

Numerička analiza prihvata uzorka dvoosne kidalice

Andačić, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:654628>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-30**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ana Andačić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Igor Karšaj, dipl. ing.

Student:

Ana Andačić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Igoru Karšaju na ukazanom povjerenju da radim diplomski rad pod njegovim mentorstvom. Također se zahvaljujem mag. ing. mech. Nini Horvatu na pomoći s eksperimentalnim dijelom rada. Veliko hvala mag. ing. mech. Toniju Škugoru na ukazanoj pomoći, vremenu i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji i dečku na podršci i strpljenju koje su mi pružali tijekom studija.

Ana Andačić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ana Andačić** JMBAG: 0035209378

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza prihvata uzorka dvoosne kidalice**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical analysis of the clamps on a biaxial testing machine**

Opis zadatka:

Dvoosno vlačno ispitivanje omogućuje procjenu mehaničkih svojstava anizotropnih materijala. Posebno je prikladno za određivanje mehaničkih svojstava biomaterijala, zbog njihove usmjerene mikrostrukture. Zbog male veličine uzoraka potrebni su specijalni prihvat koji prenose opterećenje s linearnih aktuatora na uzorak. Budući da ima temeljnu ulogu u prijenosu i raspodjeli opterećenja, sustav prihvata mora biti pažljivo dizajniran. Stezne čeljusti su jedan od najčešće korištenih sustava prihvata kod takvih uređaja. Glavni problem vezan uz stezne čeljusti je nisko trenje na mjestu kontakta s uzorkom koje može utjecati na klizanje uzorka te posljedično na pogrešna mjerenja tijekom dvoosnog vlačnog ispitivanja. Osim toga, stezne čeljusti se montiraju direktno na senzore sila pa i njihova težina može imati utjecaj na rezultate mjerenja.

U okviru ovog rada potrebno je:

- numerički analizirati čvrstoću i krutost steznih čeljusti korištenjem metode konačnih elemenata,
- odrediti raspon faktora trenja kako bi se pravilno mogao provesti eksperiment,
- odrediti silu pritezanja steznih čeljusti u ovisnosti o faktoru trenja između prihvata čeljusti i ispitnog uzorka,
- analizirati utjecaj sile pritezanja na homogenost polja naprezanja uzorka.

Dodatne informacije dostupne su prema potrebi.

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

Zadatak zadan:

5. svibnja 2022.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Igor Karšaj

Datum predaje rada:

7. srpnja 2022.

Predvideni datumi obrane:

18. – 22. srpnja 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. DVOOSNO VLAČNO ISPITIVANJE MATERIJALA	2
3. UREĐAJI ZA VLAČNO ISPITIVANJE MATERIJALA	3
3.1. Prihvati	4
3.1.1. Čeljusti (eng. Clamps)	5
3.1.2. Kukice (eng. Hooks)	5
3.1.3. Zupci (eng. Rakes).....	5
3.2. Postojeća rješenja dvoosnih kidalica	6
3.2.1. Zwick Roell dvoosne kidalice	6
3.2.2. ADMET eXpert 8000 ravninska dvoosna kidalica	8
3.2.3. ElectroForce dvoosna kidalica	9
3.2.4. CellScale dvoosna kidalica.....	10
4. MEHANIKA I KINEMATIKA KONTINUUMA.....	11
4.1. Tenzor gradijenta deformiranja	12
4.2. Tenzori deformiranosti i tenzori deformacije	13
4.3. Tenzori naprezanja	13
4.4. Hiperelastični materijalni model	14
4.4.1. Analitičko rješenje za primjer dvoosnog razvlačenja	15
5. METODA KONAČNIH ELEMENATA	17
5.1. Osnovni konačni elementi	17
5.2. Modeliranje kontakta u <i>Abaqus</i> -u [9], [10].....	19
6. IZRAČUN SILE PRITEZANJA I MOMENTA PRITEZANJA	22
7. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE FAKTORA TRENJA.....	24
7.1. Opis eksperimenta	25
7.2. Rezultati eksperimenta	26
8. NUMERIČKA ANALIZA STEZNE ČELJUSTI.....	28
9. UTJECAJ SILE PRITEZANJA NA HOMOGENOST POLJA NAPREZANJA UZORKA	38
9.1. Usporedba analitičkog i numeričkog rezultata za validaciju modela	43

9.2.	Teorijski i realni slučaj	45
9.3.	Analiza TBP uzorka	46
9.4.	Analiza FLX9840 DM uzorka	47
9.5.	Analiza FLX9850 DM uzorka	49
9.6.	Analiza FLX9860 DM uzorka	50
9.7.	Analiza FLX9870 DM uzorka	51
9.8.	Sile i momenti pritezanja	52
ZAKLJUČAK		53
LITERATURA.....		55

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz dvoosnog opterećenja uzorka	2
Slika 2. Jednoosna vlačna kidalica [2]	3
Slika 3. Pozitivan i ne-pozitivan prihvat kidalice [1]	4
Slika 4. Vrste prihvata: a) zupci, b) kukice, c) čeljusti [3]	5
Slika 5. <i>Zwick Roell</i> kidalica – maksimalno opterećenje 2 kN [2]	6
Slika 6. <i>Zwick Roell</i> kidalica – maksimalno opterećenje 50 kN [2]	7
Slika 7. <i>Zwick Roell</i> kidalice s maksimalnim opterećenjem do 150 kN (lijevo) i 250 kN (desno) [2]	7
Slika 8. <i>Zwick Roell</i> kidalica za biomaterijale [2]	8
Slika 9. <i>ADMET</i> dvoosna kidalica – prihvat za kukice [3]	8
Slika 10. <i>ADMET</i> dvoosna kidalica – čeljusti [3]	9
Slika 11. <i>ElectroForce</i> kidalica s dva motora (lijevo) i četiri motora (desno) [4]	9
Slika 12. <i>CellScale</i> dvoosna kidalica [5]	10
Slika 13. Deformiranje tijela iz početne u trenutnu konfiguraciju [7]	11
Slika 14. Heksaedarski konačni element	18
Slika 15. <i>Wedge</i> konačni element	18
Slika 16. Diskretizacija čvor-površina [10]	20
Slika 17. Usporedba diskretizacije čvor-površina i površina-površina [9]	21
Slika 18. Načini praćenja kontaktne interakcije (konačno/kratko klizanje) [10]	21
Slika 19. Blok težine G na kosini oslobođen veza	24
Slika 20. Dijelovi za izvođenje eksperimenta	25
Slika 21. Položaj pločica neposredno prije početka klizanja	26
Slika 22. Dijelovi prihvata uzorka	28
Slika 23. Dio 1: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (3374 konačna elementa)	29
Slika 24. Dio 2: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (5950 konačnih elemenata)	29
Slika 25. Dio 3: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (168 konačnih elemenata)	30
Slika 26. Dio 4: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (1656 konačnih elemenata)	30
Slika 27. Dijelovi 5 i 6: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (392 konačna elementa)	30
Slika 28. Mreža konačnih elemenata stezne čeljusti	31
Slika 29. Primjer kreiranja kontakta između dva dijela	31
Slika 30. Kontakt između dijelova 1 i 2 (lijevo) te 1 i 4 (desno)	32
Slika 31. Kontakt između dijelova 1 i 3 (lijevo) te 3 i 4 (desno)	32
Slika 32. Ograničenje Tie između dijelova 2 i 4	33
Slika 33. Ograničenje Tie između dijelova 1 i 5 te 2 i 6	33
Slika 34. Rubni uvjet pomaka - uklještenje	34
Slika 35. Opterećenje pritiskom na čeljust	34
Slika 36. Kreiranje referentnih točaka	35
Slika 37. <i>Coupling – Kinematic</i> ograničenje	35
Slika 38. Definiranje sila trenja	36
Slika 39. Raspodjela ukupnog naprezanja čeljusti	36
Slika 40. Maksimalno naprezanje čeljusti	37
Slika 41. Raspodjela ukupnog pomaka čeljusti	37
Slika 42. Dvoosno vlačno ispitivanje uzorka	38
Slika 43. Primjer definiranja hiperelastičnog materijala	38
Slika 44. Podjela geometrije uzorka s ciljem izrade kvalitetne mreže	39
Slika 45. Mreža heksaedarskih konačnih elemenata	39
Slika 46. Postavljanje rubnog uvjeta simetrije u odnosu na os x	40
Slika 47. Rubni uvjeti simetrije uzorka	40

Slika 48. Aktivnost opterećenja u pojedinom <i>Step</i> -u	41
Slika 49. Definiranje pritiska na uzorak.....	41
Slika 50. Definiranje opterećenja u smjeru osi x i y	42
Slika 51. Definiranje opterećenja u obliku pomaka	43
Slika 52. Vodeći čvorovi u smjeru osi x i y	44
Slika 53. Prateći čvorovi u smjeru osi x i y.....	44
Slika 54. Prateći čvorovi u smjeru osi x i y – realni slučaj	45
Slika 55. Raspodjela naprezanja na TBP uzorak u teorijskom slučaju	46
Slika 56. Raspodjela naprezanja u TBP uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja	46
Slika 57. Raspodjela naprezanja u TBP uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska	47
Slika 58. Raspodjela naprezanja na FLX9840 DM uzorak u teorijskom slučaju	48
Slika 59. Raspodjela naprezanja u FLX9840 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja	48
Slika 60. Raspodjela naprezanja u FLX9840 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska	48
Slika 61. Raspodjela naprezanja na FLX9850 DM uzorak u teorijskom slučaju	49
Slika 62. Raspodjela naprezanja u FLX9850 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja	49
Slika 63. Raspodjela naprezanja u FLX9850 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska	49
Slika 64. Raspodjela naprezanja na FLX9860 DM uzorak u teorijskom slučaju	50
Slika 65. Raspodjela naprezanja u FLX9860 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja	50
Slika 66. Raspodjela naprezanja u FLX9860 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska	50
Slika 67. Raspodjela naprezanja na FLX9870 DM uzorak u teorijskom slučaju	51
Slika 68. Raspodjela naprezanja u FLX9870 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja	51
Slika 69. Raspodjela naprezanja u FLX9870 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti izmjerenih kutova za pojedini materijal	26
Tablica 2. Vrijednosti izračunatih faktora trenja za pojedini materijal.....	26
Tablica 3. Srednje vrijednosti faktora trenja za pojedini materijal i standardna devijacija.....	27
Tablica 4. Karakteristike materijala dijelova čeljusti	28
Tablica 5. Vrijednosti naprezanja izračunatih analitičkim putem	43
Tablica 6. Vrijednosti naprezanja izračunatih numeričkim putem	44
Tablica 7. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal TBP pri teorijskom ispitivanju uzorka	46
Tablica 8. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal FLX9840 DM pri teorijskom ispitivanju uzorka	47
Tablica 9. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal FLX9850 DM pri teorijskom ispitivanju uzorka	49
Tablica 10. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal FLX9860 DM pri teorijskom ispitivanju uzorka	50
Tablica 11. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal FLX9870 DM pri teorijskom ispitivanju uzorka	51
Tablica 12. Tražene vrijednosti za pojedini materijal.....	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
b	Lijevi Cauchy – Greenov tenzor deformiranosti
C	Desni Cauchy – Greenov tenzor deformiranosti
C_1	Materijalna konstanta u NeoHooke materijalnom modelu
d_2	Srednji promjer navoja
e	Eulerov tenzor deformacije
E	Lagrangeov tenzor deformacije
F	Tenzor gradijenta deformiranja
F_N	Normalna sila na podlogu
F_p	Sila pritezanja vijka
F_{TR}	Sila trenja na podlozi
F_v	Osna sila u vijku
G	Težina bloka
I	Jedinična matrica
J	Jakobijan
l_0	Početna dimenzija uzorka
l_k	Konačna dimenzija uzorka
p	Hidrostatski tlak
P_h	Uspun navoja
P	Prvi Piola – Kirchhoffov tenzor naprezanja
R	Tenzor zakreta
R_e	Granica razvlačenja materijala
S	Drugi Piola – Kirchhoffov tenzor naprezanja
T_p	Moment pritezanja vijka
u	Vektor pomaka materijalne čestice
W	Funkcija energije deformiranja
x	Vektor položaja u trenutnoj konfiguraciji
X	Vektor položaja u referentnoj konfiguraciji
α	Kut kosine, kut uspona navoja
β	Referentna konfiguracija, kut profila navoja
β_0	Trenutna konfiguracija
λ	Faktor produljenja
μ	Faktor trenja
ρ'	Korigirani kut trenja
σ_{\max}	Maksimalno naprezanje materijala
σ	Cauchyev tenzor naprezanja
σ_{dev}	Devijatorsko naprezanje
σ_s	Sferno naprezanje

SAŽETAK

Za procjenu mehaničkih svojstava anizotropnih materijala potrebno je koristiti dvoosno vlačno ispitivanje prilikom kojeg se mjere podaci o naprezanju i deformacijama u dva smjera. Dvoosno vlačno ispitivanje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice. U praksi se ova vrsta ispitivanja najčešće koristi za ispitivanje svojstava biomaterijala, poput arterijskog tkiva, ili za ispitivanje različitih kompozitnih materijala. S obzirom da su uzorci biomaterijala jako malih dimezija, treba obratiti pozornost na odabir vrste prihvata uzorka s ciljem ostvarenja što veće homogenosti polja naprezanja i deformacije. Najčešće se koristi prihvat u obliku steznih čeljusti čiji se kontakt s uzorkom zasniva na faktoru trenja.

U ovom radu je eksperimentalno određeno pet faktora trenja na dodiru čeljusti i pet različitih vrsta uzoraka. Uz poznatu maksimalnu silu razvlačenja i faktor trenja, određena je vrijednost normalne sile koja se koristila kao ulazni podatak za numeričku simulaciju koja se provodila pomoću metode konačnih elemenata. Cilj ove simulacije je bio provjeriti čvrstoću i krutost stezne čeljusti prilikom maksimalnog opterećenja.

Također, prikazana je numerička analiza pet različitih hiperelastičnih materijala u teorijskom i realnom slučaju. U teorijskom slučaju uzorak je opterećen samo vlačnim silama, dok je u realnom slučaju u obzir uzeto i djelovanje sile pritezanja stezne čeljusti te dodirna površina između uzorka i čeljusti. Cilj ove simulacije je bio analizirati utjecaj sile pritezanja na homogenost polja naprezanja te odrediti približno potreban moment pritezanja. Ako je moment pritezanja prevelik, uzorak se nepotrebno deformira pri postavljanju na uređaj i povećava se koncentracija naprezanja. S druge strane, ako je moment pritezanja premali, uzorak tijekom eksperimenta može iskliznuti i eksperiment je tad neuspješan.

Za izradu modela korišten je programski paket *SolidWorks*, dok su numeričke analize provedene u programskom paketu *Abaqus*.

Ključne riječi: dvoosno vlačno ispitivanje, metoda konačnih elemenata, stezne čeljusti, hiperelastični materijal, moment pritezanja.

SUMMARY

To evaluate the mechanical properties of anisotropic materials it is necessary to use biaxial testing test during which data on stress and deformations are measured in two directions. Biaxial tensile testing is performed on devices called tensile testing machines. In practice, this type of testing is most often used to test the properties of biomaterials such as arterial tissue or to test different composite materials. Since the samples of biomaterials are small in size, we should pay attention to the choice of the type of sample acceptance with the aim of achieving greater homogeneity of the stress and deformation field. The most commonly used sample acceptance is in the form of clamping jaws whose contact with the specimen is based on the coefficient of friction.

In this paper, five coefficients of friction at contact between clamping jaws and five different types of samples were experimentally determined. With the known maximum stretching force and coefficient of friction, the value of normal force was determined which was used as input data for the numerical simulation, which was carried out using finite element method. The aim of this simulation was to verify the strength and stiffness of the clamping jaws during maximum load.

Also, a numerical analysis of five different hyperelastic materials in theoretical and real case is presented. In the theoretical case, the sample is loaded only by tensile forces, while in the real case, the action of force of tightening the clamping jaws is also taken into account. The aim of this simulation was to analyze the influence of the tightening force on the homogeneity of the stress field and to determine the approximately required tightening torque. If the tightening torque is too high, the sample is unnecessarily deformed when placed on the device and the stress concentration increases. On the other hand, if the tightening torque is too small, the sample may slip during the experiment and the experiment is then unsuccessful.

The *SolidWorks* software package was used to create the model, while numerical analyzes were performed in the *Abaqus* software package.

Key words: biaxial tensile testing, finite element method, clamping jaws, hyperelastic material, tightening torque.

1. UVOD

Mehanička svojstva materijala ovise o strukturnom stanju materijala. U slučaju idealnih tvari, poznata je veza između mikrostrukture i mehaničkih svojstava, pa je stoga moguće unaprijed proračunati mehanička svojstva uz korištenje određenih strukturnih parametara. Međutim, to nije slučaj kod realnih materijala. Za utvrđivanje mehaničkih svojstava realnih materijala potrebno je izvršiti eksperimentalna ispitivanja. Ispitivanje koje se najčešće provodi je jednoosno statičko vlačno ispitivanje izotropnih materijala i ono se vrši na uređajima koji se nazivaju kidalice. Na kidalicama se uzorak pridržava pomoću prihvata te se kontinuirano opterećuje kvazistatičkom silom najčešće do loma uzorka, a pri tome se promatra elastično i plastično ponašanje materijala.

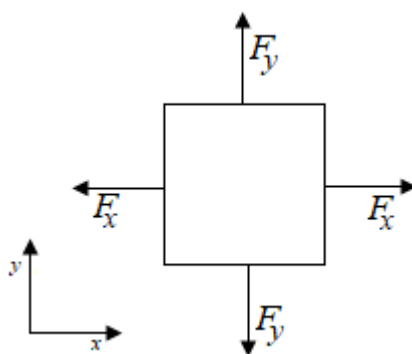
Kako anizotropni materijali imaju različita svojstva u različitim smjerovima, za procjenu njihovih mehaničkih svojstava se koristi dvoosno vlačno ispitivanje. Primjer anizotropnih materijala su biomaterijali (arterijska i druga meka tkiva) i kompozitni materijali. Kako su dimenzije uzoraka biomaterijala jako male, potrebni su prihvat koji prenose opterećenje s linearnih aktuatora na uzorak. S obzirom da sustav prihvata ima glavnu ulogu u prijenosu i raspodjeli opterećenja, isti mora biti pažljivo konstruiran. Najčešće korišten sustav prihvata kod uređaja za dvoosno vlačno ispitivanje su stezne čeljusti, gdje je prilikom ispitivanja biomaterijala glavni problem nisko trenje na mjestu kontakta s uzorkom. Takvo nisko trenje može utjecati na klizanje uzorka te posljedično na pogrešna mjerenja tijekom dvoosnog vlačnog ispitivanja. Osim toga, stezne čeljusti se montiraju direktno na senzore sila, pa i njihova težina može imati utjecaj na rezultate mjerenja.

Cilj ovog rada podijeljen je na tri dijela:

- Eksperimentalno odrediti faktor trenja između ispitivanog uzorka i čeljusti.
- Analizirati čvrstoću i krutost stezne čeljusti uz poznatu maksimalnu silu razvlačenja i faktor trenja.
- Analizirati utjecaj sile pritezanja na homogenost polja naprezanja uzorka te odrediti približan moment pritezanja čeljusti.

2. DVOOSNO VLAČNO ISPITIVANJE MATERIJALA

Dvoosno vlačno ispitivanje je vrsta statičkog vlačnog ispitivanja materijala. Statičko vlačno ispitivanje materijala je jedno od najčešće korištenih ispitivanja mehaničkih svojstava materijala, a ubraja se u skupinu razornih metoda ispitivanja. Ovom vrstom ispitivanja se određuju osnovna mehanička svojstva materijala kao što su: granica razvlačenja (R_e), vlačna čvrstoća (R_m), istezljivost (ε) i modul elastičnosti (E) [1]. Na kidalicama se ispitni uzorak (eproveta) kontinuirano vlačno opterećuje sve dok ne dođe do loma epruvete, a brzine ispitivanja su dovoljno male da masa uzorka nema utjecaj (kvazistatičko ispitivanje). Najčešće se rade jednoosna vlačna ispitivanja, ali kod biomaterijala je potrebno izvršiti dvoosno ispitivanje kako bi se odredila njihova karakteristična svojstva koja su različita u različitim smjerovima. Shematski prikaz dvoosnog vlačnog testa dan je slikom 1.



Slika 1. Shematski prikaz dvoosnog opterećenja uzorka

Vlačne sile djeluju na četiri područja okomita na gledanu površinu, a dijeljenjem pojedine sile s pripadajućom površinom se dobiju naprezanja na određenim površinama. Sile proizvode linearni aktuatori, a prihvatni uzoraka se dizajniraju tako da se te sile što ravnomjernije rasporede po stranicama uzorka.

Za razliku od jednoosnih opterećenja, prilikom dvoosnih opterećenja je teže izračunati naprezanja koja se javljaju u uzorku. Također, jedan od najvećih problema dvoosnog ispitivanja je odrediti u kojem trenutku se uzorak počinje plastično ponašati, kao i pojava asimetrije uzorka zbog koje prilikom dvoosnog opterećenja ne vrijede izrazi izvedeni za elastično područje [1]. S obzirom na pojavu velikih deformacija pri dvoosnom vlačnom ispitivanju materijala korištenih u ovom radu, koriste se hiperelastični materijalni modeli.

3. UREĐAJI ZA VLAČNO ISPITIVANJE MATERIJALA

Uređaji za vlačno ispitivanje materijala, tj. kidalice, sastoje se od: postolja, mehanizma za opterećivanje, uređaja za mjerenje sile i uređaja za očitavanje. Kidalice su se dosta razvile od početka njihove primjene. U početku su bile mehaničke, a danas su dosta složenije, kao što su elektromehaničke i hidrauličke. Najveći napredak kidalica se dogodio u pogledu točnosti mjernog sustava i regulacije brzine opterećivanja.

Pogonski mehanizam kidalice je smješten u postolje. Od postolja se zahtijeva da osigura dovoljan radni prostor za rukovanje ispitnim uzorkom te da podnese opterećenja sukladna s potrebama pogonskog sustava. Osim toga, bitno svojstvo postolja je da posjeduje jako veliku krutost koja može biti aksijalna, poprečna i torzijska. Što je postolje kruće, to se više smanjuje mogućnost pojave deformacija, a to na kraju rezultira boljom točnosti u mjerenju. Što se tiče mehanizma za opterećivanje uzorka, on se odabire prema konstrukcijskim zahtjevima i maksimalnoj sili, a može biti mehanički, pneumatski, hidraulički, električni ili kombinacija navedenih [1].

Zahtjevi koji se postavljaju na današnje kidalice su: jednostavna izrada, mala masa, visoka čvrstoća i krutost, pravilno prenošenje opterećenja na ispitni uzorak, pravilno očitavanje iznosa opterećenja u svakom trenutku, konstantno mirno opterećenje bez udara te jednostavan prihvat [1]. Na slici 2 je prikazan izgled jednoosne vlačne kidalice.



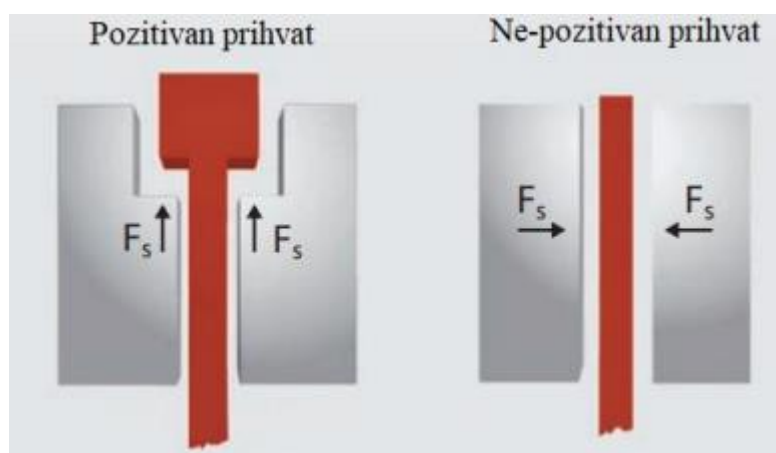
Slika 2. Jednoosna vlačna kidalica [2]

Što se tiče dvoosnih vlačnih kidalica, s obzirom da se one većinom koriste za ispitivanja biomaterijala, jako je bitno obratiti pozornost na način prihvata uzorka.

