

Usporedba analitičkog i numeričkog proračuna zakovičnih spojeva zrakoplovnih konstrukcija

Krizmanić, Gabrijel

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:235:018832>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Gabrijel Krizmanić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević, mag. aeroing.

Student:

Gabrijel Krizmanić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Darku Ivančeviću na pruženoj pomoći i savjetima i višem asistentu dr. sc. Dominiku Brezetiću na pomoći i konzultacijama te se zahvaljujem mojoj obitelji i djevojci bez čije podrške ne bih uspio.

Gabrijel Krizmanić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Gabrijel Krizmanić** JMBAG: **0035220155**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba analitičkog i numeričkog proračuna zakovičnih spojeva zrakoplovnih konstrukcija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of analytical and numerical stress analysis of riveted joints in aircraft structures**

Opis zadatka:

Zadatak završnog rada je usporedba rezultata numeričkog i analitičkog proračuna čvrstoće zakovičnog spoja tipične zrakoplovne konstrukcije opterećenog statičkom vlačnom silom.

U radu je potrebno:

- opisati pretpostavke i ograničenja korištena u analitičkom proračunu
- numeričke analize provesti korištenjem programa *Abaqus*[®]
- opisati i koristiti dva načina modeliranja zakovičnog spoja (kinematske veze i trodimenzionalnu diskretizaciju spoja)
- opisati korištene načine modeliranja zakovičnog spoja u numeričkom modelu
- validaciju numeričke metodologije provesti usporedbom s analitičkim rezultatima
- usporediti polja naprezanja i deformacija dobivenih različitim načinima modeliranja spoja
- kritički evaluirati dobivene rezultate za različite načine modeliranja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

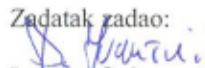
Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. ANALITIČKI PRORAČUN	4
2.1. Opis analitičkog modela	4
2.2. Provedba analitičkog proračuna	6
3. NUMERIČKO MODELIRANJE ZAKOVIČNOG SPOJA.....	10
3.1. Modeliranje zakovičnog spoja kinematskim vezama.....	10
3.1.1. Opis modela spoja kinematskim vezama	11
3.2. Detaljno modeliranje zakovičnog spoja	16
3.2.1. Opis detaljnog modela spoja	17
4. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA.....	24
5. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	38

POPIS SLIKA

Slika 1.	Tipični načini popuštanja zakovičnih spojeva [2].....	1
Slika 2.	Vrste zakovica [3]	2
Slika 3.	Model analitičkog proračuna [2], dimenzije su u [mm].....	4
Slika 4.	Karakteristične značajke spoja [1]	5
Slika 5.	Mjere duljine zakovice [1].....	6
Slika 6.	Zakovica modelirana kinematskim vezama [1].....	11
Slika 7.	Prikaz dimenzija ploče, [mm]	12
Slika 8.	Ploče u spoju modela s kinematskim vezama	13
Slika 9.	Prikaz ograničenja MPC na dvije ploče – detalj	14
Slika 10.	Usporedni prikaz mreža konačnih elemenata ploča	15
Slika 11.	Prikaz mreže konačnih elemenata u sklopu modela s kinematskim vezama	15
Slika 12.	Rubni uvjeti i opterećenja modela s kinematskim vezama	16
Slika 13.	Prikaz preklopnog spoja modela zakovičnog spoja	17
Slika 14.	Dimenzije detaljnog modela spoja, [mm]	18
Slika 15.	Dimenzije zakovice u detaljnom modelu spoja, [mm].....	19
Slika 16.	Spoj ploča i zakovica u detaljnom modelu.....	19
Slika 17.	Particije zakovica	20
Slika 18.	Mreža konačnih elemenata na pločama u 3D diskretizaciji	21
Slika 19.	Mreža konačnih elemenata po jednoj zakovici u 3D diskretizaciji.....	21
Slika 20.	Mreža konačnih elemenata u sklopu u 3D diskretizaciji.....	22
Slika 21.	Rubni uvjeti i opterećenje detaljnog modela	23
Slika 22.	Prikaz površine definirane kao kruto tijelo i referentne točke	23
Slika 23.	Ekvivalentna von Mises naprezanja modela s kinematskim vezama, [MPa].....	24
Slika 24.	Naprezanja u smjeru osi x modela s kinematskim vezama, [MPa].....	25
Slika 25.	Raspodjela pomaka u smjeru osi x modela s kinematskim vezama, [mm].....	25
Slika 26.	Raspodjela pomaka u smjeru osi x modela s kinematskim vezama, [mm] uz faktor povećanja 200.....	26
Slika 27.	Putanja po kojoj se promatra promjena ekvivalentnih von Mises naprezanja	27
Slika 28.	Grafički prikaz promjene von Mises naprezanja po putanji usmjeru osi x	27
Slika 29.	Ekvivalentna von Mises naprezanja detaljnog trodimenzionalnog spoja, [MPa]... ..	28

Slika 30.	Presjeci po poprečnoj osi za prikaz von Mises ekvivalentnih naprezanja s detaljem spoja zakovice i ploča, [MPa], a) stražnje zakovice, b) srednja zakovica, c) prednje zakovice.....	29
Slika 31.	Presjeci po uzdužnoj osi za prikaz von Mises ekvivalentnih naprezanja, [MPa], a) stražnje zakovice, b) srednja zakovica, c) prednje zakovice.....	29
Slika 32.	Presjeci po poprečnoj osi za prikaz naprezanja u smjeru osi x , [MPa], a) stražnje zakovice, b) srednja zakovica, c) prednje zakovice	30
Slika 33.	Deformacije u smjeru osi x spoja u trodimenzionalnoj diskretizaciji, [MPa].....	30
Slika 34.	Ukupni pomaci spoja u modelu s trodimenzionalnom diskretizacijom, [mm]	31
Slika 35.	Ukupni pomaci spoja u modelu s trodimenzionalnom diskretizacijom, [mm], uz faktor povećanja 200	31
Slika 36.	Prikaz putanje očitavanja von Mises ekvivalentnih naprezanja po zakovici, von Mises naprezanja, [MPa].....	32
Slika 37.	Grafički prikaz raspodjele von Mises ekvivalentnih naprezanja po dužini poprečnog presjeka.....	32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva aluminijske legure 2024-T42 [2]	6
Tablica 2. Mehanička svojstva Al2024 za numeričke modele [6]	11
Tablica 3. Podatci o numeričkom modelu diskretiziranog ljuskastim konačnim elementima	14
Tablica 4. Podatci o numeričkom modelu diskretiziranog trodimenzionalnim konačnim elementima	20
Tablica 5. Faktori sigurnosti naprezanja za metodu kinematskim vezama	33
Tablica 6. Faktori sigurnosti naprezanja za metodu trodimenzionalne diskretizacije	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
P_t	N	Statička vlačna sila
D	mm	Promjer zakovice
F_{tu}	MPa	Vlačna čvrstoća
F_{ty}	MPa	Vlačna granica tečenja
F_{su}	MPa	Krajnje smično naprezanje
F_{hru}	MPa	Krajnji bočni tlak
F_{hry}	MPa	Granica tečenja za bočni tlak
$F_{tu,y}$	MPa	Vlačna granica tečenja pomnožena s faktorom sigurnosti
$F_{su,y}$	MPa	Korigirano krajnje smično naprezanje
$F_{hru,y}$	MPa	Granica tečenja za bočni tlak pomnožena s faktorom sigurnosti
P	N	Sila po zakovici
P_{all}	N	Najveća dozvoljena sila koja izaziva smično naprezanje
MS	-	Granica sigurnosti
t_1	mm	Debljina tanje ploče
t_2	mm	Debljina deblje ploče
f_t	MPa	Vlačno naprezanje za bruto površinu ploče
A_r	mm ²	Oduzeta površina poprečnog presjeka ploče
A_g	mm ²	Ukupna površina poprečnog presjeka ploče
η	-	Učinkovitost rasporeda zakovica u redu
R_t	-	Omjer opterećenja po površini
E	GPa	Modul elastičnosti
ν	-	Poissonov faktor
τ	MPa	Smično naprezanje po zakovici
A	mm ²	Površina poprečnog presjeka tijela zakovice

SAŽETAK

Predmet ovog rada je usporedba analitičkog i numeričkog proračuna čvrstoće zakovičnog spoja korištenog u zrakoplovnim konstrukcijama. U radu je prikazana analitička metoda korištena za proračun zakovične konstrukcije odabrane u ovom radu. Kroz rad je dan pregled korištenih načina modeliranja konstrukcije i provedba numeričke analize u programu *Abaqus/Standard*. Načini modeliranja zakovične konstrukcije u programu *Abaqus/Standard* su trodimenzionalna diskretizacija spoja i modeliranje spoja kinematskim vezama. Dana je analiza analitičkih i numeričkih rješenja odabranog zakovičnog spoja. Za spoj su korištene standardne aluminijske legure korištene u zrakoplovstvu. U zadnjem poglavlju je iznesen zaključak.

Ključne riječi: numeričko modeliranje, analitički proračun, zakovični spoj, numerički proračun, zrakoplovne konstrukcije

SUMMARY

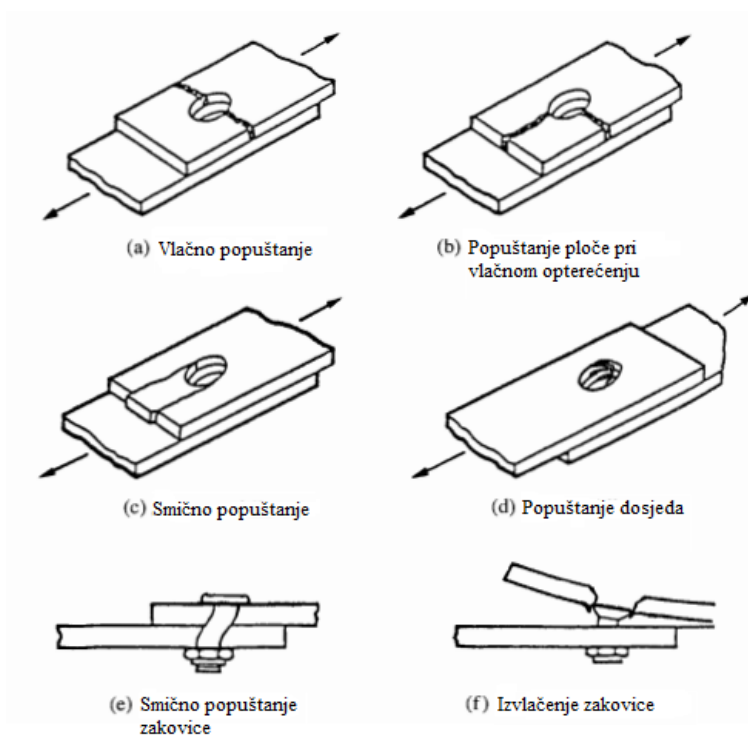
The subject of this Bachelor thesis is the comparison of analytical and numerical analyses of the strength of a riveted joint used in aircraft structures. The thesis presents the analytical method used to analyze the riveted structure selected for this work. Throughout the work, an overview of the modeling approaches used for the structure and the implementation of numerical analysis in the Abaqus/Standard software is provided. The described methods for modeling the riveted structure in Abaqus/Standard include three-dimensional discretization of the joint and modeling of the joint using kinematic constraints. An analysis of both the analytical and numerical solutions for the selected riveted joint is presented. Standard aluminum alloys commonly used in aeronautical engineering were used for the joint. The conclusion is presented in the final chapter.

Key words: numerical modeling, analytical analysis, riveted joint, numerical analysis, aircraft structures

1. UVOD

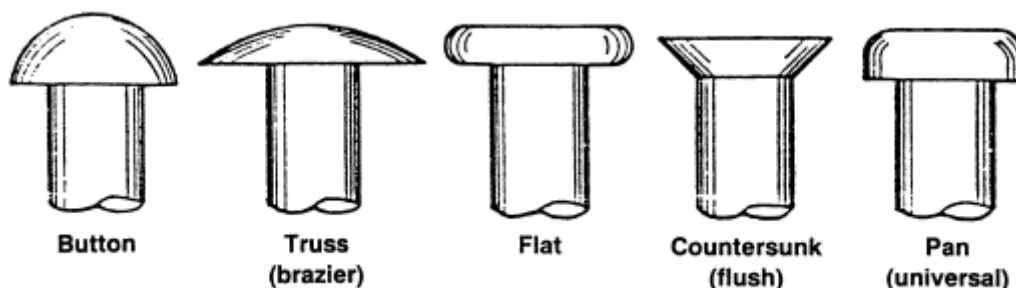
Zastupljenost zakovičnih spojeva u zrakoplovnoj industriji je i danas jako velika, odnosno najzastupljeniji oblik spajanja dijelova konstrukcija u zrakoplovnoj industriji jesu zakovični spojevi uz vijčane [1]. Gotovo sve komponente zrakoplova moraju biti ugrađene tako da im se omogući pristup iz više bitnih razloga, kao što su održavanje, odnosno servisiranje, dijagnostika, popravci i zamjene, gdje zakovični i vijčani spojevi dolaze najviše u obzir. Današnjim standardima sigurnosti u zračnom prometu sve se detaljnije razmatraju izvori rizika koji mogu uzrokovati havarije u letu zrakoplova te su jedan od tih poznatih rizika spojevi elemenata koji su najzaslužniji za najveće koncentracije naprezanja u konstrukciji. Spojevi su i najčešći izvori nesavršenosti koji mogu dovesti do katastrofalnog popuštanja te se iz tog razloga posebna pažnja posvećuje odabiru načina spajanja konstrukcija. Iz navedenih razloga se danas u zrakoplovnoj industriji sve češće prelazi na korištenje kompozitnih materijala koji zahtijevaju manji broj spojeva.

Spojevi su najčešći uzroci pukotina u zrakoplovnim konstrukcijama i te se pukotine mogu dogoditi iz mnogo različitih razloga koje je teško procijeniti. Ti razlozi ne utječu samo na pitanje statičke čvrstoće spoja nego i na zamor dijelova spoja i njihov vijek trajanja. Zakovični spojevi najčešće popuštaju u jednom od oblika prikazanih na slici 1.



Slika 1. Tipični načini popuštanja zakovičnih spojeva [2]

Na slici 1. su prikazani tipični mehanizmi pukotina zakovičnih spojeva. Prikazana su nastajanja pukotina na pločama radi prevelike vlačne sile, prevelikog tangencijalnog naprežanja i prevelikog opterećenja na bočni tlak. Način popuštanja zakovica u zakovičnim spojevima ovisi dosta o obliku glave zakovice.



Slika 2. Vrste zakovica [3]

Na slici 2. su prikazane tipične vrste zakovica korištene u industriji. U zrakoplovstvu su najkorištenije zakovice s poluokruglom glavom (eng. *Button*), zakovice sa zaobljenom glavom (eng. *Truss*) i zakovice s upuštenom glavom (eng. *Countersunk*).

U današnje vrijeme je u projektiranju značajan utjecaj numeričkih metoda u obliku programskih alata. Velika prednost korištenja takvih programa je smanjivanje broja korištenja fizičkih eksperimentalnih metoda. Da bi se dobili rezultati potrebni za opis većeg broja mehaničkih svojstava raznih spojeva potrebno je puno eksperimentalnih modela, a to je danas neisplativo novčano, a pogotovo vremenski. Kod analitičkih metoda proračuna veliki je problem povećanje kompleksnosti konstrukcija. Analitičke metode se smatraju točnijima, ali samo ako su ispunjene pretpostavke korištene u njihovom formuliranju. Zbog toga kod nekih kompleksnijih geometrija ne postoji analitičko rješenje i mora se koristiti numerički pristup. Kod zakovičnih spojeva je korištenje ustanovljenih analitičkih metoda dovoljno pouzdano, ali za osnovni proračun čvrstoće i zadovoljavanje uvjeta sigurnosti. U slučaju da je potrebno odrediti polja naprežanja, koncentracije naprežanja i polja deformacije nužno je koristiti numeričke modele. Samom analitikom ne bi bilo izvedivo analizirati utjecaje udarnih opterećenja, cikličkih opterećenja, utjecaja zračnosti kod olabavljenih spojeva, propagacije pukotina, i slično.

