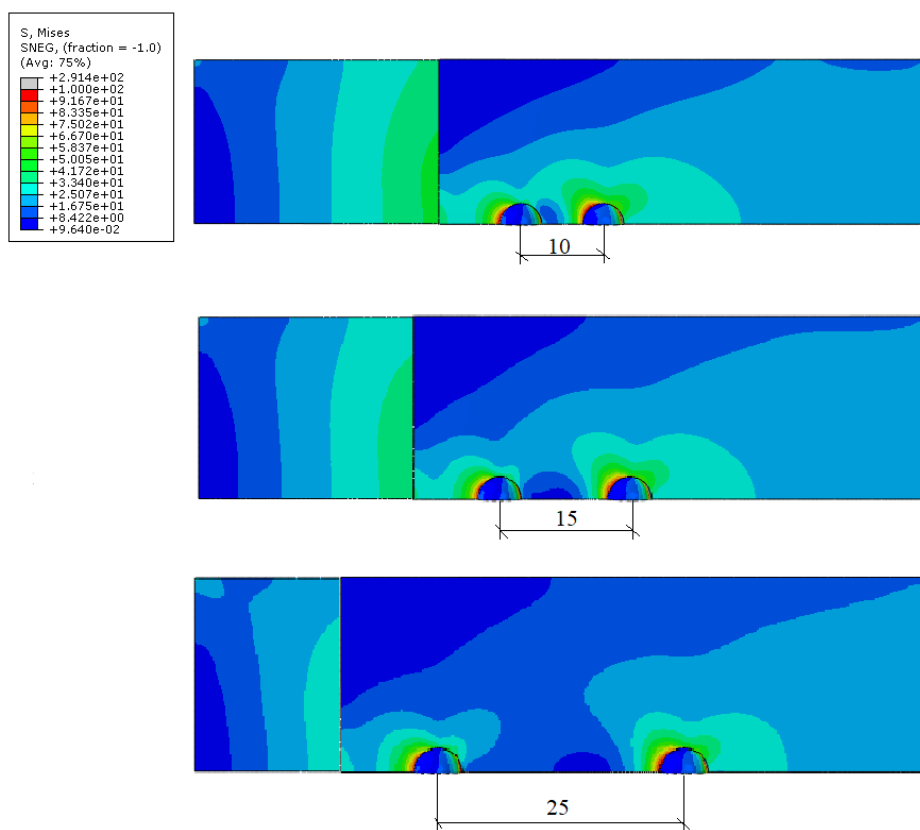
Slika 49. Usporedba deformacija u smjeru osi  $x$  modela br. 2 i br. 3, [-]

Na slici 49. su prikazane stvarne (logaritamske) deformacije u smjeru osi  $x$  modela br. 3 i br. 2. Deformacije u području oko zakovica kod modela br. 2 daleko su veće nego kod modela br. 3 kod kojeg je spoj između elemenata zanemaren.

## 5. Analiza utjecaja koraka i zračnosti zakovica na naprezanje i deformacije

### 5.1 Analiza utjecaja koraka zakovica na rezultate naprezanja i deformacija

U svrhu ove analize korišteni je model br. 4, razmatrana su tri koraka zakovica 10, 15, 25 mm.

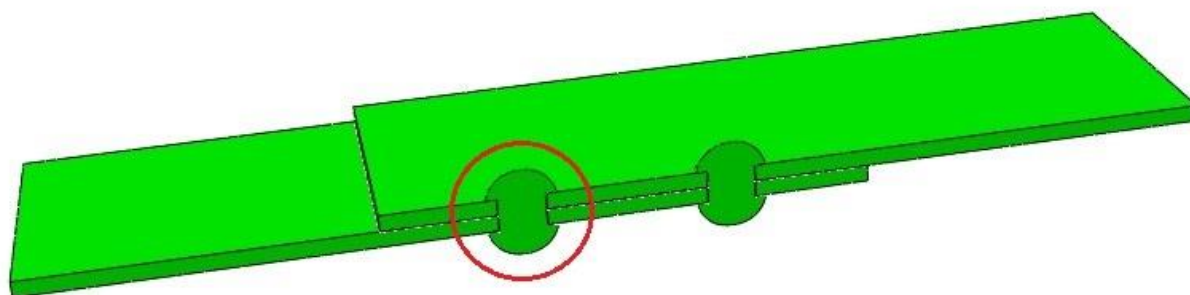


**Slika 50. Raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja [MPa] za različiti korak zakovica, prikazani korak zakovica u [mm]**