3.1. Prihvati

Prihvati su mehanička veza između ispitnog uzorka i kidalice. Njihova glavna uloga je prenijeti pomak s aktuatora na uzorak te javiti senzoru primijenjeno opterećenje na uzorak. Najveći problem prihvata je prihvatiti osjetljive uzorke bez da dođe do njihova oštećenja.

Prilikom odabira prihvata, treba provjeriti određene uvjete. S obzirom na tvrdoću, čvrstoću, duktilnost i elastična svojstva uzorka, bira se određeni oblik i dimenzije prihvata te odgovarajući doseg sila i deformacija. Ovisno o obliku uzorka i načinu prenošenja opterećenja na uzorak, prihvati mogu biti pozitivni i ne-pozitivni. Kod pozitivnog prihvata, sila se prenosi oblikom, a kod ne-pozitivnog, sila prihvata djeluje okomito na os prihvata [1]. Na slici 3 su prikazani pozitivni i ne-pozitivni prihvat kidalice, gdje je F_s sila prihvata.

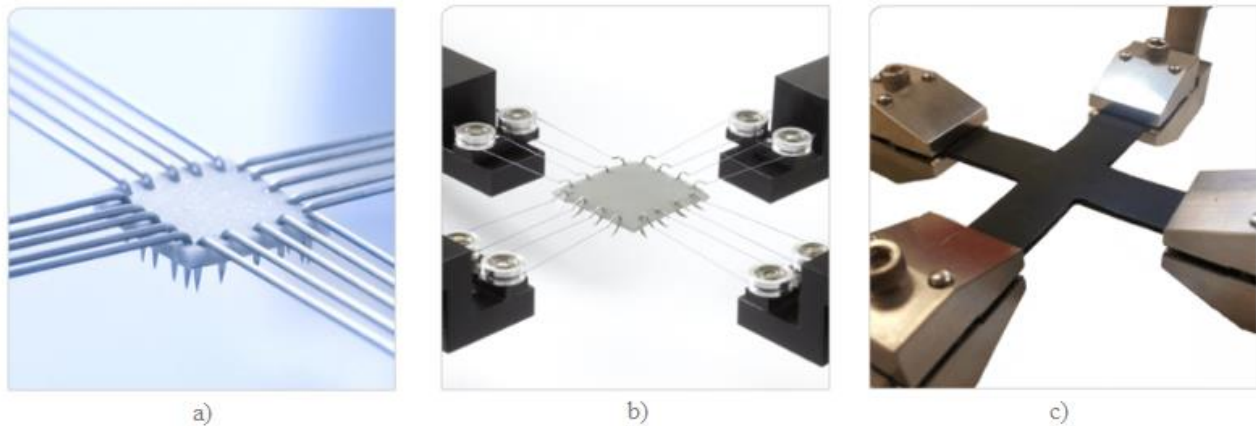


Slika 3. Pozitivan i ne-pozitivan prihvat kidalice [1]

U slučaju izvođenja velikog broja podjednakih ispitivanja, poželjno je koristiti automatsku primjenu sile prihvata (pneumatski i hidraulični prihvat), a ukoliko je potrebno provoditi više različitih ispitivanja, prihvat mora biti lako zamjenjiv. Također, jako je bitno ne preopteretiti prihvat jer to dovodi do oštećenja samog prihvata, ali i do oštećenja ispitnog uzorka [1].

Jedan od najčešćih problema koji se javlja kod prihvata prilikom vlačnog ispitivanja je proklizavanje uzorka s površina prihvata. To se događa zbog premale sile prihvata i premale površine zahvata. Sljedeći problem koji nastaje je lomljenje uzorka na površinama prihvata, a uzrok tome je prejak sila pritezanja. Također, zbog nestandardnog oblika i dimenzija prihvata može doći do nemogućnosti čvrstog zahvata uzorka.

S obzirom da se radi o dvoosnom ispitivanju biomaterijala, najpogodniji oblici prihvata su: čeljusti, kukice i zupci, a prikazani su na slici 4.



Slika 4. Vrste prihvata: a) zupci, b) kukice, c) čeljusti [3]

3.1.1. Čeljusti (eng. Clamps)

Čeljusti su vrste prihvata koje su idealne za jednoosna ispitivanja. Kod jednoosnog ispitivanja biomaterijala, uzorak će se istegnuti duž osi na kojoj djeluje vlačno opterećenje, dok će se na obje okomite osi uzorak sužiti. Prilikom dvoosnog vlačnog ispitivanja, uvode se dodatne dvije čeljusti koje onemogućavaju sužavanje uzorka u jednoj osi i na taj način sprječavaju produljenje u osi okomitoj na prvobitnu os. To utječe na raspodjelu opterećenja unutar uzorka i uzrokuje promjenu fizikalnih svojstava. Zbog toga se uvodi križni oblik uzorka koji omogućuje veće kretanje unutar uzorka jer čeljusti prihvaćaju krakove, a opterećenje se raspoređuje na centralno područje uzorka. S obzirom da je za biomaterijale teško dobiti križni oblik, prihvat u obliku čeljusti nije u potpunosti prikladan za dvoosno vlačno ispitivanje [1]. Međutim, prednost čeljusti kao prihvata je velika površina kontakta između čeljusti i uzorka.

3.1.2. Kukice (eng. Hooks)

Kukice su vrsta prihvata koji djeluju na način da se uzorak pričvrsti pomoću šavova preko kukica sa svake strane uzorka te da se vezivanjem šavova oko kolotura osigurava jednaka napetost u cijelom uzorku. Ovakav način prihvata osigurava ujednačeno opterećenje na cijelom uzorku te tako onemogućava kontralateralno gibanje i rotaciju uzorka. S obzirom na anizotropiju biomaterijala, prilikom ispitivanja može doći do smicanja ili geometrijskog pomaka unutar uzorka. Jedan od problema koji se javlja prilikom korištenja ovakve vrste prihvata je taj da nisu osigurani jednaki pomaci uzorka. Zatim, jako je zahtjevno postaviti kukice na jednak razmak od rubova i drugih kukica [1]. Također, zbog probijanja uzorka, na mjestima probijanja dolazi do koncentracije naprezanja što dovodi do bržeg pucanja uzorka.

3.1.3. Zupci (eng. Rakes)

Princip prihvata zupcima je sličan kao kod kukica, a razlika je u tome što su zupci fiksirani na zajedničku podlogu. Povećanjem broja zubaca i povećanjem širine između zubaca osigurana je bolja

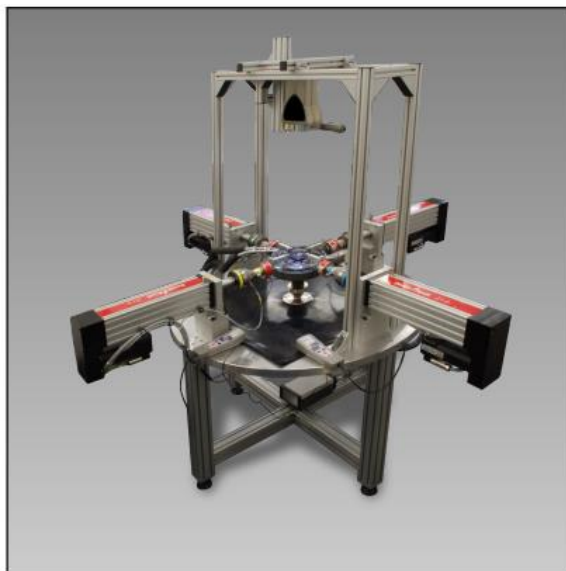
kvaliteta dvoosnog ispitivanja jer je ravnomjernija raspodjela sile po rubu uzorka. Zahtjev je da unutarnji zupci trebaju biti što udaljeniji jedan od drugog, dok vanjski zupci trebaju biti što bliži. Fiksnim razmakom između zubaca osigurana je jednolika raspodjela opterećenja uzorka, kao i jednostavnije određivanje mjesta probijanja uzorka. S obzirom na to da su zupci fiksni i kruti, oni onemogućavaju slobodno gibanje uzorka i na taj način sprječavaju anizotropan odgovor uzorka na opterećenje. Zbog toga zupci nisu prikladni za ispitivanja u slučaju velikih deformacija koje su karakteristične za anizotropne materijale, odnosno biomaterijale [1]. Također, može doći do koncentracije naprezanja na mjestima probijanja uzorka.

3.2. Postojeća rješenja dvoosnih kidalica

3.2.1. Zwick Roell dvoosne kidalice

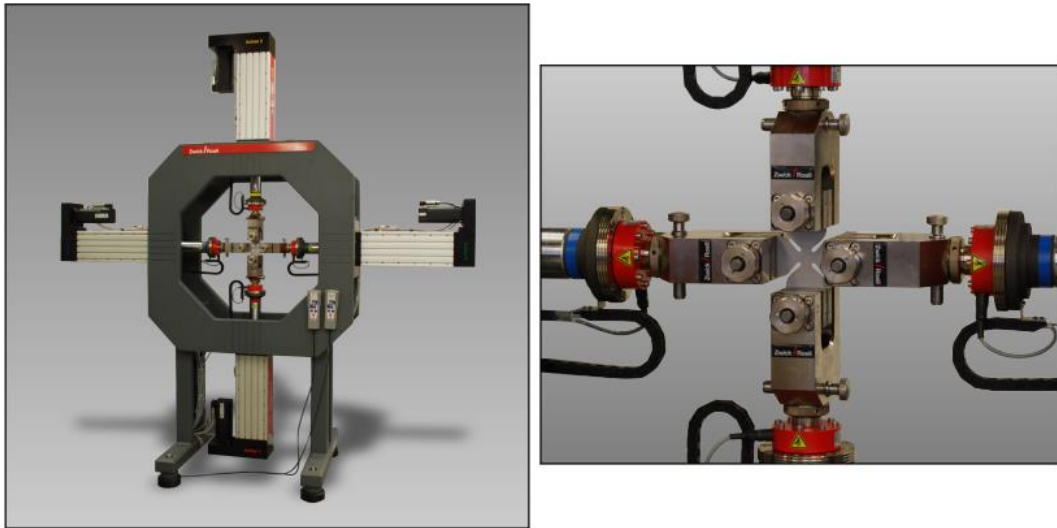
Postoji više standardiziranih oblika dvoosnih kidalica proizvođača *Zwick Roell*.

Prvi oblik kidalice je kidalica za niska opterećenja s četiri horizontalna linearna aktuatora za jednoosna i dvoosna ispitivanja prirodnih i umjetnih elastičnih tkiva, do maksimalnog opterećenja od 2 kN. Druga vrsta je dvoosna kidalica s horizontalnim elektromehaničkim aktuatorima za jednoosna i dvoosna vlačna ispitivanja na folijama, papiru, elastomerima i biomaterijalima s maksimalnim opterećenjem do 2 kN [2], a prikazana je na slici 5.



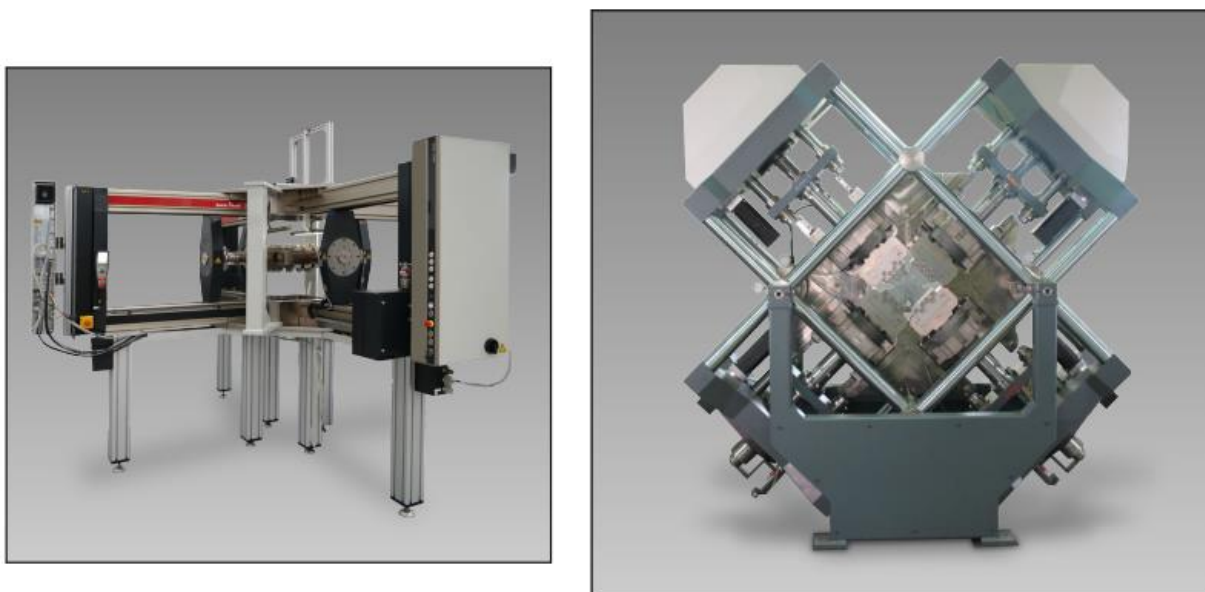
Slika 5. *Zwick Roell* kidalica – maksimalno opterećenje 2 kN [2]

Sljedeća vrsta *Zwick Roell*-ove kidalice je dvoosna kidalica koja ima vertikalne elektromehaničke aktuatore, a koristi se za jednoosna i dvoosna ispitivanja na limovima, elastomerima i plastici, s maksimalnim opterećenjem do 50 kN. Prikaz ove kidalice je dan na slici 6.



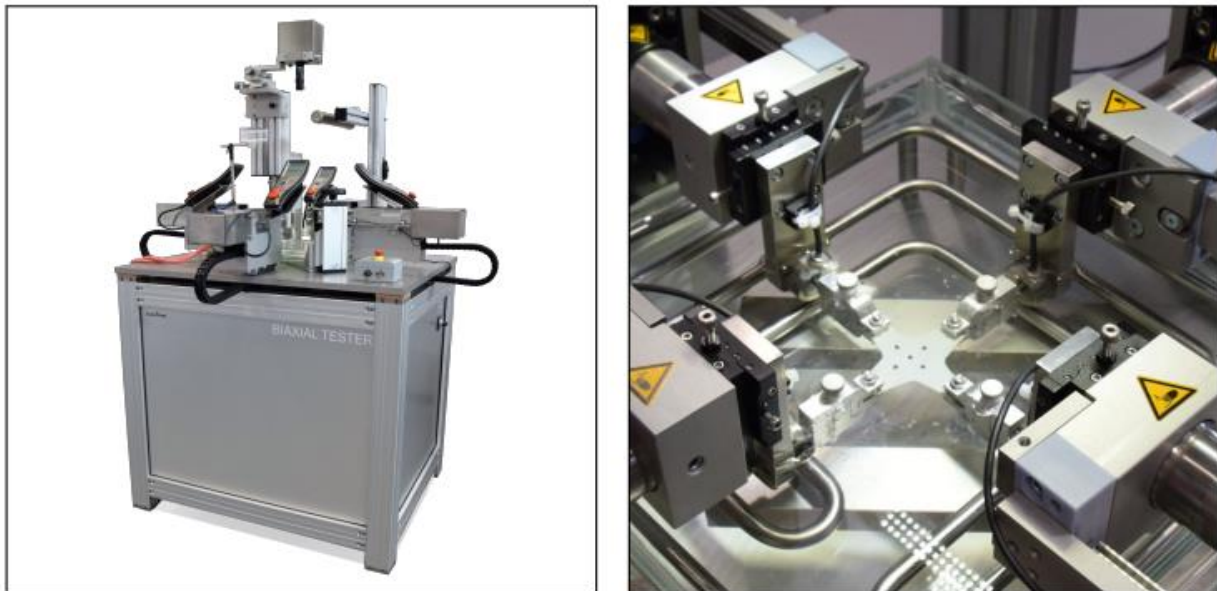
Slika 6. Zwick Roell kidalica – maksimalno opterećenje 50 kN [2]

Kidalica s maksimalnim opterećenjem od 150 kN također se može koristiti i za jednoosna i za dvoosna ispitivanja na limovima, elastomerima i plastici, dok se kidalica s maksimalnim opterećenjem od 250 kN koristi samo za ispitivanja na limovima. Prikazi ovih dviju vrsta kidalica su dani na slici 7.



Slika 7. Zwick Roell kidalice s maksimalnim opterećenjem do 150 kN (lijevo) i 250 kN (desno) [2]

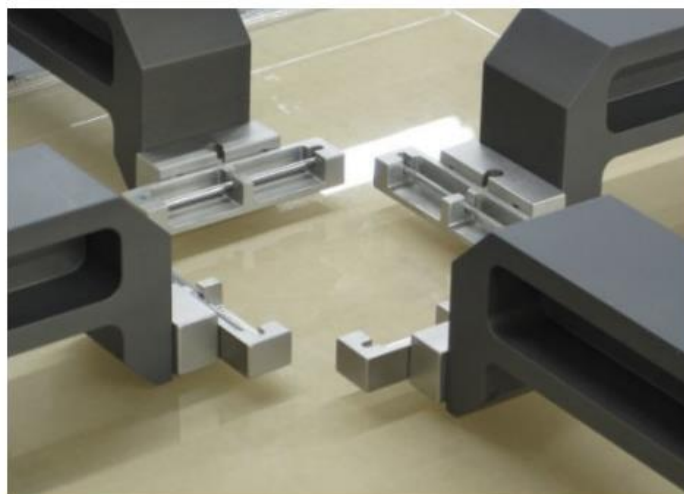
Oblik kidalice koji je konstruiran isključivo za ispitivanje biomaterijala koristi četiri linearna aktuatora i posudu ispunjenu vodom ili fiziološkom otopinom za osiguranje željene okoline za ispitivanje uzroka. Maksimalno opterećenje ove kidalice je 200 N, korištena vrsta prihвата su čeljusti, a kidalica je prikazana na slici 8.



Slika 8. Zwick Roell kidalica za biomaterijale [2]

3.2.2. ADMET eXpert 8000 ravninska dvoosna kidalica

Ova kidalica je idealna za mjerenje mehaničkog odziva biomaterijala. Sastoji se od dva okomita aktuatora koji se mogu gibati ili neovisno jedan o drugome ili koordinirano. Ima mogućnost korištenja i izmjene više prihвата, a oblici uzoraka mogu biti kvadratni, križni i modifikacije križnog oblika [3]. S obzirom da je biomaterijale teško oblikovati kao križni uzorak, za ispitivanje kvadratnih uzoraka biomaterijala koriste se zupci i prihvat za kukice kao što je prikazano na slici 9.



Slika 9. ADMET dvoosna kidalica – prihvat za kukice [3]

Uzorci se mogu testirati na zraku, na sobnoj ili povišenoj temperaturi, a može se osigurati i posuda napunjena vodom ili fiziološkom otopinom, topla ili hladna, ovisno o željenoj okolini u kojoj želimo ispitivati uzorak. Pri ispitivanju drugih vrsta materijala (elastomeri, kompoziti) koriste se križni uzorci [3], a kao prihvat se koriste čeljusti, što je prikazano na slici 10.



Slika 10. *ADMET* dvoosna kidalica – čeljusti [3]

Maksimalno opterećenje *ADMET*-ovih dvoosnih kidalica je do 5 kN.

3.2.3. *ElectroForce* dvoosna kidalica

Ova kidalica se može prilagoditi određenim potrebama istraživanja. Osnovnu horizontalnu ploču je moguće nadograditi s dva ili četiri linearna motora, dodacima kao što su čeljusti, posude napunjene vodom ili fiziološkom otopinom, sterilna komora i dodatni aktuatori za ispitivanja udara i torzije. Maksimalno statičko opterećenje ove kidalice je 140 N [4].

Slika 11 prikazuje *ElectroForce* kidalicu s dva motora (lijevo) i kidalicu s četiri motora i ispunjenom posudom (desno).



Slika 11. *ElectroForce* kidalica s dva motora (lijevo) i četiri motora (desno) [4]

3.2.4. CellScale dvoosna kidalica



Slika 12. CellScale dvoosna kidalica [5]

CellScale kidalica se sastoji od četiri aktuatora i integrirane posude za kontroliranje temperature. Mogu se koristiti različiti načini prihvata uzorka (čeljusti, kukice i zupci).

Prihvat pomoću zubaca se sastoji od 20 (4 x 5) fiksiranih zubaca koji su elektrokemijski naoštreni kako bi se što lakše probio ispitni uzorak. Slično kao zupci, prihvat kukicama i koloturama se sastoji od 16 (4 x 4) kuka, gdje su na svaku od 8 kolotura povezane po dvije kuke. Kod sljedeće vrste prihvata, prihvat pomoću čeljusti, nema probijanja uzorka nego se postavljanje uzorka odvija stezanjem čeljusti na uzorak [5].

CellScale kidalica se koristi za uzorke veličine od 3 do 15 mm, a maksimalno opterećenje je 200 N.

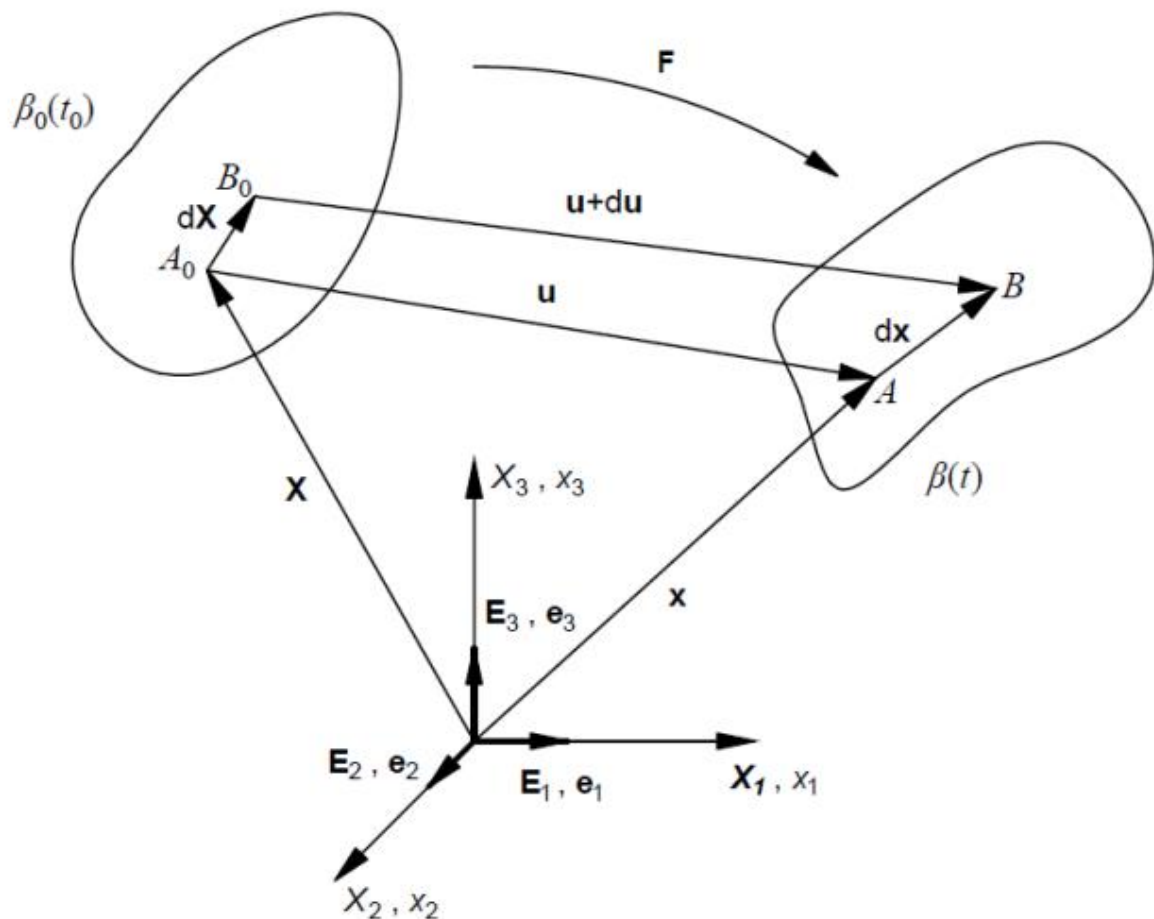
4. MEHANIKA I KINEMATIKA KONTINUUMA

Kako bismo opisali ponašanje materijala uzorka prilikom simulacije utjecaja sile pritezanja na homogenost polja naprezanja, potrebno je prikazati teorijske osnove mehanike kontinuuma.