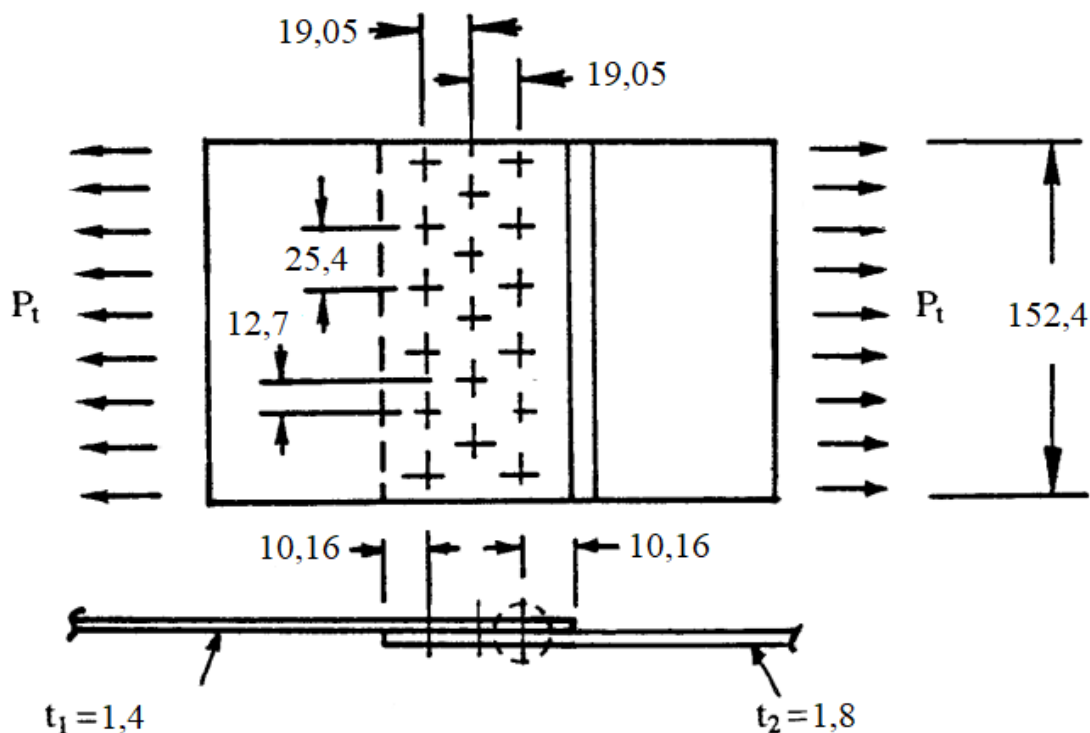
U okviru ovog rada je prikazana analitička metoda određivanja pouzdanosti, sigurnosti i učinkovitosti zakovičnog spoja prema literaturi, dok su u numeričkom dijelu prikazane dvije metode koje se koriste za modeliranje zakovičnih spojeva. Te dvije metode su detaljno objašnjene kao i modeli u tim metodama te je dan osvrt na njihovu validaciju pomoću analitičke

metode koja je prije razrađena. Materijal korišten oba modela je aluminijska legura tipa 2024 i za tu leguru su korištena potrebna svojstva. Prvi numerički model, s kinematskim vezama, opisuje ploče modelirane površinama kako bi se koristili ljuskasti konačni elementi, a zakovice koje ih spajaju preko kinematskih veza. Drugi numerički model trodimenzionalne diskretizacije opisuje ploče i zakovice kao trodimenzionalna tijela. Modeli su u potpunosti izrađeni u preprocesoru *Abaqus/CAE* tj. geometrija nije uvedena iz nekog drugog programskog paketa i analize su izvedene u *solveru Abaqus/Standard*, a analitički proračun je izveden direktno u radu.

2. ANALITIČKI PRORAČUN

2.1. Opis analitičkog modela

U ovome zadatku model spoja zakovica sastoji se od dvije ploče različitih debljina, prve 0,055 inča odnosno 1,4 mm i druge 0,071 inča tj. 1,8 mm, obje od aluminijske legure 2024-T42. Spojene su pomoću 17 zakovica promjera 3/16 inča odnosno 4,76 mm prema slici 3. Materijal zakovica je aluminijska legura tipa 2024-T31. Mehanička svojstva ploča i zakovica korištena pri daljnjem proračunu uzeta su iz [2]. U primjeru prema kojem se provodi analitički proračun korišten je imperijalni sustav mjera i oznaka, no za svrhe ovog rada mjere su pretvorene u SI sustav jedinica. Spoj je opterećen statičkom vlačnom silom P_t iznosa 3400 N raspoređenom ravnomjerno po širini ploča.



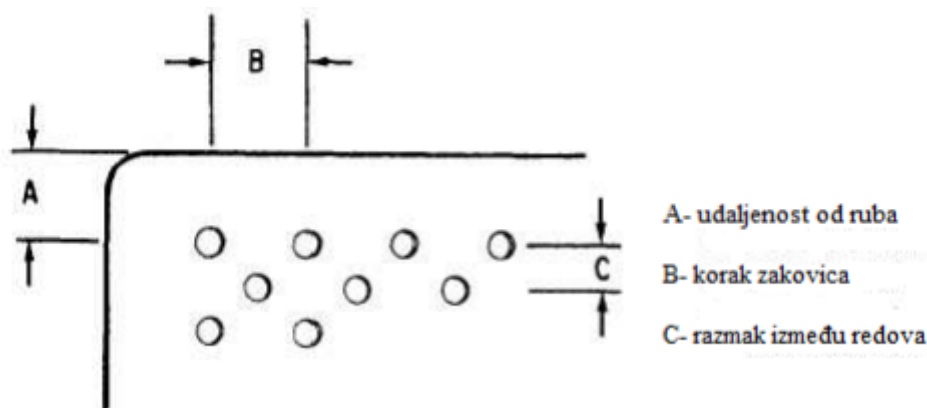
Slika 3. Model analitičkog proračuna [2], dimenzije su u [mm]

Tehnički zahtjevi koji bi se trebali uvijek provjeriti kod ovakvog načina spajanja dviju ploča zakovicama su korak zakovica, udaljenost od ruba, razmak između redova zakovica, odnos čvrstoće zakovica i ploča i potrebna duljina zakovice [1].

Korak zakovica je mjera udaljenosti između dvije zakovice u istom redu i ovdje iznosi 25,4 mm, dok minimalni korak između ispuščenih zakovica ne bi smio biti manji od 3,5 promjera zakovice, što je ovdje više nego zadovoljeno [1].

Udaljenost od ruba se mjeri od središta prve zakovice pa do samog ruba ploče, uz to da ta udaljenost ne bi smjela biti manja od dva niti veća od četiri promjera zakovice. Kad bi se zakovica ugradila preblizu ruba ploče došlo bi do lakšeg nastajanja pukotina i propagacija iste. I ovaj tehnički zahtjev je zadovoljen kod ovog spoja [1].

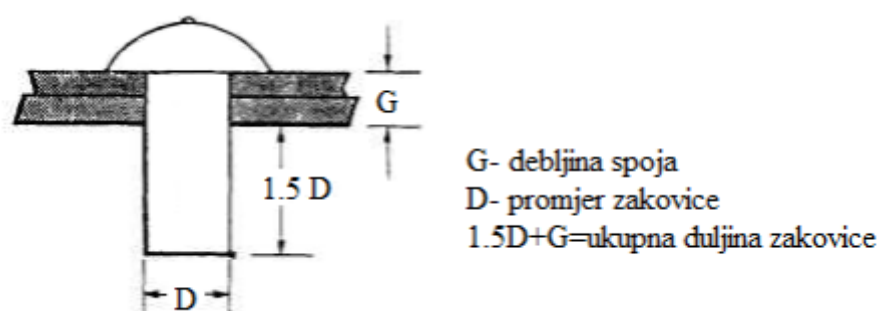
Razmak između redova zakovica je uobičajeno 0,75 koraka zakovice, što je u ovom slučaju upravo toliko. Najmanji dozvoljeni razmak između redova je 2,5 promjera zakovice jer se inače riskira oslabljenje spoja na tim dijelovima, mogući nastanak pukotina i olakšanu propagaciju pukotina. Navedene karakteristične značajke zakovičnog spoja prikazane su na slici 4 [1].



Slika 4. Karakteristične značajke spoja [1]

Izbor standardiziranih zakovica od raznih materijala i raznih dimenzija je danas brojan, stoga je važno odabrati zakovice za spoj i prema tim kriterijima. Prema tome, bitno je odabrati zakovice od materijala veće ili u krajnjem slučaju jednake čvrstoće od ploča korištenih za spoj [1].

Duljina tijela zakovice u spoju jednaka je zbroju debljina ploča koje se spajaju, ali bitno je napomenuti i dodatak potreban za formiranje zakovice pri zakivanju koji generalno iznosi 1,5 promjera zakovice. Mjere koje treba uzeti u obzir pri određivanju duljine standardizirane zakovice prikazane su na slici 5 [1].



Slika 5. Mjere duljine zakovice [1]

2.2. Provedba analitičkog proračuna

Analitički proračun je osnovan na metodi prikazanoj u [2]. Metoda je iskustvenog tipa i bazira se na određivanju granica sigurnosti obje ploče i zakovice. Sve vrijednosti mehaničkih svojstava materijala korištenih u daljnjem proračunu su uzete iz tablica iz [2].

Mehanička svojstva korištena za aluminijsku leguru 2024-T42 za dvije ploče uzeta su iz [2] i dana u tablici 1.

Tablica 1. Mehanička svojstva aluminijske legure 2024-T42 [2]

Svojstvo [mjerna jedinica]	Iznos
F_{tu} – vlačna čvrstoća [MPa]	406,79
F_{ty} – vlačna granica tečenja [MPa]	241,32
F_{su} – krajnje smično naprezanje [MPa]	241,32
F_{hru} – krajnji bočni tlak [MPa]	772,21
F_{hry} – granica tečenja za bočni tlak [MPa]	386,11

U prvom koraku se provjerava omjer vlačne čvrstoće i vlačne granice tečenja i uspoređuje sa standardnim faktorom sigurnosti korištenim u zrakoplovstvu od 1,5.

$$\frac{F_{tu}}{F_{ty}} = \frac{406,79}{241,32} = 1,69 > 1,5 \quad (2.1)$$

Iz tog razloga se koristi vlačna granica tečenja pomnožena s faktorom sigurnosti. Odnosno

$$F_{tu,y} = 1,5 \cdot 241,32 = 361,98 \text{ MPa}, \quad (2.2)$$

te iz toga proizlazi da je korigirano krajnje smično naprezanje definirano kao

$$F_{su,y} = F_{su} \left(\frac{F_{tu,y}}{F_{tu}} \right) = 241,32 \cdot \left(\frac{361,98}{406,79} \right) = 214,74 \text{ MPa}, \quad (2.3)$$

gdje je F_{su} krajnje smično naprezanje, $F_{tu,y}$ vlačna granica tečenja pomnožena s faktorom sigurnosti, a F_{tu} vlačna čvrstoća.

Nadalje se provjerava omjer krajnjeg bočnog tlaka F_{hru} i granice tečenja za bočni tlak F_{hry} .

$$\frac{F_{hru}}{F_{hry}} = \frac{772,21}{386,11} = 2 > 1,5 \quad (2.4)$$

To je opet veće od faktora sigurnosti stoga se koristi umnožak faktora sigurnosti i granice tečenja za bočni tlak F_{hry} .

$$F_{hru,y} = 1,5 \cdot 386,11 = 579,17 \text{ MPa} \quad (2.5)$$

Kod zakovica se koristi opterećenje po jednoj zakovici u odnosu na cijeli sklop. Opterećenje na zakovice je rezultanta opterećenja na ploče, odnosno

$$P = \frac{3400}{17} = 200 \text{ N/zakovici.} \quad (2.6)$$

Prema vrsti zakovice korištene u modelu promjera $D = 3/16$ inča odnosno 4,76 mm i materijala aluminijske legure tipa 2024-T31, vrijednosti krajnjeg smičnog naprezanja $F_{su}=282,69$ MPa te najvećeg dozvoljenog smičnog opterećenja od 5227 N i faktora korekcije 0,98 [2].

Dakle najveća dozvoljena sila koja izaziva smično naprezanje iznosi

$$P_{all} = 5227 \cdot 0,98 = 5122,5 \text{ N/zakovici.} \quad (2.7)$$

Sljedeće se računa granica sigurnosti MS (eng. *Margin of safety*) za opterećenje za zakovice.

$$MS = \frac{P_{all}}{P} - 1 = 24,6 \quad (2.8)$$

To je poprilično veliko zbog dovoljno malog opterećenja. Inače se u praksi teži prema što manjem MS -u s ciljem minimizacije mase konstrukcije, ali mora biti pozitivan u svakom slučaju.

Nadalje, računa se MS u ploči debljine $t_1 = 0,055$ inča odnosno 1,4 mm. Dozvoljeno opterećenje na bočni tlak je

$$F_{hru,y} \cdot D \cdot t_1 = 579,17 \cdot 4,76 \cdot 1,4 = 3859,59 \text{ N.} \quad (2.9)$$

Granica sigurnosti za opterećenje pri bočnom tlaku je

$$MS = \frac{3859,59}{200} = 19,3. \quad (2.9)$$

Opet je velikog iznosa radi malog opterećenja narinutog na ovaj spoj.

Najveće dozvoljeno opterećenje za bočni tlak u ploči debljine $t_2 = 1,8$ mm za zakovicu promjera $D = 4,76$ mm je 4190 N, a dozvoljeno naprezanje za granicu tečenja pri bočnom tlaku je 2976 N [2].

Stoga je omjer tih dviju veličina

$$\frac{4190}{2976} = 1,41 < 1,5, \quad (2.10)$$

gdje se može zaključiti da se ne radi o kritičnom području.

Zato se pri određivanju granica sigurnosti (MS -a) može koristiti najveće dozvoljeno opterećenje za bočni tlak.

$$MS = \frac{4190}{200} - 1 = 20 \quad (2.11)$$

I ova granica sigurnosti je velika što znači da pri ovakvom opterećenju nije potrebno razmatrati opterećenje na bočni tlak niti na jednu od dvije korištene ploče.

Sljedeće na redu za računanje je granica sigurnosti neto površine presjeka ploča. Inače u praksi, pa tako i u ovom primjeru, se razmatra samo tanja ploča, pošto ploča veće debljine sigurno neće biti u kritičnom rasponu ako nije tanja ploča.

Prvo je potrebno pronaći vlačno naprezanje za bruto površinu. Neto površina predstavlja površinu poprečnog presjeka ploče umanjenu za sumu površina poprečnih presjeka tijela svih zakovica. Bruto površina se odnosi na ukupnu površinu poprečnog presjeka ploče. Dakle vlačno naprezanje za bruto površinu iznosi

$$f_t = \frac{3400}{152,4 \cdot 1,4} = 15,94 \text{ MPa}. \quad (2.12)$$

Nadalje, potrebno je odrediti koliko se smanji površina poprečnog presjeka ploče u jednom redu zakovica radi provrta izrađenih za zakovice.

Stoga se računa ukupna oduzeta površina poprečnog presjeka ploče u ravnini reda zakovica radi provrta.

$$A_r = 6 \cdot 4,76 \cdot 1,4 = 40 \text{ mm}^2 \quad (2.13)$$

Ukupna površina poprečnog presjeka ploče A_g je jednaka

$$A_g = 152,4 \cdot 1,4 = 213,36 \text{ mm}^2. \quad (2.14)$$

Dakle, omjer bruto i neto površina poprečnog presjeka ploče je $\frac{A_r}{A_g} = 0,187$. Iz tog podatka se može odrediti učinkovitost rasporeda zakovica u ovom spoju.

$$\eta = 1 - 0,187 = 0,813 \quad (2.15)$$

Taj podatak govori o kvaliteti odabranog broja zakovica u jednom redu, u ovom slučaju u redu s najvećim brojem zakovica. Cilj je površinu poprečnog presjeka ploče očuvati što većom, odnosno što bližom bruto vrijednosti površine, dok je uz to potrebno zadovoljiti uvjete čvrstoće spoja određenim brojem zakovica. Upravo ovaj podatak o učinkovitosti rasporeda zakovica se može povezati s ranije spomenutim tehničkim zahtjevima koraka zakovica i udaljenosti od ruba jer i ti uvjeti imaju ograničenja koja direktno utječu na učinkovitost. Uvijek je bolje zadovoljiti sve potrebne uvjete sa što manjim brojem zakovica kako bi ova učinkovitost bila što veća.

Kako bi se u konačnici izračunala granica sigurnosti neto površine poprečnog presjeka ploče debljine $t_l=1,4$ mm, potrebno je izračunati omjer vlačnog naprezanja za bruto površinu poprečnog presjeka i ranije spomenutog $F_{tu,y}$ pomnoženog s učinkovitosti površine poprečnog presjeka.

$$R_t = \frac{f_t}{\eta F_{tu,y}} = \frac{15,94}{0,813 \cdot 361,98} = 0,0542 \quad (2.16)$$

Dobivenim omjerom se izračunava granica sigurnosti za neto površinu poprečnog presjeka tanje ploče.

$$MS = \frac{1}{R_t} - 1 = 17,45 \quad (2.17)$$

Prikazane granice sigurnosti se analogno ovom postupku mogu provoditi i za deblju ploču, ali se to u praksi ne radi jer nema potrebe pošto će samo biti veći od granica sigurnosti za tanju ploču radi veće debljine.