Promjer zakovica u ovome modelu je 3,5 mm, i prema pravilima koja su prethodno navedena korak zakovica u ovome slučaju ne bi smio biti manji od 12,25 mm. Iz rezultata na slici 50. kod modela kod kojeg je korak zakovica 10 mm, možemo uočiti izraženiju koncentraciju naprezanja u području oko zakovica. Ta koncentracija naprezanja uz prisustvo dinamičkog naprezanja predstavlja potencijalno mjesto inicijacije pukotine koja dovodi do smanjenja čvrstoće spoja i naposljetku popuštanja spoja, također preveliki korak zakovica nije poželjan

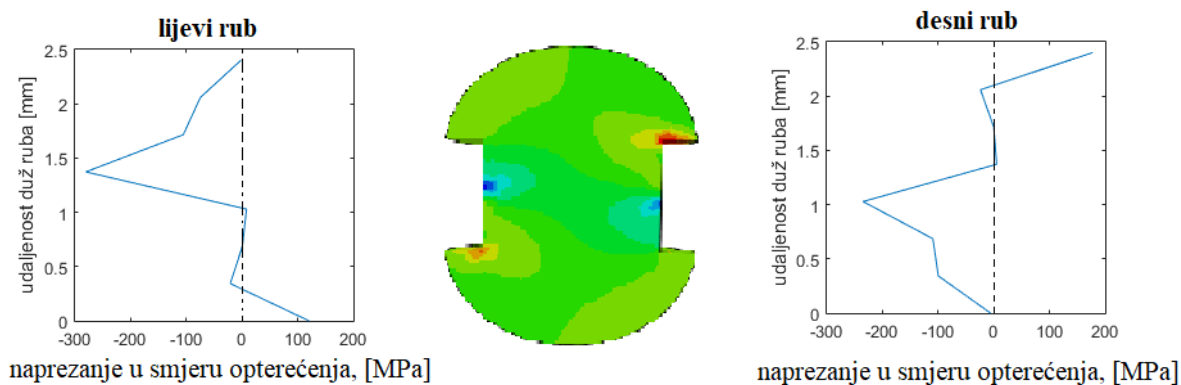


zbog moguće pojave izvijanja uzdužnice između zakovica. Za daljnju analizu će poslužiti samo dio modela br. 4 zaokružen crvenom bojom na slici 51.



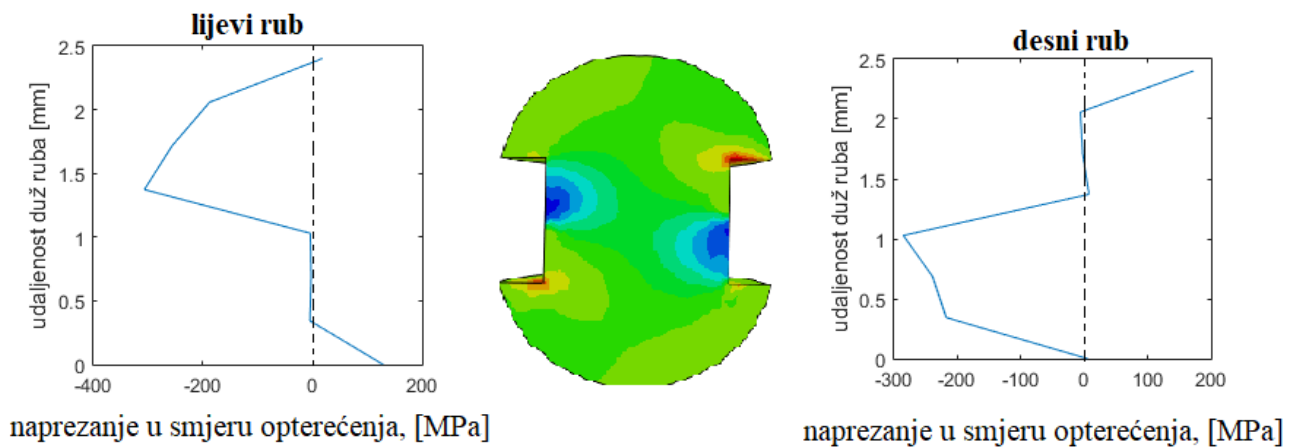
Slika 51. Zakovica korištena za prikaz rezultata