Mehanika kontinuuma je dio mehanike koji proučava makroskopsko gibanje čvrstih, tekućih i plinovitih tvari [6]. Dio mehanike kontinuuma u kojem se obrađuju pomak, brzina, ubrzanje i deformacije naziva se kinematika kontinuuma.

Kinematika kontinuuma je dio mehanike u kojem se proučava gibanje tijela, a ne vodi se računa o uzrocima gibanja. Materijalno tijelo je dio prostora, odnosno kontinuuma određenog volumena, koji je od ostatka kontinuuma odvojen plohom koja ga omeđuje, a masu mu daje materija kojom je tijelo ispunjeno. Materijalno tijelo se sastoji od čestica za koje su karakteristični volumen dV i masa dm .

Na slici 13 je prikazan proces deformiranja materijalnog tijela.



Slika 13. Deformiranje tijela iz početne u trenutnu konfiguraciju [7]

Do promjene oblika, položaja i veličine materijalnog tijela dolazi zbog djelovanja opterećenja na tijelo. Kako bi se opisalo gibanje tijela u određenom trenutku t , prati se njegova trenutna konfiguracija $\beta(t)$ u odnosu na referentnu konfiguraciju $\beta_0(t_0)$ u trenutku t_0 , pri čemu se položaj čestica koje se nalaze unutar promatranog tijela opisuje s tri koordinate. Takav pristup gibanju se naziva Lagrangeov opis gibanja.

Tijekom promatranja deformiranja krutih deformabilnih tijela, nedeformirani oblik tijela se uzima kao početna (referentna) konfiguracija i prikazuje se u tzv. materijalnim koordinatama. Vektor početnog položaja za neku česticu unutar materijalnog tijela se definira uz pomoć triju koordinata X_1 , X_2 i X_3 u materijalnom koordinatnom sustavu, jediničnim vektorima \mathbf{E}_1 , \mathbf{E}_2 i \mathbf{E}_3 i vezan je za početni trenutak t_0 .

Deformiranjem tijela čestice prelaze u novi položaj koji se definira pomoću vektora položaja \mathbf{x} . Vektor \mathbf{x} se zapisuje kao funkcija vremena i vektora početnog položaja prema izrazu:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t). \quad (1)$$

Izraz (1) je moguće zapisati u indeksnom zapisu, gdje je $i = 1, 2, 3$:

$$x_i = x(X_i, t). \quad (2)$$

Sa slike 13 se vidi da se vektor pomaka \mathbf{u} može zapisati kao:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{x} - \mathbf{X}, \\ \mathbf{u}(\mathbf{X}, t) &= \mathbf{x}(\mathbf{X}, t) - \mathbf{X}. \end{aligned} \quad (3)$$

4.1. Tenzor gradijenta deformiranja

Vežu između elementarne dužine u početnoj ($d\mathbf{X}$) i trenutnoj konfiguraciji ($d\mathbf{x}$) je moguće zapisati kao:

$$\begin{aligned} d\mathbf{x} &= \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} d\mathbf{X}, \\ d\mathbf{x} &= \mathbf{F} d\mathbf{X}, \end{aligned} \quad (4)$$

gdje \mathbf{F} predstavlja tenzor gradijenta deformiranja.

Tenzor gradijenta deformiranja \mathbf{F} je moguće zapisati pomoću indeksnog i dijadnog zapisa prema izrazima:

$$\begin{aligned} F_{aA} &= \frac{\partial x_a}{\partial X_A}, \\ \mathbf{F} &= F_{aA} e_a \otimes E_A. \end{aligned} \quad (5)$$

Kada se izraz $F_{aA} = \frac{\partial x_a}{\partial X_A}$ zapiše po indeksima $a = 1, 2, 3$ i $A = 1, 2, 3$, slijedi:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial X_1} & \frac{\partial x_1}{\partial X_2} & \frac{\partial x_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial X_1} & \frac{\partial x_2}{\partial X_2} & \frac{\partial x_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial X_1} & \frac{\partial x_3}{\partial X_2} & \frac{\partial x_3}{\partial X_3} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Jedno od bitnijih svojstava tenzora \mathbf{F} je to da je moguće definirati referentnu konfiguraciju ako je poznata trenutna konfiguracija, tako što se na jednostavan način može odrediti inverzni tenzor \mathbf{F}^{-1} :

$$\mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^{-1} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{F} = \mathbf{I}, \quad (7)$$

gdje \mathbf{I} predstavlja jediničnu matricu s dimenzijama 3 x 3.

4.2. Tenzori deformiranosti i tenzori deformacije

S obzirom da je tenzor gradijenta deformiranja \mathbf{F} dvostruki tenzor, tj. istovremeno se odnosi na referentnu i trenutnu konfiguraciju, nepraktičan je za upotrebu. Zbog toga se uvode tenzori deformiranosti i tenzori deformacije.

Postoje dva tenzora deformiranosti: desni Cauchy – Greenov tenzor deformiranosti \mathbf{C} i lijevi Cauchy – Greenov tenzor deformiranosti \mathbf{b} . Desni Cauchy – Greenov tenzor deformiranosti se odnosi na početnu konfiguraciju, a zapisuje se kao:

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F}. \quad (8)$$

Za razliku od desnog Cauchy – Greenovog tenzora deformiranosti, lijevi Cauchy – Greenov tenzor deformiranosti se odnosi na trenutnu konfiguraciju i zapisuje se kao:

$$\mathbf{b} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T. \quad (9)$$

Što se tiče tenzora deformacije, razlikujemo Lagrangeov tenzor deformacije i Eulerov tenzor deformacije. Lagrangeov tenzor deformacije se odnosi na referentnu konfiguraciju i zapisuje se kao:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} (\mathbf{C} - \mathbf{I}), \quad (10)$$

dok se Eulerov tenzor deformacije odnosi na trenutnu konfiguraciju i zapisuje se kao:

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2} (\mathbf{I} - \mathbf{b}^{-1}). \quad (11)$$

Ono što je karakteristično za oba ova tenzora deformacije je to što je pomoću njih moguće opisati ponašanje tijela gdje se javljaju veliki pomaci i deformacije.

4.3. Tenzori naprezanja

Pomoću tenzora naprezanja je moguće opisati pojavu naprezanja koja se javlja prilikom djelovanja površinskih i volumenskih opterećenja na tijelo. Najčešće se koristi Cauchyev tenzor naprezanja $\boldsymbol{\sigma}$:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Cauchyev tenzor naprezanja je simetričan tenzor. Odnosi na trenutnu konfiguraciju, a s obzirom da u obzir uzima trenutnu površinu, predstavlja stvarno naprezanje. Stoga se često koristi pri eksperimentalnim ispitivanjima.

Prvi Piola – Kirchoffov tenzor naprezanja \mathbf{P} uzima u obzir opterećenja u trenutnoj i površine u početnoj konfiguraciji (inženjersko naprezanje) što znači da ima dvojni konfiguraciju. Veza \mathbf{P} i $\boldsymbol{\sigma}$ dana je izrazom:

$$\mathbf{P} = J\mathbf{F}^{-1}\boldsymbol{\sigma}, \quad (13)$$

gdje J predstavlja Jakobijan koji je skalarna veličina, a zapisuje se kao:

$$J = \frac{dV}{dV_0} = \det\mathbf{F}. \quad (14)$$

Prvi Piola – Kirchoffov tenzor naprezanja se često koristi pri eksperimentalnim ispitivanjima. Nesimetričan je tenzor te ga nije moguće povezati s tenzorom deformacije u konstitutivnim jednadžbama, pa zbog toga nije pogodan za numeričke analize.

Drugi Piola – Kirchoffov tenzor naprezanja \mathbf{S} se odnosi na početnu konfiguraciju i simetričan je tenzor. Veza između \mathbf{S} i \mathbf{P} je dana izrazom:

$$\mathbf{S} = \mathbf{P}\mathbf{F}^{-T}, \quad (15)$$

dok je veza s Cauchyevim tenzorom naprezanja prikazana kao:

$$\mathbf{S} = J\mathbf{F}^{-1}\boldsymbol{\sigma}\mathbf{F}^{-T}. \quad (16)$$

Cauchyev tenzor naprezanja se može rastaviti na sferni i devijatorski dio. Sferno naprezanje je zapravo hidrostatski tlak i ima utjecaj na promjenu volumena, ali ne utječe na promjenu oblika, dok devijatorsko naprezanje ima utjecaj na deformiranje tijela.

Sferno naprezanje se računa prema izrazu:

$$\boldsymbol{\sigma}_s = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \cdot \mathbf{I}, \quad (17)$$

a devijatorski dio naprezanja iznosi:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{dev}} = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_s. \quad (18)$$

4.4. Hiperelastični materijalni model

Hiperelastičnim materijalnim modelom se opisuju materijali koji se ponašaju elastično kod pojave velikih deformacija.

Ovakav model se koristi za opis ponašanja bioloških tkiva i elastomera, ali samo pri izotermnim procesima deformiranja. Iako je materijal elastičan, ovisnost naprezanja i deformacija je nelinearna.

Način ponašanja hiperelastičnih materijala se opisuje korištenjem funkcije energije deformiranja W koja je funkcija od \mathbf{C} ($W=W(\mathbf{C})$).

Cauchyev tenzor naprezanja zapisan pomoću W iznosi:

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{J} \mathbf{F} \frac{\partial W}{\partial \mathbf{C}} \mathbf{F}^T. \quad (19)$$

S obzirom da je ponašanje elastomera i bioloških tkiva nestlačivo, tj. tijekom deformiranja nema promjene volumena, možemo zapisati:

$$J = \det \mathbf{F} = 1. \quad (20)$$

Ako je tenzor \mathbf{F} simetričan, vrijedi da je $\mathbf{C} = \mathbf{b}$, pa se Cauchyev tenzor naprezanja zapisuje:

$$\boldsymbol{\sigma} = 2 \frac{\partial W}{\partial I_{1b}} \mathbf{b} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_{2b}} \mathbf{b}^{-1} - p \mathbf{I}, \quad (21)$$

gdje su I_{1b} i I_{2b} prva i druga invarijanta lijevog Cauchy – Greenovog tenzora naprezanja, a p je hidrostatski tlak.

Postoje razni načini definiranja energije deformiranja W , a u ovom radu je korišten oblik iz NeoHooke materijalnog modela, koji je također i najjednostavniji, a definira se kao:

$$W = C_1 \cdot (I_{1b} - 3). \quad (22)$$

Parcijalnim deriviranjem izraza (22) dobije se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial I_{1b}} &= C_1, \\ \frac{\partial W}{\partial I_{2b}} &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Uvrštavanjem izraza (23) u izraz (21) dobije se $\boldsymbol{\sigma}$ za NeoHooke materijalni model:

$$\boldsymbol{\sigma} = 2C_1 \mathbf{b} - p \mathbf{I}. \quad (24)$$

4.4.1. Analitičko rješenje za primjer dvoosnog razvlačenja

Faktori produljenja u smjerovima osi x , y i z se označavaju kao:

λ_x – faktor produljenja u smjeru osi x ,

λ_y – faktor produljenja u smjeru osi y ,

λ_z – faktor produljenja u smjeru osi z ,

a računaju se kao omjer početne i konačne dimenzije u smjeru pojedine osi.

Ako je uzorak opterećen vlačnim silama u smjeru osi x i y (kao na slici 1), gradijent deformiranja \mathbf{F} za takvo opterećenje iznosi:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix}, \quad (25)$$

gdje je, ako se pretpostavi izotropno ponašanje materijala, $\lambda_x = \lambda_y = \lambda$, pa se \mathbf{F} zapisuje kao:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix}. \quad (26)$$

S obzirom da je materijal uzorka hiperelastičan i nestlačiv, vrijedi da je $\det \mathbf{F} = 1$:

$$\det \mathbf{F} = \begin{vmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{vmatrix} = \lambda^2 \cdot \lambda_z = 1, \quad (27)$$

iz čega slijedi:

$$\lambda_z = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (28)$$

Lijevi Cauchy – Greenov tenzor naprezanja za slučaj dvoosnog vlačnog opterećenja uzorka iznosi:

$$\mathbf{b} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda^4} \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Izraz (24) raspisan po komponentama se zapisuje kao:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = 2 \cdot C_1 \cdot \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda^4} \end{bmatrix} - p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Izraz (30) predstavlja tri komponente tenzora naprezanja koje su različite od nule:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2 \cdot C_1 \cdot \lambda^2 - p, \\ \sigma_{yy} &= 2 \cdot C_1 \cdot \lambda^2 - p, \\ \sigma_{zz} &= 2 \cdot C_1 \cdot \frac{1}{\lambda^4} - p. \end{aligned} \quad (31)$$

Zbog dimenzija uzorka (duljina i širina su puno veće od debljine) može se pretpostaviti ravninsko stanje naprezanja u kojem je $\sigma_{zz} = 0$ te se iz tog uvjeta može izračunati p :

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= 2 \cdot C_1 \cdot \frac{1}{\lambda^4} - p = 0, \\ p &= 2 \cdot C_1 \cdot \frac{1}{\lambda^4}. \end{aligned} \quad (32)$$

Uvrštavanjem izraza (32) u izraz za naprezanja u smjeru osi x i y , slijedi:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 2 \cdot C_1 \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right). \quad (33)$$

5. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata je numerička metoda koja je temeljena na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Tijelo, odnosno kontinuum koji se deformira, ima beskonačano mnogo stupnjeva slobode gibanja. Deformiranje je opisano pomoću diferencijalnih jednadžbi za koje je moguće naći točno analitičko rješenje samo za mali broj jednostavnih primjera. Zbog toga se, pomoću metode konačnih elemenata, kontinuum zamjenjuje s diskretnim modelom. Tijelo se dijeli na konačan broj potpodručja, odnosno ovakav diskretizirani model se sastoji od više međusobno povezanih elemenata koji imaju ograničen broj stupnjeva slobode, a elementi se nazivaju konačni elementi i povezani su u čvorovima [8].

Polje pomaka, deformacija i naprezanja svakog konačnog elementa je moguće opisati pomoću interpolacijskih funkcija koje su zapravo aproksimacija rješenja diferencijalnih jednadžbi. Na taj način se sustav diferencijalnih jednadžbi zamjenjuje sustavom algebarskih jednadžbi. Također, interpolacijske funkcije moraju zadovoljiti odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model mogao što više približiti točnom rješenju. Cilj je da se rješenja dobivena metodom konačnih elemenata što više približe vrijednostima koje točno opisuju razmatrani problem. Povećanjem broja konačnih elemenata, numerička rješenja se moraju približavati točnim vrijednostima [8].

Kod složenih konstrukcija, kao što je zadani primjer stezne čeljusti, zahtijeva se podjela na veći broj konačnih elemenata i na taj način se dovoljno dobro opisuju pojave tijekom analize konstrukcije. Tako se dobije sustav s više algebarskih jednadžbi koje se rješavaju korištenjem računalnih programa. U okviru ovog rada je za numeričku analizu metodom konačnih elemenata korišten programski paket *Abaqus*.

5.1. Osnovni konačni elementi

Tip konačnog elementa koji će se koristiti pri rješavanju određenog problema ovisi o obliku i nepoznatim parametrima u čvorovima. Što je veći broj nepoznanica, to zahtijeva složeniju interpolacijsku funkciju. Stupnjevi slobode pojedinog elementa predstavljaju nepoznate parametre u čvorovima. Ti čvorovi, u metodi pomaka u mehanici deformabilnih tijela, opisuju pomake i derivacije pomaka.

Osnovni konačni elementi koji se najčešće koriste su [8]:

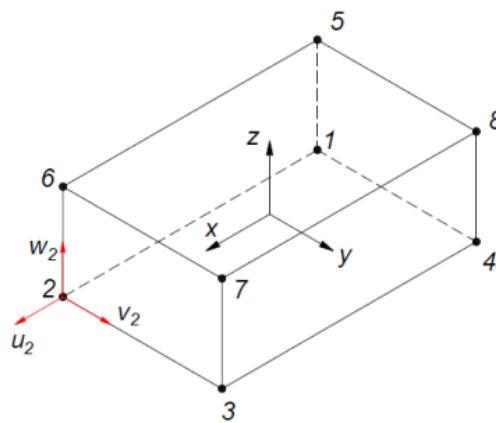
- a) jednodimenzijski konačni elementi,
- b) dvodimenzijski konačni elementi,
- c) trodimenzijski konačni elementi,
- d) osnosimetrični konačni elementi,
- e) konačni elementi za rješavanje problema savijanja ploča,

f) konačni elementi za analizu ljuskastih konstrukcija.

U okviru ovog rada korišten je trodimenzionalni konačni element, tj. heksaedarski konačni element prvog reda (oznaka u *Abaqus*-u C3D8) koji ima osam čvorova i u svakom od čvorova po tri stupnja slobode gibanja. Stupnjevi slobode gibanja predstavljaju pomake u smjerovima koordinatnih osi x , y i z , a ukupan broj stupnjeva slobode je 24.

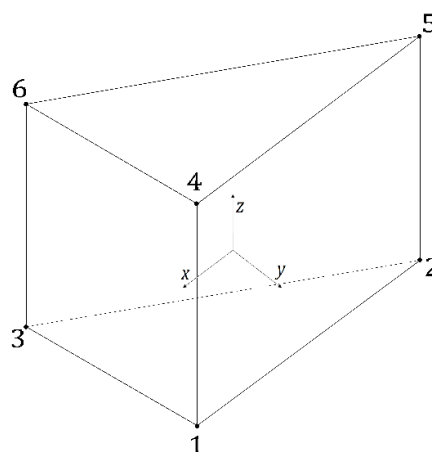
Meka biološka tkiva i elastomeri se opisuju hiperelastičnim materijalnim modelom i za njih se pretpostavlja da su nestlačivi. Konačni elementi koji služe za opisivanje nestlačivog ponašanja opisani su pomoću hibridne formulacije čija je oznaka u *Abaqus*-u C3D8H. Hibridna formulacija je zapravo dodatni stupanj slobode koji osigurava uvjet nestlačivosti.

Na slici 14 je prikazan heksaedarski konačni element.



Slika 14. Heksaedarski konačni element

Osim heksaedarskog konačnog elementa prvog reda, u analizi čeljusti je korišten i *wedge* konačni element, odnosno element u obliku prizme. Primjena ovog elementa omogućava izradu pravilne mreže na mjestima koja nisu prikladna za izradu mreže pomoću heksaedarskog elementa prvog reda. Ovaj prizmatični element ima šest čvorova i u svakom po tri stupnja slobode gibanja tako da je ukupan broj stupnjeva slobode za ovaj element 18.



Slika 15. *Wedge* konačni element

5.2. Modeliranje kontakta u *Abaqus*-u [9], [10]

Za modeliranje kontakta u programskom paketu *Abaqus* koriste se sljedeći algoritmi:

- osnovni kontaktni algoritam (*eng. general contact*),
- algoritam kontaktnih parova (*eng. contact pairs*),
- algoritam kontaktnih elemenata (*eng. contact elements*).

Osnovni kontaktni algoritam je metoda za rješavanje problema kontakta gdje se odabirom jedne opcije opisuje kontakt dva tijela koja u stvarnosti nisu u dodiru. Za razliku od osnovnog kontaktnog algoritma, kod algoritma kontaktnih parova se pozornije definiraju površine u kontaktu te zbog toga sa sobom nosi mnoga ograničenja za pojedine tipove površina u međusobnom djelovanju.

Formulacija kontakta se temelji na odabiru vrste kontakta, načinu ostvarivanja kontakta i dodjeljivanja *master* i *slave* uloga kontaktnih kontura. *Abaqus* omogućuje definiranje kontakta između dvije površine koje mogu komunicirati jedna s drugom ili jedne površine koja može biti u interakciji sama sa sobom (*eng. self-contact*). Kontaktne konture su granice tijela koja sudjeluju u kontaktu (*eng. contact surface*). Kod trodimenzionalnih tijela i ljuski to su površine, a kod kontakata linijskih ili ravninskih dvodimenzijskih struktura, kontaktne konture su rubovi.

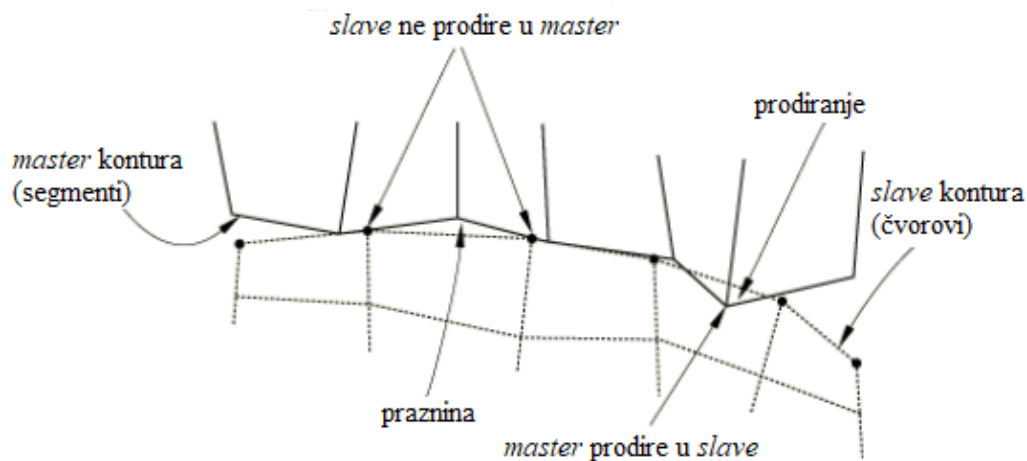
U definiciji kontaktne interakcije potrebno je konturama dodijeliti *master* i *slave* uloge. Smjernice za dodjelu uloga su:

- *slave* je uvijek privržen deformabilnijem tijelu,
- ne mogu obje površine biti krute, jedna mora biti deformabilna,
- ako imamo manju i veću površinu, *slave* bi trebala biti manja površina,
- mreža *slave* površine mora biti gušća u odnosu na mrežu *master* površine.

Položaj i uvjeti kontakta između kontaktnih površina ovise o načinu diskretizacije. *Abaqus* nudi dva načina diskretizacije kontakta:

- diskretizacija čvor-površina (*eng. node-to-surface*),
- diskretizacija površina-površina (*eng. surface-to-surface*).