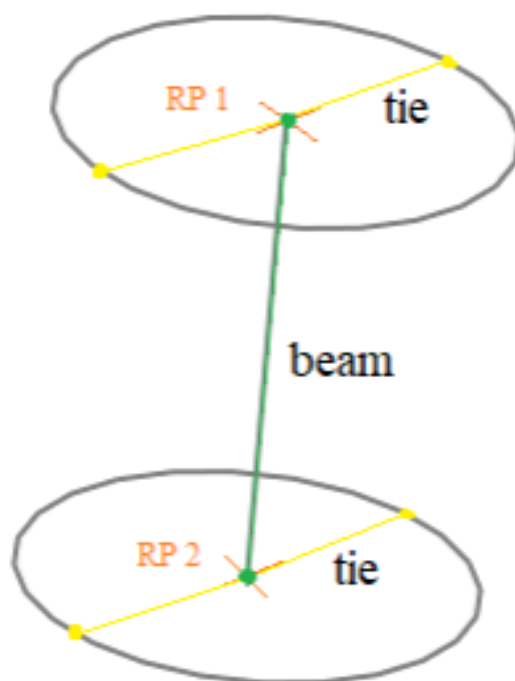
3. NUMERIČKO MODELIRANJE ZAKOVIČNOG SPOJA

3.1. Modeliranje zakovičnog spoja kinematskim vezama

Postoji više načina modeliranja zakovičnih spojeva kinematskim vezama, među kojima se ističu modeliranje spojeva nezavisno o mreži konačnih elemenata i modeliranje spojeva kinematskim vezama na prethodno izrađenim provrtima [1]. U ovom radu odabran je postupak modeliranja spojeva kinematskim vezama na prethodno izrađenim provrtima, pošto je prije navedeni način pogodniji za modeliranje spojeva točkastih zavara i sličnih spojeva gdje se ne izrađuju provrti u geometriji ploča kao kod zakovičnih spojeva. Postupak modeliranja na prethodno izrađenim provrtima je opisan u radu [4]. Programski paket *Abaqus/Standard* pruža mogućnost modeliranja kinematskih veza pomoću opcije MPC (eng. *Multi point constraint*). To su kinematske veze kojima se povezuju razni čvorovi i stupnjevi slobode gibanja, odnosno onemogućuju stupnjevi slobode gibanja u zavisno povezanim čvorovima. Nakon što je jedno ograničenje definirano, na istom mjestu više nije moguće definirati druga ograničenja. *Abaqus/Standard* pruža više oblika *Multi-point constraint*-a (*Beam, Cylsym, Link, Pin, Revolute, Tie i Universal*) gdje svaki ima različitu namjenu. U ovom radu su korišteni MPC vrste *Tie* i *Beam*. Nije preporučeno u modelu definirati preveliki broj ovakvih ograničenja, ako nije potrebno, pošto to može uzrokovati razne probleme u analizi [5].

Kao što je već navedeno, u okviru ovog rada korištena su ograničenja vrste MPC *Beam* i MPC *Tie*. Najprije se ploče modeliraju kao površine kako bi se koristili ljuskasti konačni elementi. Zatim se u modelu za svaki provrt ranije izvedenih ploča definiraju u modulu *Interactions* referentne točke u središtima provrta. Koristi se ograničenje vrste MPC *Tie* kako bi se povezale točke po obodu provrta s referentnom točkom u središtu, dok se za povezivanje samih referentnih točaka provrta koji se spajaju koristi ograničenje vrste MPC *Beam*. Kinematska veza MPC *Beam* služi kako bi ostvarila kruta veza između provrta koji se spajaju tj. između pomaka i rotacija referentnih točaka i na taj način repliciralo idealizirano tijelo zakovice. S druge strane, ograničenje MPC *Tie* tvori plohu povezivanjem referentne točke s obodom provrta ploča u jednu cjelinu. Na taj način se središnja referentna točka giba skupa s obodom provrta i tako replicira pritisak završetka glave zakovice koja spaja elemente. Na slici 6. prikazana je zakovica opisana pomoću ograničenja vrste MPC *Beam* i MPC *Tie*. Ograničenjem MPC *Beam* se međusobno

povezuju referentne točke, dok se ograničenjem MPC *Tie* povezuju točke po obodu provrta s referentnim točkama u središtu.



Slika 6. Zakovica modelirana kinematskim vezama [1]

3.1.1. Opis modela spoja kinematskim vezama

U ovom potpoglavlju će u potpunosti biti opisan model spoja kinematskim vezama, počevši od materijala, geometrije, konačnih elemenata, rubnih uvjeta i opterećenja.

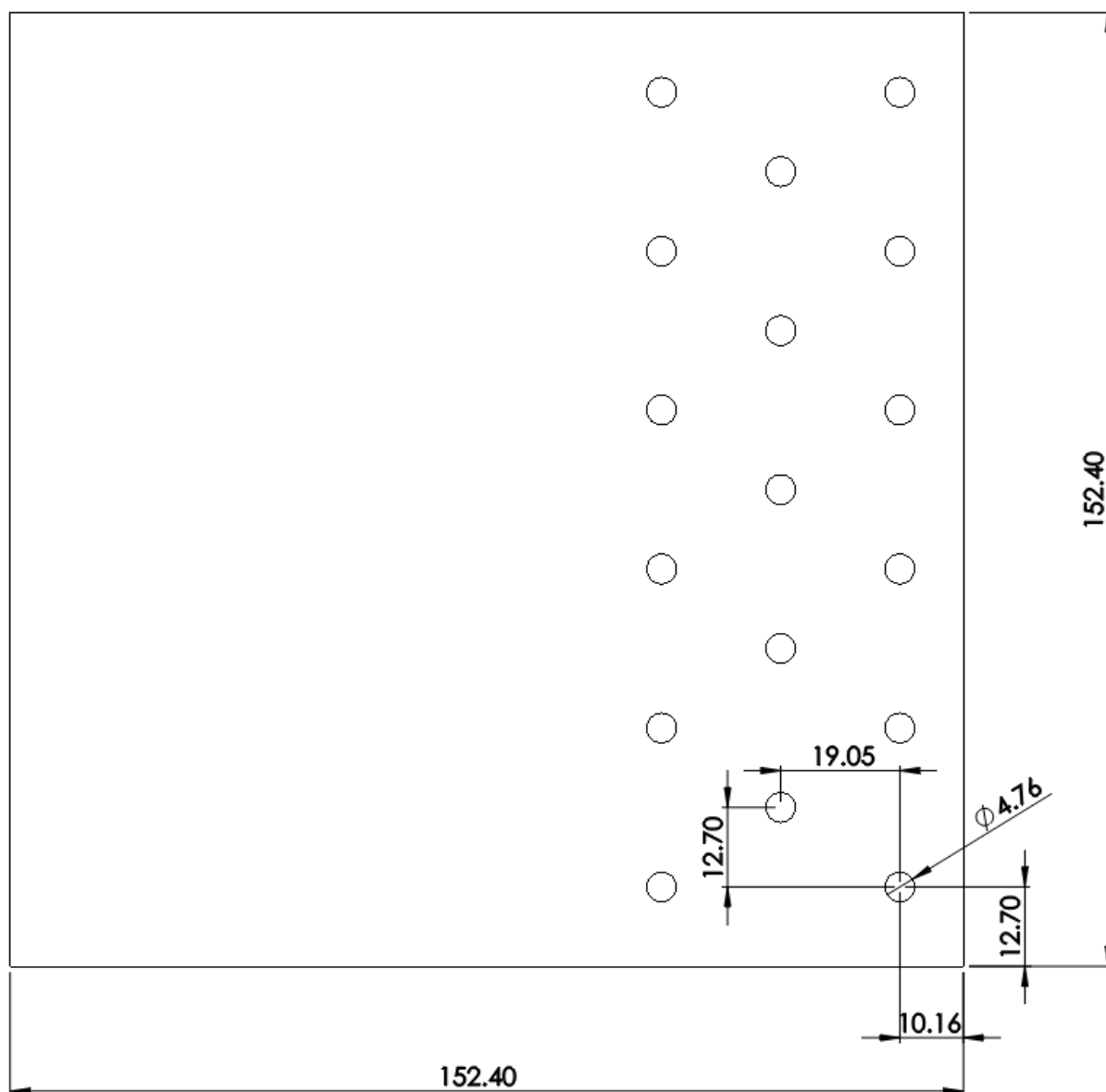
Materijal u analizi je aluminijska legura 2024, često korištena u zrakoplovstvu. Materijal je izotropan s elastičnim ponašanjem i svojstvima danim u tablici 2. U ovom radu korišten je općeniti iznos modula elastičnosti za tip aluminijske legure 2024 za sve elemente u spojevima.

Tablica 2. Mehanička svojstva Al2024 za numeričke modele [6]

Svojstvo [mjerna jedinica]	Iznos
E [GPa]	73
ν [-]	0,33

Bitno je napomenuti da je isti materijal s istim svojstvima korišten i u modelu s trodimenzionalnom diskretizacijom.

Geometrija modela je izrađena na temelju zadatka iz analitičkog proračuna, jednakih dimenzija ploča, koraka zakovica, razmaka između redova i udaljenosti od ruba.

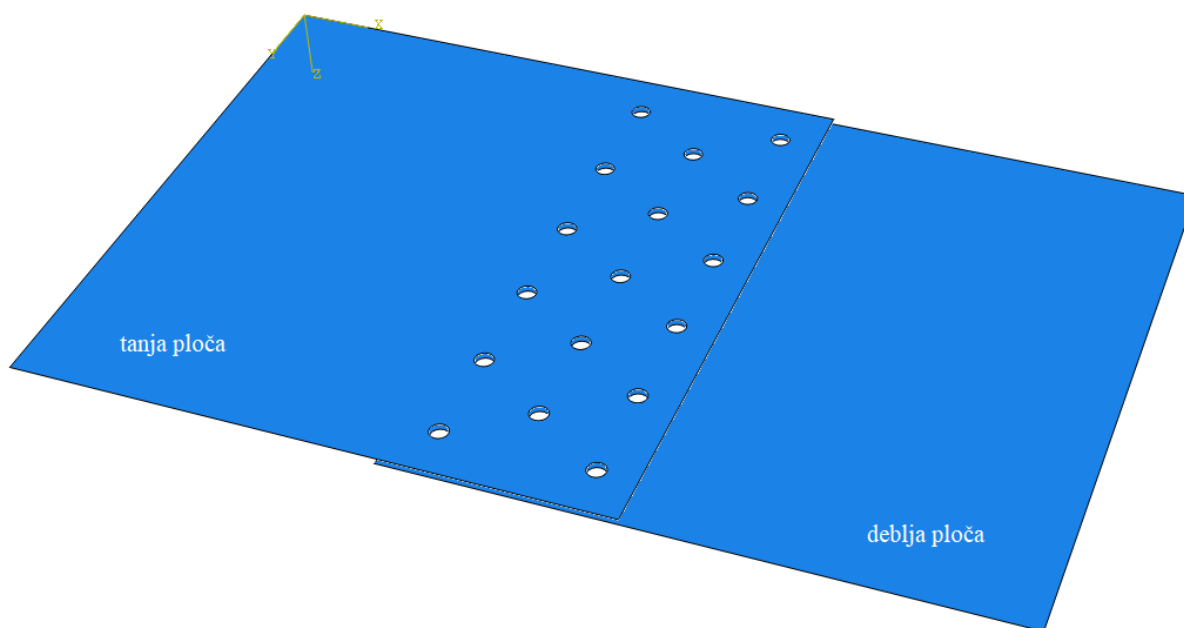


Slika 7. Prikaz dimenzija ploče, [mm]

Slika 7. prikazuje dimenzije koje potpuno definiraju geometriju obje ploče.

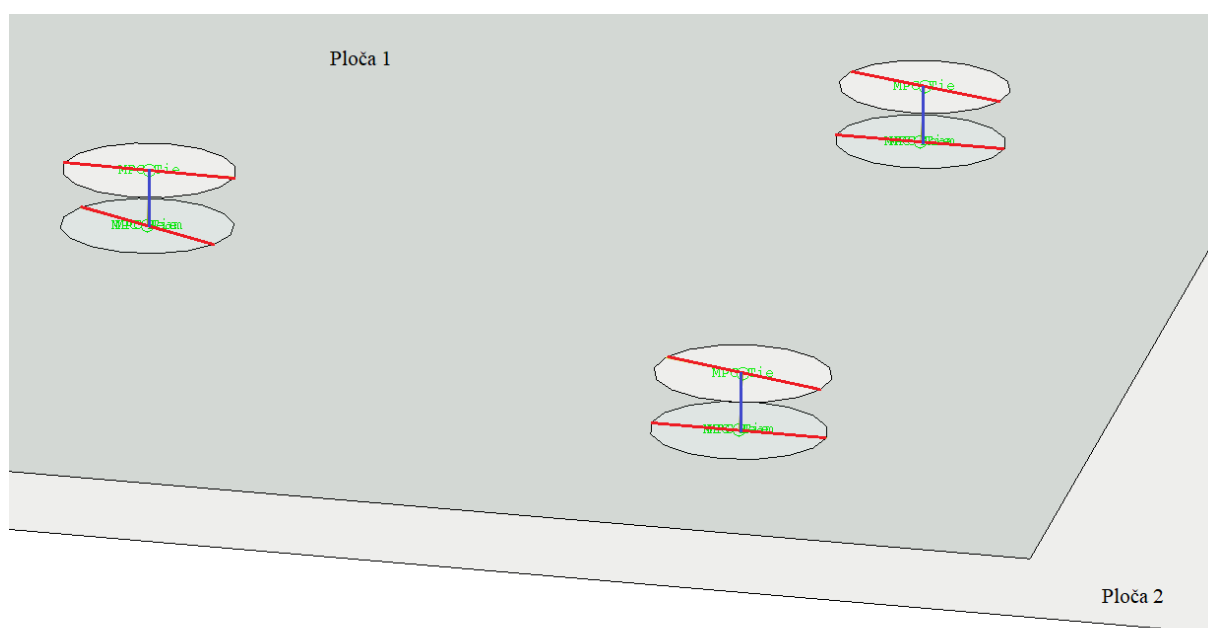
Navedena geometrija korištena je za ploče obje debljine pošto su identične, osim dimenzije debljine. Jedna ploča debljine je 1,8 mm, a druga 1,4 mm.

Ploče su izrađene zasebno u modulu *Part*. Debljine su zasebno zadane u modulu *Property* zajedno uz opisan materijal kako bi se takva geometrija kasnije diskretizirala S4R ljuskastim konačnim elementima.



Slika 8. Ploče u spoju modela s kinematskim vezama

Na slici 8. prikazan je međusobni položaj ploča modeliranih ljuskastim konačnim elementima u modulu *Assembly*.



Slika 9. Prikaz ograničenja MPC na dvije ploče – detalj

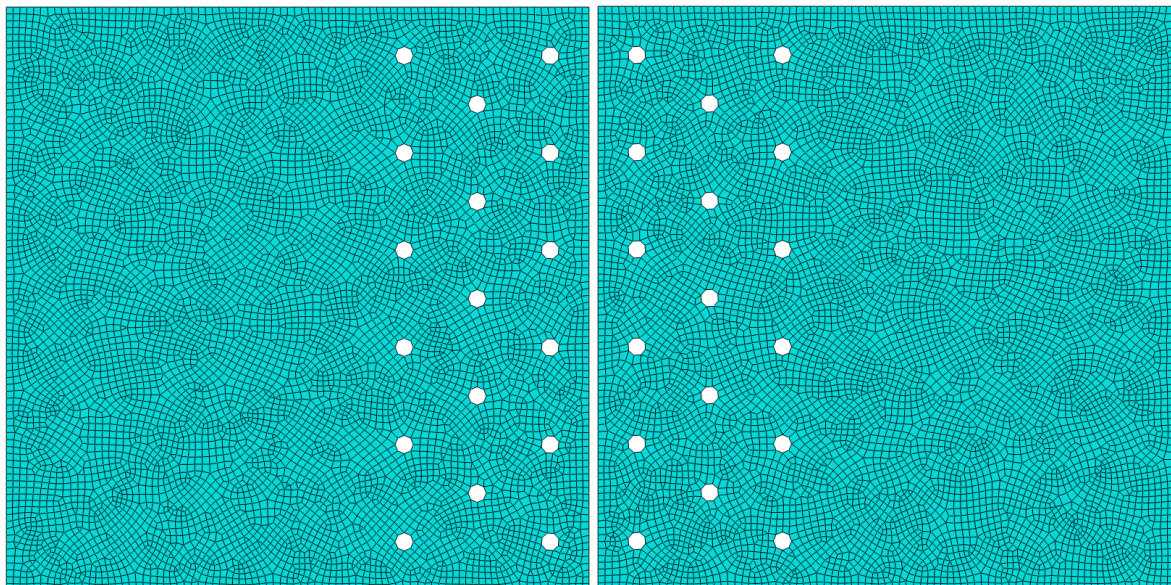
Slika 9. prikazuje položaje ranije objašnjenih ograničenja kinematskim vezama MPC *Beam* i MPC *Tie*. Tamno plave linije koje povezuju referentne točke provrta predstavljaju MPC *Beam*, a crvene linije koje povezuju obode provrta s referentnim točkama u sredini predstavljaju MPC *Tie*.