## 5.2 Utjecaj zračnosti između zakovice i provrta na naprezanje i deformacije



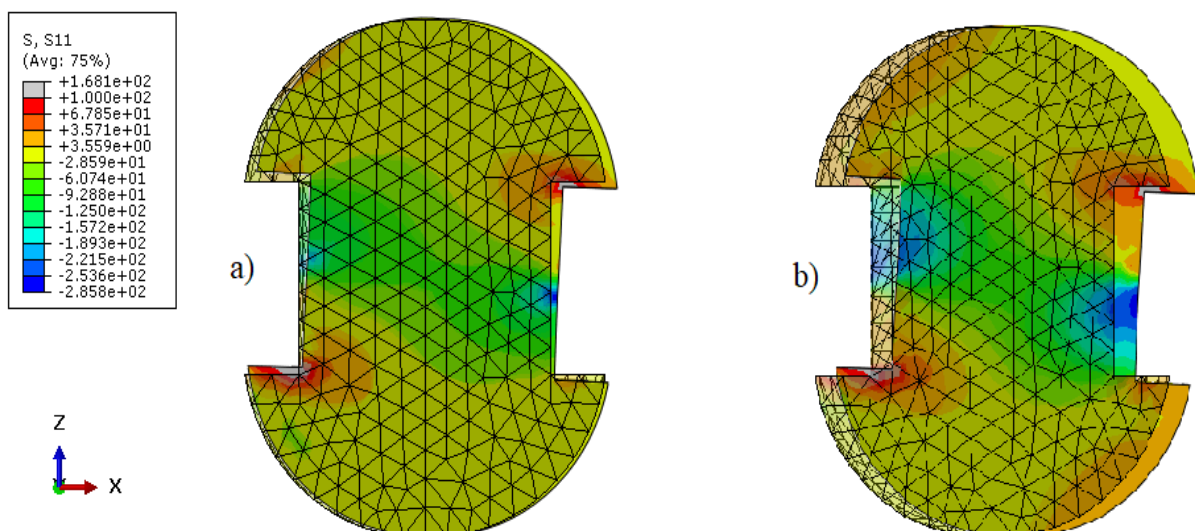
Slika 52. Raspodjela naprezanja u smjeru opterećenja po zakovici za model bez zračnosti, [MPa]

Na slici 52. su prikazane raspodjele naprezanja zakovice u smjeru osi  $x$ , za lijevi i desni rub zakovice. U ovome modelu ne postoji zračnost između zakovice i provrta.



Slika 53. Raspodjela naprezanja u smjeru opterećenja po zakovici za model sa zračnošću, [MPa]

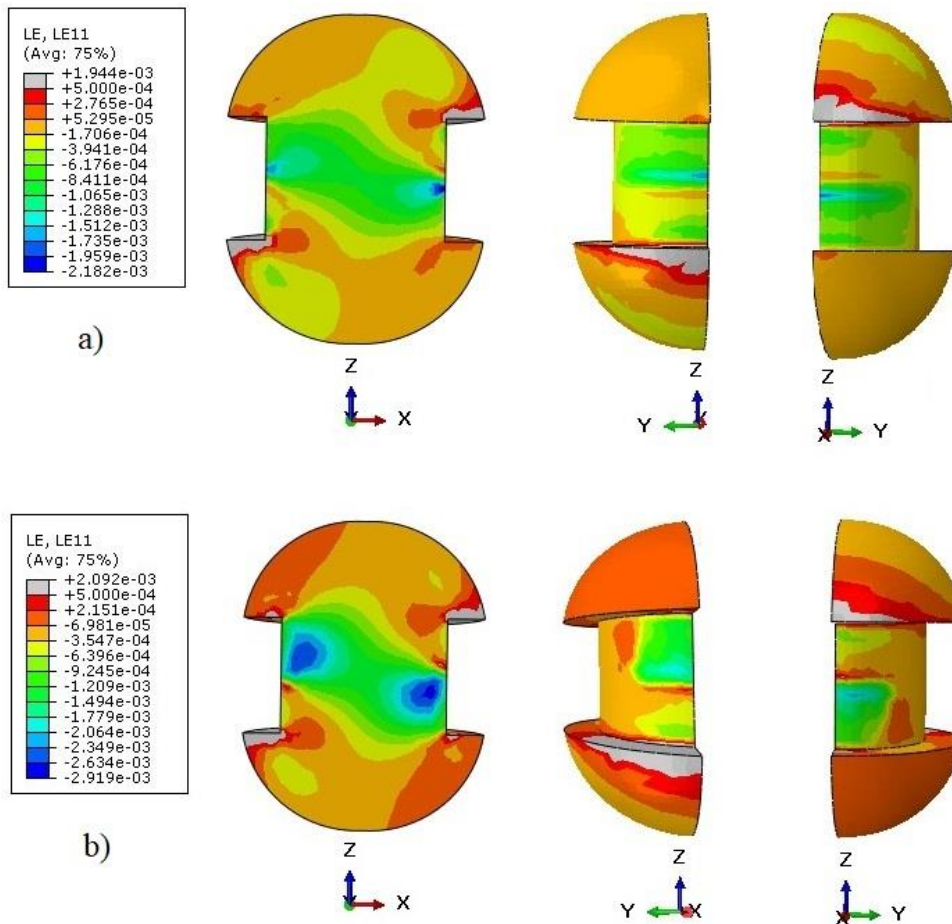
Na slici 53. je prikazana raspodjela naprezanja u smjeru opterećenja zakovice, za lijevi i desni rub. Iz usporedbe rezultata sa slike 52. i 53. može se zaključiti, da postojanje male zračnosti između zakovice i provrta ima značajan utjecaj na naprezanja.