Kod diskretizacije kontakta čvor-površina, kontakt je uspostavljen na način da je svaki *slave* čvor s jedne strane dodirne linije u interakciji sa svojom projekcijom na *master* konturu sa suprotne strane dodirne linije. Svaki kontakt sadrži jedan *slave* čvor i *master* površinu u okolini. Na slici 16 je prikazana diskretizacija čvor-površina.



Slika 16. Diskretizacija čvor-površina [10]

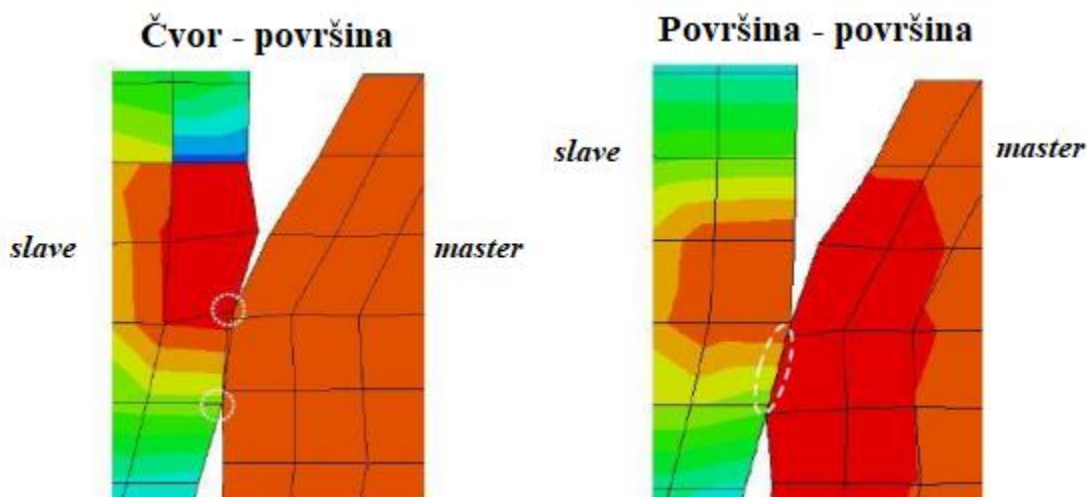
Diskretizacija čvor-površina je određena sljedećim karakteristikama:

- Čvorovi *master* površine prodiru kroz *slave* površinu, dok *slave* čvorovi ne mogu prodrijeti u *master* površinu.
- Zakrivljenost i smjer *slave* konture nisu bitni.
- *Slave* kontura može biti definirana kao grupa čvorova (*eng. node-based surface*).
- Smjer kontakta je određen normalom *master* površine.
- Diskretizacija čvor-površina može biti korištena i u slučaju da se ne koriste *slave* konture kao grupe čvorova.

Za razliku od diskretizacije čvor-površina, prilikom diskretizacije površina-površina, u obzir se uzimaju oblici i *master* i *slave* kontura. Karakteristike diskretizacije površina-površina su:

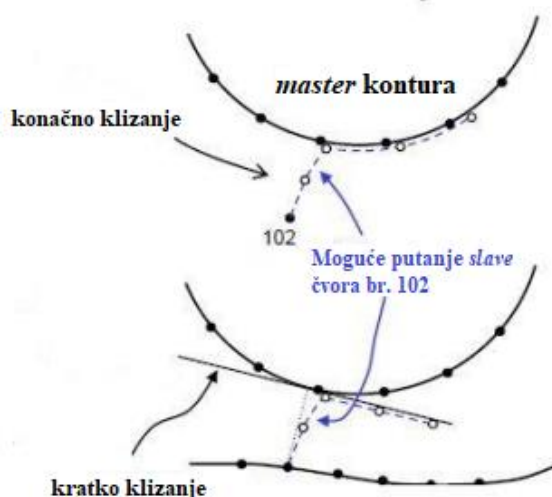
- Definiranje kontakta se vrši u okolini *slave* čvorova, a ne samo u *slave* čvorovima.
- Kontakt se definira podešavanjem područja usmjerenog na *slave* čvorove tako da će ograničenje kontakta biti pod dominantnim utjecajem jednog čvora, a pod slabijim utjecajem susjednih čvorova.
- Ne dolazi do prodiranja *master* čvorova kroz *slave* konturu.
- Smjer kontaktnih sila određen je smjerom normale *slave* konture u okolini *slave* čvorova.

Na slici 17 je prikazana usporedba diskretizacije čvor-površina i površina-površina.



Slika 17. Usporedba diskretizacije čvor-površina i površina-površina [9]

Interakcija dviju kontaktnih ploha ili rubova i njihovo relativno gibanje ovisi o izboru načina praćenja kontakta. *Abaqus* nudi dva načina praćenja kontaktne interakcije: konačno klizanje (*eng finite sliding*) i kratko klizanje (*eng. small sliding*) čiji su prikazi dani na slici 18.



Slika 18. Načini praćenja kontaktne interakcije (konačno/kratko klizanje) [10]

Kod konačnog klizanja je dozvoljeno slobodno gibanje kontaktnih površina. Za razliku od konačnog, kratko klizanje je prilagođeno malim međusobnim klizanjima dva tijela u kontaktu, bez obzira što postoji mogućnost pojave velikih pomaka tih tijela. Prednost kratkog klizanja u odnosu na konačno je to što omogućuje brži proračun i veću robusnost simulacije, a koja će se vrsta praćenja kontakta koristiti, ne ovisi o načinu diskretizacije kontakta.

6. IZRAČUN SILE PRITEZANJA I MOMENTA PRITEZANJA

Za potrebe analize utjecaja sile pritezanja na homogenost polja naprezanja uzorka, potrebno je dati izraze prema kojima se računaju sila pritezanja i moment pritezanja.

Zbog malih dimenzija čeljusti, pretpostavljamo da je sila pritezanja jednaka normalnoj sili koja se javlja na dodiru uzorka i čeljusti. S obzirom da se analiza provodi na pet različitih materijala, postojat će pet različitih sila pritezanja, a time i pet momenata pritezanja.

Sila pritezanja se računa prema izrazu:

$$F_p = \frac{F_{TR}}{\mu}, \quad (34)$$

gdje je:

F_p – sila pritezanja,

F_{TR} – sila trenja,

μ – faktor trenja na dodiru čeljusti i uzorka (iz eksperimenta).

Prema [11], moment pritezanja vijka se računa prema izrazu:

$$T_p = F_v \frac{d_2}{2} \tan(\rho' + \alpha), \quad (35)$$

gdje je:

T_p – moment pritezanja vijka,

F_v – osna sila u vijku (jednaka sili pritezanja),

d_2 – srednji promjer navoja (za M6 prema [12]: $d_2=5,35$ mm),

ρ' - korigirani kut trenja,

α – kut uspona.

Korigirani kut trenja se računa kao:

$$\rho' = \tan^{-1} \left(\frac{\mu}{\cos \beta} \right), \quad (36)$$

gdje je:

μ – faktor trenja za čelik – cink (prema [13]: $\mu = 0,5$)

β – kut profila navoja (za metrički navoj 60° [12])

Kut uspona se računa prema izrazu:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{P_h}{d_2 \pi}, \quad (37)$$

gdje je:

P_h – uspon navoja (prema [12]: $P_h = 1$ mm),

d_2 – srednji promjer navoja.

Na osnovu poznatih podataka možemo izračunati kut uspona i korigirani kut trenja, a oni iznose:

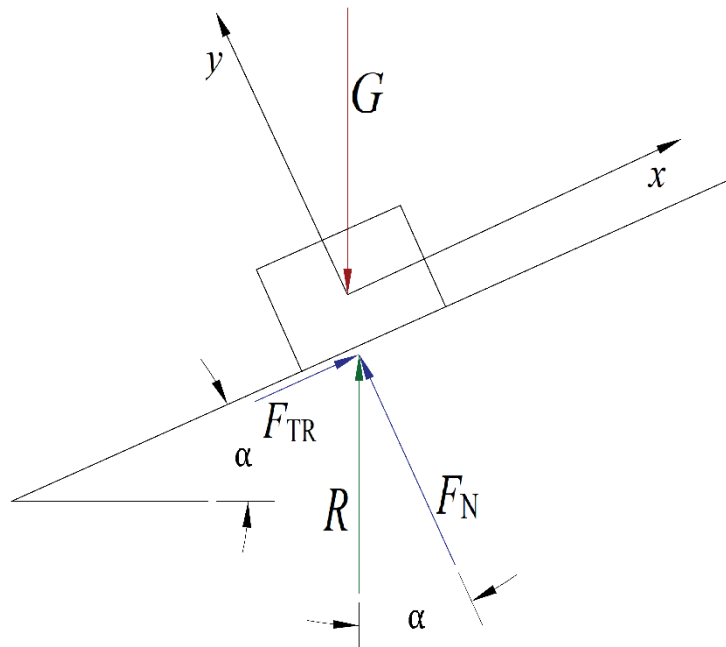
$$\begin{aligned}\rho' &= 45^\circ, \\ \alpha &= 3,4^\circ.\end{aligned}\tag{38}$$

Koristeći iznose iz izraza (38), dalje u radu će se računati momenti pritezanja za svaki od pet materijala.

7. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE FAKTORA TRENJA

Za modeliranje pojave trenja na mjestu dodira čeljusti i uzorka potrebno je odrediti faktor trenja. Određivanje faktora trenja se temelji na sljedećem izvodu.

Promatramo blok težine G na kosini, prema slici 19.



Slika 19. Blok težine G na kosini oslobođen veza

Uvjeti ravnoteže bloka zapisani u x - y koordinatnom sustavu glase:

$$\sum F_x = 0: G \sin \alpha - F_{TR} = 0, \quad (39)$$

$$\sum F_y = 0: G \cos \alpha - F_N = 0, \quad (40)$$

gdje je:

G – težina bloka,

F_N – normalna sila,

F_{TR} – sila trenja.

Iz izraza (39) i (40) se dobije:

$$\frac{F_{TR}}{F_N} = \tan \alpha. \quad (41)$$

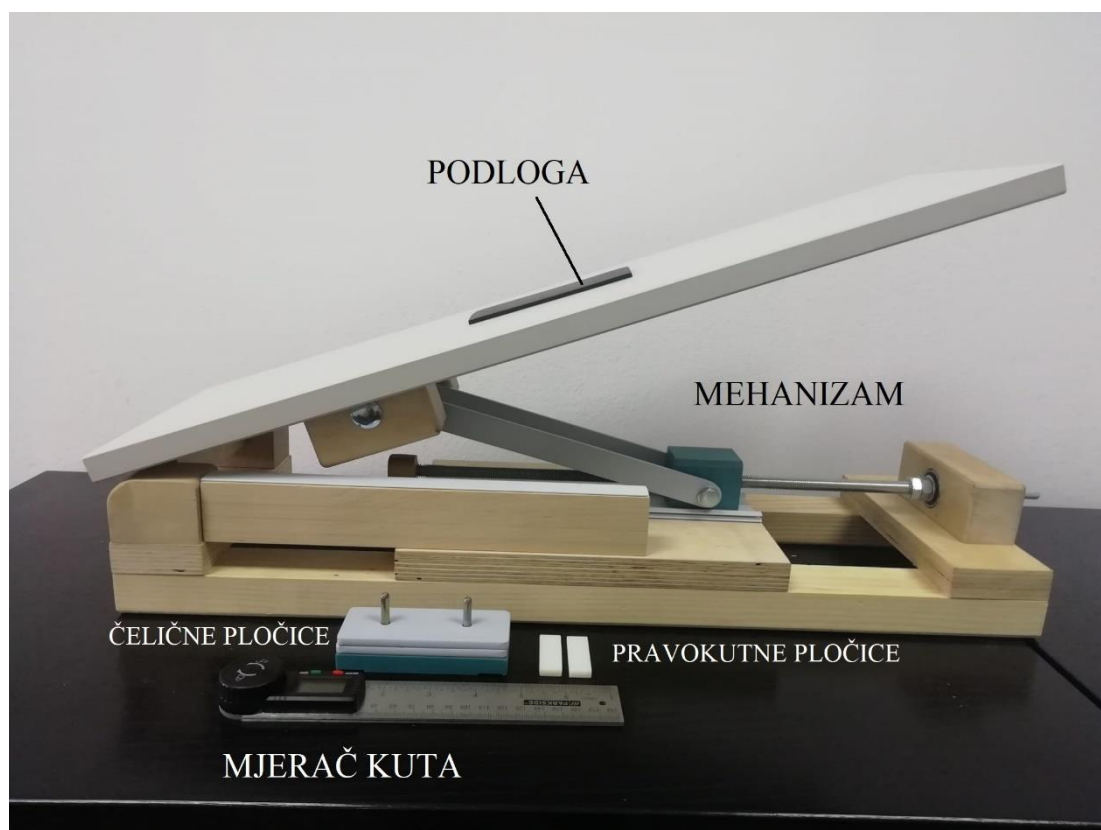
S obzirom na jednakost $F_{TR} = \mu \cdot F_N$, gdje je μ faktor trenja podloge, dobije se izraz:

$$\mu = \tan \alpha. \quad (42)$$

Na temelju izraza (42) eksperimentalno je određen faktor trenja.

7.1. Opis eksperimenta

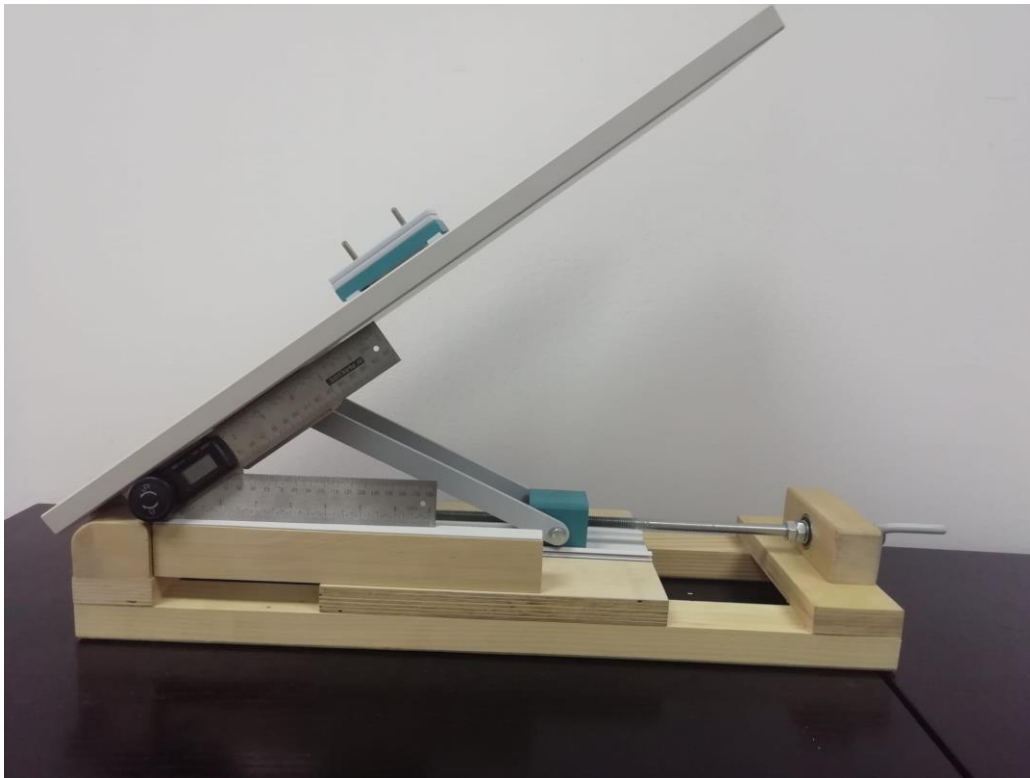
Na uređaj za ispitivanje trenja se postavlja podloga koja ima svojstva materijala ispitnog uzorka. Na tu podlogu se postave dva jednaka pravokutna dijela koji imaju svojstva pločica koje se nalaze u čeljusti i omogućavaju bolji prihvat ispitnog uzorka i čeljusti. S obzirom da je masa pločica jako mala (nekoliko grama) potrebno je dodati dodatnu masu kako bi se povećala normalna sila između materijala podloge i pločica. Povećanje mase je omogućeno dodavanjem određenog broja čeličnih pločica. Na slici 20 je prikazan mehanizam, podloga, pravokutne pločice, čelične pločice i mjerač kuta.



Slika 20. Dijelovi za izvođenje eksperimenta

Okretanjem ručice pokreće se vreteno po kojem se kreće matica. Gibanje matice uzrokuje povećanje nagiba ploče. Ovisno o trenutku u kojem pločice krenu kliziti po podlozi, okretanje ručice se zaustavlja i izmjeri se kut pomoću digitalnog mjerača.

Eksperiment se provodio na pet različitih materijala po pet ponavljanja za svaki materijal, a prikaz jednog, neposredno prije početka klizanja, je dan na slici 21.



Slika 21. Položaj pločica neposredno prije početka klizanja

7.2. Rezultati eksperimenta

Vrijednosti izmjerenih kutova za pojedini materijal prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Vrijednosti izmjerenih kutova za pojedini materijal

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
TBP	58,7°	57,9°	56,2°	55,5°	56,8°
FLX9840 DM	64,2°	59,5°	61,5°	60,9°	64,5°
FLX9850 DM	65,9°	63,9°	66°	57,9°	64,8°
FLX9860 DM	50,3°	53,7°	51,6°	50,2°	52°
FLX9870 DM	49,8°	50,7°	55°	48,6°	50,9°

Faktori trenja dobiveni za pojedini materijal prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Vrijednosti izračunatih faktora trenja za pojedini materijal

	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
TBP	1,65	1,59	1,49	1,46	1,53
FLX9840 DM	2,07	1,7	1,84	1,8	2,1
FLX9850 DM	2,24	2,04	2,25	1,6	2,13
FLX9860 DM	1,2	1,36	1,26	1,2	1,28
FLX9870 DM	1,18	1,22	1,43	1,13	1,23

Za potrebe daljnje analize u *Abaqus*-u korištene su srednje vrijednosti faktora trenja za pojedini materijal, a vrijednosti su prikazane u tablici 3. Također, u tablici 3 je prikazan iznos standardne devijacije, odnosno raspršenosti rezultata u odnosu na srednju vrijednost.

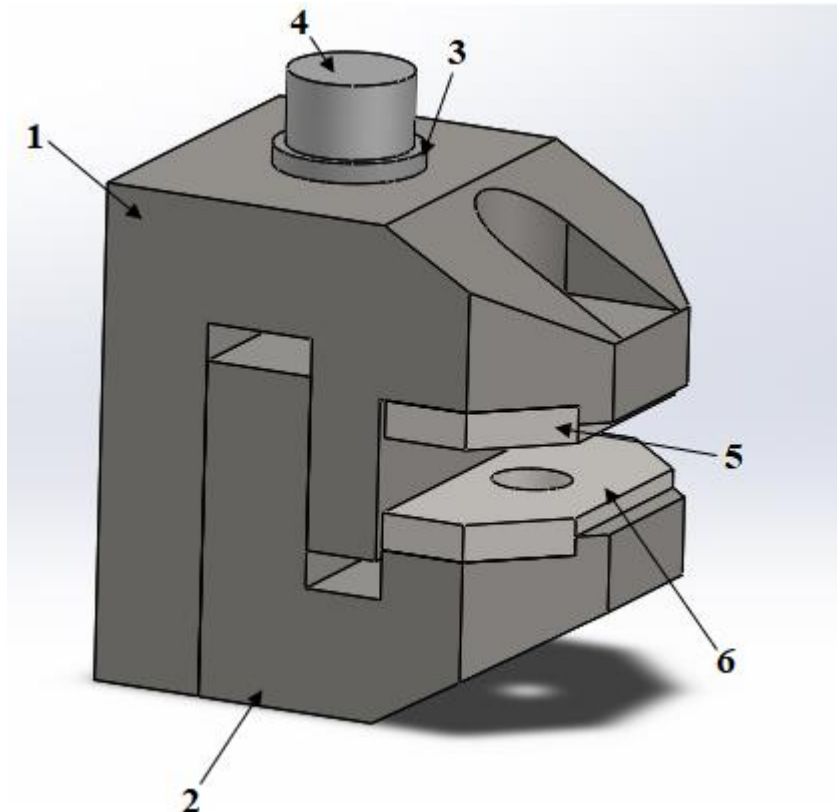
Tablica 3. Srednje vrijednosti faktora trenja za pojedini materijal i standardna devijacija

	TBP	FLX9840 DM	FLX9850 DM	FLX9860 DM	FLX9870 DM
μ	1,544	1,902	2,052	1,26	1,24
s	0,06859	0,1565	0,2388	0,05933	0,1023

8. NUMERIČKA ANALIZA STEZNE ČELJUSTI

Model prihvata koji se analizira je izrađen u programskom paketu *SolidWorks* te je kao *STEP* datoteka unesen u programski paket *Abaqus*.

Model sklopa je pojednostavljen, odnosno s dijelova sklopa su uklonjeni radijusi zaobljenja i skošenja radi jednostavnije izrade mreže konačnih elemenata. S obzirom da znamo da glava vijka neće biti kritičan dio u analizi, i ona je pojednostavljena iz istog razloga kao i ostali dijelovi. Tako pojednostavljen model se sastoji od 6 dijelova kao što je prikazano na slici 22.



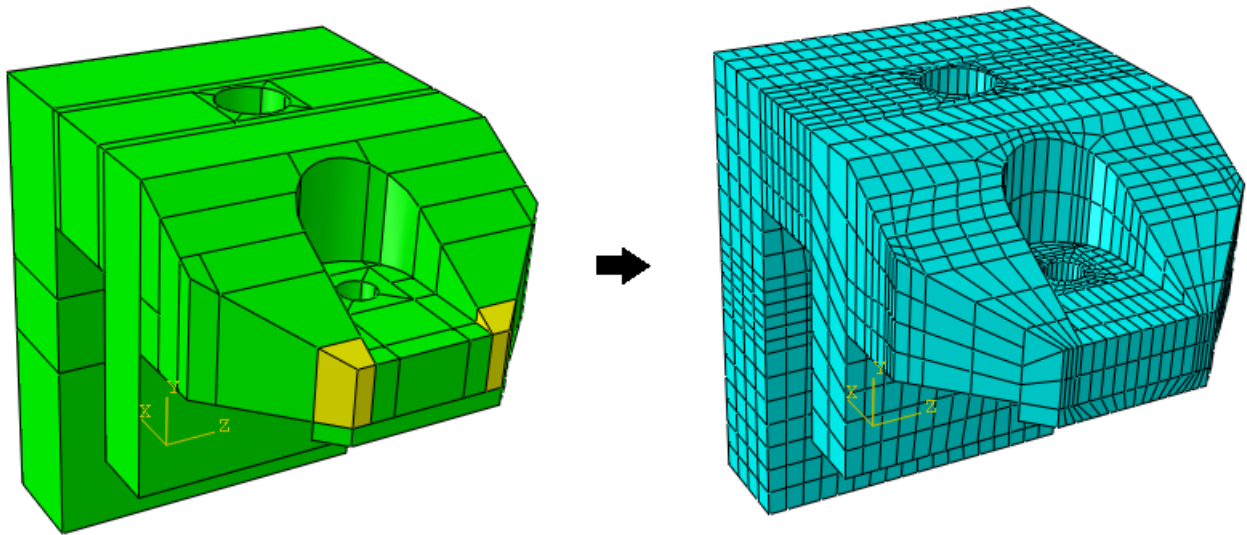
Slika 22. Dijelovi prihvata uzorka

U početku je potrebno kreirati *Step* za statičku analizu. Za svaki od dijelova je potrebno definirati karakteristike materijala (modul elastičnosti i Poissonov faktor) prema tablici 4.