Nakon napravljenog sklopa u modulu *Assembly*, prikazanog na Slici 8. u modulu *Mesh* definira se mreža konačnih elemenata. Mreža konačnih elemenata je definirana na obje ploče na jednak način. Podatci koji opisuju mreže konačnih elemenata prikazani su u tablici 3.

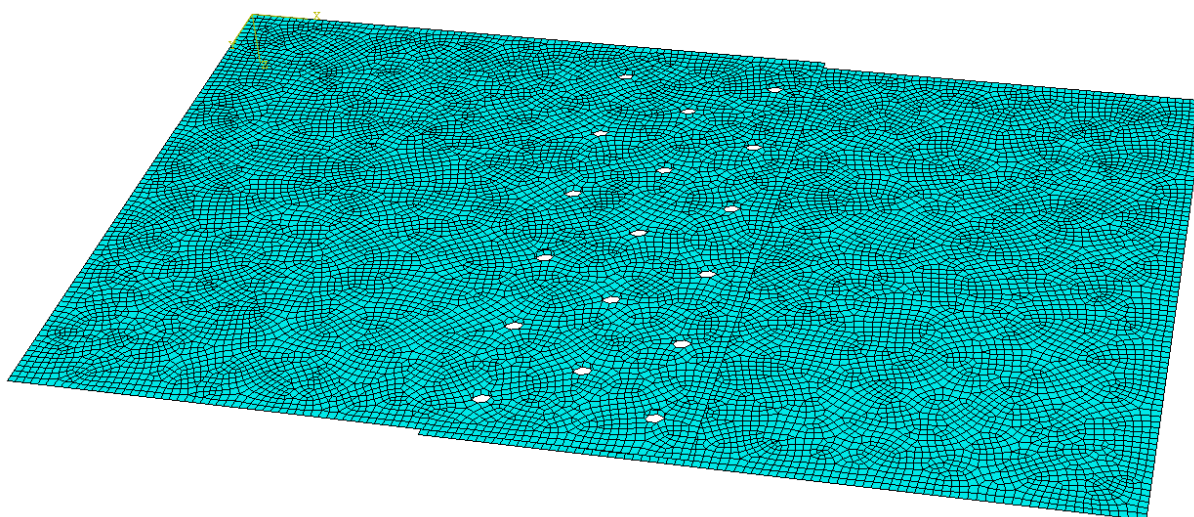
Tablica 3. Podatci o numeričkom modelu diskretiziranog ljuskastim konačnim elementima

<i>Part</i>	Ploča 1,8 mm	Ploča 1,4 mm
Broj elemenata	8536	8544
Broj S4R elemenata	8224	8222
Broj S3 elemenata	312	322

Prosječna dimenzija konačnih elemenata (eng. *Seed*) korištena je 1,8 mm pošto duljina ne bi trebala biti manja od definirane debljine ploče kako bi izbjegli moguće komplikacije u analizi.



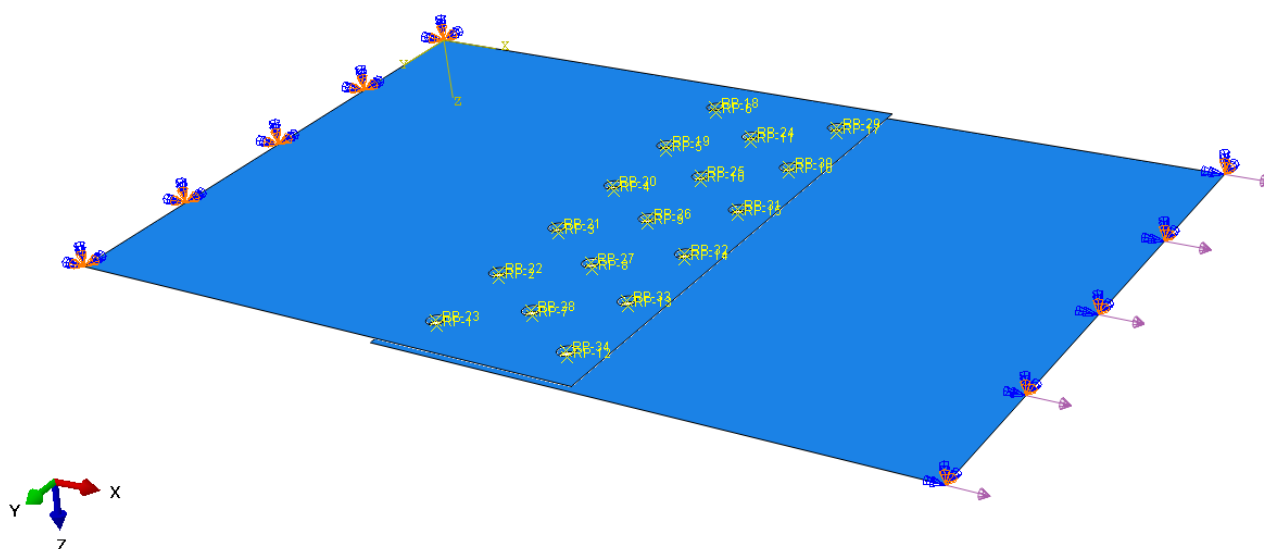
Slika 10. Usporedni prikaz mreža konačnih elemenata ploča



Slika 11. Prikaz mreže konačnih elemenata u sklopu modela s kinematskim vezama

Na slikama 10. i 11. prikazana je mreža konačnih elemenata, a iz tablice 3. se može vidjeti da su za ploče korišteni pretežito četverokutni S4R elementi, a trokutasti S3 samo gdje je bilo potrebno radi komplikacije geometrije, koje u ovom slučaju stvaraju provrti. Opcijom *Verify Mesh* u modulu *Mesh* provjereno je da nema nepravilnosti pri postavljanju mreža.

U modulu *Load* opisani su rubni uvjeti i opterećenja ovog modela. Prema orijentaciji na slici 12. na lijevom kraju je definirano uklještenje, odnosno onemogućeni su svi pomaci i rotacije, dok je na desnom kraju definirano ograničenje pomaka i rotacija osim pomaka u smjeru osi x . Isto tako u smjeru osi x je definirano kontinuirano opterećenje čiji iznos pomnožen s duljinom na kojoj djeluje iznosi 3400 N, što je zadano u analitičkom proračunu. Iznos tog kontinuiranog opterećenja je 22,3 N/mm.

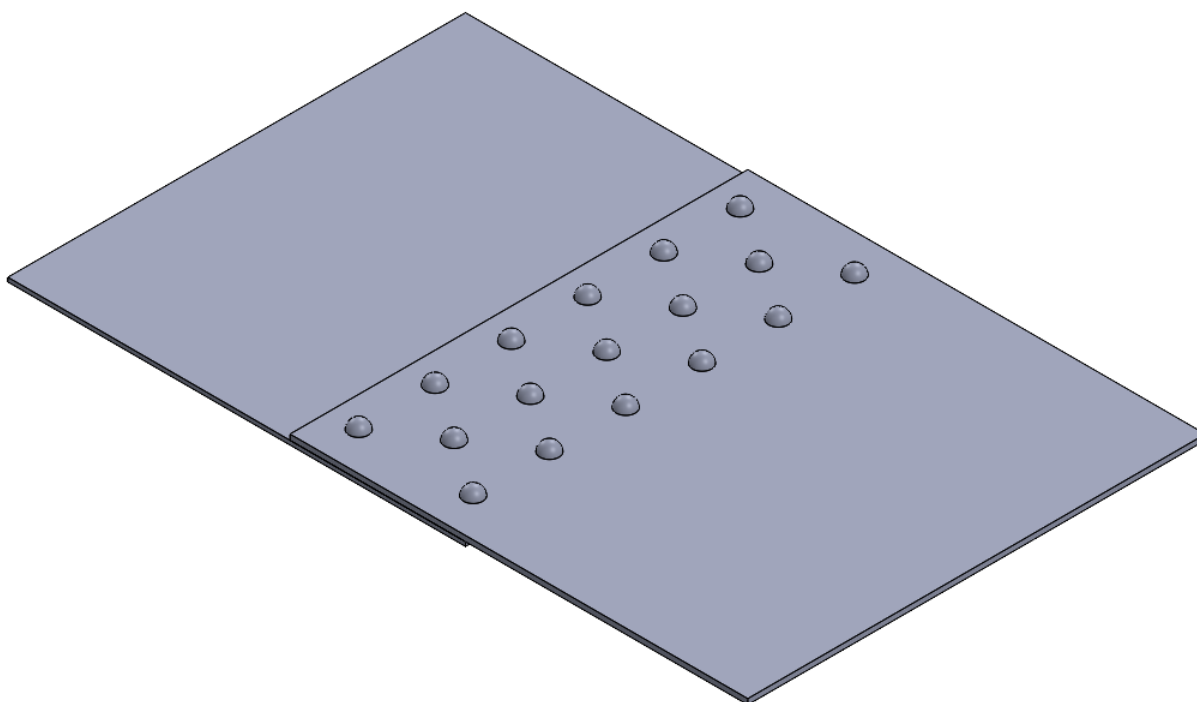


Slika 12. Rubni uvjeti i opterećenja modela s kinematskim vezama

3.2. Detaljno modeliranje zakovičnog spoja

Diskretizacija trodimenzionalnim konačnim elementima spoja koristi se za detaljnu analizu spoja, najčešće kako bi se razmatrale detaljna raspodjela polja naprezanja i deformacija po zakovicama i pločama u spoju. Kod ovakvog načina modeliranja može se još razmatrati i analiza zaostalih naprezanja nakon postupka spajanja te utjecaj iznosa koraka zakovica i tako

odrediti korak pri zadovoljavajućoj nosivosti spoja uz što manju koncentraciju naprezanja [1]. Za razliku od modela spoja kinematskim vezama, u kojima se ploče modeliraju ljuskastim konačnim elementima, u ovom spoju su ploče čvrsta tijela koje imaju u geometriji definiranu debljinu te se u analizi mogu razmatrati polja naprezanja i deformacija po debljini ploča. Radi detaljne analize i potrebnih računalnih resursa, ovakvi modeli se najčešće svode na manji uzorak zakovica te će se takvo pojednostavljenje koristiti i u ovom radu. Na slici 13. prikazan je spoj ploča sa svih 17 zakovica.



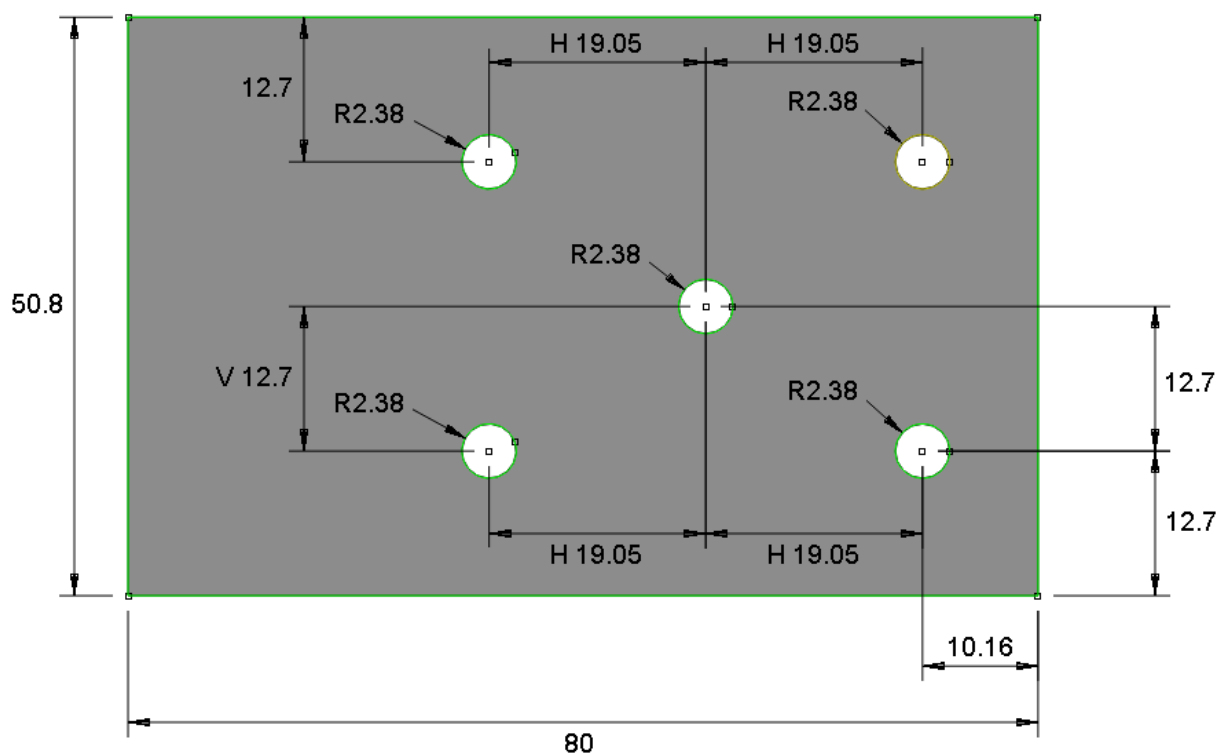
Slika 13. Prikaz preklopnog spoja modela zakovičnog spoja

3.2.1. Opis detaljnog modela spoja

Kao i za prijašnji, i za ovaj model su u narednom poglavlju prikazane opisne karakteristike modela koje uključuju materijal, geometriju, mrežu konačnih elemenata te rubne uvjete i opterećenja.

I u ovom modelu se koristi materijal aluminijeva legura vrste Al2024 čija su svojstva prikazana ranije u tablici 2.

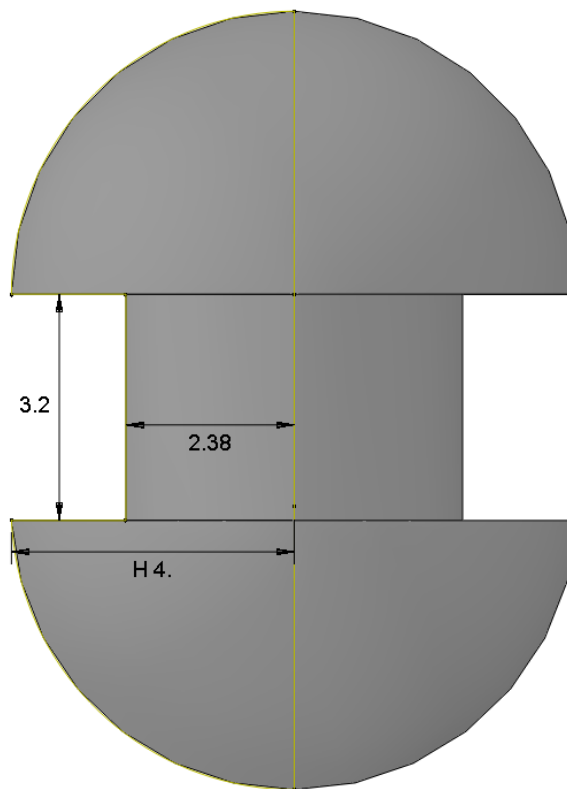
Geometrija modela je opet uzeta iz modela u analitičkom proračunu, ali u ovom modelu se koristi uzorak spoja od pet zakovica zbog značajno kompleksnije numeričke analize. Koristi se manji uzorak da bi se uvelike pojednostavila računalna analiza u odnosu na onu koja bila sa svih 17 zakovica.