Slika 54. Raspodjela naprezanja na zakovici u smjeru osi  $x$ , [MPa], uz faktor uvećanja 4, a) model bez zračnosti, b) model sa zračnošću od 0.06 mm

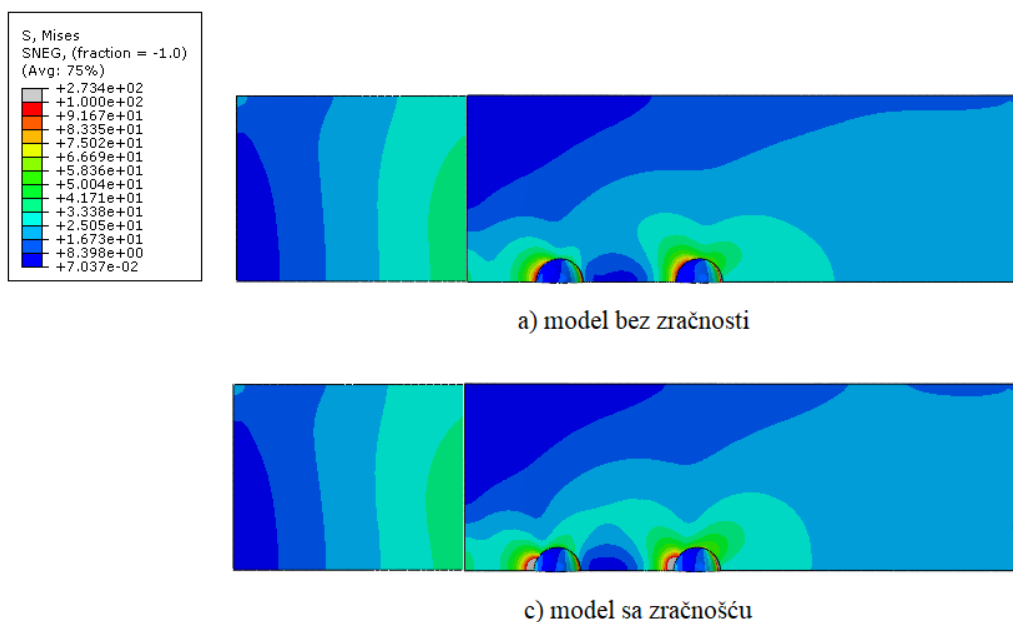
Na slici 54. je zajedno s razlikom u naprezanju zakovice u smjeru osi  $x$  vidljiv pomak zakovice uz faktor uvećanja 4. Osim što se zakovica uzdužno pomakne, ona se i zarotira, a to

je posljedica momenta savijanja koji nastaje zato što se ploče koje zakovice spajaju ne nalaze u istoj ravnini. To se uočava kod oba slučaja samo je kod modela sa zračnošću izraženije.



**Slika 55. Usporedba deformacija zakovice u smjeru osi  $x$ , [-], a) model bez zračnosti, b) model sa zračnošću**

Na slici 55. su prikazane deformacije zakovice u smjeru osi  $x$ , za slučaj kada ne postoji zračnost između zakovice i provrta, i kada te zračnosti ima. Iz prikazanog se vidi da su veće deformacije u slučaju kad postoji zračnost između zakovice i provrta. Kod postojanja zračnosti manji dio površine zakovice je u kontaktu s provrtom, pa zbog manje kontaktne površine na tim mjestima dolazi do povećanja naprezanja i deformacija.