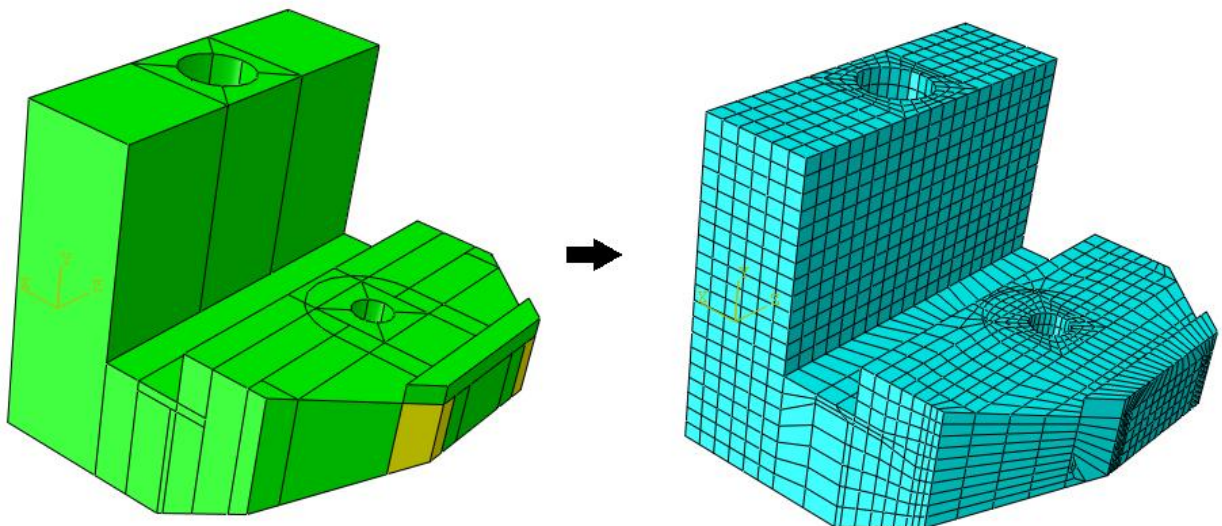
Tablica 4. Karakteristike materijala dijelova čeljusti

	Materijal	Modul elastičnosti	Poissonov faktor	Granica razvlačenja
Dio 1	X6Cr17	220 000 N/mm ²	0,28	320 N/mm ²
Dio 2	X6Cr17	220 000 N/mm ²	0,28	320 N/mm ²
Dio 3	S355 J0	221 000 N/mm ²	0,28	275 N/mm ²
Dio 4	Zn-Al-Mg obložen čelik	85 000 N/mm ²	0,3	285 N/mm ²
Dio 5	Ugljični nelegirani čelik	210 000 N/mm ²	0,28	220 N/mm ²
Dio 6	Ugljični nelegirani čelik	210 000 N/mm ²	0,28	220 N/mm ²

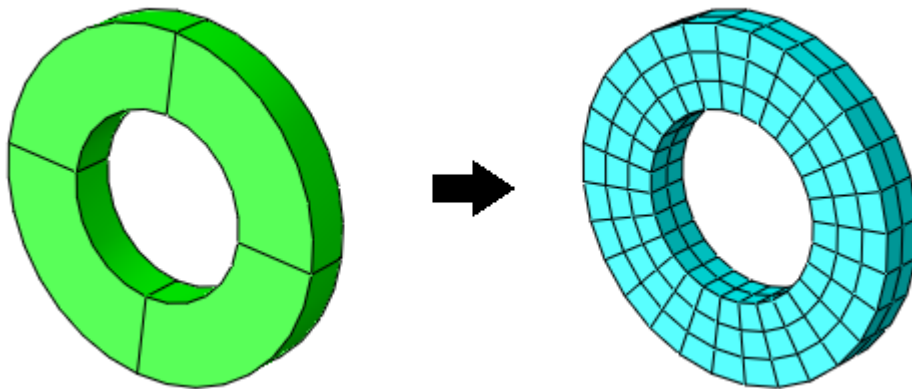
Kako bi se izradila pravilna heksaedarska mreža, geometrija svakog od dijelova je podijeljena na particije. Elementi koji su pridruženi području zelene boje su heksaedarski elementi prvog reda, dok su području žute boje dodijeljeni heksaedarski *wedge* elementi, odnosno elementi u obliku prizmi. Na sljedećim slikama su prikazi particioniranih dijelova i pripadnih mreža konačnih elemenata za pojedini dio prihvata.



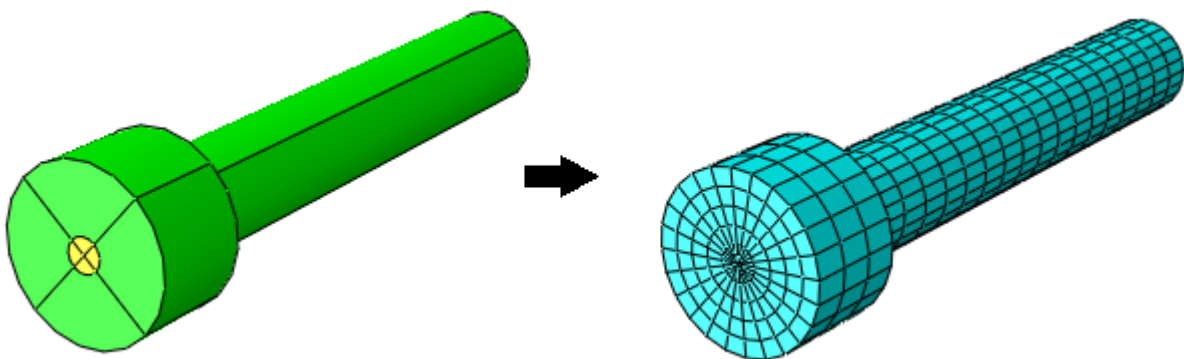
Slika 23. Dio 1: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (3374 konačna elementa)



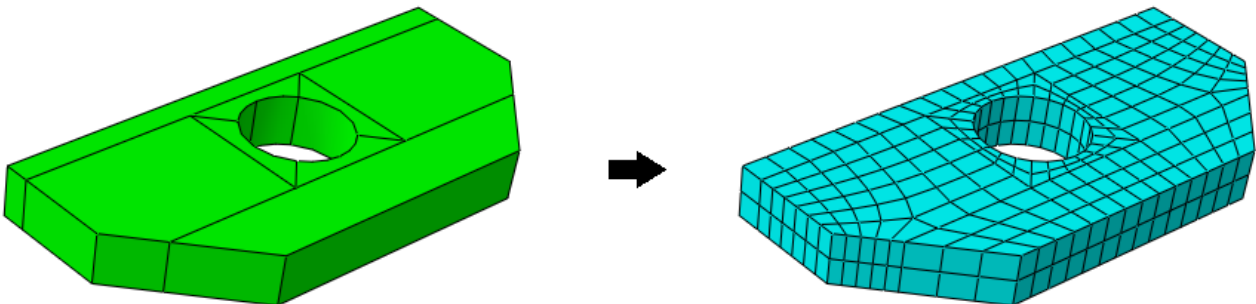
Slika 24. Dio 2: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (5950 konačnih elemenata)



Slika 25. Dio 3: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (168 konačnih elemenata)

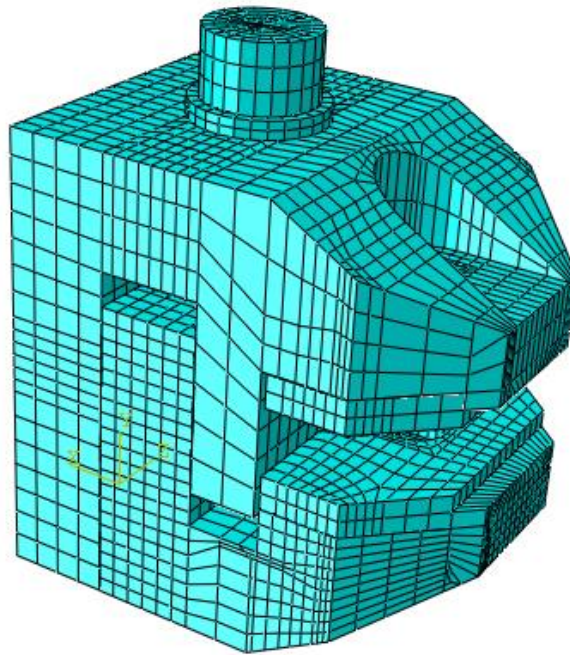


Slika 26. Dio 4: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (1656 konačnih elemenata)



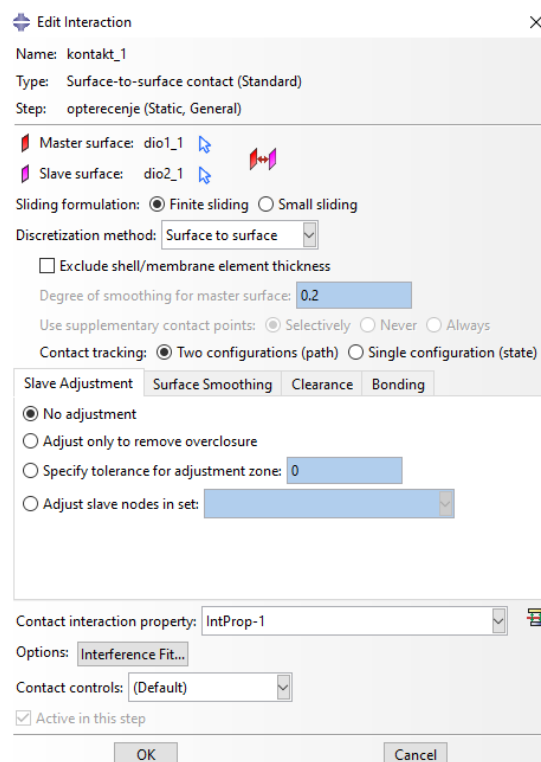
Slika 27. Dijelovi 5 i 6: particioniranje dijela i mreža konačnih elemenata (392 konačna elementa)

Ukupni broj konačnih elemenata za čeljust je 11932, a prikaz mreže konačnih elemenata je dan na slici 28.



Slika 28. Mreža konačnih elemenata stezne čeljusti

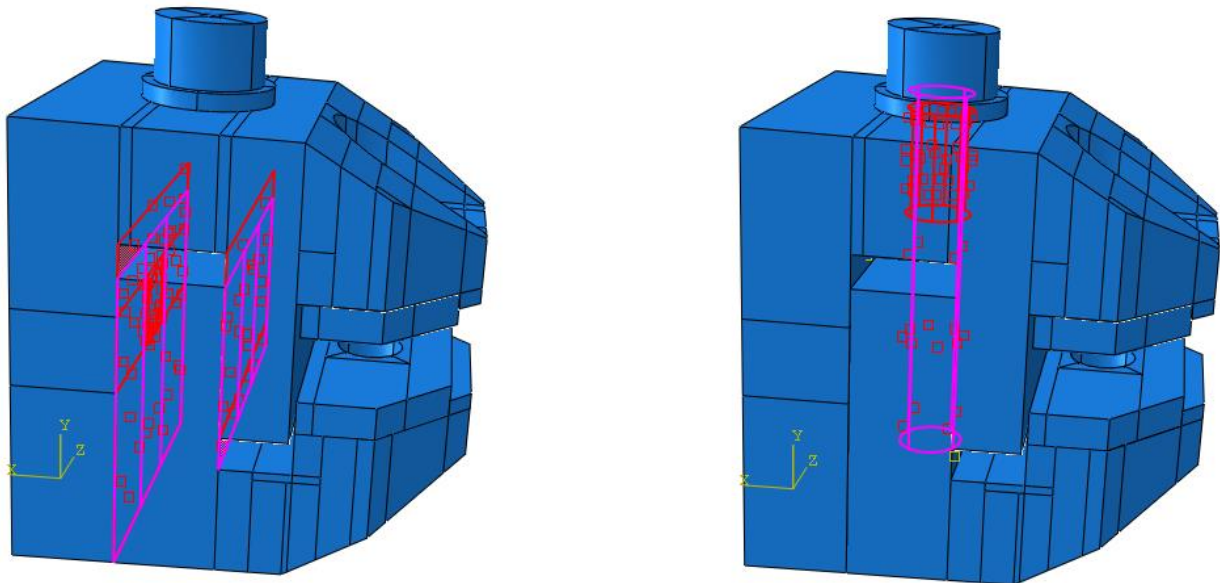
S obzirom da se model koji se analizira sastoji od više dijelova, potrebno je definirati odnose između njih. Odnosi se definiraju u modulu *Interaction*, opcijom *Create Interaction* gdje se definira kontakt površina na površinu, s trenjem ili bez trenja. Također, odabranim površinama je potrebno dodijeliti *master* i *slave* uloge, a način definiranja uloga je objašnjen u potpoglavlju 5.2. Primjer definiranja jednog od kontakata je prikazan na slici 29.



Slika 29. Primjer kreiranja kontakta između dva dijela

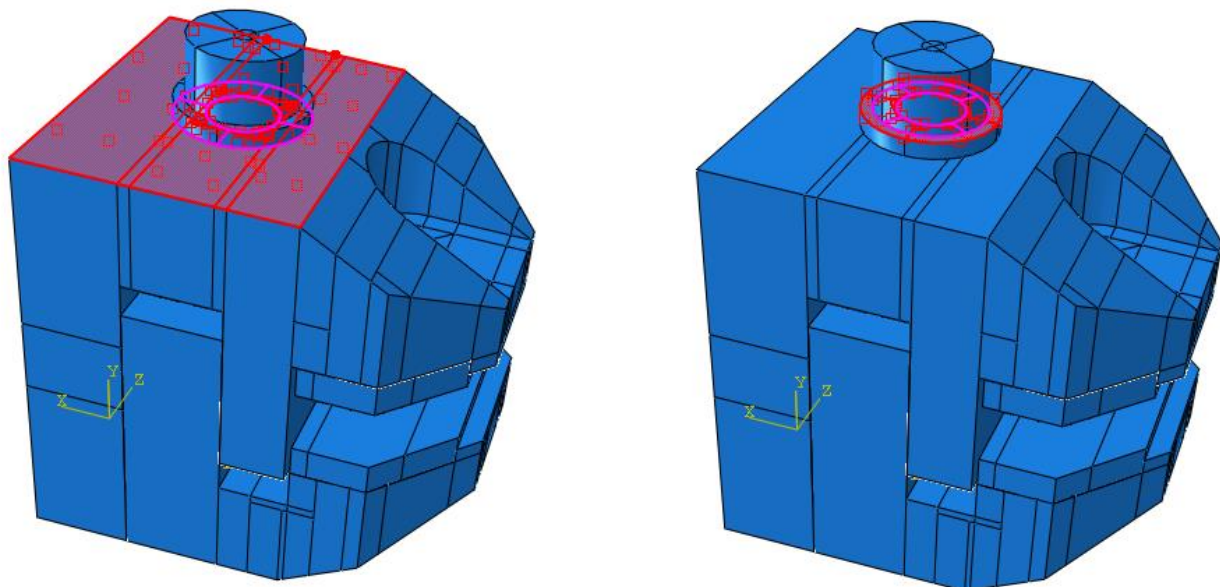
U dijelu *Contact Interaction Property* se definira radi li se o kontaktu s trenjem ili bez trenja.

Kontakti između dijelova 1 i 2 (sa slike 22) su definirani kao kontakti bez trenja, kao i kontakt između dijelova 1 i 4, što je prikazano na slici 30.



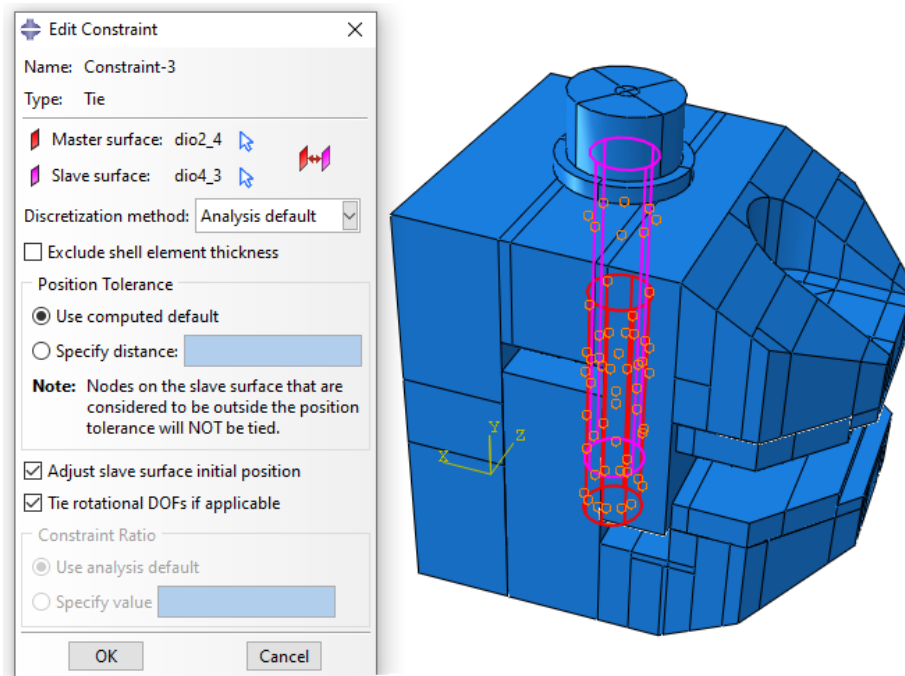
Slika 30. Kontakt između dijelova 1 i 2 (lijevo) te 1 i 4 (desno)

Za razliku od već spomenutih interakcija, kontakt između dijelova 1 i 3 je kontakt s trenjem, gdje je faktor trenja jednak 0,3 (čelik-čelik). Također, između dijelova 3 i 4 postoji trenje ($\mu = 0,5$, čelik-cink). Kontakti između navedenih dijelova su prikazani na slici 31.



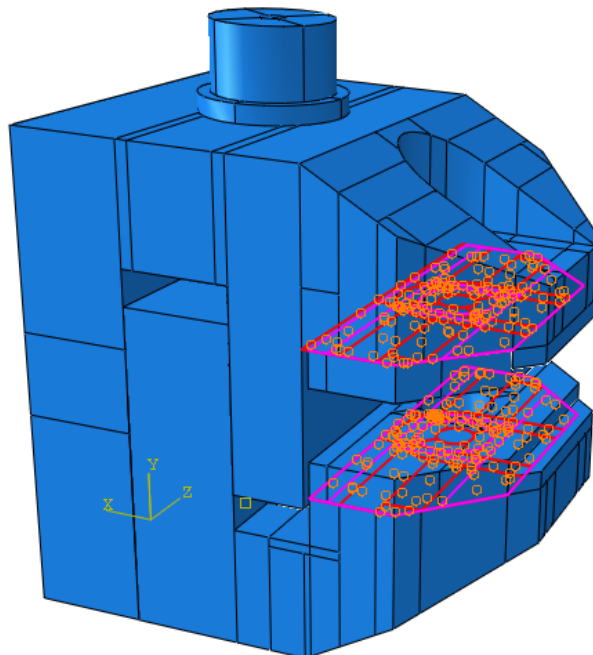
Slika 31. Kontakt između dijelova 1 i 3 (lijevo) te 3 i 4 (desno)

Sljedeće što je potrebno definirati su ograničenja pomoću opcije *Constraint* odabirom *Tie* gdje su dijelovi čvrsto povezani jedan s drugim. Na taj način su povezani dijelovi 2 i 4 koji predstavljaju vijak i maticu, pa je pretpostavka da između njih nema relativnog gibanja. Veza između ta dva dijela je prikazana na slici 32.



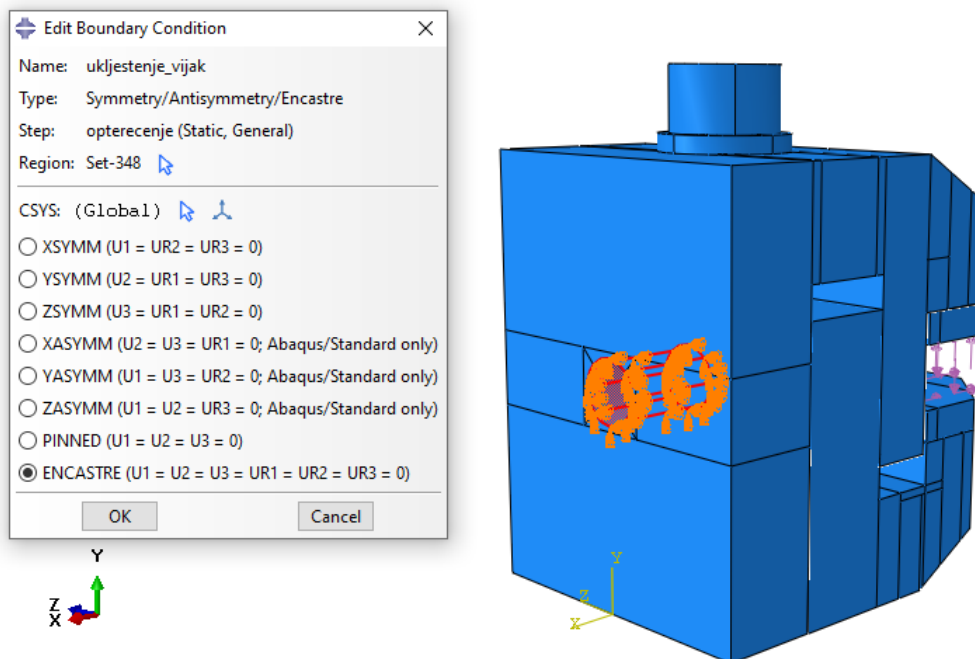
Slika 32. Ograničenje *Tie* između dijelova 2 i 4

Također, dijelovi 1 i 5 te 2 i 6 su povezani s na isti način (Slika 33).



Slika 33. Ograničenje *Tie* između dijelova 1 i 5 te 2 i 6

Sljedeći korak je definiranje rubnih uvjeta. Što se tiče rubnih uvjeta pomaka, uklještenje, odnosno svi pomaci i rotacije oko sve tri osi su spriječeni na mjestu gdje se u stvarnosti nalazi vijak koji pričvršćuje čeljust na aktuator. Prikaz rubnog uvjeta pomaka je dan na slici 34.

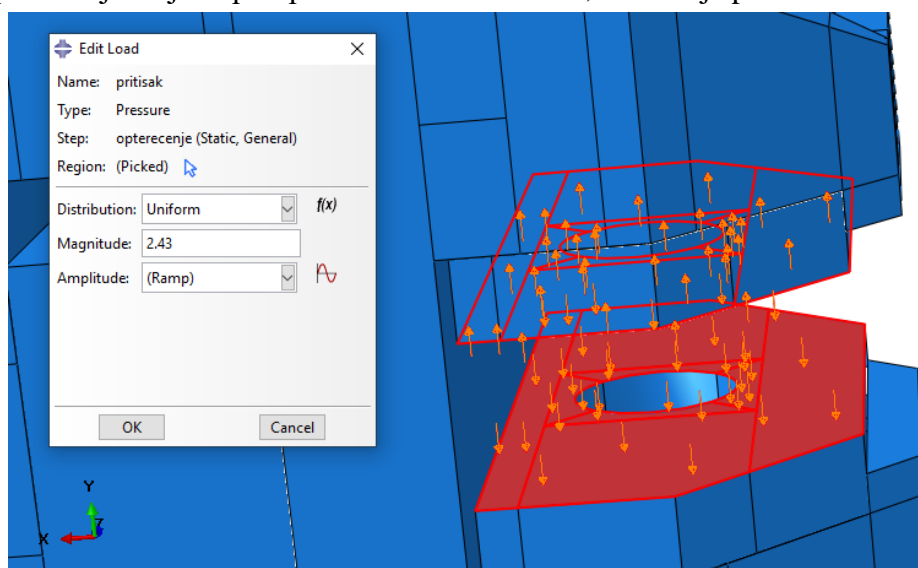


Slika 34. Rubni uvjet pomaka - uklještenje

S obzirom da se prilikom dvoosnog ispitivanja uzorak pričvršćuje u čeljust i razvlači, rezultat toga su opterećenja na čeljust u obliku pritiska (tlaka) na dodirnim plohama uzorka i čeljusti te sile trenja uslijed razvlačenja uzorka.

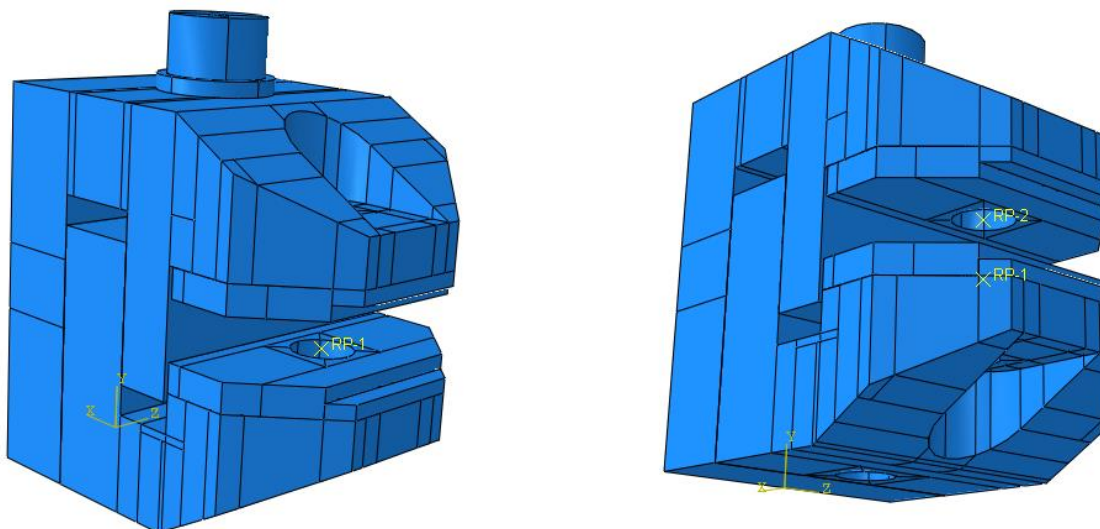
Za potrebe analize prihvata korišteno je maksimalno opterećenje kidalice od 2 kN te eksperimentalno dobiveni minimalni faktor trenja $\mu = 1,24$ kako bi se dobilo najveće opterećenje koje prihvat mora podnijeti.

Definiranje opterećenja čeljusti pod pritiskom u iznosi od 2,43 MPa je prikazano na slici 35.



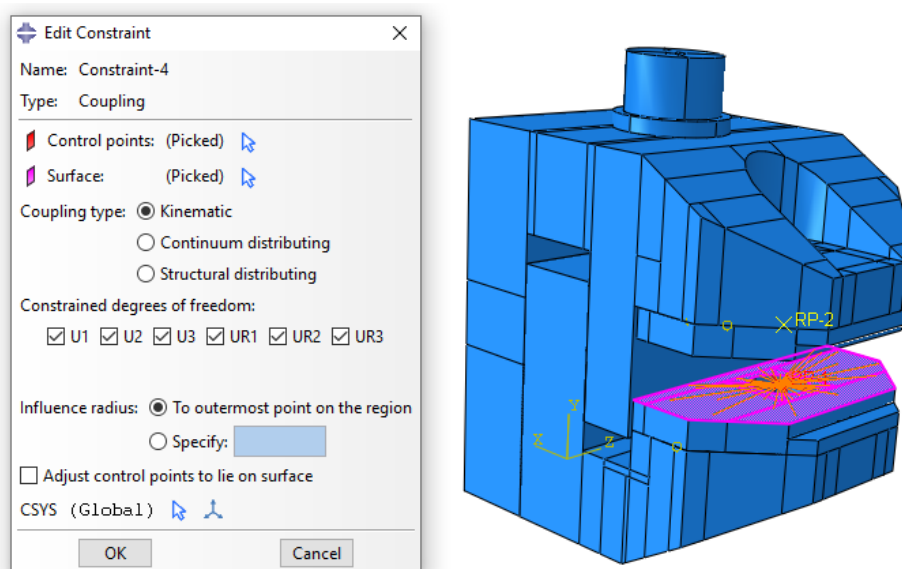
Slika 35. Opterećenje pritiskom na čeljust

Za definiranje opterećenja silom trenja potrebno je postaviti koncentriranu silu u središte dodirne plohe. Prvo je potrebno kreirati referentne točke (*eng. reference points*) na dvije dodirne površine kako je prikazano na slici 36.



Slika 36. Kreiranje referentnih točaka

Nakon definiranja položaja referentnih točaka, potrebno ih je povezati s površinom na kojoj se nalaze. To je ostvareno pomoću opcije *Coupling – Kinematic* koja ograničava gibanje skupine čvorova na gibanje krutog tijela definirano jednim referentnim čvorom te se može primijeniti na određene stupnjeve slobode gibanja, ovisno o potrebi. Definiranje *Coupling – Kinematic* ograničenja prve referentne točke RP-1 i pripadne površine prikazano je na slici 37.

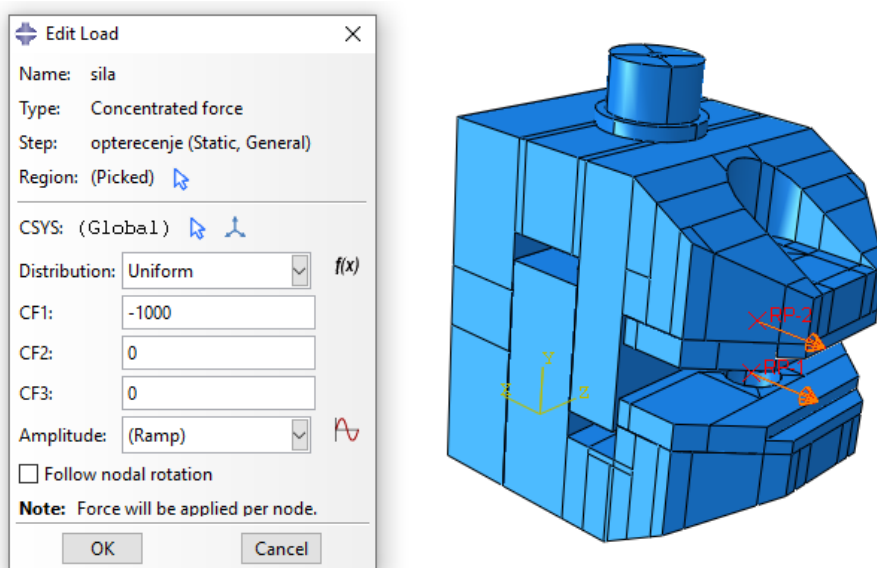


Slika 37. *Coupling – Kinematic* ograničenje

Analogno se definira ograničenje za drugu referentnu točku RP-2 i pripadnu površinu.

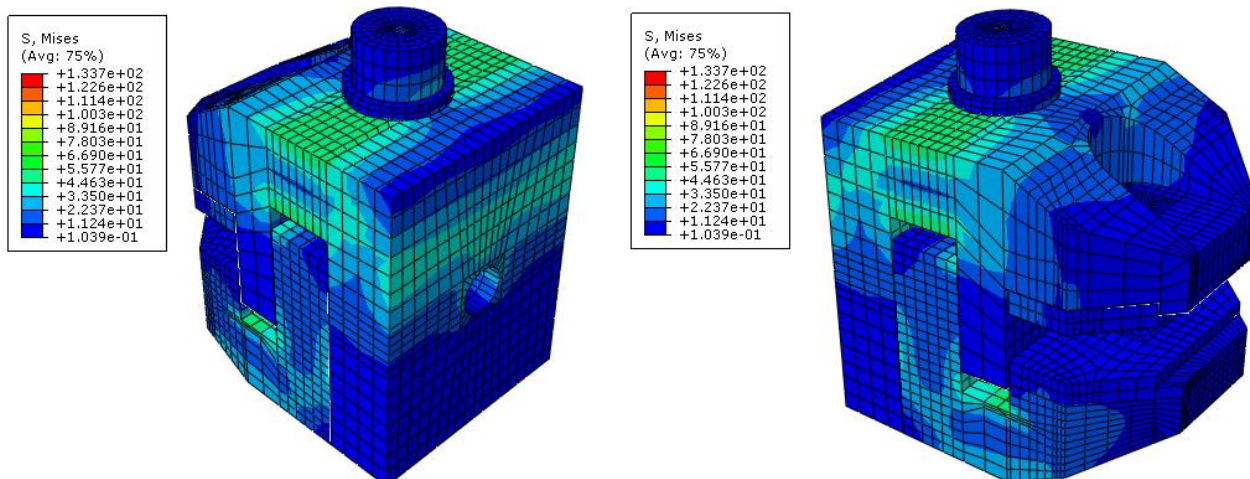
Nakon kreiranja referentnih točaka i pripadnih ograničenja, potrebno je definirati opterećenje silom trenja na čeljust. Hvatišta koncentriranih sila trenja su u prethodno kreiranim referentnim točkama.

S obzirom na maksimalno opterećenje kidalice od 2 kN, pojedina sila trenja koja opterećuje čeljust iznosi 1000 N. Definiranje sila trenja je prikazano na slici 38.



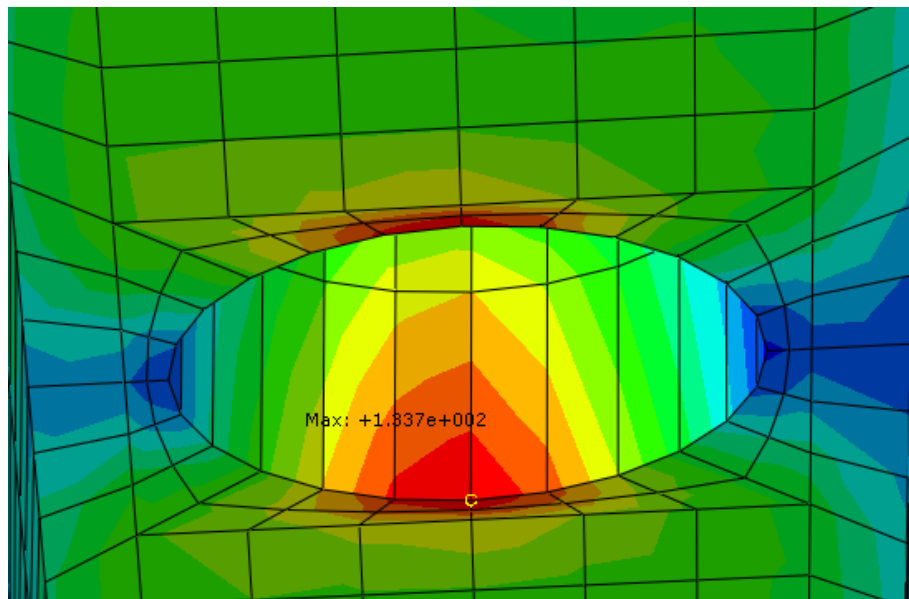
Slika 38. Definiranje sila trenja

Na slici 39 je prikazana raspodjela ukupnog napreznja nakon provedene analize.



Slika 39. Raspodjela ukupnog napreznja čeljusti

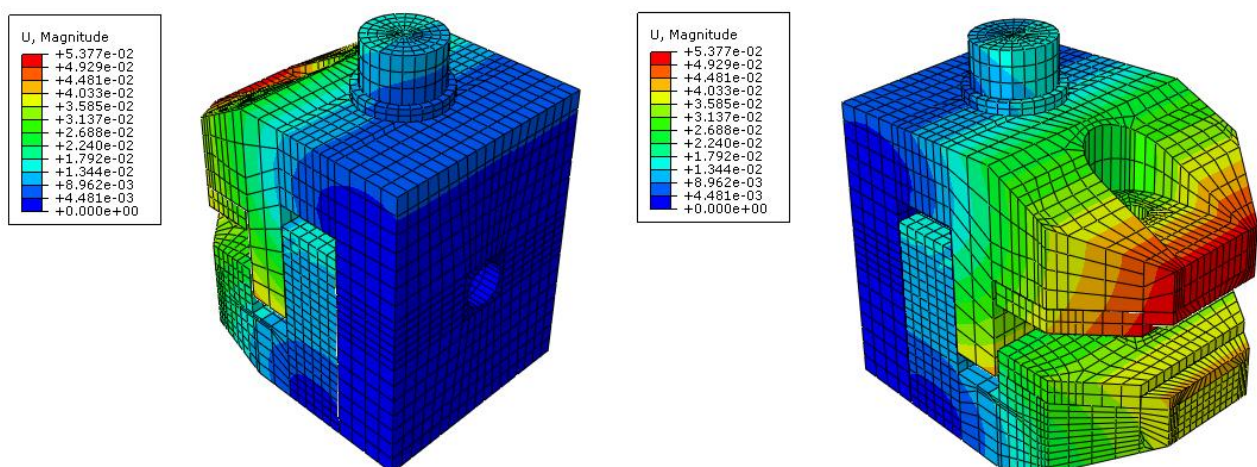
Maksimalno napreznje se javlja na mjestu dodira vijka i gornjeg dijela čeljusti. Zbog bolje preglednosti, prikazani su rezultati za gornji dio čeljusti na kojem se i nalazi maksimalno napreznje (Slika 40). Iznos maksimalnog napreznja je $\sigma_{max} = 133,7 \text{ MPa}$.



Slika 40. Maksimalno naprezanje čeljusti

S obzirom da granica razvlačenja materijala dijela iznosi $R_e = 320$ MPa, a maksimalno naprezanje je puno niže od te vrijednosti, zaključujemo da prihvat može podnijeti opterećenja koja djeluju na čeljust prilikom dvoosnog ispitivanja uzoraka pri maksimalnom opterećenju kidalice.

Na slici 41 je prikazana raspodjela ukupnog pomaka uslijed djelovanja zadanih opterećenja.

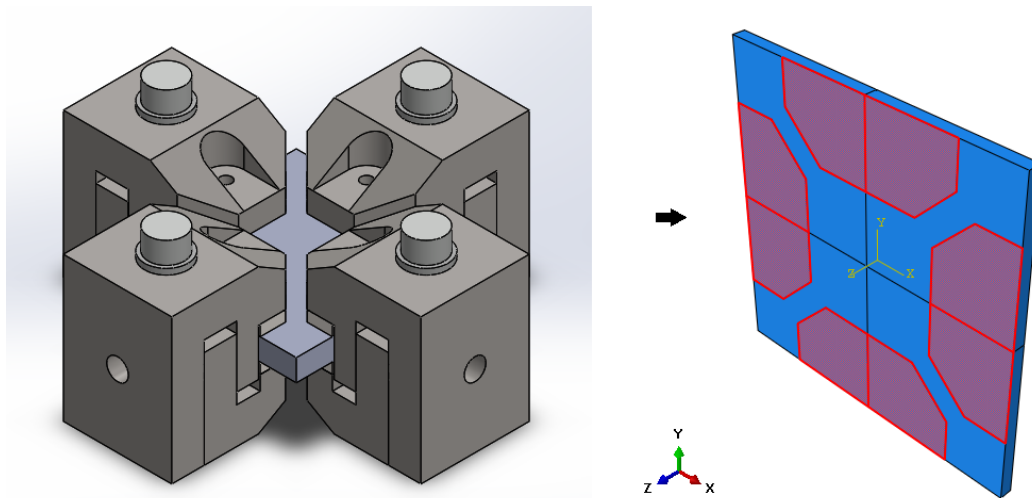


Slika 41. Raspodjela ukupnog pomaka čeljusti

Uočljivo je da se minimalni pomaci nalaze na dijelu koji pričvršćuje čeljust na aktuator, dok do maksimalnog pomaka dolazi na gornjem dijelu čeljusti.

9. UTJECAJ SILE PRITEZANJA NA HOMOGENOST POLJA NAPREZANJA UZORKA

Pojednostavljeni primjer dvoosnog vlačnog ispitivanja uzorka je prikazan na slici 42.



Slika 42. Dvoosno vlačno ispitivanje uzorka

Za numeričku analizu uzorka korišten je programski paket *Abaqus* u kojem je prvo kreirana geometrija uzorka. Budući da su geometrija i rubni uvjeti simetrični u odnosu na sve tri osi, iskorištena je jedna osmina uzorka kao proračunski model. S obzirom da se radi o hiperelastičnom modelu, na početku simulacije je potrebno definirati svojstva materijala kao što je prikazano na slici 43, na primjeru materijala TBP.

Name: TBP
Description:

Material Behaviors

Hyperelastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Hyperelastic

Material type: Isotropic Anisotropic

Strain energy potential: Neo Hooke

Input source: Test data Coefficients

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

Strain energy potential order: 1

Use temperature-dependent data

Data

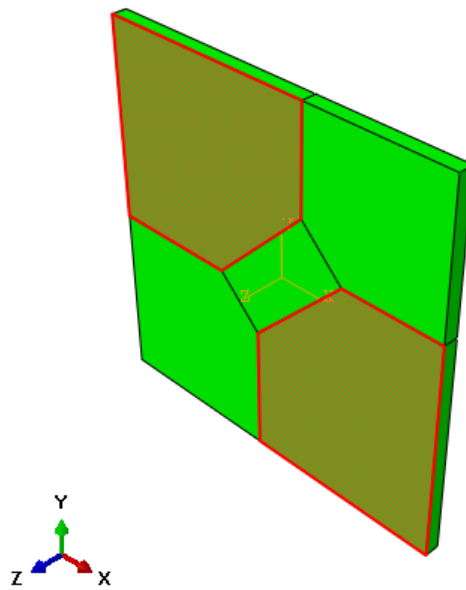
	C10	D1
1	0.1225	0

OK Cancel

Slika 43. Primjer definiranja hiperelastičnog materijala

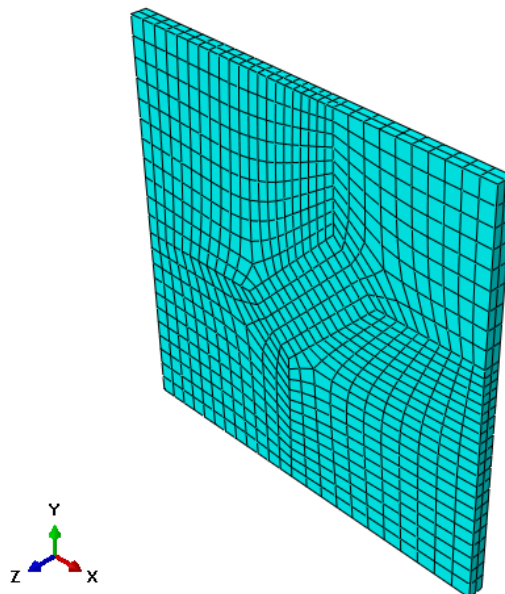
Postupak opterećivanja uzorka se sastoji iz dva dijela: stezanje uzorka u čeljust i razvlačenje uzorka. Zbog toga se kreiraju dva *Step*-a, jedan u kojem je uzorak opterećen tlakom na području dodira čeljusti i uzorka, i drugi u kojem je kreirano vlačno opterećenje u dva smjera. S obzirom da se analizira problem u kojem dolazi do velikih pomaka, u postavkama je uključena opcija *nlgeom* koja označava geometrijsku nelinearnost.

Kako bi se izradila pravilna heksaedarska mreža, geometrija uzorka je podijeljena na particije kao što je prikazano na slici 44, s naglašenim mjestima kontakta uzorka i čeljusti. Elementi koji su dodijeljeni su heksaedarski konačni elementi prvog reda C3D8H.



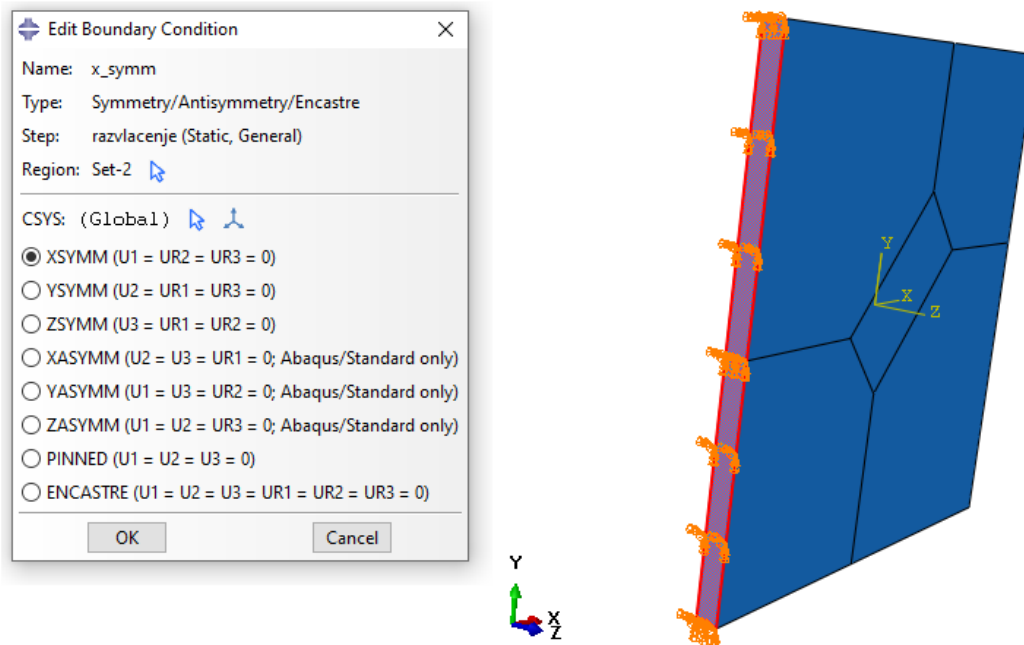
Slika 44. Podjela geometrije uzorka s ciljem izrade kvalitetne mreže

Na slici 45 je prikazana mreža od 1492 heksaedarska konačna elementa.



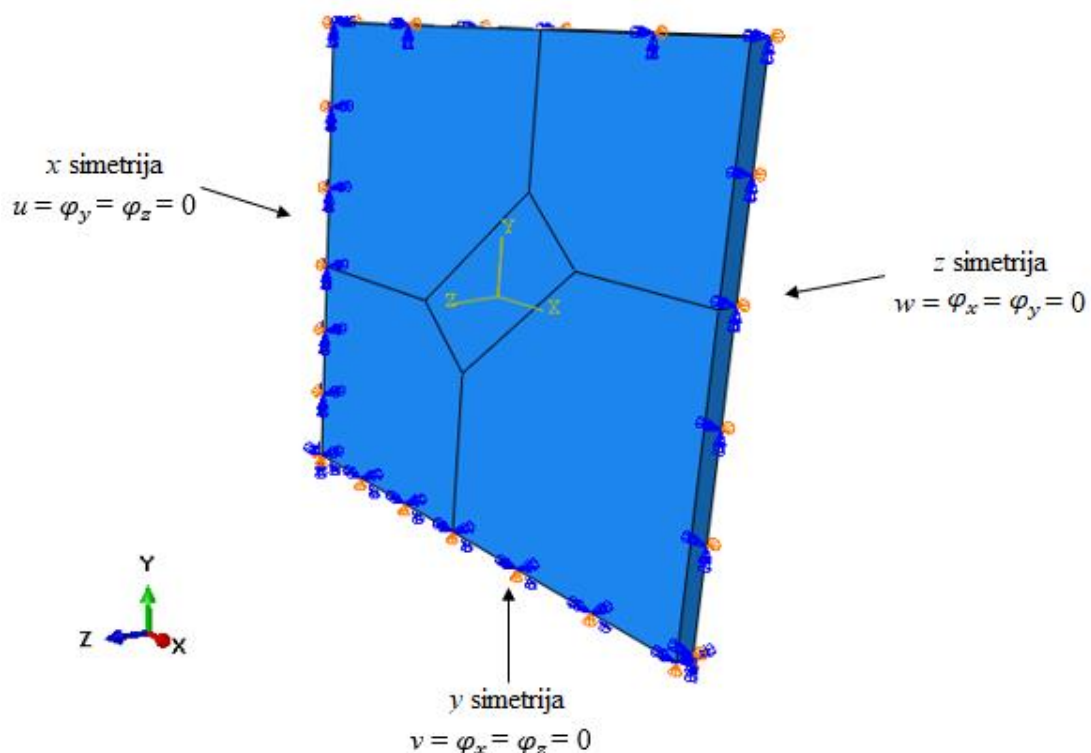
Slika 45. Mreža heksaedarskih konačnih elemenata

Kako je već spomenuto, uzorak je simetričan u odnosu na sve tri osi, pa se prilikom definiranja rubnih uvjeta postavljaju rubni uvjeti simetrije prema osima x , y i z . Na slici 46 je prikazan postupak postavljanja rubnog uvjeta simetrije u odnosu na os x .



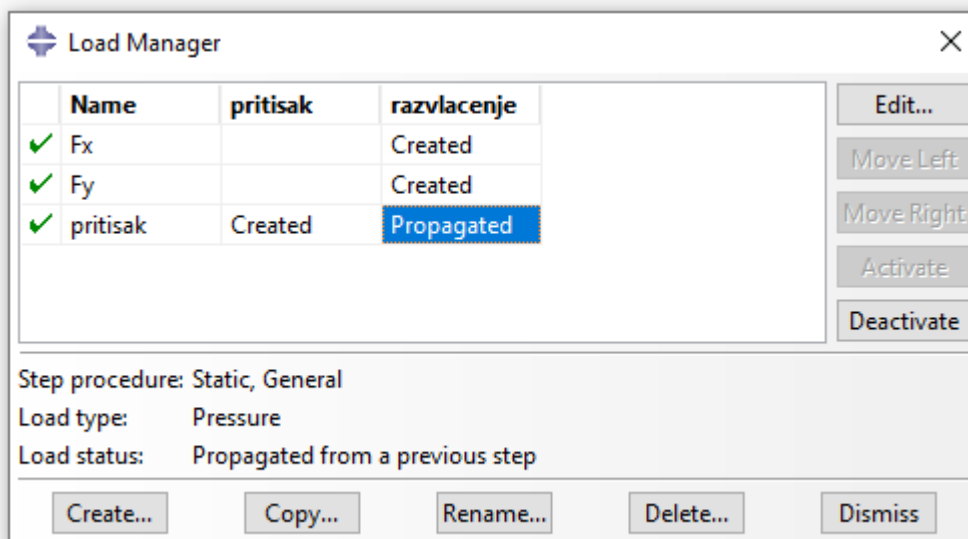
Slika 46. Postavljanje rubnog uvjeta simetrije u odnosu na os x

Analogno postavljanju rubnog uvjeta simetrije oko x , postavljaju se rubni uvjeti simetrije oko osi y i z . Potpuno definirani rubni uvjeti uzorka su prikazani na slici 47.



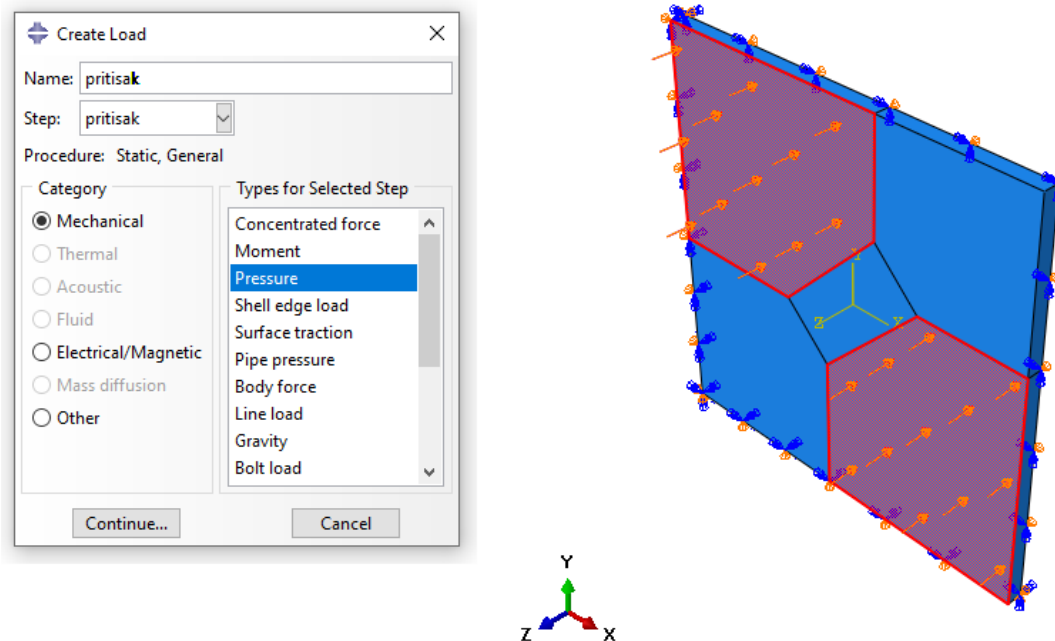
Slika 47. Rubni uvjeti simetrije uzorka

Što se tiče opterećenja, ranije je spomenuto da se sastoji iz dva dijela. Prvo opterećenje *pritisak* se definira u prvom *Step*-u (*pritisak*), a drugo opterećenje, F_x i F_y , se definira u drugom *Step*-u (*razvlacenje*). Potrebno je naglasiti da se početno opterećenje kreira u prvom *Step*-u i djeluje u drugom *Step*-u, dok je drugo opterećenje aktivno samo u drugom *Step*-u (Slika 48). To je analogno vlačnom ispitivanju uzorka gdje se uzorak prvo pričvrsti pomoću čeljusti, pa se nakon toga opterećuje na vlak.



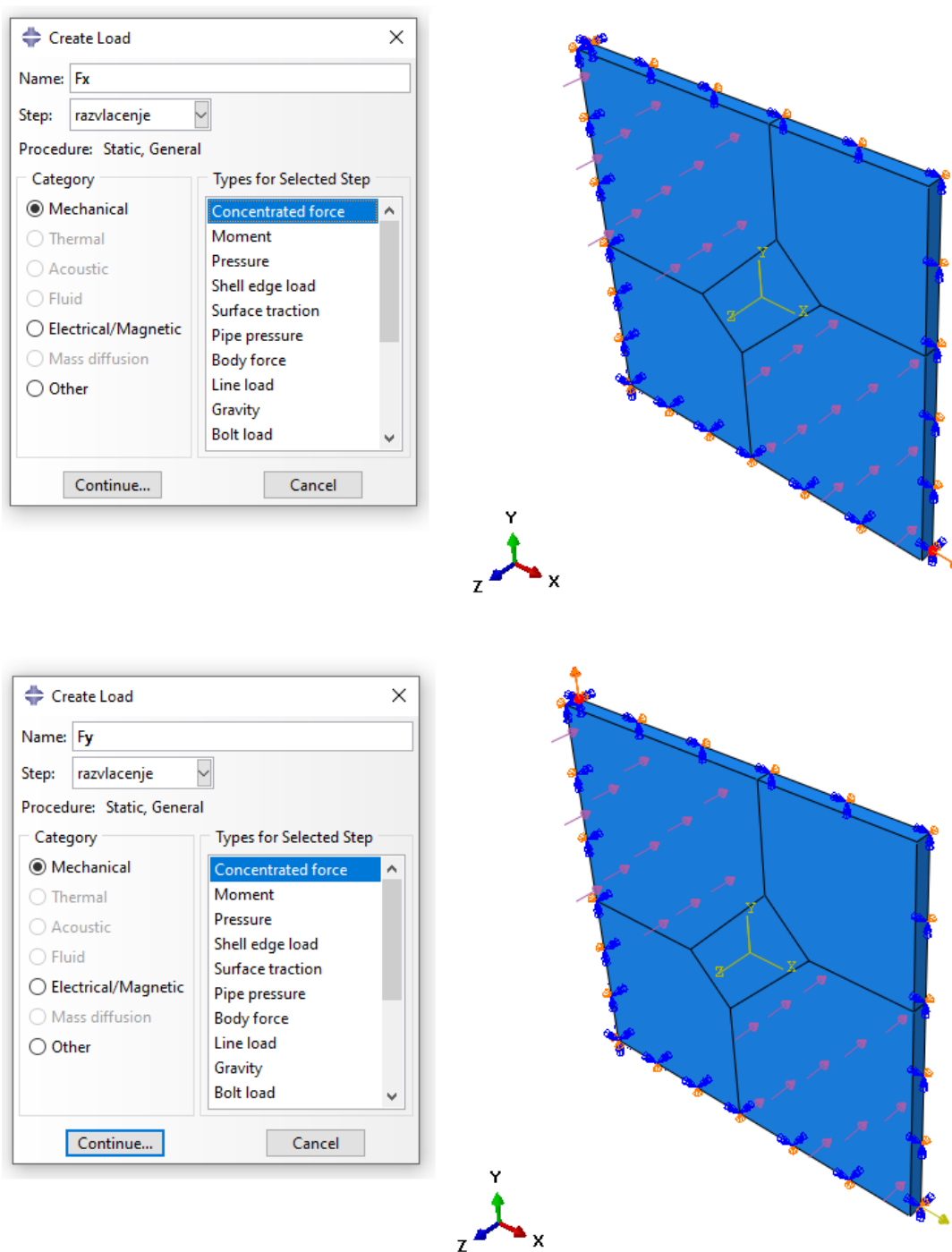
Slika 48. Aktivnost opterećenja u pojedinom *Step*-u

Na slici 49 je prikazan postupak definiranja pritiska uzorka.



Slika 49. Definiranje pritiska na uzorak

Slika 50 prikazuje način definiranja sila razvlačenja u smjerovima osi x i y .



Slika 50. Definiranje opterećenja u smjeru osi x i y

U nastavku su objašnjeni postupci analiza za teorijski i realni slučaj opterećenja uzorka prilikom dvoosnog vlačnog ispitivanja za model uzorka dimenzija 25 x 25 x 1 mm. Prije toga je, u svrhu dokazivanja dobro definiranog modela, prikazana usporedba rezultata dobivenih analitičkim i numeričkim putem na primjeru uzorka opterećenog samo vlačno, bez pritiska, čije je opterećenje zadano pomakom umjesto koncentriranim silama kako je prikazano na slici 50.

9.1. Usporedba analitičkog i numeričkog rezultata za validaciju modela

Početne i konačne dimenzije ispitivanog uzorka su uzete proizvoljno s obzirom na dimenzije prihvata. Početna duljina i širina (dimenzije u smjerovima osi x i y) iznose po $l_0 = 25$ mm. Konačne dimenzije su također uzete proizvoljno, a iznose $l_k = 27$ mm. Iz tih vrijednosti se izračunaju produljenja u smjeru osi x i y :

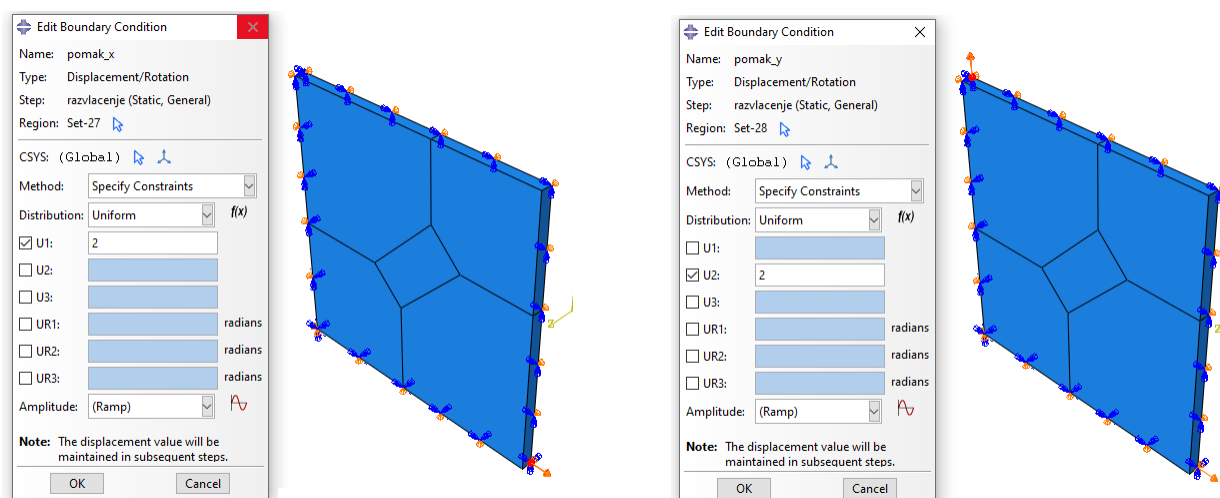
$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda = \frac{l_k}{l_0} = \frac{27}{25} = 1,08. \quad (43)$$

Iznosi napreznja izračunatih analitičkim putem pomoću izraza (33) i (43) u smjerovima osi x i y za pojedini materijal su prikazani u tablici 5.

Tablica 5. Vrijednosti napreznja izračunatih analitičkim putem

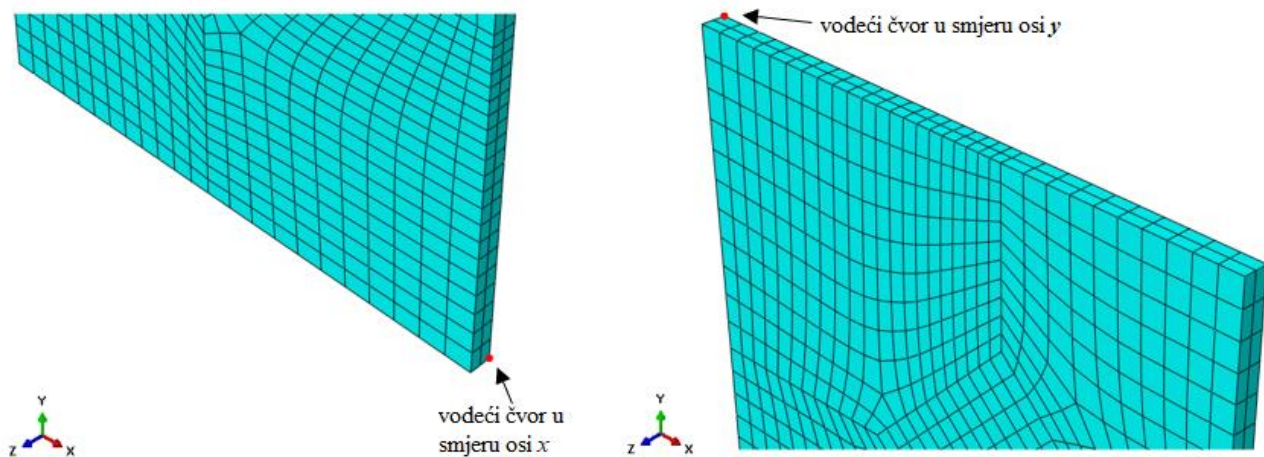
	TBP	FLX9840 DM	FLX9850 DM	FLX9860 DM	FLX9870 DM
C_1	0,1225 MPa	0,2 MPa	0,3435 MPa	0,487 MPa	0,925 MPa
$\sigma_X = \sigma_Y$	0,10568 MPa	0,172548 MPa	0,29635 MPa	0,420155 MPa	0,798035 MPa

Za numeričko rješavanje problema se koristio model uzorka prethodno opisan (Slika 43 do Slika 48), s opterećenjem zadanim u obliku pomaka u smjeru osi x i y u iznosu od 2 mm, prema slici 51.

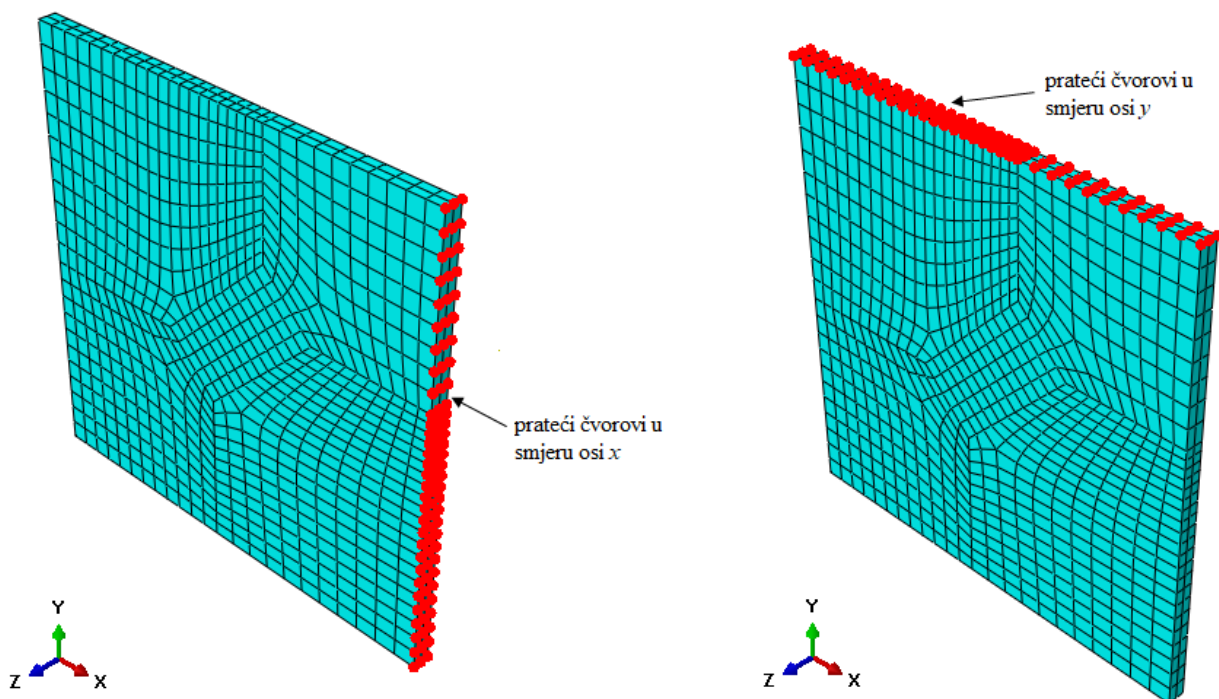


Slika 51. Definiranje opterećenja u obliku pomaka

Kako bi se osiguralo jednoliko razvlačenje uzorka, potrebno je odrediti vodeće i prateće čvorove. Vodeći čvor je čvor u kojem je zadana sila ili pomak, a preko opcije *Constraint – Equation* je postavljeno da pomaci pratećih čvorova budu jednaki pomaku vodećeg čvora. Bez tog ograničenja bi u rezultatima dobili nehomogeno polje deformiranja. Vodeći čvorovi se nalaze na mjestima djelovanja pomaka, a prateći čvorovi se nalaze duž stranica kako je prikazano na sljedećim slikama.



Slika 52. Vodeći čvorovi u smjeru osi x i y



Slika 53. Prateći čvorovi u smjeru osi x i y

Iznosi naprezanja dobivenih numeričkim putem su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Vrijednosti naprezanja izračunatih numeričkim putem

	TBP	FLX9840 DM	FLX9850 DM	FLX9860 DM	FLX9870 DM
$\sigma_x = \sigma_y$	0,1057 MPa	0,1725 MPa	0,2964 MPa	0,4202 MPa	0,7980 MPa

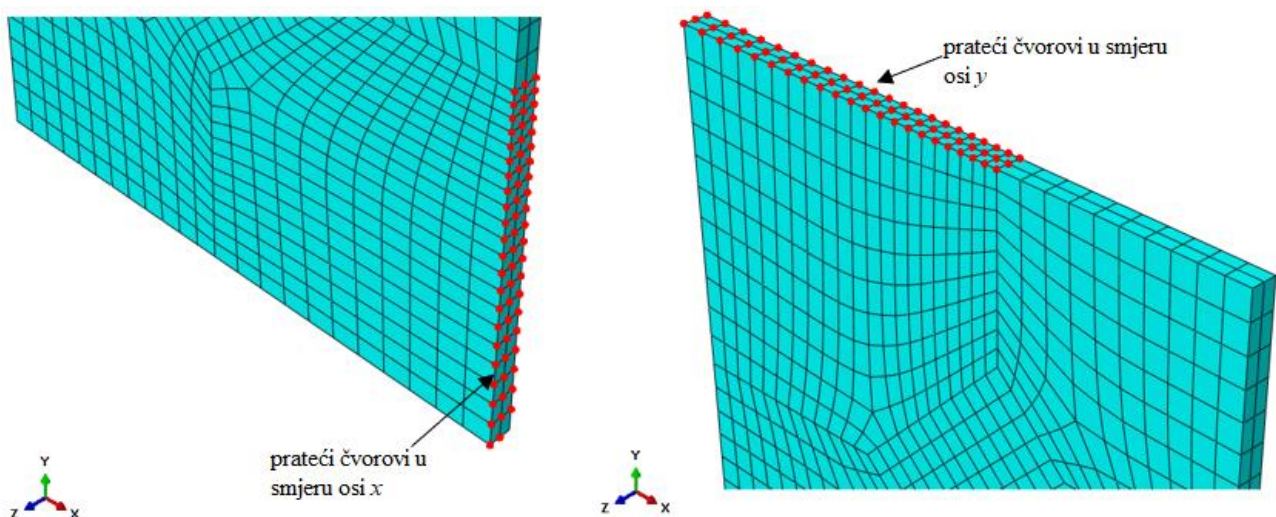
Usporedbom vrijednosti naprezanja iz tablica 5 i 6, zaključujemo da je model za analizu metodom konačnih elemenata u *Abaqus*-u dobro definiran.

9.2. Teorijski i realni slučaj

Za razliku od opterećenja uzorka za validaciju modela, u sljedećim analizama se uzorak opterećuje vlačnim silama umjesto pomacima jer postoji veza između vlačnih sila i pritiska u realnom slučaju, a to je preko faktora trenja, dok veza pritiska i pomaka nije poznata.

Prilikom analize teorijskog ispitivanja uzorka, uzorak je opterećen samo vlačnim silama, tj. opterećenje od stezanja čeljusti se ne uzima u obzir. Vodeći čvorovi se nalaze na mjestima djelovanja koncentriranih sila F_x i F_y , dok se prateći čvorovi nalaze duž stranica kako je prikazano na slikama 52 i 53.

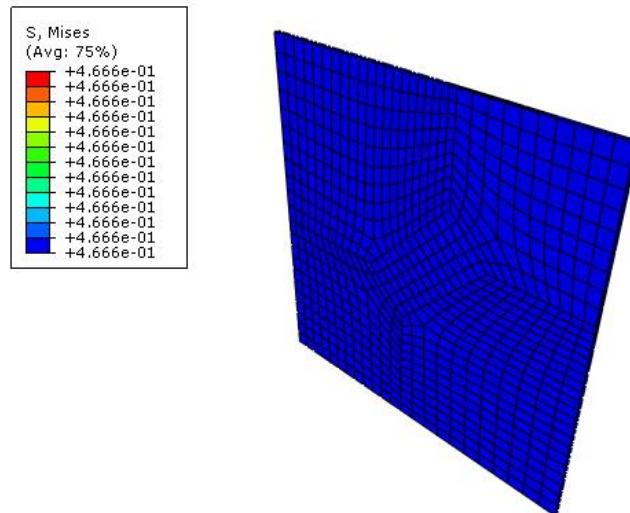
Za analizu realnog slučaja opterećenja uzorka, uz utjecaj sila razvlačenja, u obzir se uzima i utjecaj pritiska koji nastaje zbog pritezanja čeljusti. Za razliku od teorijskog slučaja, kod realnog opterećenja prateći čvorovi su definirani na drugačiji način tako da vodeći čvorovi ostaju na mjestima djelovanja koncentriranih sila razvlačenja, dok se prateći čvorovi definiraju samo duž rubova koji su pod djelovanjem pritiska od čeljusti kako je prikazano na slici 54.



Slika 54. Prateći čvorovi u smjeru osi x i y – realni slučaj

9.3. Analiza TBP uzorka

Iterativnim postupkom je određena maksimalna vrijednost sile razvlačenja za koju neće doći do pucanja uzorka, a raspodjela naprezanja nakon analize teorijskog slučaja prikazana je na slici 55.



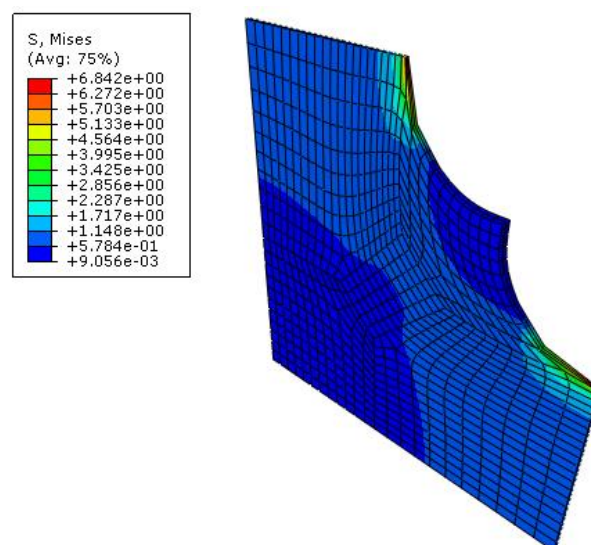
Slika 55. Raspodjela naprezanja na TBP uzorak u teorijskom slučaju

Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja u smjeru osi x i y te maksimalnog i dopuštenog naprezanja za teorijski slučaj ispitivanja TBP materijala uzorka su prikazani u tablici 7.

Tablica 7. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal TBP pri teorijskom ispitivanju uzorka

	$F_x = F_y$	λ	σ_{\max}	σ_{dop}
TBP	8 N	1,458	0,466 MPa	0,5323 MPa

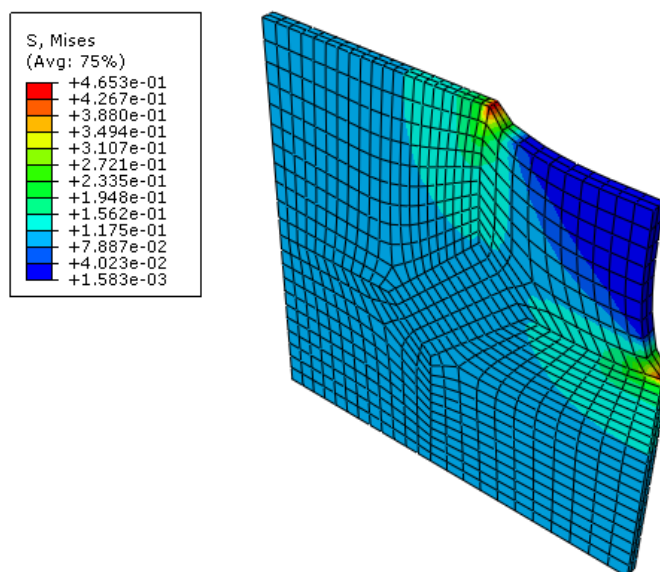
Raspodjela naprezanja za realni slučaj prilikom opterećenja s maksimalnom silom razvlačenja od 8 N i pripadnim pritiskom prikazana je na slici 56.



Slika 56. Raspodjela naprezanja u TBP uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja

Iz slike 56 je vidljivo da maksimalno naprezanje koje se javlja u uzorku znatno prelazi dopuštene vrijednosti te je zbog toga za analizu realnog slučaja opterećenja potrebno koristiti manje sile razvlačenja. Iterativnim postupkom je dobiven iznos sile razvlačenja i izračunatog pritiska, a vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, sile pritezanja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja te momenta pritezanja su prikazane u tablici 12, gdje se moment pritezanja računa prema izrazu (35). Tablica 12 se nalazi na kraju poglavlja i objedinjuje navedene vrijednosti za sve materijale uzoraka.

Raspodjela naprezanja za realni slučaj pri dozvoljenim vrijednostima opterećenja je prikazana na slici 57.



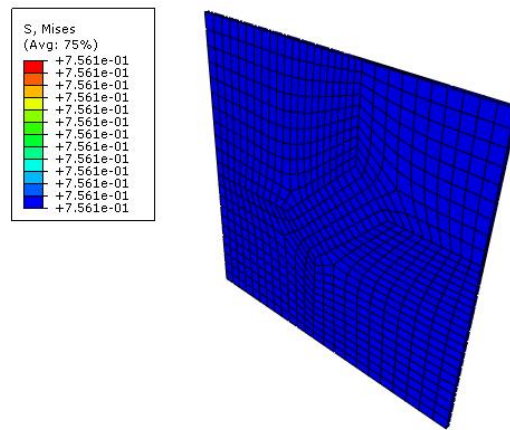
Slika 57. Raspodjela naprezanja u TBP uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska

9.4. Analiza FLX9840 DM uzorka

Analogno postupku analize TBP uzorka, analizira se materijal FLX9840 DM. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja te maksimalnog i dopuštenog naprezanja za teorijski slučaj dane su u tablici 8, a raspodjela naprezanja je prikazana na slici 58.

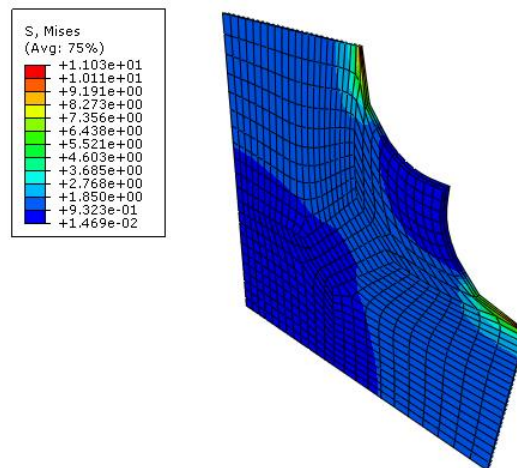
Tablica 8. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal FLX9840 DM pri teorijskom ispitivanju uzorka

	$F_x = F_y$	λ	σ_{\max}	σ_{dop}
FLX9840 DM	13 N	1,454	0,7561 MPa	0,8285 MPa



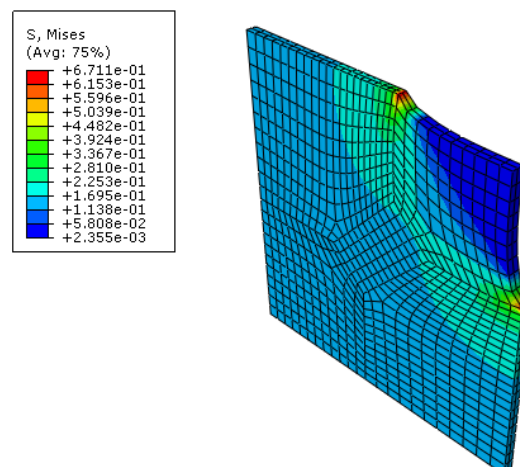
Slika 58. Raspodjela naprezanja na FLX9840 DM uzorak u teorijskom slučaju

Raspodjela naprezanja za realni slučaj opterećenja je prikazana na slici 59 gdje se, kao i u prethodnom slučaju, javljaju prevelika naprezanja te je potrebno smanjiti vrijednosti sile razvlačenja i pritiska.



Slika 59. Raspodjela naprezanja u FLX9840 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja

Nakon određivanja dozvoljenih sila razvlačenja i pritiska, dobije se raspodjela naprezanja prikazana na slici 60. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, sile i momenta pritezanja te maksimalnog i dopuštenog naprezanja, za ovaj uzorak i za sve naredne uzorke su dane u tablici 12.



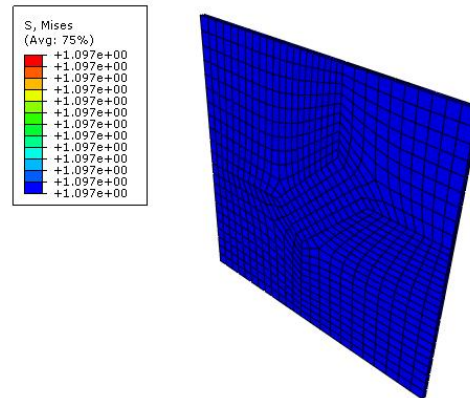
Slika 60. Raspodjela naprezanja u FLX9840 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska

9.5. Analiza FLX9850 DM uzorka

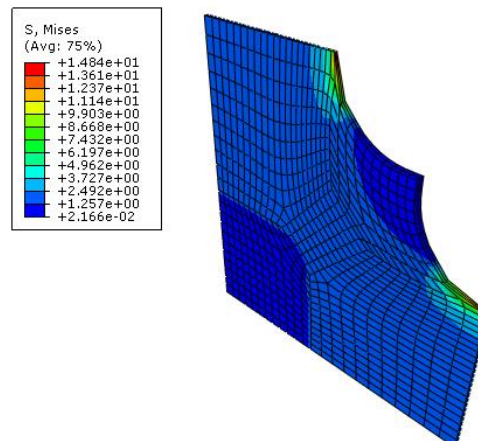
S obzirom da se analize za ovaj uzorak rade na analogan način kao i za prethodna dva, postupak neće biti detaljno objašnjen, nego će se u nastavku prikazati samo rezultati analiza.

Tablica 9. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal FLX9850 DM pri teorijskom ispitivanju uzorka

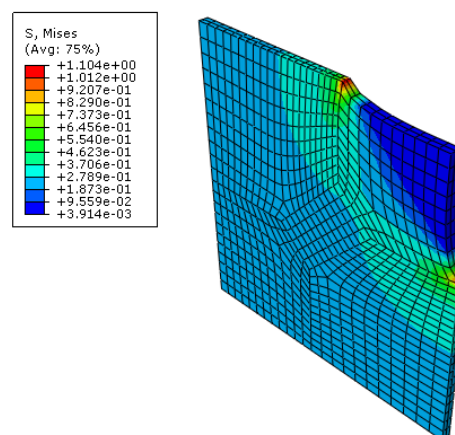
	$F_x = F_y$	λ	σ_{\max}	σ_{dop}
FLX9850 DM	20 N	1,371	1,097 MPa	1,1795 MPa



Slika 61. Raspodjela naprezanja na FLX9850 DM uzorak u teorijskom slučaju



Slika 62. Raspodjela naprezanja u FLX9850 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja



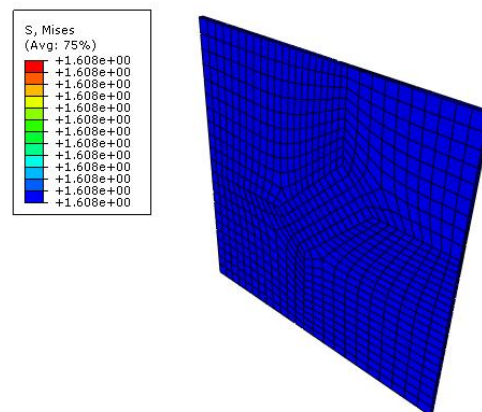
Slika 63. Raspodjela naprezanja u FLX9850 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska

9.6. Analiza FLX9860 DM uzorka

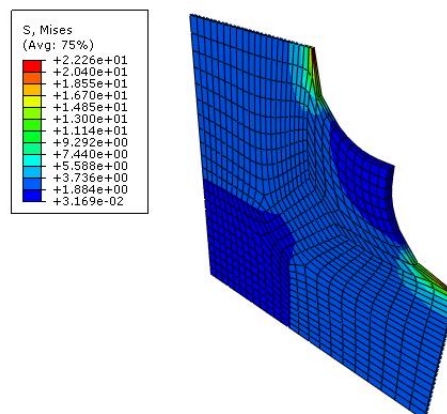
Kao i za prethodni uzorak, za analizu FLX9860 DM uzorka će biti samo prikazani rezultati analiza.

Tablica 10. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal FLX9860 DM pri teorijskom ispitivanju uzorka

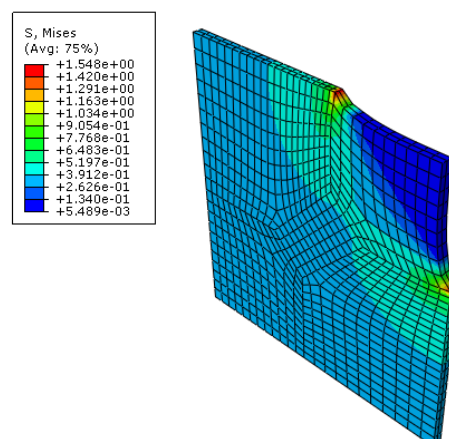
	$F_x = F_y$	λ	σ_{\max}	σ_{dop}
FLX9860 DM	29 N	1,39	1,608 MPa	1,6655 MPa



Slika 64. Raspodjela naprezanja na FLX9860 DM uzorak u teorijskom slučaju



Slika 65. Raspodjela naprezanja u FLX9860 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja



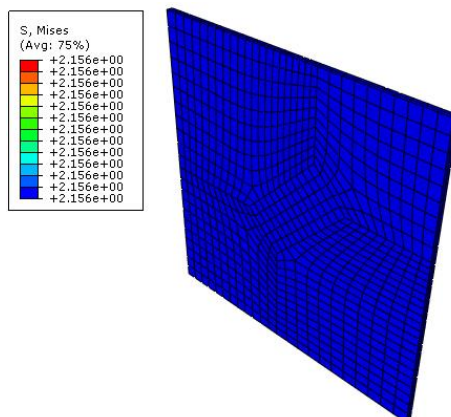
Slika 66. Raspodjela naprezanja u FLX9860 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska

9.7. Analiza FLX9870 DM uzorka

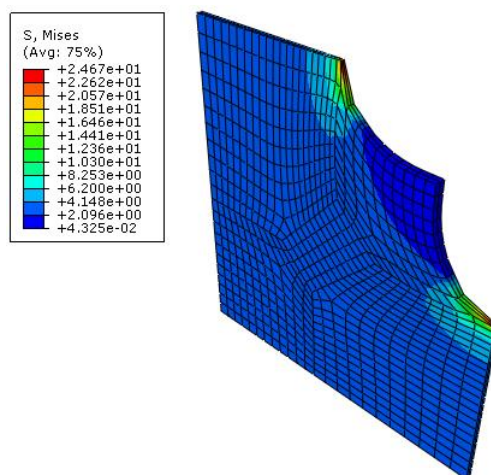
Također, i za ovaj uzorak će biti prikazani samo rezultati analiza.

Tablica 11. Vrijednosti sile razvlačenja, faktora produljenja, maksimalnog i dopuštenog naprezanja za materijal FLX9870 DM pri teorijskom ispitivanju uzorka

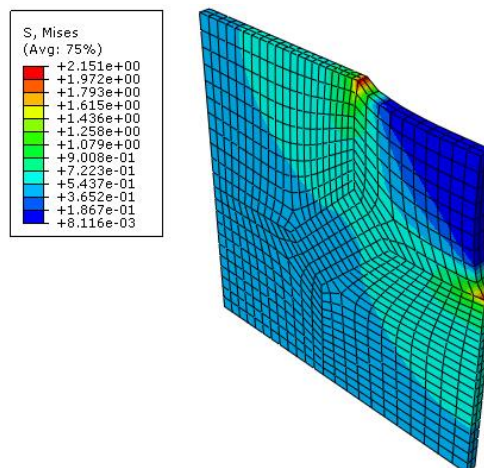
	$F_x = F_y$	λ	σ_{\max}	σ_{dop}
FLX9870 DM	43 N	1,253	2,156 MPa	2,195 MPa



Slika 67. Raspodjela naprezanja na FLX9870 DM uzorak u teorijskom slučaju



Slika 68. Raspodjela naprezanja u FLX9870 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s maksimalnom silom razvlačenja



Slika 69. Raspodjela naprezanja u FLX9870 DM uzorku pri realnom ispitivanju uzorka s dopuštenim vrijednostima sile razvlačenja i pritiska

9.8. Sile i momenti pritezanja

Prilikom dvoosnog vlačnog ispitivanja analiziranih materijala potrebno je poznavati iznos momenata pritezanja kojim će se čeljusti pritegnuti, a neće doći do pucanja uzorka ako je moment prevelik ili do klizanja uzorka ako je moment premali. Vrijednosti momenata pritezanja, faktora produljenja, kao i sila pritezanja te sila razvlačenja uzoraka, uz maksimalna naprezanja koja se javljaju u svim uzorcima, prikazane su u tablici 12.

Tablica 12. Tražene vrijednosti za pojedini materijal

	$F_x = F_y$	λ	F_p	T_p	σ_{\max}	σ_{dop}
TBP	2 N	1,07	1,295 N	3,9 Nmm	0,4653 MPa	0,5323 MPa
FLX9840 DM	3 N	1,063	1,58 N	4,76 Nmm	0,6711 MPa	0,8285 MPa
FLX9850 DM	5 N	1,06	2,44 N	7,35 Nmm	1,104 MPa	1,1795 MPa
FLX9860 DM	7 N	1,06	5,56 N	16,75 Nmm	1,548 MPa	1,6655 MPa
FLX9870 DM	10,5 N	1,046	8,47 N	25,5 Nmm	2,151 MPa	2,195 MPa

ZAKLJUČAK

Ciljevi koji su postavljeni u uvodnom dijelu rada su: odrediti faktor trenja između čeljusti i uzorka, provjeriti čvrstoću i krutost stezne čeljusti te analizirati utjecaj sile pritezanja na homogenost polja naprezanja i odrediti približan moment pritezanja čeljusti.

Za ispunjenje prvog cilja bilo je potrebno odrediti faktor trenja eksperimentalnim putem tako što se za pet različitih materijala ponavljao eksperiment pet puta. U eksperimentu je korišten uređaj za ispitivanje trenja koji se pokretao pomoću ručice. Ručica je uzrokovala okretanje vretena po kojem se kretala matica koja je omogućavala promjenu nagiba ploče. Na pokretnoj ploči se nalazila podloga koja je imala svojstva ispitnog uzorka, a na podlogu su se postavile dvije pločice koje imaju svojstva materijala kojim se osigurava bolji prihvat uzorka i čeljusti. Na te pločice je bilo potrebno postaviti dodatnu masu kako bi se povećala normalna sila jer je masa samih pločica jako mala. Mjerenje se vršilo tako što se okretanje ručice zaustavilo ovisno o trenutku početka klizanja pločica po podlozi te se pomoću digitalnog mjerača kuta izmjerio nagib ploče uređaja. S obzirom da dobiveni faktori trenja za određeni uzorak ne odstupaju previše jedan od drugog, zaključujemo da je eksperiment pouzdan. Za svaki od materijala se izračunao srednji faktor trenja koji se koristio u daljnoj analizi.

Prije početka analize stezne čeljusti, bilo je potrebno pojednostaviti model čeljusti u svrhu izrade kvalitetnije mreže konačnih elemenata. U slučaju da nisu izbačena skošenja i zaobljenja, mreža bi bila jako sitna i precizna, ali bi imala prevelik broj elemenata, pa bi analiza trajala predugo. Elementi koji su se koristili su heksaedarski konačni elementi, a na dijelovima koji nisu prikladni za heksaedarsku mrežu su korišteni *wedge* elementi. Za numeričku analizu čvrstoće i krutosti stezne čeljusti je uzeto maksimalno opterećenje koje se može javiti prilikom ispitivanja spomenutih pet uzoraka. Zbog toga se za faktor trenja uzeo minimalni u iznosu od $\mu = 1,24$ te maksimalno opterećenje kidalice od 2 kN, odnosno u slučaju ispitivanja FLX9870 DM uzroka čeljust će biti najviše opterećena. Rezultati analize pokazuju vrlo male pomake te maksimalno ekvivalentno naprezanje $\sigma_{\max} = 133,7$ MPa koje je znatno manje od granice razvlačenja materijala $R_e = 320$ MPa, što znači da su uvjeti čvrstoće i krutosti čeljusti zadovoljeni. S obzirom na raspodjelu naprezanja i mjesto gdje se javlja maksimalno naprezanje, možemo zaključiti da će i u slučaju većeg opterećenja kidalice, konstrukcija čeljusti zadovoljiti.

Sljedeće što je odrađeno u radu je analiza različitih hiperelastičnih materijala uzoraka. Zbog pojednostavljenja, smatralo se da se radi o izotropnim materijalima. Svaki od uzoraka se analizirao na isti način, samo su se mijenjala svojstva hiperelastičnog materijala. S obzirom na simetriju geometrije i opterećenja, u analizi se koristila jedna osmina uzorka. Kako bi se odredio utjecaj sile pritezanja čeljusti, odnosno tlaka koji se zbog pritiska čeljusti javlja na uzorku, analize su podijeljene

na dva dijela. Prvo se analizirao teorijski slučaj opterećenja u kojem je uzorak opterećen samo vlačnim silama. Iterativnim postupkom se odredila sila razvlačenja koja je jednaka u smjeru osi x i y te za koju je maksimalno naprezanje bilo manje od dopuštenog. Nakon toga se radila analiza realnog slučaja. Prvo se na osnovu teorijski dobivene sile razvlačenja preko faktora trenja izračunala sila pritezanja i za taj slučaj je dobiveno da maksimalna naprezanja znatno prelaze dopuštene vrijednosti, što znači da sila pritezanja ima jako velik utjecaj na polje naprezanja uzorka. Također, to znači da u se ubuduće pri ispitivanju hiperelastičnih materijala, odnosno biomaterijala, u obzir mora uzeti i utjecaj pritiska čeljusti.

S obzirom da je pokazano kako sila pritezanja ima značajan utjecaj na polje naprezanja, bilo je potrebno odrediti približne momente pritezanja jer u slučaju da je moment pritezanja prevelik, uzorak se deformira pri postavljanju na uređaj te dolazi do koncentracije naprezanja, a ako je moment pritezanja premali, dolazi do klizanja uzorka tijekom eksperimenta.

LITERATURA

- [1] Marić, A. J., *Diplomski rad*, FSB, Zagreb, 2020.
- [2] <https://www.zwickroell.com/products/static-materials-testing-machines/biaxial-and-triaxial-testing-machines/#navigation-246>, pristupljeno 14.06.2022.
- [3] <https://www.admet.com/products/biaxial-testing-machines/planar-biaxial-test-machines/>, pristupljeno 14.06.2022.
- [4] <https://www.tainstruments.com/planar-biaxial-2-motor/>, pristupljeno 14.06.2022.
- [5] <https://www.cellscale.com/products/biotester/>, pristupljeno 14.06.2022.
- [6] Alfirević I., *Uvod u tenzore i mehaniku kontinuuma*, Golden marketing, Zagreb, 2003.
- [7] Bilješke s predavanja iz kolegija Mehanika kontinuuma, FSB, Zagreb, 2021/22.
- [8] Sorić J., *Metoda konačnih elemenata*, Golden Marketing-Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [9] King S., Richards T., *Solving contact problems with Abaqus*, UK, 2013.
- [10] *Abaqus 6.14. Documentation, Abaqus/CAE User's manual*, ABAQUS Inc.,
- [11] Kranjčević N., *Vijci i navojna vretena*, FSB, Zagreb, 2014.
- [12] Kraut B., *Strojarski priručnik*, Sajema, Zagreb, 2009.
- [13] <https://www.tribonet.org/wiki/friction-coefficients-in-atmosphere-and-vacuum>, pristupljeno 24.06.2022.