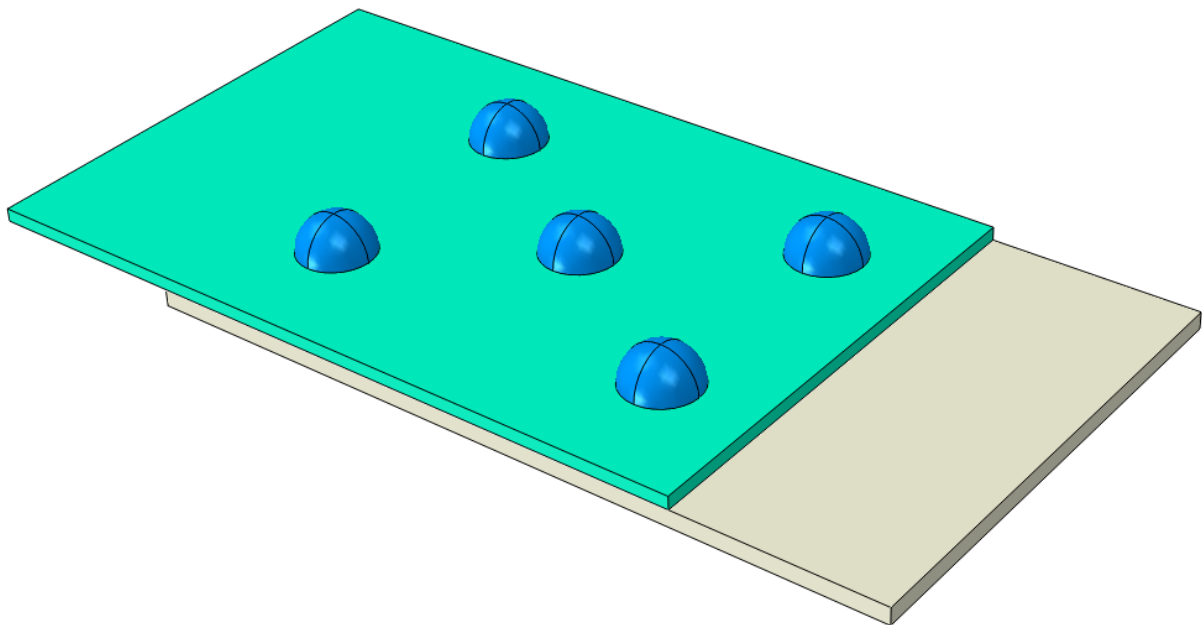
Slika 14. Dimenzije detaljnog modela spoja, [mm]

U geometrijskim karakteristikama ovog modela zadržane su i dalje sve potrebne karakteristične dimenzije koraka zakovice, udaljenosti od ruba i razmaka među redovima zakovica. Ploče su skraćene po duljini kako bi se smanjio broj elemenata u daljnjem postupku radi kraćeg trajanja simulacije. Ploče su modelirane kao čvrsta tijela u modulu *Part*, gdje je deblja ploča ekstrudirana za 1,8 mm, a tanja za 1,4 mm.

U slučaju trodimenzionalne diskretizacije spoja nije izostavljen model zakovice kao kod kinematskih veza gdje kinematska ograničenja igraju ulogu zakovice. Ovdje su zakovice modelirane kao čvrsta tijela u modulu *Part* tipa za revoluciju napravljenog profila oko središnje osi. Na slici 15. prikazane su dimenzije korištenih zakovica u modelu trodimenzionalne diskretizacije, a na slici 16. ploče u spoju u modulu *Assembly*.



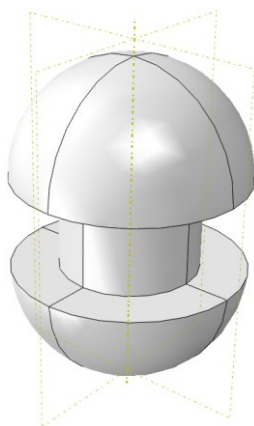
Slika 15. Dimenzije zakovice u detaljnom modelu spoja, [mm]



Slika 16. Spoj ploča i zakovica u detaljnom modelu

Spoj između zakovica i ploča definiran je opcijom glavna površina-sporodna površina (*master-slave surface*). Površina tijela zakovica je odabrana kao glavna, a ploče kao sporedne površine [7].

Kako bi raspored mreže konačnih elemenata bio što kvalitetniji po cilindričnim zakovicama, korištenjem naredbe *Partition cell: Use datum plane* izvedene su četiri particije koje definiraju dvije paralelne ravnine simetrije koje su prije toga napravljene. Particije zakovice su prikazane na slici 17.



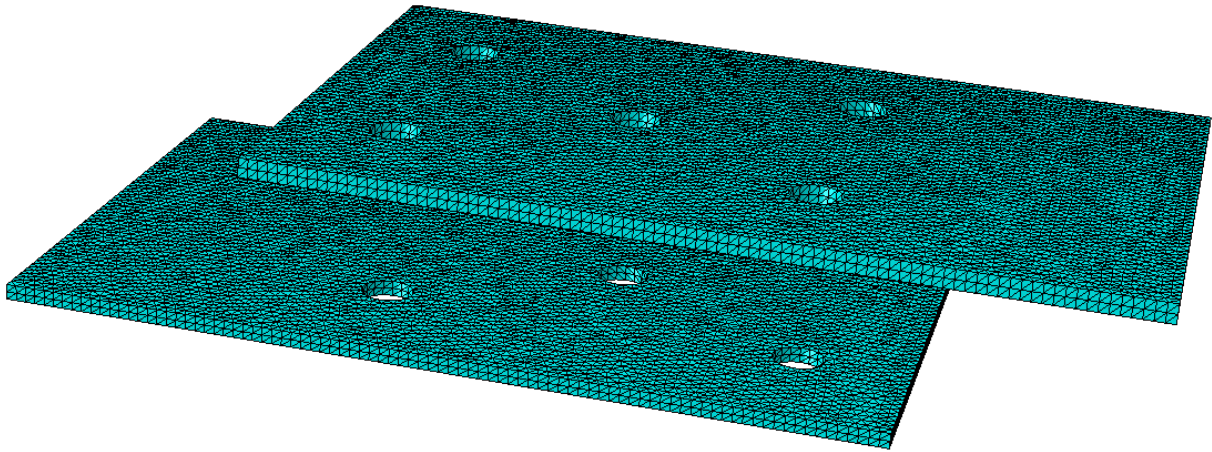
Slika 17. Particije zakovica

Nakon izrađenog sklopa u modulu *Assembly* prikazanog na slici 16. i zadanih svojstava materijala u modulu *Property*, u modulu *Mesh* definiraju se mreže konačnih elemenata za pojedine dijelove sklopa. U tablici 4. dani su podatci o korištenim konačnim elementima.

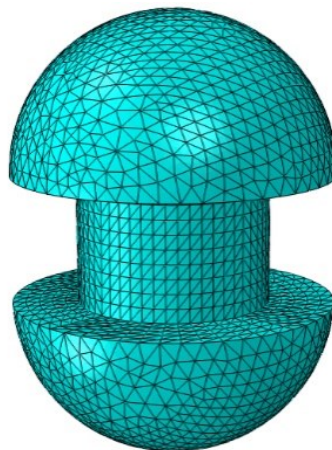
Tablica 4. Podatci o numeričkom modelu diskretiziranog trodimenzionalnim konačnim elementima

Dio modela	Zakovica	Ploča 1,8 mm	Ploča 1,4 mm
Broj elemenata (tipa C3D10)	56608	77671	62241
Broj čvorova	80434	125936	105333
Ukupan broj elemenata u sklopu (pet zakovica i obje ploče)	422952		
Ukupan broj čvorova u sklopu (pet zakovica i obje ploče)	633439		

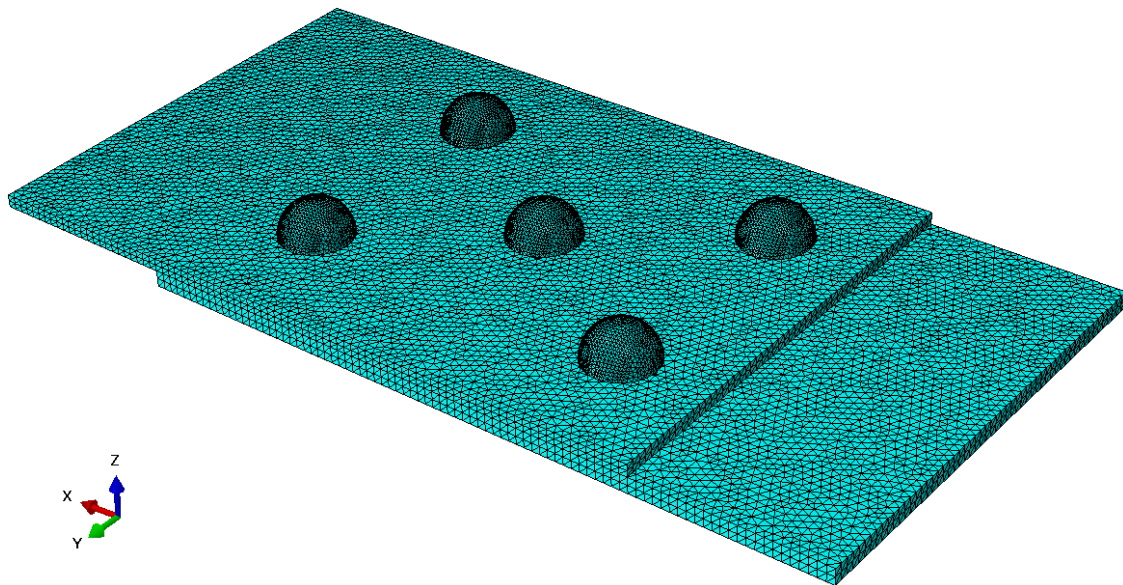
U ovom modelu su sve mreže konačnih elemenata u potpunosti izvedene tetraedarskim konačnim elementima drugog reda C3D10.



Slika 18. Mreža konačnih elemenata na pločama u 3D diskretizaciji



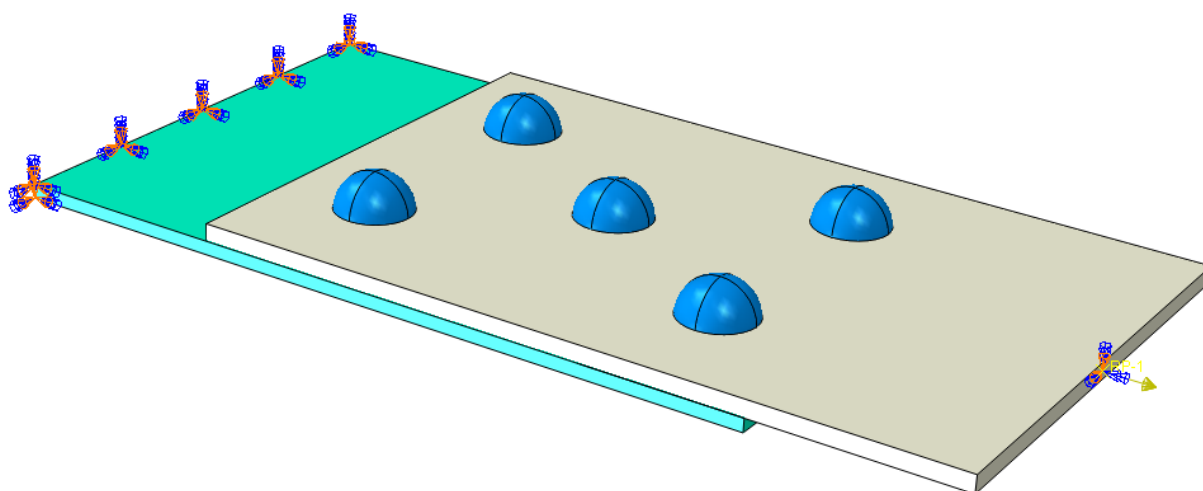
Slika 19. Mreža konačnih elemenata po jednoj zakovici u 3D diskretizaciji



Slika 20. Mreža konačnih elemenata u sklopu u 3D diskretizaciji

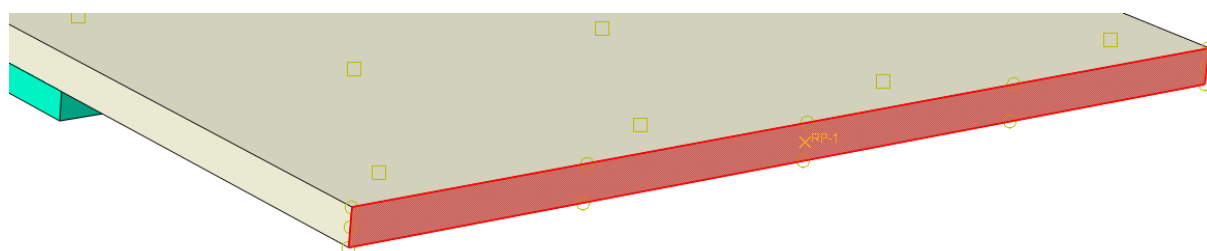
Na slikama 18., 19. i 20. prikazane se raspodjele mreža konačnih elemenata po pojedinim dijelovima sklopa i na cijelom sklopu. Opcijom *Verify Mesh* u modulu *Mesh* provjereno je da nema nepravilnosti pri postavljanju mreža.

Rubni uvjeti i opterećenja u detaljnom trodimenzionalnom modelu su opisani na sljedeći način. Prema orijentaciji na slici 21. s lijeve strane spoja definirano je uklještenje, odnosno onemogućeni su svi pomaci i rotacije. S desne strane na rubu ploče je definirana koncentrirana sila iznosa od 1000 N, zato što je u modelu sa 17 zakovica korišten ukupni iznos opterećenja od 3400 N odnosno 200 N po zakovici, tako je ovdje na pet zakovica zadano ukupno opterećenje od 1000 N. Kako koncentrirana sila ne bi nerealno razvlačila ploču u samo jednoj točki plohe, cijela ploha je povezana ograničenjem krutog tijela opcijom *Constraint – Rigid Body* u modulu *Interactions*. Ograničenje je definirano preko referentne točke smještene u središtu plohe. Isto kao što je u referentnoj točki definirana koncentrirana sila, tako je i rubni uvjet ograničenja pomaka i rotacija, osim pomaka u smjeru osi x , definiran u referentnoj točki na sredini plohe koja se sada, radi navedenih postupaka, vodi kao kruto tijelo i nema zasebnih deformacija.



Slika 21. Rubni uvjeti i opterećenje detaljnog modela

Na slici 22. prikazana je površina na kojoj je definirano ograničenje krutog tijela i referentna točka u kojoj su definirani rubni uvjeti i opterećenje.

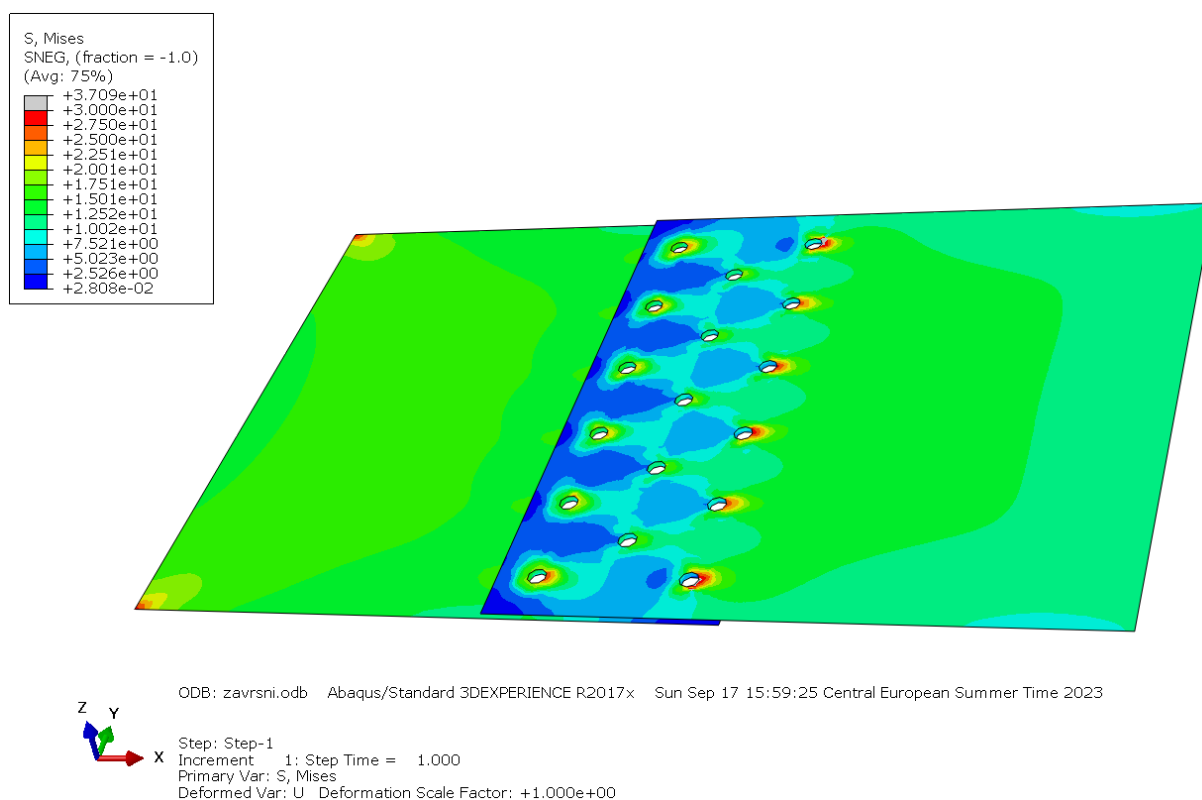


Slika 22. Prikaz površine definirane kao kruto tijelo i referentne točke

4. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA

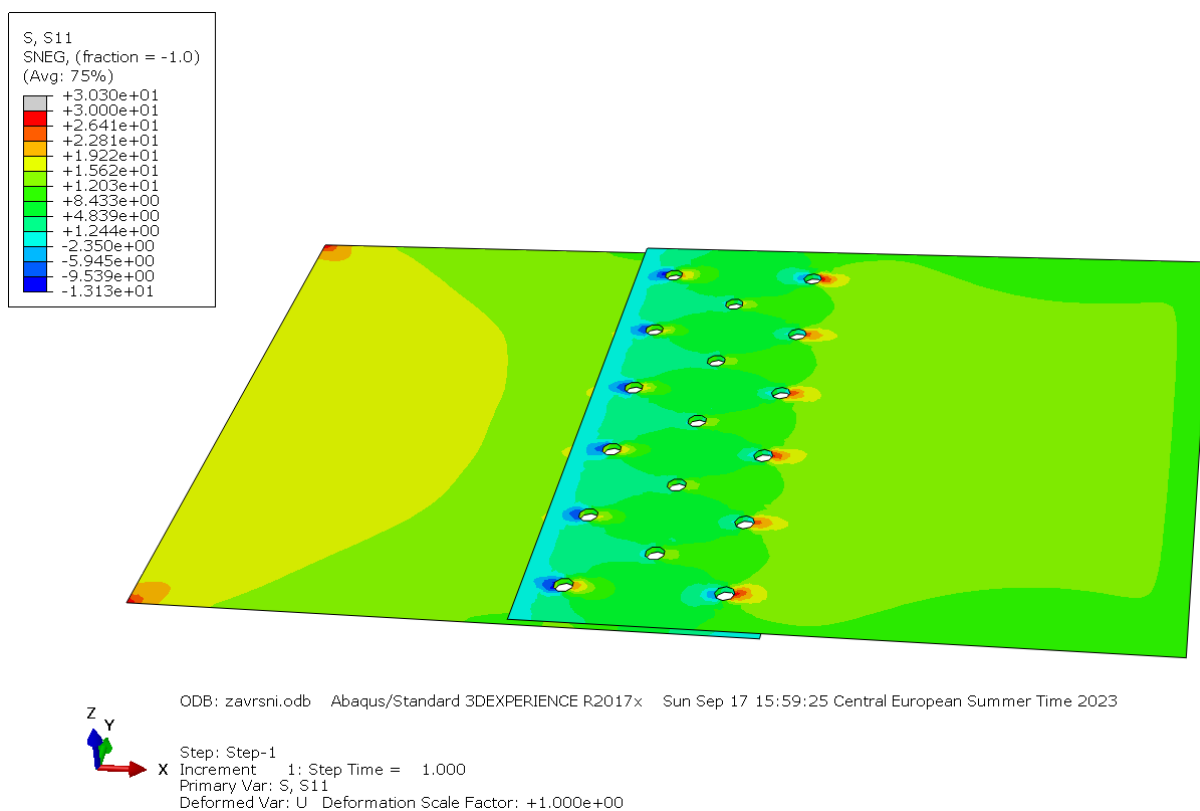
U ovom poglavlju prikazani su rezultati analiza modela spoja s kinematskim vezama i detaljnog trodimenzionalnog modela spoja. Najbitnije je za svrhe ovog zadatka prikazati polja dobivenih napreznja i deformacija. Usporedba i validacija rješenja pomoću analitičkog proračuna je provedena usporedbom dobivenih ekvivalentnih von Mises napreznja s dopuštenim vrijednostima granica tečenja i dopuštenih smičnih napreznja danih u analitičkom proračunu.

Prikazi rezultata započet će od modela spoja s kinematskim vezama.



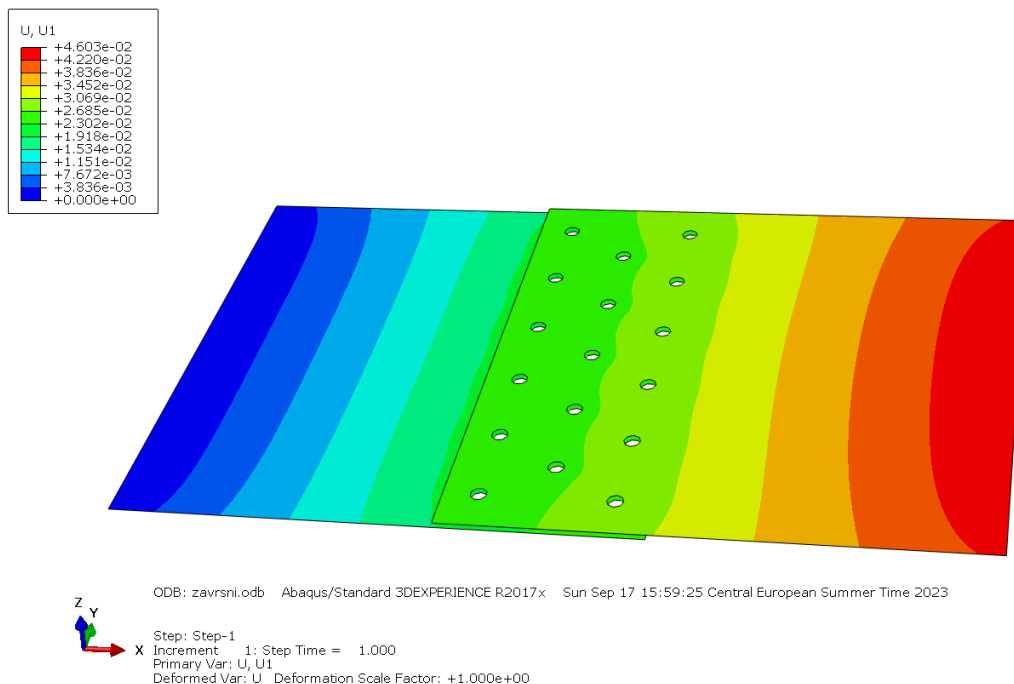
Slika 23. Ekvivalentna von Mises napreznja modela s kinematskim vezama, [MPa]

Na slici 23. prikazana su ekvivalentna von Mises napreznja za model diskretiziran ljuskastim konačnim elementima. Primjetno je da je najveći skok u napreznjima oko područja zakovica, posebno oko onih najbližim opterećenom kraju i oko područja uklještenja, s lijeve strane.



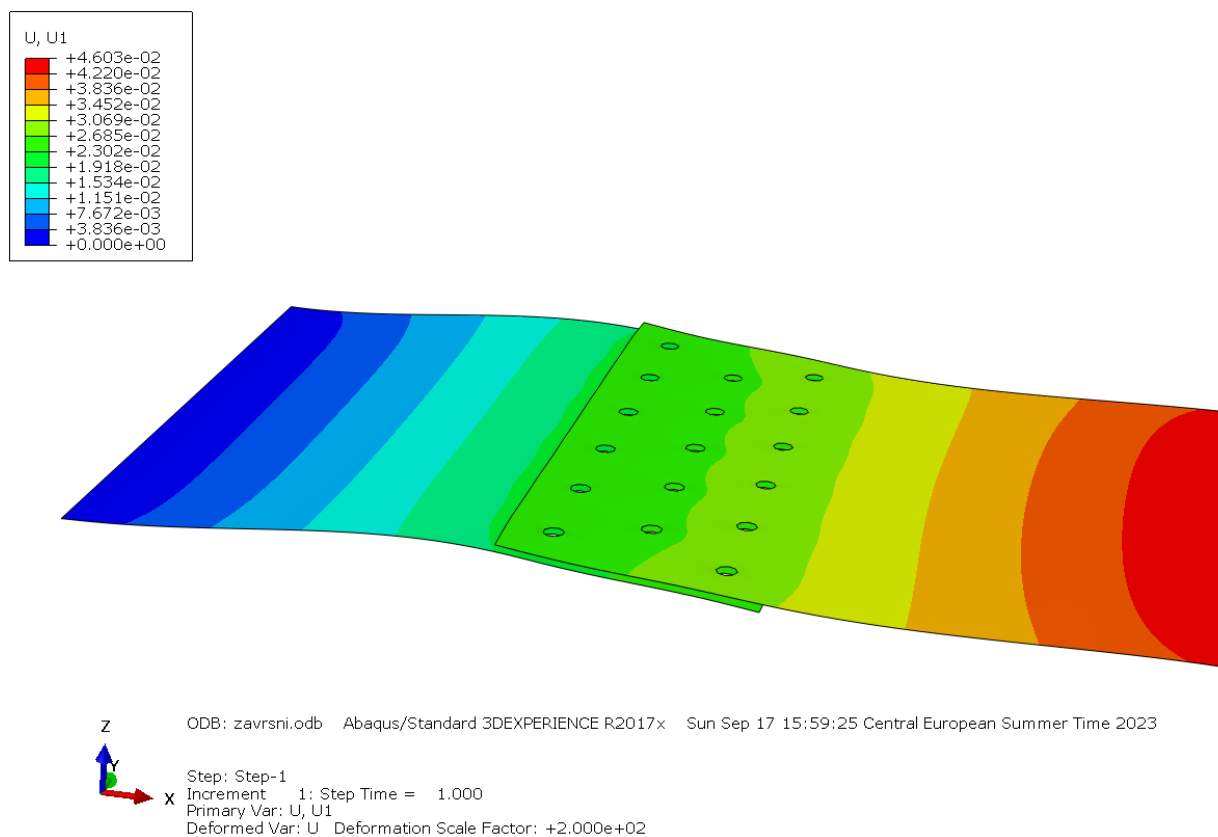
Slika 24. Naprezanja u smjeru osi x modela s kinematskim vezama, [MPa]

Na slici 24. su prikazana naprezanja u smjeru osi x te se u usporedbi s raspodjelom naprezanja na slici 23. može zaključiti kako je većinski udio u ekvivalentnim naprezanjima onaj u smjeru osi x .



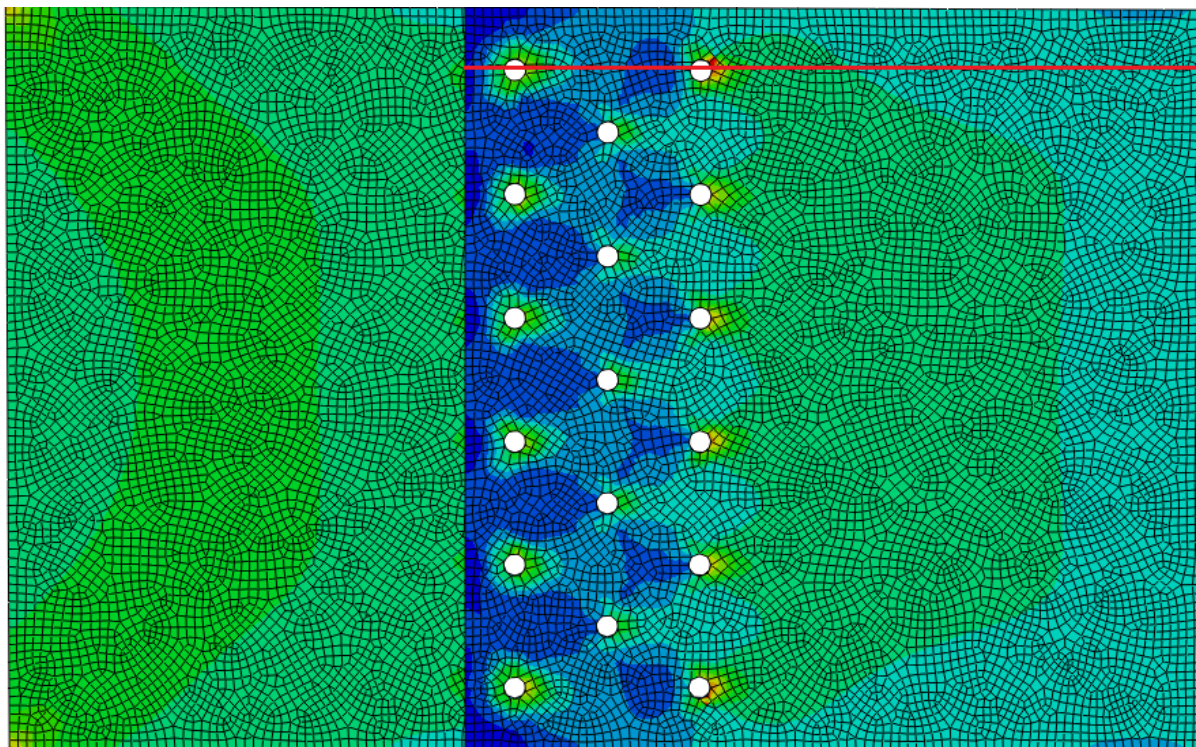
Slika 25. Raspodjela pomaka u smjeru osi x modela s kinematskim vezama, [mm]

S obzirom na to da je na lijevom kraju spoja definirano uklještenje, jasno je da tu pomaka neće biti, a u desnom kraju gdje je definirano opterećenje će pomaci biti najveći, a to se jasno vidi na slici 25. Na mjestu spoja gdje se nalaze zakovice će krutost spoja biti najveća pa će u pomaci biti minimalni u odnosu na pomake na rubu gornje ploče. Kao posljedica ekscentriciteta uklještenja i opterećenja u spoju na slici 26. prikazan je način na koji se ploče savijaju. Radi malog opterećenja prikaz je dan uz faktor povećanja.

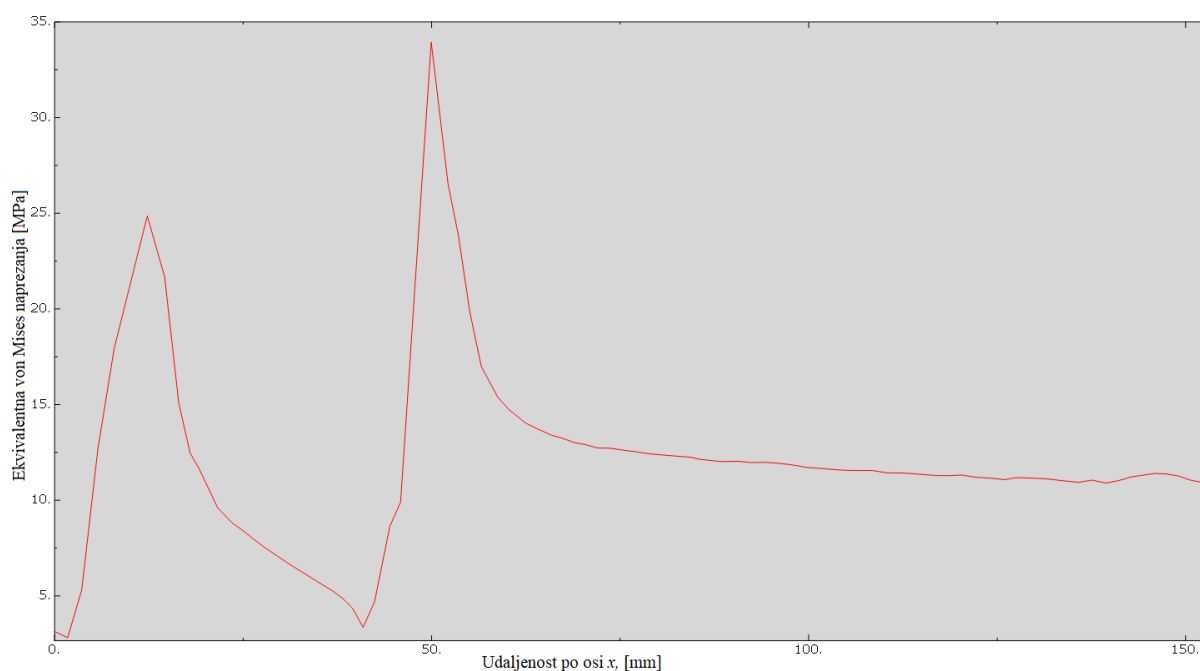


Slika 26. Raspodjela pomaka u smjeru osi x modela s kinematskim vezama, [mm] uz faktor povećanja 200

Još je korisno pregledati kako se naprezanja mijenjaju po ploči koja se deformira u smjeru osi x . Na slici 27. prikazana je putanja po kojoj se na slici 28. prikazuje promjena ekvivalentnih von Mises naprezanja u smjeru osi x , odnosno u smjeru opterećenja. Promatrana putanja je smještena tako da se obuhvate najveća dobivena naprezanja u spoju.



Slika 27. Putanja po kojoj se promatra promjena ekvivalentnih von Mises naprezanja



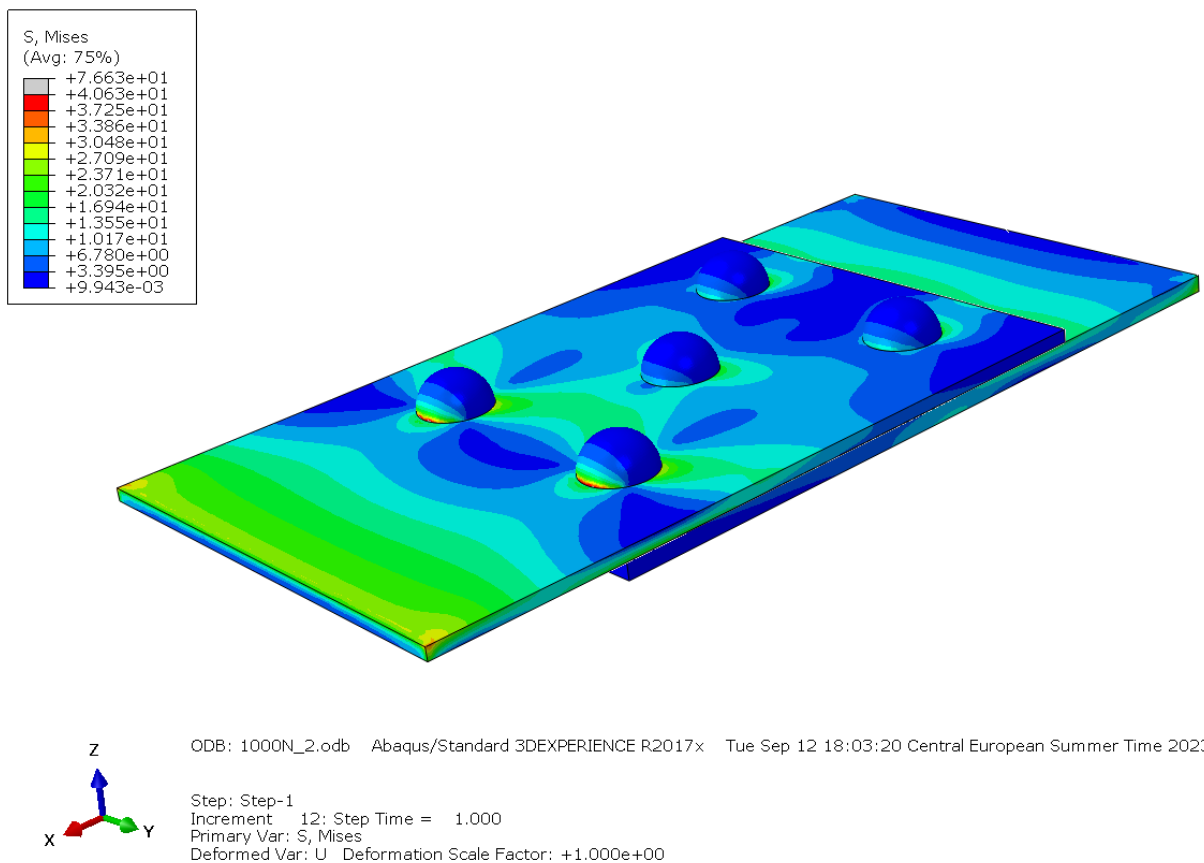
Slika 28. Grafički prikaz promjene von Mises naprezanja po putanji u smjeru osi x

Iz slike 28. vidljivo je kako su najmanja naprezanja na ploči na samom rubu i na dijelu ploče koji se nalazi između dviju zakovica, a vršna naprezanja oko provrta. Iznosi naprezanja na područjima samih provrta se mogu zanemariti jer ne postoje. Putanja očitavanja rezultata se zadaje

spajanjem čvorova konačnih elemenata, stoga program ne razlikuje ploču od provrta pri izvođenju rezultata.

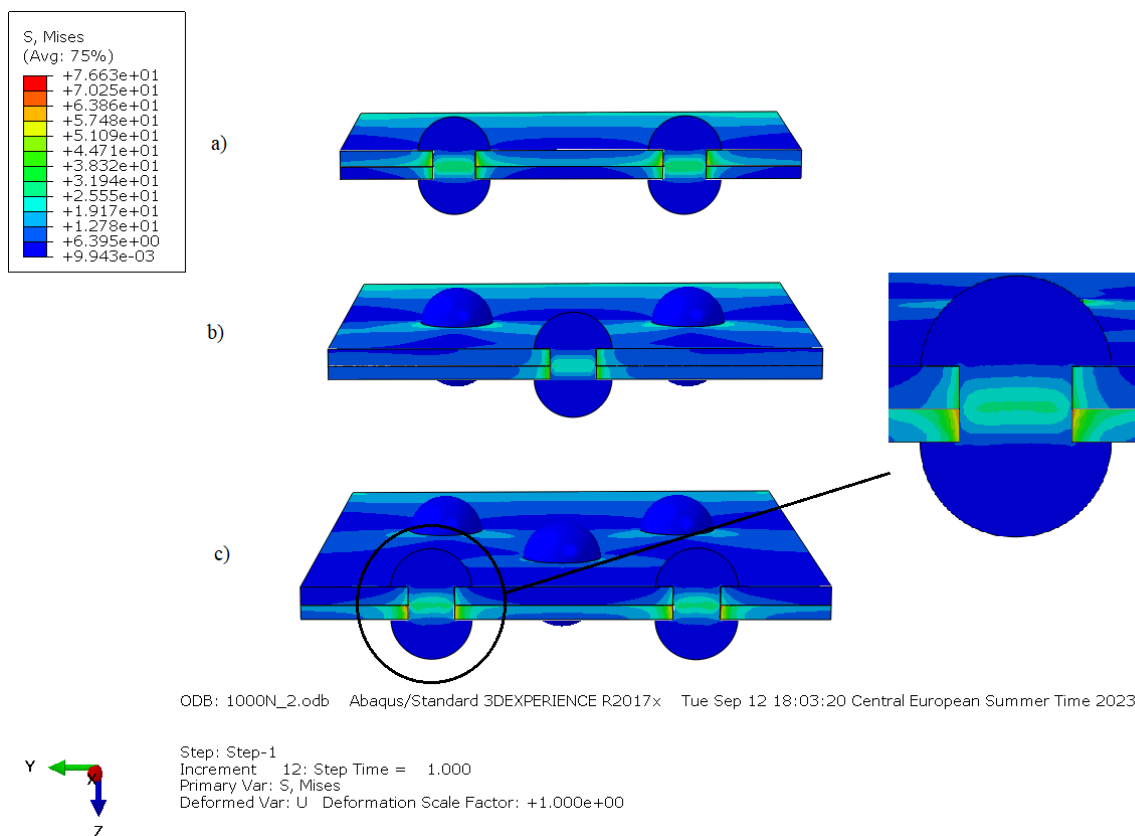
Sljedeće su prikazana rješenja odnosno polja naprezanja i deformacija za model gdje se spoj opisuje trodimenzionalnom mrežom konačnih elemenata.

Na slikama 29., 30. i 31. prikazana su polja ekvivalentnih von Mises naprezanja.

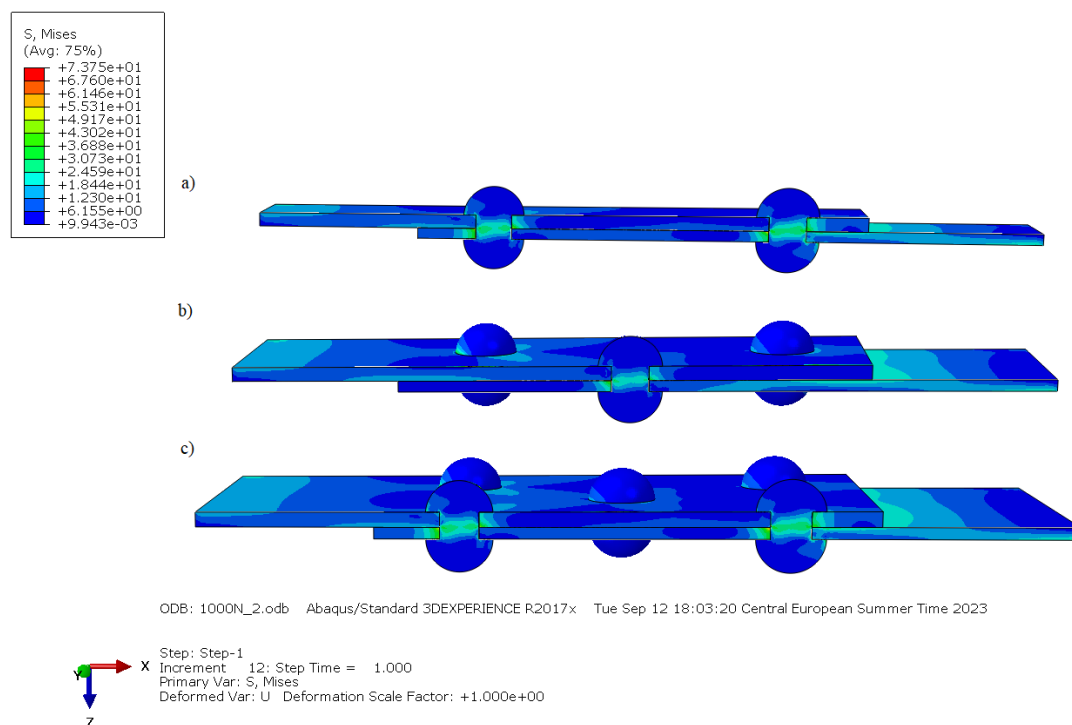


Slika 29. Ekvivalentna von Mises naprezanja detaljnog trodimenzionalnog poja, [MPa]

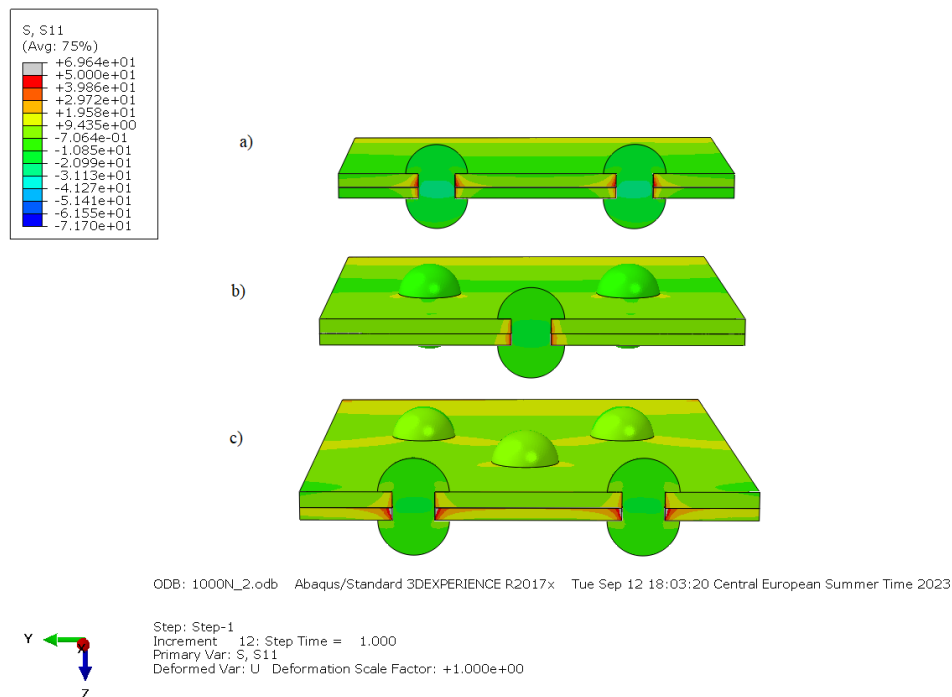
Ekvivalentna naprezanja su najvećih iznosa na dodiru zakovica i ploča, a od svih zakovica na srednjoj zakovici se iznosi naprezanja najmanje izražavaju. Razlog tome je što oko srednje zakovice nema razlistavanja ploča uslijed deformacija. Krutost cijelog spoja je tu najizraženija. Isto to se može primijetiti i na samim pločama. Na slici 29. se može primijetiti da su vršna naprezanja otprilike duplo većeg iznosa od onih na slici 23. kod modela s kinematskim vezama. Vršna naprezanja kod oba modela se nalaze na spojevima ploča i zakovica, ali kod modela s kinematskim vezama nema raspodjele koncentracije naprezanja po debljini ploče kao kod detaljnog trodimenzionalnog modela. U raspodjeli po debljini ploče na provrtima nalaze se vršna naprezanja uzrokovana i bočnim tlakom zakovica, što se u pločama modela s kinematskim vezama ne pojavljuje, jer nema definiranih kontakata. Glave zakovica u detaljnom modelu dodatno stvaraju pritisak na ploče radi ekscentriciteta opterećenja i uklještenja.



Slika 30. Presjeci po poprečnoj osi za prikaz von Mises ekvivalentnih napreznja s detaljem spoja zakovice i ploča, [MPa], a) stražnje zakovice, b) srednja zakovica, c) prednje zakovice

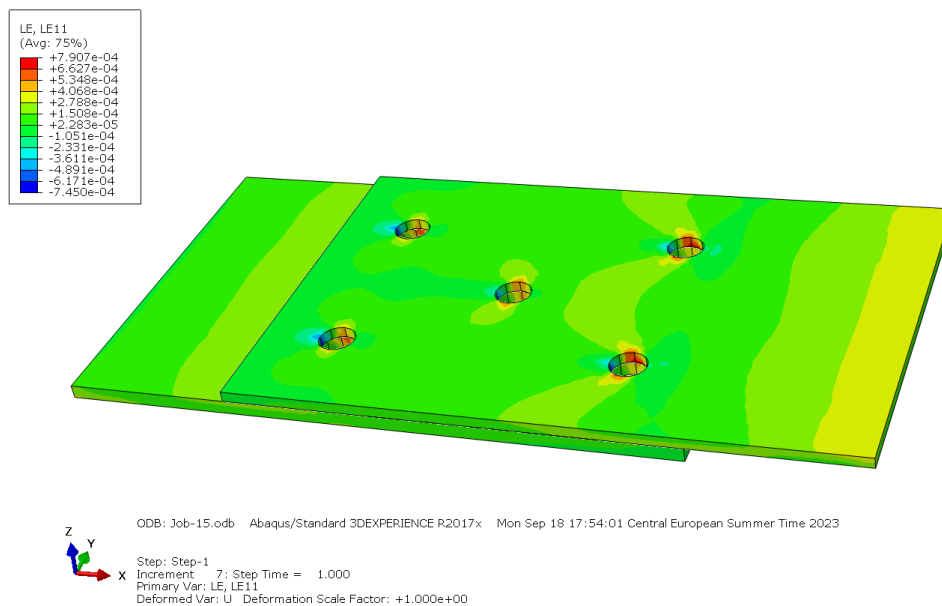


Slika 31. Presjeci po uzdužnoj osi za prikaz von Mises ekvivalentnih napreznja, [MPa], a) stražnje zakovice, b) srednja zakovica, c) prednje zakovice



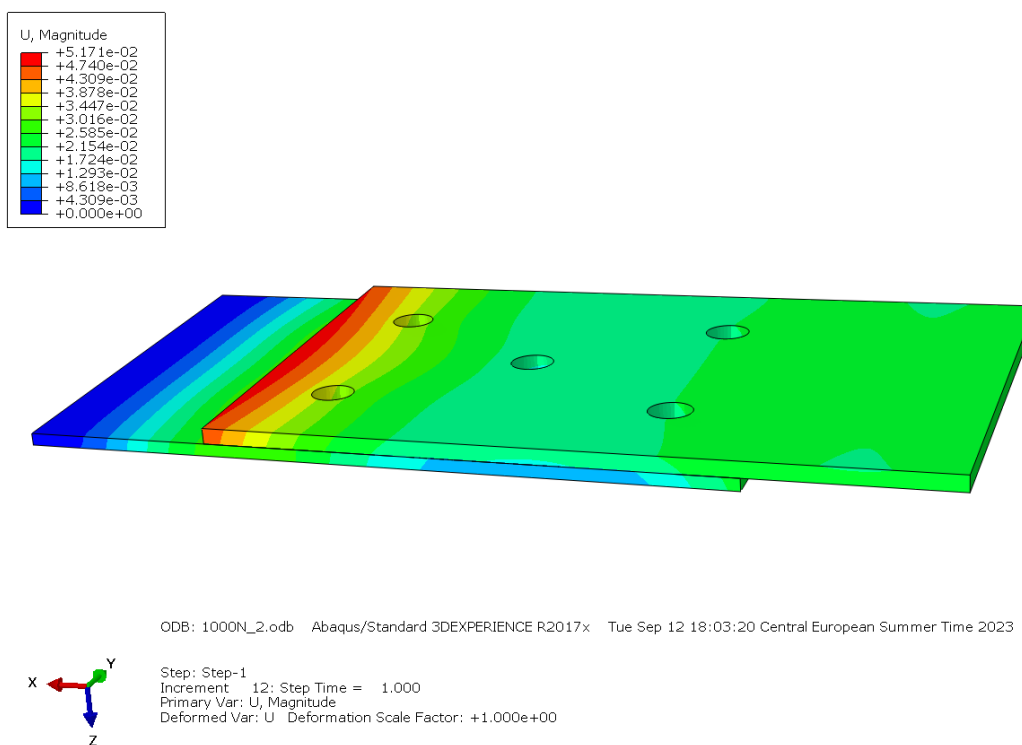
Slika 32. Presjeci po poprečnoj osi za prikaz naprezanja u smjeru osi x , [MPa], a) stražnje zakovice, b) srednja zakovica, c) prednje zakovice

Isto tako je na slici 32. prikazana raspodjela naprezanja u smjeru osi x i može se zaključiti da je u dodiru zakovica i ploča najveći udio u ekvivalentnim naprezanjima taj u smjeru osi x . Tu su i najkritičniji dijelovi spoja.

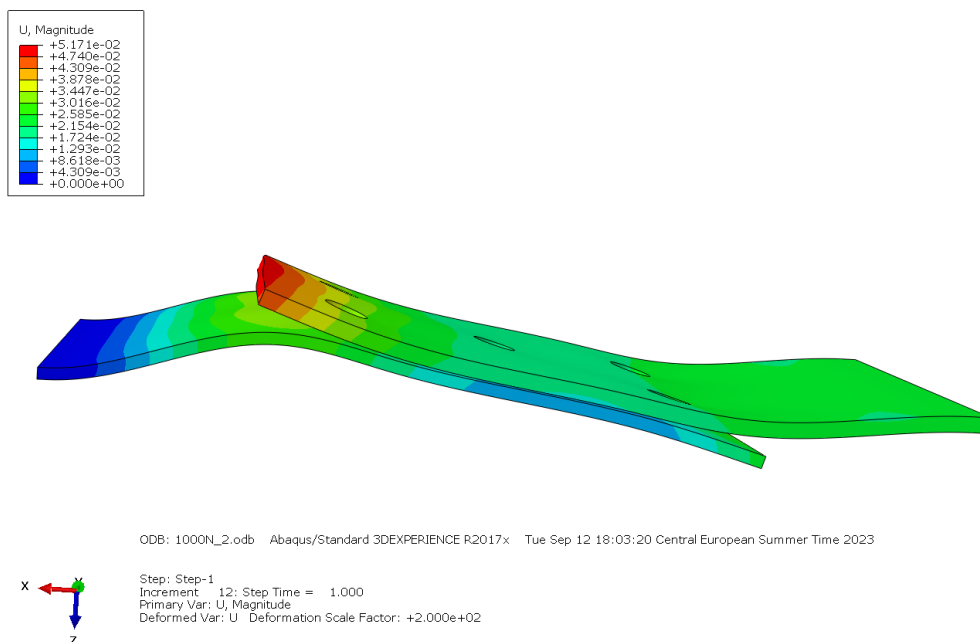


Slika 33. Duljinske deformacije u smjeru osi x spoja u trodimenzionalnoj diskretizaciji

Raspored koncentracije naprezanja u smjeru osi x je potkrepljen i prikazom deformacija na pločama u smjeru osi x .



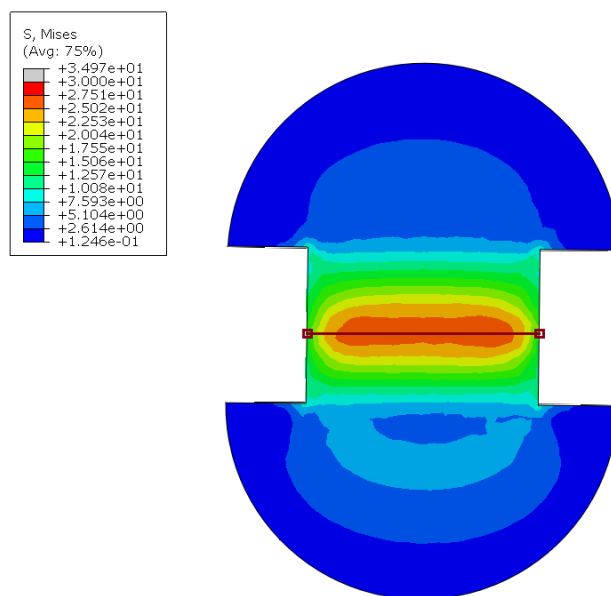
Slika 34. Ukupni pomaci spoja u modelu s trodimenzionalnom diskretizacijom, [mm]



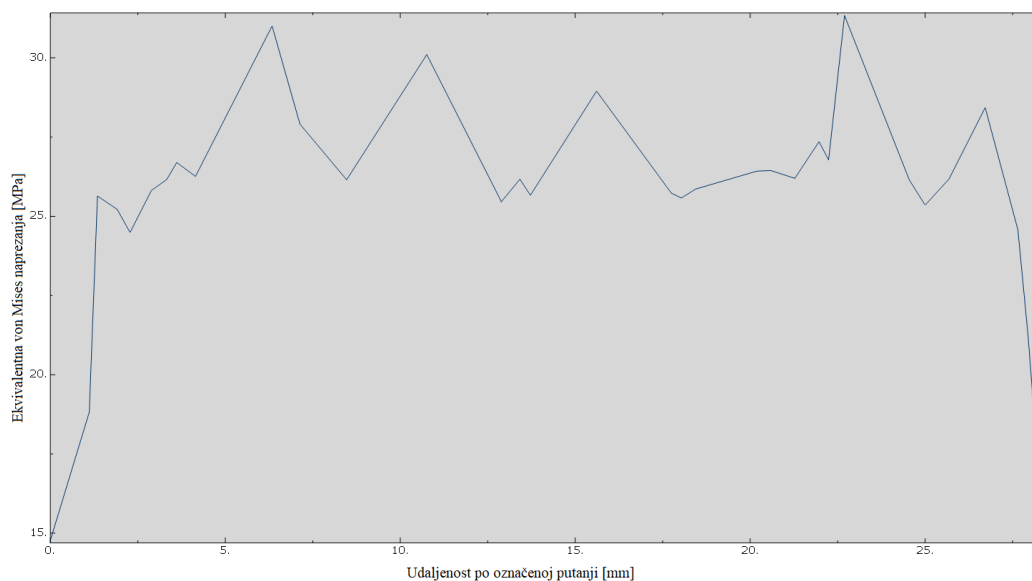
Slika 35. Ukupni pomaci spoja u modelu s trodimenzionalnom diskretizacijom, [mm], uz faktor povećanja 200

Na slikama 34. i 35. prikazani su ukupni pomaci spoja gdje se jasno vidi utjecaj razlistavanja zbog načina definiranja rubnih uvjeta. Naglašeni prikaz na slici 35. s faktorom povećanja to najbolje predočava.

Sljedeće je prikazana raspodjela ekvivalentnih naprezanja po dužini poprečnog presjeka tijela zakovice u spoju. Na slici 36. prikazana je putanja po kojoj su očitane vrijednosti ekvivalentnih von Mises naprezanja, dok su vrijednosti prikazane grafički na slici 37.



Slika 36. Prikaz putanje očitavanja von Mises ekvivalentnih naprezanja po zakovici, von Mises naprezanja, [MPa]



Slika 37. Grafički prikaz raspodjele von Mises ekvivalentnih naprezanja po dužini poprečnog presjeka

Zakovica na kojoj su očitani najveći iznosi naprezanja je prikazana na slikama 36. i 37. Iz slika se može zaključiti da naprezanja dosežu najveće vrijednosti u ravnini spoja ploča.

Kako bi se usporedile metode analize i validirale pomoću analitičkog proračuna odabiru se najveća ekvivalentna von Mises naprezanja u spojevima oba modela i uspoređuju s ranije navedenom vlačnom granicom tečenja F_{ty} i krajnjim smičnim naprežanjem F_{su} koje za ove zakovice ovog materijala imaju jednaki iznos od 241,32 MPa. Ti iznosi su dobiveni eksperimentalno [2]. Usporedbom tih vrijednosti određeni su faktori sigurnosti za oba spoja po zakovici.

Za usporedbu s faktorom sigurnosti prema analitičkoj metodi potrebno je prvo izračunati naprežanje po zakovici pomoću pretpostavljene sile po zakovici P od 200 N. To naprežanje iznosi

$$\tau = \frac{P}{A} = 11,24 \text{ MPa}, \quad (4.1)$$

gdje je A površina poprečnog presjeka tijela zakovice.

Faktor sigurnosti prema granici tečenja i krajnjem smičnom naprežanju u analitičkom proračunu iznosi 21,45.

Tablica 5. Faktori sigurnosti naprezanja za metodu kinematskim vezama

	Max. von Mises naprežanje [MPa]	Faktor sigurnosti prema granici tečenja i krajnjem smičnom naprežanju
1. red	28,26	8,54
2. red	19,16	12,59
3. red	36,08	6,69

Tablica 6. Faktori sigurnosti naprezanja za metodu trodimenzionalne diskretizacije

	Max. von Mises naprezanje [MPa]	Faktor sigurnosti prema granici tečenja i krajnjem smičnom naprezanju
1. zakovica	36,50	6,61
2. zakovica	34,97	6,90
3. zakovica	33,06	7,30
4. zakovica	45,00	5,36
5. zakovica	46,20	5,22
Ploča 1,8 mm	61,11	3,95
Ploča 1,4 mm	76,63	3,15

U tablici 5. je radi jednostavnosti dana samo najveća vrijednost ekvivalentnog naprezanja iz svakog reda, a to je omogućeno radi izrazite uniformnosti rasporeda naprezanja po svakom redu. Još jedna opaska bitna za napomenu je činjenica da u metodi spoja pomoću kinematskih veza nema modeliranih zakovica, već su navedene vrijednosti naprezanja na pločama na mjestima spoja. To je samo jedan od razloga zašto se dvije metode ne mogu uspoređivati međusobno adekvatno. Drugi razlog bi bila činjenica da se u modelu s kinematskim vezama radi o ljuskastim konačnim elementima te po debljini ploča postoji samo po jedna vrijednost koja opisuje naprezanje, dok je kod trodimenzionalne diskretizacije slučaj detaljnog rasporeda konačnih elemenata pomoću kojih se može vjerno opisati raspodjela naprezanja po debljini ploče. To se jako dobro očituje kod usporedbe rezultata maksimalnih ekvivalentnih naprezanja po pločama između tablica 5. i 6., gdje se vidi kako na pločama dakako postoje naprezanja koja su veća od onih navedenih kod metode modeliranja s kinematskim vezama.

Glavna prednost modeliranja spoja kinematskim vezama je korištenje ljuskastih konačnih elemenata gdje bi se mogao modelirati značajno kompleksniji spoj s puno više zakovica i ploča. Za jednaki iznos vremena i jednaku dostupnost računalne snage trodimenzionalnom diskretizacijom se mogu modelirati samo puno jednostavniji spojevi i konstrukcije. Nadalje, programskim paketom *Abaqus/Standard* u slučaju ovog rada, puno je učinkovitije provesti metodu modeliranja kinematskim vezama.

Nasuprot tome, trodimenzionalni model puno detaljnije prikazuje raspodjelu naprezanja i deformacija po spoju zakovice i provrta ploče. U modelu se mogu naći pronaći vrijednosti naprezanja od onih koje su dostupne u prikazu rezultata modela s kinematskim vezama, što je bitna prednost.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana su tri različita pristupa problemu pronalaženju bitnih karakteristika kojima se dimenzioniraju zakovični spojevi. Onaj najjednostavniji i najčešće korišten je analitički pristup iz dostupne literature. Ovakav pristup se može smatrati najefikasnijim po pitanju vremena, ali ne i prema detaljnom opisu ponašanja spoja.

Druga dva pristupa su numeričke vrste i veoma se međusobno razlikuju. Prikazuju dvije nasuprotne strane u spektru kompleksnosti. Onaj jednostavniji pristup modeliranju spoja je koristeći kinematske veze kako bi se opisala uloga zakovice u spoju između dvije ploče modeliranih ljuskastim konačnim elementima. Drugi pristup je diskretizacija spoja detaljnom trodimenzionalnom mrežom konačnih elemenata. U tom pristupu se i ploče i zakovice definiraju kao trodimenzionalna čvrsta tijela.

Oba pristupa imaju svoje prednosti i nedostatke i to je dobro vidljivo u okviru ovog rada. Modeliranje zakovičnih spojeva trodimenzionalnom diskretizacijom omogućava puno detaljniji pregled i utjecaj polja deformacija i naprezanja. Generalno, ovim pristupom se može analizirati puno više od prikazanog, kao što je provjera utjecaja zračnosti između zakovice i provrta na naprezanja, provjera utjecaja parametara na polja deformacija i naprezanja kao što su razmak između redova zakovica, korak zakovice i udaljenost od ruba. Još jedna od bitnih prednosti pristupa detaljnom modelu je jako dobra predodžba koncentracija naprezanja u spojevima, što je od velike bitnosti u zrakoplovnoj industriji. Pored svega navedenog, za potrebe ovog rada se ipak metoda modeliranja spoja kinematskim vezama pokazala isplativijom radi svoje jednostavnosti, brzine i učinkovitosti. Modeliranjem kinematskim vezama se može opisati puno kompleksnija geometrija koje su česte u zrakoplovstvu, kao na primjer spoj uzdužnica i oplata ili spoj oplata te razmatrati ponašanja takvih geometrija, dok bi isti spojevi detaljnom analizom zahtijevali previše računalnih resursa.

Danom usporedbom se može vidjeti da oba modela daju velike faktore sigurnosti, što je dobro ali i nepoželjno u isto vrijeme. Analitičkim proračunom se koriste mnoga pojednostavljenja gdje se zanemaruju određeni utjecaji na spoj, kao što su ekscentricitet uklještenja i opterećenja te moguće savijanje u elementima. Jednako tako se zanemaruje utjecaj kontaktnih sila između zakovica i ploča. Zbog takvih razloga su pretpostavljeni faktori sigurnosti u analitičkom proračunu značajno veći od dobivenih pomoću numeričkih metoda. Za ovakvo opterećenje dobiven je stabilan detaljan model i pregled naprezanja i deformacija, ali ovako veliki faktori sigurnosti mogu značiti dvije stvari. Jedna je da je opterećenje premalo i da je spoj sposoban

podnositi puno veća opterećenja ili da je spoj predimenzioniran za zadano opterećenje, što znači da je konstrukcija pevelike mase, a to je u zrakoplovstvu zaseban problem.

Praksa ukazuje na to da prilikom analize većih modela, kao što su krilo ili trup zrakoplova, nema potrebe uzimati u obzir utjecaj zakovica, jer je njihov utjecaj svakako pokriven globalnim faktorom sigurnosti. Inače, pogotovo u zrakoplovstvu, postupci spajanja i skidanja zakovičnih spojeva strogo su propisani korak po korak od strane proizvođača kako bi se osigurao što bolji standard sigurnosti i pouzdanosti [1].

LITERATURA

- [1] Golub, A.: Diplomski rad, Zagreb, 2018.
- [2] Niu, M.C.Y.: *Airframe Stress Analysis and Sizing*, Conmilit Press Ltd., Hong Kong, 1997.
- [3] <https://www.goebelfasteners.com/general-types-of-rivets-their-applications>, 20.09.2023.
- [4] 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.
- [5] Abaqus Documentation, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2014.
- [6] *Metalic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures MIL-HDBK-5J*, Department of Defense Handbook, Atlantic City, 2003.
- [7] Bišćan, M.: Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2014.