**Slika 56. Usporedba ekvivalentnih von Mises naprezanja modela bez i sa zračnošću, [MPa]**

Usporedbom raspodjela ekvivalentnih von Mises naprezanja na slici 56. se može zaključiti da se već i prilikom pojave male zračnosti, naprezanja u području oko zakovice povećavaju, stoga je važno prilikom izrade zakovičnog spoja koristiti zakovice provjerene kvalitete, a i adekvatan alat. Zračnost također može nastati ako je duljina zakovice premala, jer u tom slučaju dolazi do formiranja glave zakovice prije nego što zakovica ispuni provrt.

## 6. Zaključak

U ovom radu je prikazana analiza različito modeliranih spojeva konstrukcije, prvenstveno su prikazani različiti načini modeliranja zakovičnih spojeva. Za modeliranje zakovica korištene su tri metode, uz metodu koja zanemaruje spojeve i smatra ih idealnima. Za pojedinu metodu izrađen je model prikladnih dimenzija na kojem su izrađeni modeli zakovica. U radu se htjelo prikazati kako je potrebno pojednostavniti model do razine prihvatljivosti, jer poželjno je da analize budu što je moguće kraće, odnosno važno je odvojiti važno od nevažnog. Stoga je ovim radom prikazano da ovisno o kojem stupnju složenosti se radi, odnosno koliku važnost ima promatrana komponenta, hoće li se izraditi kompletan model i koristiti jednostavniji model, ili će se komponenta podijeliti na segmente i koristiti detaljan model za daljnju analizu.

Usporedbom dobivenih rezultata može se uočiti razlika u odzivu modela za različite načine modeliranja spojeva elemenata konstrukcije. To je izraženo kod usporedbe modela br. 2 i modela br. 3, u kojoj je vidljiva koncentracija naprezanja u području oko provrta modela br. 2, koje za razliku kod modela br. 3 nema. Osim koncentracije naprezanja dolazi i do pojave većih deformacija.

Osim usporedbe različitih načina modeliranja zakovičnih spojeva, u radu je također analiziran utjecaj koraka zakovica i zračnosti između zakovica i provrta, na rezultate. Iz rezultata možemo zaključiti da je važno poštivati korak zakovica, kako bi se dobio spoj odgovarajuće nosivost i što je moguće manje koncentracije naprezanja. Veliki korak zakovica smanjuje nosivost spoja i prouzročuje izvijanje između zakovica. Kod premalog koraka zakovica dolazi do velikih koncentracija naprezanja, koje uz prisustvo dinamički promjenjivog opterećenja mogu biti katastrofalne za konstrukciju. Iz analize utjecaja zračnosti možemo zaključiti, da i mala zračnosti ima izražen utjecaj na rezultate.

U radu su korišteni različiti stupnjevi složenosti modeliranja zakovičnih spojeva, iz toga možemo zaključiti da prilikom analize većih modela, kao što je na primjer krilo zrakoplova, nema smisla u obzir uzimati zakovice, jer njihov utjecaj pokriva faktor sigurnosti od 1,5.

Iz povijest zrakoplovnih nesreća zaključeno je, da je potrebno strogo pratiti upute proizvođača kod popravaka dijelova strukture zrakoplova, i ovim radom je to potvrđeno iz analize parametra zakovičnih spojeva.

## LITERATURA

- [1] Sghayer A.; Grbović A.; Sedmak A.; Dinulović M.; Grozdanović I.; Sedmak S.; Petrovski B.: *Experimental and numerical analysis of fatigue crack growth in integral skin-stringer panels*, Beograd, Srbija, 2018.
- [2] Abaqus Documentation, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2014.
- [3] Wronicz, W.; Kaniowski, J.: *Methods for global and local fem analysis of riveted joint on the example of the PZL M28 Skytruck Aircraft*: Institute of Aviation, Warsaw, Poland, 2009.
- [4] Kecelioglu, G.; *Stress and fracture analysis of riveted joints*: The graduate school of natural and applied sciences of Middle east technical university, 2008.
- [5] <http://navyaviation.tpub.com>, 15.8.2018.
- [6] <http://content.aviation-safety-bureau.com/allmembers/faa-h-8083-31-amt-airframe-vol-1/sections/chapter4.php>, 15.8.2018.
- [7] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d0ab706c407443078a647eafc bce9b7e&ckck=1>, 17.9.2018.
- [8] Popović, S.: *Analiza udarnih ostecenja segmenta konstrukcije trupa velikog putnickog aviona*, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2008.
- [9] Rafael, H.: Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2008.
- [10] Bišćan, M.: Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2014.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc