Numerička analiza čvrstoće okvira kompozitnog brdskog bicikla

Nekić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:468227

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Nekić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Doc. dr. sc. Darko Ivančević

Student:
Luka Nekić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Darku Ivančeviću na ukazanom povjerenju i na pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Luka Nekić

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, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Nekić** Mat. br.: 0035195331

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza čvrstoće okvira kompozitnog brdskog bicikla**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Stress Analysis of a Composite Mountain Bike Frame**

Opis zadatka:

U radu je potrebno provesti numeričku analizu čvrstoće i krutosti kompozitnog okvira brdskog bicikla zadane geometrije i rasporeda slojeva. U inicijalnoj fazi rada potrebno je iz dostupne CAD geometrije kompozitnog okvira izraditi model za numeričku analizu konstrukcija u programu Abaqus/Standard ili Abaqus/Explicit. Pritom je potrebno posebnu pozornost posvetiti korištenim pojednostavljenjima koja su neophodna pri izradi numeričkog modela složene kompozitne konstrukcije.

U radu je potrebno dati pregled zahtjeva koje okvir bicikla treba zadovoljiti prema definiranim normama za zadanu kategoriju okvira bicikla. U nastavku rada je potrebno procijeniti opterećenje kojem konstrukcija može biti podvrgnuta u realnim uvjetima tijekom eksploatacije. Pritom treba koristiti podatke iz dostupne literature ili rezultate jednostavnih analitičkih modela.

Primjenom numeričke analize konstrukcija u programu Abaqus/Standard ili Abqus/Explicit je potrebno provjeriti zadovoljava li konstrukcija uvjete čvrstoće i krutosti prema normama primjenom standardnih kriterija popuštanja za kompozitne konstrukcije te primjenom analize gubitka stabilnosti. U nastavku rada potrebno je provesti numeričku analizu čvrstoće i krutosti pri procijenjenom realnom opterećenju okvira tijekom eksploatacije. U zadnjem dijelu rada potrebno je predložiti promjenu rasporeda slojeva s ciljem smanjenja mase postojeće konstrukcije kompozitnog okvira.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
7. ožujka 2019.	9. svibnja 2019.	15., 16. i 17. svibnja 2019.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Darko Ivančević

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Sadržaj

Sadržaj I
Popis slika III
Popis tablica VI
Popis oznaka VII
Sažetak IX
1. UVOD 1
1.1. *HardCore Industry* bicikl 2
2. Kompozitni materijali 3
2.1. Proizvodnja kompozitnih materijala 4
2.2. Mehanika kompozitnih materijala 5
2.2.1. Teorije popuštanja [5] 5
3. PRORAČUN ČVRSTOĆE BICIKLA 11
3.1. Statička i dinamička opterećenja bicikla 11
3.1.1. Zakon očuvanja energije 12
3.1.2. Norma ISO 4210 14
3.2. Kritična mjesta rame bicikla 16
4. NUMERIČKA ANALIZA 17
4.1. Konačni elementi 17
4.2. Geometrija modela 18
4.3. Zadavanje materijala 20
4.4. Rubni uvjeti 23
4.5. Kinematske veze 24
4.6. Opterećenja 26
4.6.1. Prvi slučaj opterećenja prema ISO 4210-6-2015 26
4.6.2. Drugi slučaj opterećenja prema ISO 4210-6-2015 27
4.6.3. Treći slučaj opterećenja 29
4.6.4. Četvrti slučaj opterećenja 30

5. Rezultati 31
5.1. Konvergencija mreže 31
5.2. Rezultati za prvi slučaj opterećenja 33
5.3. Rezultati za drugi slučaj opterećenja 36
5.4. Rezultati za treći slučaj opterećenja 39
5.5. Rezultati za četvrti slučaj opterećenja 41
5.6. Analiza rezultata 44
6. Izvijanje 45
6.1. Rezultati 45
6.1.1. Prvi slučaj izvijanja 45
6.1.2. Drugi slučaj izvijanja 46
7. Konačni rasporeda slojeva 48
8. Zaključak 50
9. Literatura 51

Popis slika:

Slika 1. Primjeri izrade rame brdskog bicikla [1], [2] 1
Slika 2. Kompozitna rama *downhill* bicikla [3] 2
Slika 3. *HardCore Industry* brdski bicikl [3] 3
Slika 4. Prikaz slaganja laminata [4] 3
Slika 5. Postupci proizvodnje kompozitnih dijelova: a) ručno dodirno laminiranje b) podtlačno oblikovanje c) injekcijsko (RTM) [4] 4
Slika 6. Označavanje osi ortotropnog materijala [5] 5
Slika 7. Opterećenje koje ne djeluje u pravcu glavnih materijalnih osi [5] 7
Slika 8. Površina popuštanja kod kriterija maksimalnih naprezanja [5] 8
Slika 9. Prikaz opterećenja i rubnih uvjeta rame bicikla: a) opterećenje uslijed težine vozača, b) opterećenje uslijed voznih sila, c) opterećenje uslijed vožnje [6] 11
Slika 10. Prikaz kritičnih mjesta konstrukcije [6] 12
Slika 11. Shema testnog modela prema ISO 4210-6-2015 14
Slika 12. Shema testnog modela za izračun čvrstoće rame bicikla prema ISO 4210-6-2015 .. 15
Slika 13. Prikaz loma konstrukcije prednje rame bicikla [8] 16
Slika 14. Prikaz konačnih elemenata [9] 17
Slika 15. 3D model *down-hill* bicikla tvrtke *Hardcore Industry* sa svim dijelovima rame (lijevo) i dijelovima koji se koriste u numeričkoj analizi (desno) 18
Slika 16. Primjer ispravljanja 3D geometrije 19
Slika 17. Primjer pojednostavljenja 3D geometrije gornjeg desnog spojnog elementa 20
Slika 18. Geometrija modela u programskom paketu *Abaqus* 20
Slika 19. Prikaz površina s pripadajućim rasporedom slojeva 22
Slika 20. Prikaz površina s pripadajućom orijentacijom materijala 22
Slika 21. Prikaz zadavanja rubnih uvjeta na desnom osloncu stražnje rame bicikla 23
Slika 22. Prikaz površina na koje se nameću rubni uvjeti 24
Slika 23. Prikaz zadavanja rubnih uvjeta na prednjoj kompozitnoj rami bicikla 24
Slika 24. Prikaz zadavanja kinematkse veze 25
Slika 25. Prikaz kinematskih veza 25
Slika 26. Položaj horizontalne sile prema normi ISO 4210-6-2015 27
Slika 27. Prikaz vertikalnih sila prema normi ISO 4210-6-2015 28
Slika 28. Prikaz zadavanja hvatišta i smjer sile za treći slučaj opterećenja 30

Slika 29. Prikaz ojačanih površina 31
Slika 30. Prikaz ojačane površine spoja 31
Slika 31. Graf konvergencije rješenja 32
Slika 32. Prikaz mreže konačnih elemenata 33
Slika 33. Prikaz kriterija maksimalnog naprezanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije 33
Slika 34. Prikaz kriterija maksimalnog naprezanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije 34
Slika 35. Rezultati Tsai-Hill kriterija popuštanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije 34
Slika 36. Rezultati Tsai-Hill kriterija popuštanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije35
Slika 37. Rezultati Tsai-Wu kriterija popuštanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije. 35
Slika 38. Rezultati Tsai-Wu kriterija popuštanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije 35
Slika 39. Vrijednosti pomaka U1 [mm] za prvi slučaj opterećenja 36
Slika 40. Kriterij maksimalnog naprezanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, drugi slučaj opterećenja 37
Slika 41. Kriterij maksimalnog naprezanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije, drugi slučaj opterećenja 37
Slika 42. Tsai-Hill kriterij za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, drugi slučaj opterećenja 38
Slika 43. Tsai-Wu kriterij za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, drugi slučaj opterećenja 38
Slika 44. Vrijednosti ukupnog pomaka U za drugi slučaj opterećenja, nedeformirani oblik .. 38
Slika 45. Kriterij maksimalnog naprezanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije, treći slučaj opterećenja 39
Slika 46. Kriterij maksimalnog naprezanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, treći slučaj opterećenja 40
Slika 47. Tsai-Hill kriterij za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, treći slučaj opterećenja 40
Slika 48. Tsai-Wu kriterij za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, treći slučaj opterećenja 40
Slika 49. Vrijednosti ukupnih pomaka U [mm] za treći slučaj opterećenja..... 41
Slika 50. Prikaz raspodjele naprezanja [MPa] prema *Von Mises* za zadnji sloj konstrukcije [0°] 41

Slika 51. Tsai-Wu kriterij za zadnji sloj [45°] kompozitne konstrukcije, četvrti slučaj opterećenja 42
Slika 52. Prikaz kritičnog mjesta prednje rame bicikla 43
Slika 53. Prikaz prve forme izvijanja za treći slučaj opterećenja 46
Slika 54. Prikaz druge forme izvijanja za treći slučaj opterećenja 46
Slika 55. Prikaz prve forme izvijanja za četvrti slučaj opterećenja 47
Slika 56. Prikaz druge forme izvijanja za četvrti slučaj opterećenja 47
Slika 57. Prikaz rasporeda slojeva za stražnji dio rame *Modela 1* 48
Slika 58. Prikaz rasporeda slojeva za prednji dio rame *Modela 1* 48

Popis tablica:

Tablica 1. Mehanička svojstva materijala 21
Tablica 2. Mehanička svojstva materijala, kriteriji popuštanja 21
Tablica 3. Raspored slojeva 22
Tablica 4. Broj konačnih elemenata 32
Tablica 5. Iznosi kriterija popuštanja za odabrane slojeve rasporeda slojeva materijala 42
Tablica 6. Iznosi kriterija popuštanja za varirane rasporede slojeva 43
Tablica 7. Dobiveni rezultati za prvi slučaj opterećenja 45
Tablica 8. Dobiveni rezultati za drugi slučaj opterećenja 46
Tablica 9. Usporedba masa rami bicikla 49

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
E_1	MPa	Modul elastičnosti u smjeru vlakana
E_2	MPa	Modul elastičnosti okomit na smjer vlakana
E_k	J	Kinetička energija
E_p	J	Potencijalna energija
E_{aku}	J	Akumulirana energija
F	N	Sila
F_i, F_{ij}	1/Pa, $1/Pa^2$	Parametri definirani iz čvrstoće materijala
F, G, N	$1/Pa^2$	Parametri definirani iz čvrstoće materijala
F_{p1}	N	Proračunska sila za prvo opterećenje
F_{p2}	N	Proračunska sila za drugo opterećenje
F_{p3}	N	Proračunska sila za treće opterećenje
F_{p4}	N	Proračunska sila za četvrto opterećenje
F_{kr}	N	Kritična sila izvijanja
g	m/s^2	Gravitacija
G_{12}, G_{13}, G_{23}	MPa	Moduli smičnosti
m	kg	Masa
M_1	kg	Masa prvog utega
M_2	kg	Masa drugog utega
M_3	kg	Masa trećeg utega
h	mm	Visina pada
h_1	mm	Visina pada utega prema normi
h_2	mm	Visina pada bicikla prema normi
s	mm	Hod sile
S	MPa	Smična čvrstoća
X_t	MPa	Vlačna čvrstoća u pravcu vlakana
X_c	MPa	Tlačna čvrstoća u pravcu vlakana
Y_t	MPa	Vlačna čvrstoća okomito na pravac vlakana
Y_c	MPa	Vlačna čvrstoća okomito na pravac vlakana

Θ	rad	Postavni kut sloja
ρ	kg/m3	Gustoća
υ	-	Poissonov faktor
σ_x	MPa	Naprezanje u smjeru osi *x*
σ_1, σ_2	MPa	Normalno naprezanje u glavnom materijalnom koordinatnom sustavu
τ_{12}	MPa	Smično naprezanje u glavnom materijalnom koordinatnom sustavu

Sažetak

U ovom radu numerički je analiziran model kompozitne rame brdskog tzv. *downhill* bicikla dobivenog od strane tvrtke *HardCore Industry*. U prvom dijelu dan je prikaz različitih tipova rame bicikla. U daljnjem dijelu teksta opisani su kompozitni materijali, karakteristike, način izrade te mehanika kompozitnih materijala. Kako bi se osiguralo da ne dođe do popuštanja materijala potrebno je u analizu uvrstiti kriterije popuštanja. Formulacije odabranih teorija popuštanja prikazane su u radu. Nadalje, u radu su prikazane norme koje rama mora zadovoljiti, ISO 4210-6-2015. Numerička analiza provedena je u programskom paketu *Abaqus.* Zbog složene geometrije potrebno je pojednostaviti geometriju modela te su u radu prikazana i opisana postavljenja pojednostavljena. Za provedbu analize potrebno je odrediti i realna opterećenja koja se pojavljuju tijekom vožnje bicikla. Pripadajuća opterećenja određena su pomoću zakona očuvanja energije. Analizirana su kritična mjesta konstrukcije te se provodi variranje rasporeda slojeva. U zadnjem dijelu rada prikazan je odabrani raspored slojeva za dobiveni model te njegova usporedba sa sličnim modelima na tržištu.

Ključne riječi: brdski bicikl, opterećenja bicikla, numerička analiza, kompozitne konstrukcije.

Summary

The subject of this work is numerical analysis of composite downhill bike frame. Bike model is property of HardCore Industry company. Firstly, the overview of the different bike frame designs is given. Characteristics, manufacturing techniques and mechanical properties of composite materials are described. To ensure bike will endure necessary loads, failure criteria are analyzed. Mathematical formulation of chosen failure theories is given. Norms regarding bikes frames, as for example ISO 4210-6-2015 are considered. Numerical analysis is conducted using Abaqus software. Due to complicated geometry it is necessary to apply certain simplifications, which are described in this work. It is also necessary to determine loads which occur during downhill rides. Loads are calculated using the energy conservation law. Critical locations are analyzed and ply layups are varied. In the last part, chosen layup is compared with similar models available on the market.

Key words: downhill bike, bike loads, numerical analysis, composite structures.

1. UVOD

Bicikl je postao jedan od osnovnih načina prijevoza osobito u većim gradovima gdje do izražaja dolazi njegova praktičnost te pozitivan utjecaj na okoliš. Radi sve veće uporabe bicikala javlja se sve veći interes za smanjenjem mase bicikla, a da se pri tome ne naruši njihova pouzdanost. Brdski tzv. *downhill* bicikli posebna su skupina bicikala koji zbog specifičnih visokih opterećenja imaju nešto drugačiji oblik od klasičnih bicikala te značajno veće zahtjeve za čvrstoćom i izdržljivosti. Kako u svijetu razvija sve veći interes za adrenalinske sportove, brdski biciklizam pronalazi sve više zaljubljenika koji se žele okušati u tom sportu. Zbog karakterističnog terena nije moguće jednoznačno odrediti koji bi oblik rame i tip bicikla najbolje odgovarao uvjetima staza. Trenutno na tržištu postoji veliki broj rama različitih karakteristika konstruiranih s obzirom na različite vrste opterećenja. Najznačajnija razlika koja utječe na čvrstoću rame bicikla je način povezivanja prednjeg i zadnjeg dijela rame bicikla. Prednji i zadnji dio rame bicikla mogu biti izrađeni kao jedno tijelo bez amortizera između njih (tkz. *hardtrail* rama) ili mogu biti povezani sa suspenzijom između njih (tkz. *full suspension* rama). Na slici 1 prikazana je *hardtrail* (lijevo) i *full suspension* (desno) rama bicikla.



Slika 1. Primjeri izrade rame brdskog bicikla [1], [2]

Bicikl koji se analizira u ovom radu je *full suspension* bicikl no i unutar te kategorije bicikala postoje značajne razlike u konstrukciji rame. Glavni problem koji inženjeri pokušavaju riješiti je smanjenje pojave koncentracije naprezanja oko prihvata amortizera te optimiranje međusobnog gibanja prednje i zadnje rame kako bi se postigao kompromis između krutosti potrebne za poboljšanje voznih karakteristika i elastičnosti koja pruža udobnost vozaču.

U ovom radu opisati će se karakteristični slučajevi opterećenja bicikla te rješavanja problema čvrstoće i krutosti kompozitne rame brdskog bicikla. Zbog karakterističnih uvjeta staze i velikih brzina, kompozitna rama bicikla mora biti velike čvrstoće, a ujedno imati i dovoljnu elastičnost. Elastičnoste također važna i za same vozne karakteristike bicikla. Na slici 2 dan je primjer

karakteristični kompozitne rame bicikla. Navedeni primjer je ujedno i model bicikla na kojem će se vršiti numerička analiza.



Slika 2. Kompozitna rama *downhill* bicikla [3]

Sam oblik i vozne karakteristike nisu tema ovog rada već će se primarno proučavati čvrstoća postojećeg brdskog bicikla proizvođača *HardCore Industry*. Kalup za izradu kompozitnih dijelova je izrađen te se ne mogu vršiti promjene na obliku konstrukcije te će se u radu varirati samo orijentacija i broj slojeva. Varirat će se način i iznos opterećenja što će biti detaljnije prikazano u proračunskom modelu. U duljenjem dijelu teksta biti će prikazani i karakteristični konačni elementi za numeričko rješavanje problema. Također, prikazati će se i karakteristični spojevi na rami te pripadni rubni uvjeti.

1.1. *HardCore Industry* bicikl

U diplomskom radu analizirati će se mehanička svojstva numeričkog modela rame bicikla. Navedeni model je izradila tvrtka *HardCore Industry* (ili skraćeno *HCI*). Nakon dugogodišnjeg iskustva u vožnji brdskih bicikala, vlasnik tvrtke odlučio se na izradu vlastitog brdskog bicikla. Prvi model već sudjeluje na raznim natjecanjima te zadovoljava sve zahtjeve na izdržljivost i vozne karakteristike. Model je izrađen na osnovu dugogodišnjeg iskustva bavljenjem vožnje i proizvodnje brdskih bicikala. Tvrtka se odlučila za izradu drugog modela bicikla. Geometrija drugog modela je slična prijašnjoj te je prvi model poslužio za dobivanje orijentacijskih vrijednosti orijentacije i broja slojeva.

Kako bi se odredio optimalan broj slojeva za dijelove kompozitne rame, potrebno je izvršiti numeričku analizu čvrstoće rame bicikla. Nažalost, navedeni model bicikla je još u prototipnoj

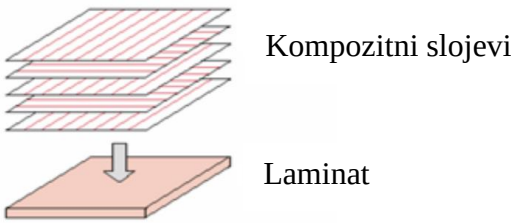
fazi te nije moguće izvršiti detaljnije analize koje bi se dobile eksploatacijom bicikla prilikom zahtjevnih brdskih utrka.



Slika 3. *HardCore Industry* brdski bicikl [3]

2. Kompozitni materijali

Kompozitni materijali su posebne skupina materijala koji se dobivaju spajanjem dvaju ili više različitih materijala s ciljem postizanja specifičnih karakteristika i svojstava kakva ne posjeduju niti jedan sastojak sam za sebe. Sastoje se od osnovnog materijala (matrice) i dodatnog materijala (ojačala i/ili punila) [4]. Zbog svoje specifične strukture i načina oblikovanja postoji nekoliko podjela kompozitnih materijala (podjela prema materijalu matrice, materijalu ojačavala, obliku ojačavala, rasporedu ojačavala i sl.). Kompozitni materijali koji se koriste za izradu rame bicikla su prvenstveno višeslojni kompozitni materijali (laminati). Laminati su strukturirani polimerni kompoziti koji kao ojačanje imaju samo jednu vrstu vlakana. Kompozitni slojevi s različito orijentiranim vlaknima slažu se i lijepe međusobno u laminat uz djelovanje tlaka. U daljnjem dijelu teksta prilikom korištenja izraza *kompozitni materijala* smatraju se kompozitni materijali izraženi kao laminati. Prikaz slaganja laminata dan je na slici 4.

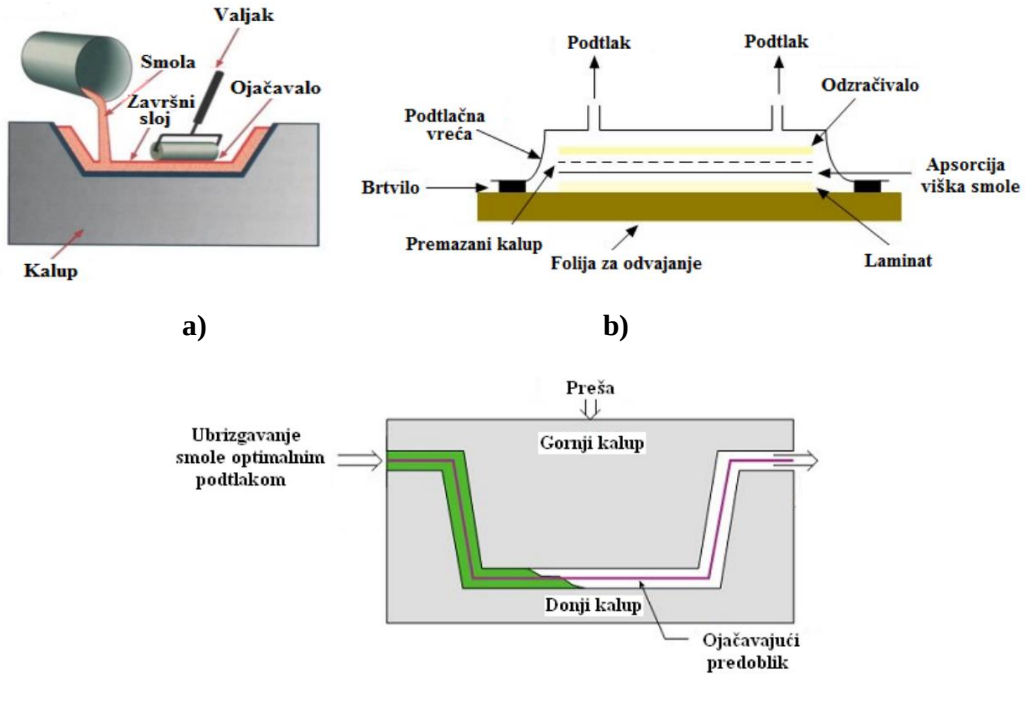


Slika 4. Prikaz slaganja laminata [4]

Kompozitni materijali imaju sve veću primjenu u izradi rama bicikla zbog svoje male specifične mase i velike izdržljivosti. Jedan od osnovnih ciljeva prilikom izrade bicikla je smanjenje mase koje omogućava bolje vozne karakteristike te lakše upravljanje. Glavna prepreka kod upotrebe kompozitnog materijala u proizvodnji bicikla je cijena. Zbog visokih zahtijeva koji se postavljaju na brdske bicikle te želje za ostvarenjem što boljeg rezultata na *downhill* natjecanjima, kompozitni materijali postaju osnovni materijali prilikom izrade istih.

2.1. Proizvodnja kompozitnih materijala

Postoje mnogi postupci proizvodnje polimernih kompozitnih tvorevina, kao što su ručni dodirni postupak laminiranja, dodirni postupak sa štrcanjem vlakana, pultrudiranje (40 % – 70 % ojačavala), postupak namotavanja filamenata (FW- eng. *Filament Winding*), podtlačno oblikovanje laminata (autoklav), injekcijsko – posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikovanjem (RTM-eng. Resin Transfer Moulding), centrifugalno lijevanje, izravno prešanje SMC-a i BMC-a, podtlačno ulijevanje smole (VIP-eng. *Vacuum Infusion Process*), itd..[4] Shematski prikaz nekih od navedenih postupaka proizvodnje dan ja na slici 5.



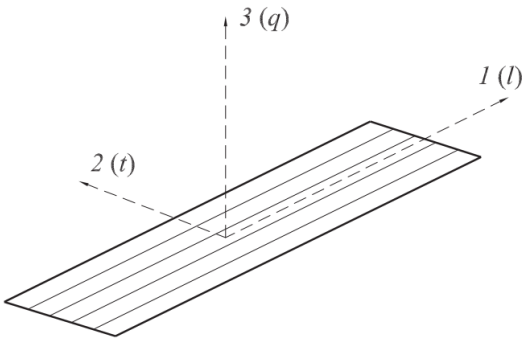
Slika 5. Postupci proizvodnje kompozitnih dijelova: a) ručno dodirno laminiranje b) podtlačno oblikovanje c) injekcijsko (RTM) [4]

Prilikom izrade kompozitnih rama bicikla koriste se kalupni postupci zbog zahtjevne geometrije bicikla. Kako se za izradu kompozitnog bicikla tvrtke *HardCore Industry* koriste kalupi definirane geometrije, u numeričkom izračunu čvrstoće bicikla nije moguće modificirati geometriju modela te su svi slojevi složeni prema unutrašnjosti konstrukcije.

2.2. Mehanika kompozitnih materijala

Kompozitni materijali se sastoje od dva osnovna konstituenta: vlakna i matrice koji čine slojeve koji su međusobno povezani i tako čine višeslojni kompozit (laminat). Vlakna su osnovni nosivi element kompozita i daju mu čvrstoću, dok matrica drži vlakna zajedno, ima važnu funkciju u prijenosu opterećenje na vlakno, daje vanjsku formu kompozitu, definira njegovo ponašanje obzirom na djelovanje atmosfere itd. Vlakna su najčešće: ugljična, staklena, aramidna (npr. kevlar) i metalna, a najčešće čine 60 - 70 % volumnog udjela u kompozitu [5].

Čvrstoća kompozitnih materijala ovisi o rasporedu i broju slojeva u konstrukciji. Vlakna, u jednom sloju, mogu biti poslagana ravnomjerno u jednom smjeru (eng. *unidirectional*) ili kao mreža (eng. *woven*). Na slici 6 je prikazan način označavanja osi u kompozitnom sloju.



Slika 6. Označavanje osi ortotropnog materijala [5]

2.2.1. Teorije popuštanja [5]

Za razliku od izotropnih materijala (tehničkih metala) kod kompozita su mehanizmi popuštanja materijala bitno drugačiji, i ne mogu se opisati klasičnim pristupom kao krhki ili duktilni lom. Kako se često radi o spajanju velikog broja slojeva (i do nekoliko stotina), a niti sam sloj nije homogen već se sastoji od barem dva konstituenta, jasno je da se popuštanje može dogoditi na vrlo različite načine. Najčešće se razmatraju: lom matrice, pucanje vlakna, izvlačenje vlakna, delaminacije (pri čemu dolazi do odvajanja slojeva). Danas je razvijen vrlo velik broj kriterija popuštanja, a najpoznatiji i najšire prihvaćeni kriteriji popuštanja su:

- Kriteriji maksimalnih naprezanja,
- Kriteriji maksimalnih deformacija,
- Tsai-Hill kriterij,
- Tsai-Wu kriterij,
- Puck-ov kriterij,
- Hashin-ov kriterji itd.

Kriteriji se uvijek postavljaju za jedan sloj, naprezanja su definirana u glavnom materijalnom sustavu, te je nužno poznavati 5 parametara čvrstoće:

- X_t – vlačna čvrstoća u pravcu vlakana,
- X_c – tlačna čvrstoća u pravcu vlakana,
- Y_t – vlačna čvrstoća okomito na pravac vlakana,
- Y_c – vlačna čvrstoća okomito na pravac vlakana,
- S – smična čvrstoća.

Bitna razlika u odnosu na kriterije definirane kod izotropnih (metalnih) materijala jest da vrijednost naprezanja koje ulaze u kriterije nisu glavne (svojstvene) vrijednosti tenzora naprezanja već vrijednosti naprezanja u sustavu glavnih materijalnih osi jednog sloja [5].

Prilikom proračuna čvrstoće kompozitne rame bicikla koristiti će se kriteriji maksimalnog naprezanja te Tsai-Wu i Tsai-Hill kriteriji popuštanja.

2.2.1.1. Kriteriji maksimalnog naprezanja [5]

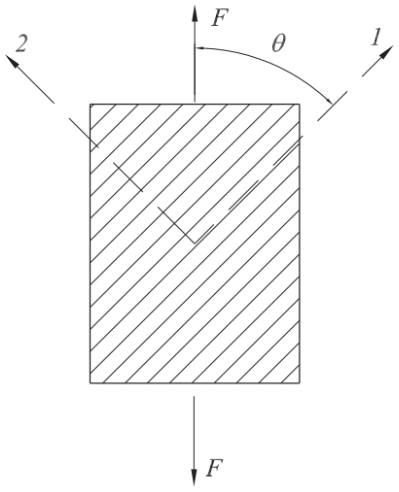
Kriteriji se najviše primjenjuje kod jednoosnog opterećenja i kaže da do popuštanja neće doći ako je ispunjeno:

$$\text{za } \sigma > 0 \quad \left\{ \begin{matrix} \sigma_1 < X_t \\ \sigma_2 < Y_t \\ |\tau_{12}| < S \end{matrix} \right\}, \tag{1}$$

$$\text{za } \sigma < 0 \quad \left\{ \begin{matrix} \sigma_1 > X_c \\ \sigma_2 > Y_c \\ |\tau_{12}| < S \end{matrix} \right\}. \tag{2}$$

Nedostatak ovog kriterija je da ne daje dovoljno pouzdane rezultate kad se radi o dvoosnom slučaju opterećenja. Ako opterećenje nije u pravcu jedne od glavnih materijalnih osi, već pod kutom Θ u odnosu na osi *1* (slika 7), moguće je zapisati:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_x \cos^2\theta < X, \\ \sigma_2 &= \sigma_x \sin^2\theta < Y, \\ \tau_{12} &= -\sigma_x \sin\theta\cos\theta < S, \end{aligned} \tag{3}$$

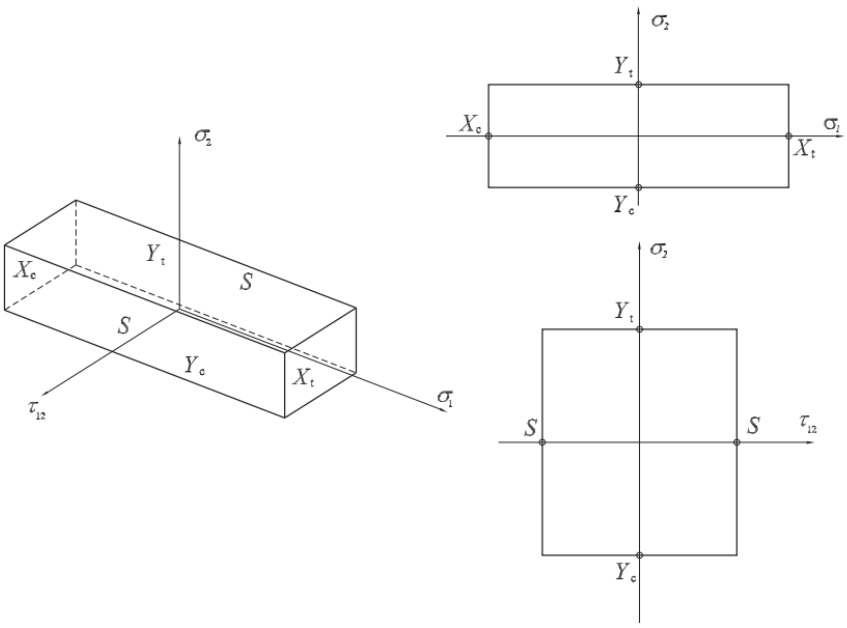


Slika 7. Opterećenje koje ne djeluje u pravcu glavnih materijalnih osi [5]

iz čega slijedi uvjet da σ_x smije imati maksimalnu vrijednost koja je jednaka:

$$\begin{aligned} \sigma_x &< \frac{X}{\cos^2\theta}, \\ \sigma_x &< \frac{Y}{\sin^2\theta}, \\ \sigma_x &< \frac{S}{\sin\theta\cos\theta}. \end{aligned} \tag{4}$$

U ovim izrazima *X*, *Y* i *S* se koriste kao tlačna ili vlačna čvrstoća, u ovisnosti o predznaku σ_x, a koji se zapisuje pomoću apsolutne vrijednosti. U tom se slučaju i vrijednost naprezanja σ_x zapisuje svojom apsolutnom vrijednošću. Usporedba s eksperimentalnim podacima pokazala je da će kriterij davati najbolje vrijednosti za Θ =0 ili 90°, dok će podudaranje s eksperimentima biti najslabije pri Θ =45°. Površina popuštanja može se prikazati slikom 8.



Slika 8. Površina popuštanja kod kriterija maksimalnih naprezanja [5]

2.2.1.2. Tsai-Wu kriterij [5]

Ovaj kriterij naziva se još i tenzorski ili kvadratični kriterij popuštanja i spada među najčešće korištene kriterije. Tenzorski (indeksni) zapis kriterija glasi:

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1, \qquad i, j = 1,6\,. \tag{5}$$

U kojem se slučaju zapis kriterija sastoji od 42 člana:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + \ldots + F_6\sigma_6 + \ldots + F_{11}\sigma_1\sigma_1 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 + \ldots + F_{66}\sigma_6\sigma_6 = 1. \tag{6}$$

U ovom su izrazu F_i te F_{ij}, parametri u koje ulazi čvrstoća kompozita. Ako se razmatra samo jedan sloj u ravninskom stanju naprezanja, ostaju samo indeksi *1*, *2* i *6* te se kriteriji zapisuje:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\sigma_6 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{16}\sigma_1\sigma_6 + 2F_{26}\sigma_2\sigma_6 = 1. \tag{7}$$

Detaljnom analizom može se pokazati da je $F_6 = F_{16} = F_{26} = 0$. Vrijednosti parametara dobivaju se na način kao i kod Tsai-Hill kriterija (prikazano u sljedećem poglavlju).

Drugi zapis parametra F_{12} koji se često koristi glasi:

$$F_{12} = -\frac{1}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}}, \tag{8}$$

U kojem se slučaju Tsai-Wu kriteriji zapisuje u obliku koji se i najčešće koristi:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 - \sqrt{F_{11}F_{22}}\sigma_1\sigma_2 = 1. \tag{9}$$

Parametri F_1, F_2, F_{11} i F_{22} u izrazu (9) definirani su kao[5]:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}, \\ F_{11} &= -\frac{1}{X_t X_c}, \\ F_1 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c}, \\ F_{11} &= -\frac{1}{Y_t Y_c}. \end{aligned} \tag{10}$$

Karakteristike Tsai-Wu kriterija:

- Kriterij ne indicira način na koji će sloj popustit već samo naprezanje kod kojega će sloj popusti
- Kriterij je postavljen samo jednim izrazom što dovodi do znatno jednostavnije primjene
- Ako treba odrediti najveće dopušteno naprezanje, kriteriji uvijek daje dva rješenja – jedno s pozitivnim, a drugo s negativnim predznakom.

2.2.1.3. Tsai-Hill kriterij [5]

Ovaj kriteriji koristi se u slučaju troosnog stanja naprezanja i spada u skupinu energetskih kriterija popuštanja. Kriteriji kaže da do popuštanja kompozitnog sloja neće doći ako je ispunjen uvjet:

$$\begin{aligned} (G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 + (F+G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 \\ + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 < 1 \end{aligned} \tag{11}$$

gdje su parametri $F \ldots N$ definirani iz čvrstoće materijala. Njihove vrijednosti dobivene su tako da se razmatraju slučajevi jednoosnog stanja naprezanja. Tako se iz uvjeta $\sigma_1 \neq 0$, uz sve ostale komponente tenzora naprezanja $\sigma_{ij} = 0$, dobiva:

$$G + H = \frac{1}{X^2}. \tag{12}$$

Ako se postupak ponovi i za ostale komponente tenzora naprezanja, izvode se relacije:

$$\begin{aligned} 2N &= \frac{1}{S^2}, \\ F + H &= \frac{1}{Y^2}, \\ F + G &= \frac{1}{Z^2}, \end{aligned} \tag{13}$$

Iz koji se dodatnim sređivanjem izvode izrazi:

$$\begin{aligned} 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}, \\ 2G &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2}, \\ 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}. \end{aligned} \tag{14}$$

X, *Y* i *Z* predstavljaju parametre čvrstoće. Kod ovih parametra nisu naznačeni indeksi $()_c$ odnosno $()_t$ budući da se oni dodjeljuju ovisno o predznaku odgovarajućeg naprezanja. Parametar *Z* predstavlja čvrstoću u smjeru okomito na ravninu sloja (u pravcu *3* koji se definira vektorskim produktom vektora smjera glavnih materijalnih osi *1* i *2*). Za jedan sloj, koji je u ravninskom stanju naprezanja, Tsai-Hill kriteriji glasi:

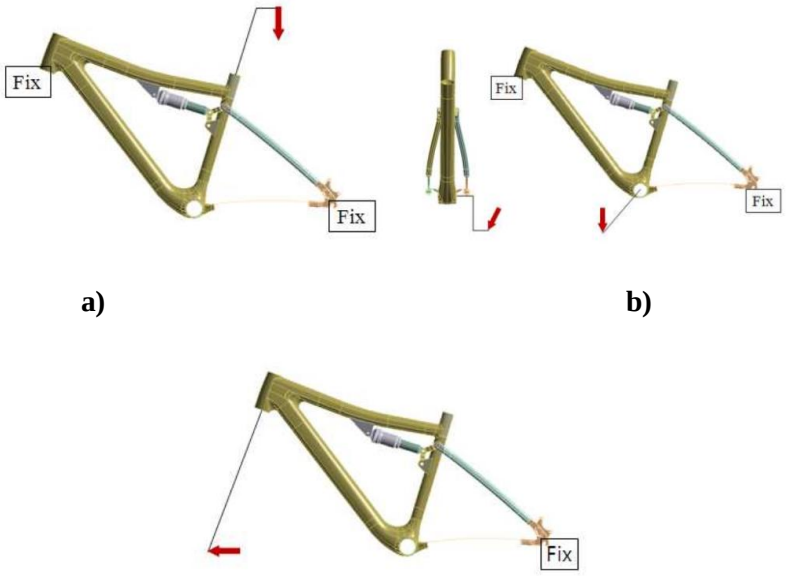
$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} < 1. \tag{15}$$

3. PRORAČUN ČVRSTOĆE BICIKLA

Za izradu numeričkog modela osim geometrije potrebno je poznavati i opterećenja modela. Kako bi rezultati proračuna bili što realniji potrebno je odrediti i analizirati oblike i iznose opterećenja kojima je podvrgnut brdski bicikl prilikom eksploatacije. U ovom radu biti će prikazana samo statička numerička analiza modela. Dinamička opterećenja promatrati će se kao kvazistatička te će se vršiti statička analiza proračuna čvrstoće bicikla. U ovom dijelu rada opisat će se opterećenja te pripadajući rubni uvjeti. Također će biti dan osvrt na norme koje određuju minimalno opterećenje koj bicikl mora izdržati. Kako je model izrađen od kompozitnog materijala pojašnjen je proračun čvrstoće kompozitnih materijala te teorije popuštanja koje se koriste za analizu.

3.1. Statička i dinamička opterećenja bicikla

Pregledom literature pronađeno je više primjera izračuna čvrstoće kompozitne rame *downhill* bicikla. U primjeru na slici 9 prikazana je rama bicikla opterećena je na nekoliko načina. Glavno opterećenje je opterećenje koje nastaje zbog težine vozača bicikla. Postoji još i opterećenje koje nastaje u osloncu pedala zbog pokretačkih sila na pedalama. Statička opterećenja znatno su manja od dinamičkih opterećenja koja nastaju prilikom vožnje bicikla. Prethodno spomenuta opterećenja prikazana su na slici 9.

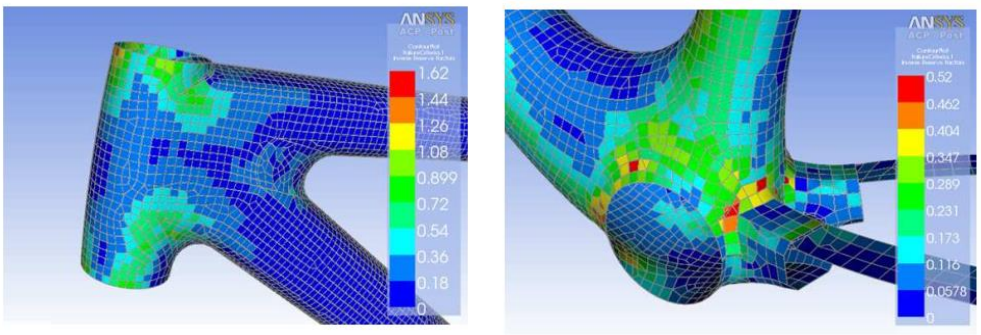


a) **b)**

c)

Slika 9. Prikaz opterećenja i rubnih uvjeta rame bicikla: a) opterećenje uslijed težine vozača, b) opterećenje uslijed voznih sila, c) opterećenje uslijed vožnje [6]

Na slici 9 prikazani su i rubni uvjeti korišteni tijekom analize u [6]. Rezultati su pokazali da su kritična mjesta u skladu s pretpostavkama. Najkritičniji su spojevi cijevi rame uslijed naglih promjena geometrije i utjecaja momenata savijanja. Radi toga ja izrazito važno dobro odabrati rubne uvjete i pravilno modelirati model. Navedeni dijelovi zbog svoje složene geometrije su zahtjevni za proizvodnju te su moguća odstupanja od traženih karakteristika. Rezultati numeričke analize su prikazani na slici 10.



Slika 10. Prikaz kritičnih mjesta konstrukcije [6]

Karakteristični *downhill* bicikli imaju složenu geometriju te je rama najčešće konstruirana od dva veća kompozitna dijela međusobno spojena ublaživačem. Kako je ranije navedeno u ovom radu se neće provoditi dinamička numerička analiza već će se dinamička opterećenja promatrati kao kvazistatička što omogućuje provedbu jednostavnije statičke analize. Najčešća metoda izračuna statičke sile pri dinamičkom opterećenju je uz pomoć zakona očuvanja energije.

3.1.1. Zakon očuvanja energije

Za izračuna sila koje se pojavljuju tijekom vožnje koristi se zakon očuvanja energije. Zakon očuvanja energije pokazao se veoma primjenjivim u praksi zahvaljujući tome što daje dovoljno dobre rezultate, a istovremeno je i vrlo jednostavan za primjenu. Primjena zakona očuvanja energije tijekom slobodnog pada često je primjenjiva prilikom izračuna dinamičkih sila vožnje npr. ako vozač prilikom spuštanja naleti na dio staze koji ima oblik stepenice doći će do naglog pada u visini (slobodnog pada). Pojednostavljenja jednadžba očuvanja energije glasi:

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{k2} + \sum E_{aku}. \tag{16}$$

U izrazu (16) su:

E_{p1} – potencijalna energija sustava prije pada,
E_{k1}, E_{k2} – kinetička energija sustava prije odnosno nakon pada,
$\sum E_{aku}$ – ukupna akumulirana energija sustava.

Ako se uvede pretpostavku da je brzina vozača ostala nepromijenjena i da vozač nije akumulirao energiju nego da je sva akumulirana energija u amortizeru, izraz (16) prelazi u:

$$E_p = E_{amortizera}. \tag{17}$$

Nadalje, ako se uvede da je sila u amortizeru konstanta tada jednadžba (17) prelazi u:

$$m \cdot g \cdot h = F \cdot s. \tag{18}$$

U izrazu (18) je F sila u amortizeru, a s hod sile koji se može promatrati kao hod amortizera. Iz navedenog primjera može se dobiti sila u amortizeru prilikom pada bicikla s određene visine. Koristeći podatke iz eksperimenta u kojemu se mjeri sila podloge prilikom slobodnog pada brdskih bicikala [7], može se provjeriti navedena tvrdnja. U navedenom testiranju mjerena je sila reakcije podloge 8 *downhill* vozača s istim modelom brdskog bicikla. Mase vozača su bila 76,6±6,3 kg, a visina pada 29, 48 i 67 cm. Uzimajući sljedeće podatke:

masa čovjeka, $m = 80$ kg,
gravitacija $g = 9,81$ m/s^2,
visina pada $h = 0,68$ m,
hod sile $s = 0,07$ m,

te koristeći jednadžbu (2) dobiva se slijedeći iznos sile:

$$F = \frac{m \cdot g \cdot h}{s} = \frac{80 \cdot 9,81 \cdot 0,68}{0,07} = 7623,7 \text{ N}. \tag{19}$$

U eksperimentu je prikazan prosječna vrijednost iznosa sila reakcije podloge.

$$F_{test}(h = 68 \text{ cm}) = 7877,567 \pm 368,33 \text{ N}. \tag{20}$$

Usporedbom rezultata eksperimenta utvrđeno je da iznos sile podloge približno jednak dobivenoj sili. Navedena sila koristi se pri statičkoj analizi opterećenja bicikla. Analogno se mogu analizirati i udarna opterećenja bicikla prilikom naleta na veće neravnine na stazi.

Kako su nagle promjene visine, padovi i skokovi, te udarci na neravnine najčešći oblici dinamičkih opterećenja, navedeni primjeri biti će i osnovna dva slučaja za koja će se analizirati čvrstoća bicikla.

3.1.2. Norma ISO 4210

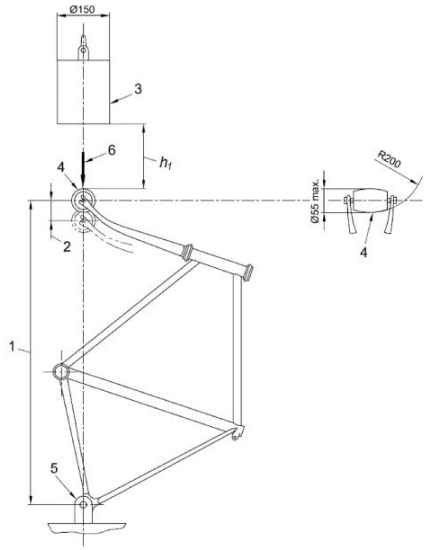
Norma ISO 4210 navodi niz ograničenja i uvjeta koje bicikl mora zadovoljavati. Za brdske bicikle najzanimljivije su norme ISO 4210-2-2015 te ISO 4210-6-2015. Navedene norme postavljaju sigurnosne zahtjeve prilikom izrade bicikla. Norma ISO 4210-2-2015 daje standarde u vidu samog oblika i dimenzija koje bicikl mora zadovoljavati te za ovaj rad nije relevantna, ali je bitna za spomenuti kako bi se dao uvid zašto su neki oblici bicikla konstruirani na određeni način.

Norma ISO 4210-6-2015 određuje načine eksperimentalnog testiranja rame bicikla. Navedena testiranja odnose se na ciklička opterećenja. Zahtjevi predstavljaju minimum koji bicikl mora izdržati te predstavljaju osnove prilikom konstruiranja bicikla. Na slici 11. i 12. prikazane su sheme testiranja rame kompozitnog bicikla koje su propisane normom ISO 4210-6-2015. Prilikom testiranja primjenjuju se parametri mase utega i visine *h* koji su zadani ovisno o tipu bicikla te njegovoj primjeni. Bicikli su podijeljeni u 4 skupine: klasični i gradski bicikli, dječji bicikl, brdski ili terenski bicikl te trkači bicikl ili cestovni bicikl.

Za model prikazan na slici 11 parametar koji se mijenja ovisno o tipu bicikla je visina h_1. Za brdske ili terenske bicikle zadana visina h_1 iznosi:

$$h_1 = 360 \text{ mm}. \tag{21}$$

Masa utega je ista za sve tipove bicikla te iznosi 22.5 kg. Masa dijela koji se postavlja na prednju osovinu bicikla (slika 11. dio 4) mora iznositi 1 kg.

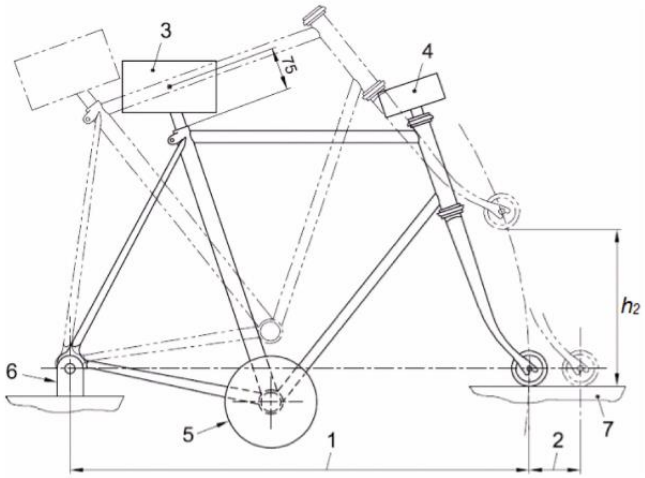


Slika 11. Shema testnog modela prema ISO 4210-6-2015

Zanimljivo je spomenuti kako je navedena visina značajno veća od visine zadanih za ostale tipove bicikla. Visina h_1 za gradske i dječje bicikle iznosi 180 mm dok, za trkače ili cestovne bicikle ona iznosi 212 mm.

Za model prikazan na slici 12 variraju se mase M_1, M_2 *i* M_3 te visina h_2. Navedene mase prikazane su na slici 12 gdje je M_1 dio 3, M_2 dio 4 i M_3 dio 5. Iznosi za zadane parametre za tip brdskog ili terenskog bicikla su:

$$\begin{aligned} M_1 &= 30 \text{ kg}, \\ M_2 &= 10 \text{ kg}, \\ M_3 &= 50 \text{ kg}, \\ h_2 &= 300 \text{ mm}. \end{aligned} \tag{22}$$



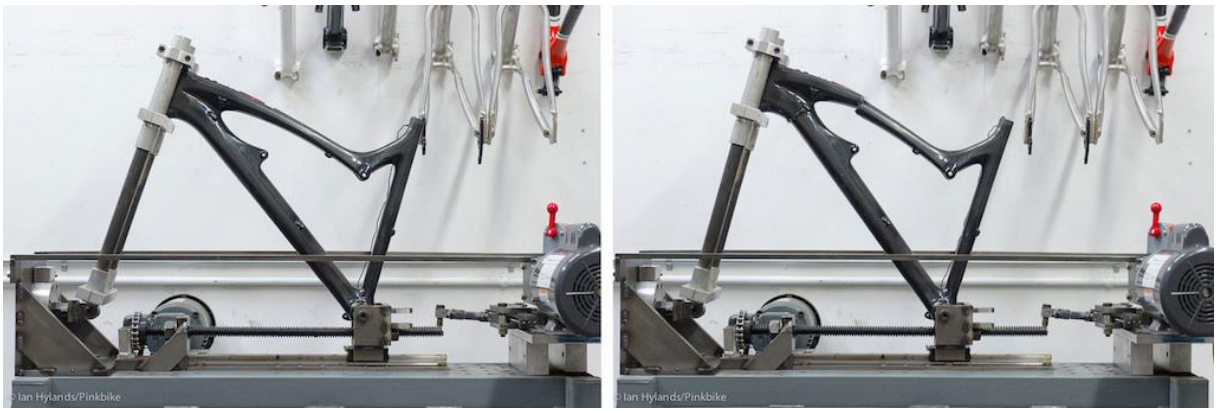
Slika 12. Shema testnog modela za izračun čvrstoće rame bicikla prema ISO 4210-6-2015

Kao i u prethodnom slučaju testiranja, iznos parametara visine testiranja je najveći prilikom testiranja brdskog bicikla. Suma masa za gradske, brdske i trkače bicikle iznosi 90 kg dok za dječji bicikli suma masa iznosi 80 kg. Raspodjela masa razlikuje se o tipu bicikla te je kod gradskog bicikla masa M_1 najveća te iznosi 50 kg, a masa M_3 iznosi 30 kg dok je kod brdskog bicikla kako je prikazano na slici 12, raspored masa obrnut. Masa M_2 je ista u oba slučaja i iznosi 10 kg. Raspored masa za brdski ili terenski te trkači ili cestovni bicikl je identičan. Razlog takvog raspodjela masa je zbog načina vožnje bicikla te se pretpostavlja da se prilikom vožnje brdskog i cestovnog bicikla vozač više oslanja na noge te se time i veći dio mase prenosi na donji dio rame bicikla.

Navedena dva modela nisu svi načini testiranja koji su obuhvaćeni normom ISO 4210-6-2015, ali su dva najrelevantnija za izračune čvrstoće koji se provode u ovom radu.

3.2. Kritična mjesta rame bicikla

Očekivana kritična mjesta rame bicikla su mjesta bliže osloncima bicikla jer se na njima pojavljuju i najveći momenti savijanja te su ona najudaljenija od sila koje su uzrokovane težinom vozača. Pregledom literature i dostupnih sadržaja o provedenim eksperimentima utvrđeno je nekoliko kritičnih mjesta na rami bicikla. Eksperiment kojeg provodi *Santa Cruz Bicycles - Test Lab* [8] te koji simulira opterećenje bicikla horizontalnom silom na prednju osovinu bicikla prikazano je mjesto pri kojem dolazi do loma kompozitne rame bicikla. Testna rama bicikla prikazana je na slici 13.



Slika 13. Prikaz loma konstrukcije prednje rame bicikla [8]

Kolaps konstrukcije nastao je pri opterećenju od 9130 N. Taj podatak daje okvirne vrijednosti koje se očekuju prilikom provedbe numeričke analize čvrstoće kompozitne rame bicikla. Također navodi se da je dobivena sila pri kojoj dolazi do loma konstrukcije 2,5 puta veća od očekivanih sila koje se pojavljuju u realnim uvjetima kod brdskih bicikla.

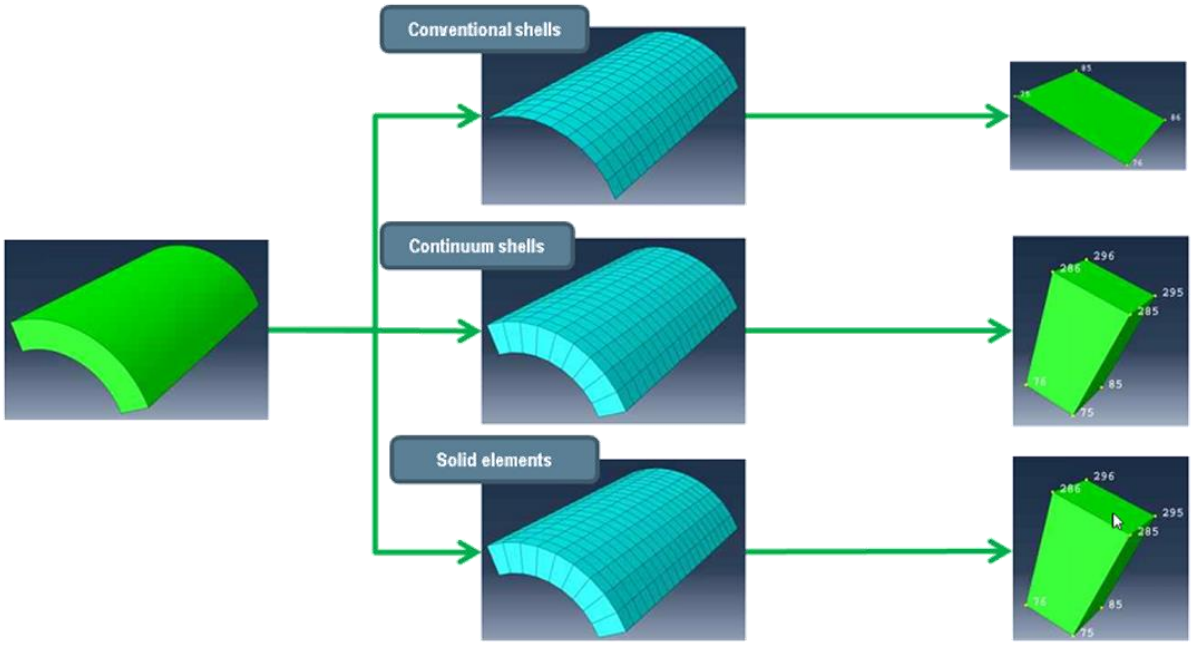
U eksperimentu [8] je provedeno i testiranje pada utega određene mase na prednju osovinu bicikla opisanog prema DIN 4210-6-2015. Kolaps kompozitne rame dolazi pri padu utega od 50 kg s visine od 900 mm. Može se primijetiti kako su navedene vrijednosti značajno veće od vrijednosti koje propisuje norma. Razlog značajno veće čvrstoće rame leži u tome što je vrlo teško odrediti maksimalne sile koje se pojavljuju prilikom vožnje brdskih *downhill* utrka. Velike brzine i neravan teren značajno povećavaju zahtjeve za čvrstoćom rame pri čemu proizvođači bicikala žele biti sigurni da će njihov model biti pouzdan i siguran.

4. NUMERIČKA ANALIZA

U ovom dijelu rada biti će prikazani rezultati numeričke analize kompozitne rame bicikla. Numerička analiza čvrstoće provedena je u programskom paketu *Abaqus*. U prvom dijelu opisani su konačni elementi koji se koriste te izrada geometrije modela koja se koriste prilikom analize. Nadalje, prikazane su kinematske veze zadane između pojedinih dijelova konstrukcije. Također, prikan je i postupak zadavanja materijala, rubnih uvjeta i nametnutih opterećenja.

4.1. Konačni elementi

U ovom poglavlju dan je kratki osvrt na konačne elemente koji se koriste u numeričkoj analizi kompozitnih konstrukcija. Elementi koji se koriste su *Shell*, *Solid-shell* i *Solid* elementi. Za specifične šuplje konstrukcije kao što je rama bicikla najčešće se primjenjuju ljuskasti konačni elementi. Na slici 14 prikazani su karakteristični konačni elementi.



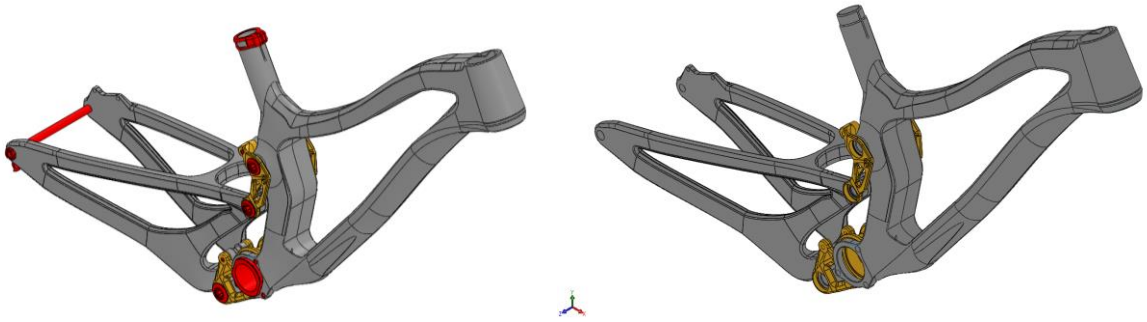
Slika 14. Prikaz konačnih elemenata [9]

Konačni elementi koji se najčešće primjenjuju u numeričkim proračunima 3D ljuskastih konstrukcija su linearni trokutni odnosno četverokutni elementi *S3R* i *S4R* sa 3 odnosno 4 čvora. Navedeni elementi koristi će se prilikom izrade mreže za kompozitne dijelove rame bicikla. Jedan od elemenata koji se koristi pri modeliranju komplicirane 3D geometrije je tetraedarski element *C3D10* sa 10 čvorova. Spojni elementi rame bicikla izrađeni su kao puni

dijelovi izrađeni od aluminija. Zbog svoje kompliciranе geometrije prilikom modeliranja biti će korišteni navedeni elementi.

4.2. Geometrija modela

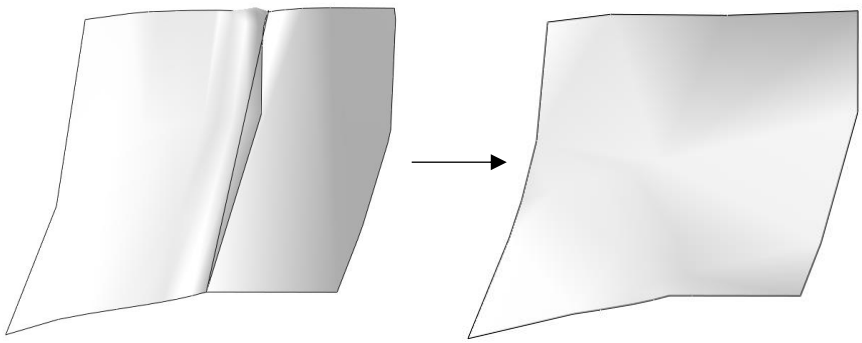
Tvrtka *Hardcore Industry* dostavila je 3D model rame bicikla na osnovu kojega će se izvršiti proračun čvrstoće. Iz navedenog modela za proračun se koriste samo dijelovi koji imaju značajan utjecaj na proračun čvrstoće bicikla. Prikaz 3D modela bicikla prikazan je na slici 15, lijevo. Dijelovi korišteni za numerički proračun čvrstoće su prednja i zadnja kompozitna rama te glavni spojni dijelovi. Kako je ranije navedeno, oblik modela je fiksan te nije moguće vršiti promjene oblika pojedinih dijelova. Materijal je također odabran od strane tvrtke te je moguće varirati samo raspored i broj slojeva kompozitnih dijelova. Proračun spojnih elemenata neće se detaljno proučavati jer je njihov materijal i oblik određen na osnovu prijašnjeg modela te je oblik također uvjetovan i dimenzijama amortizera. Navedeni spojni dijelovi odabrani su radi zornijeg prikazivanja naprezanja i zadavanja kinematskih veza između kompozitnih dijelova rame bicikla.



Slika 15. 3D model *down-hill* bicikla tvrtke *Hardcore Industry* sa svim dijelovima rame (lijevo) i dijelovima koji se koriste u numeričkoj analizi (desno)

Modeli korišteni u numeričkoj analizi su prednja i zadnja kompozitna rama, gornji lijevi i gornji desni te donji spojni element. Modeli su prikazani na slici 15, desno. Ostali dijelovi rame bicikla nisu nužni u numeričkom izračunu te će radi pojednostavljenja analize biti će zamijenjeni kinematskim vezama i rubnim uvjetima. Kinematske veze i rubni uvjeti dodijeljeni su na način da što bolje opisuju stvarne (realne) odnose između pojedinih dijelova. Modeli dobiveni od proizvođača bili su u obliku STEP datoteke te je bila potreban dodatna obrada u programskom paketu *Solidworks* kako bi se s njima mogla raditi daljnja numerička analiza u programskom paketu *Abaqus*. Model je izrađen kao *surface* model što predstavlja izazov prilikom izrade numeričkog modela za analizu čvrstoće zbog zahtjevne geometrije.

Neki dijelovi modela pojednostavljeni su kako bi se mogla izvršiti numerička analiza, ali je pri tome uzeto u obzir funkcionalnost dijelova kako se ne bi dobili nerealni rezultati. Naime, potrebno je uzeti u obzir velike geometrijske diskontinuitete na kojima se očekuje pojava koncentracije naprezanja. Uklanjanjem navedenih dijelova dobili bi se rezultati koji ne bi odgovarali stvarnim uvjetima. Također, neki geometrijski diskontinuiteti su nastali u stvaranju modela i pokretanju STEP datoteke. Takvi diskontinuiteti nisu realni te se ne pojavljuju u stvarnom modelu te ih je potrebno ukloniti. Ispravak geometrije izvodi se u programskom paketu *Abaqus* jer se u navedenom paketu vrši i numerička analiza te se na taj način olakšava provjera ispravljane geometrije. Naredbe potrebne za ispravak geometrije nalaze se pod skupinom *Geometry edit*. Naredbe koje su se primjenjivale su *Remove redundant entities, Repair invalid, Replace face, Remove face* i *Cover edge*. Na slici 16 prikazan je primjer loše učitane geometrije modela te njen ispravak uz pomoć naredbi *Remove face* koja uklanja odabrane površine i naredbe *Cover edges* koja stvara novu 3D površinu između odabranih rubova.

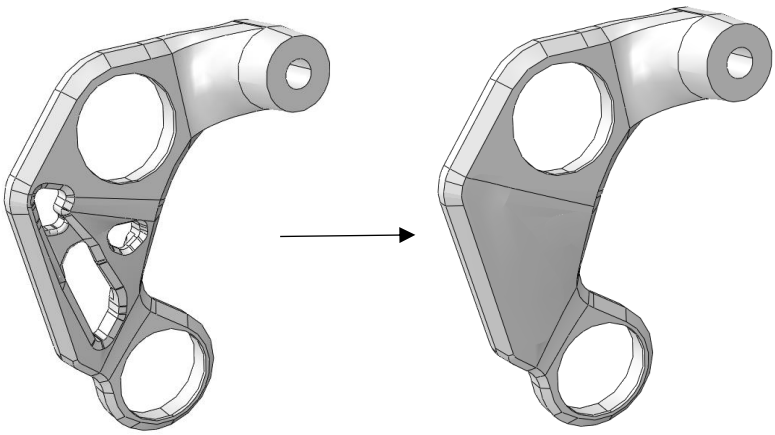


Slika 16. Primjer ispravljanja 3D geometrije

U dobivenoj geometriji od strane proizvođača model bicikla je postavljen u neopterećeni položaj (amortizer je neopterećen). Kako se prilikom konstruiranja dijelovi za koje je spojen amortizer spajaju krutom vezom potrebno je odrediti pri kojem će se položaju opterećivati rama bicikla. Odabran je krajnji položaj amortizera.

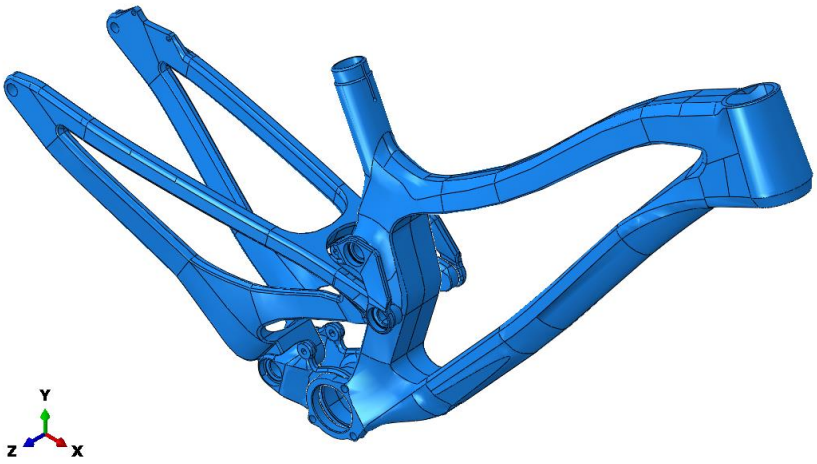
Spojni elementi rama bicikla modelirani su kao *solid* elementi te imaju kompliciranu geometriju kako bi se smanjila njihova masa. Kako rezultati njihove numeričke analize nisu relevantni, geometrija navedenih dijelova je pojednostavljena, primjer prikazan na slici 17. Prilikom uređivanja geometrije te npr. korištenja opcija *Remove face* geometrija elementa se pretvara u

shell oblik te je nakon završetka rada s geometrijom potrebno koristit naredbu *Solid from shell* kako bi se dobio početni oblik dijela.



Slika 17. Primjer pojednostavljenja 3D geometrije gornjeg desnog spojnog elementa

Na slici 18 prikazana je geometrija modela u *Abaqusu*.



Slika 18. Geometrija modela u programskom paketu *Abaqus*

4.3. Zadavanje materijala

Za navedeni model korištena su dva materijala. Kompozitni materijal od kojega su izrađena prednji i stražnji dio rame bicikla te aluminijska legura od koje su izrađeni spojni elementi. Svojstva materijala od kojega su izrađeni kompozitni dijelovi zadaju se pod *Material manager* u kojemu se definiraju svojstva jednog sloja. Raspored i broj slojeva definira se pod naredbom *Section manager* gdje se odabire *Shell-composite* te se nakon unošenja rasporeda slojeva navedeni raspored pomoću naredbe *Assign Section* dodjeljuje određenoj površini rame

konstrukcije. Materijal slojeva kompozitnih dijelova određen je od strane proizvođača *HardCore Industry*. Odabrani materijal vlakna je CFRP – Plain weave 3K carbon, a materijal matrice je Sika Biresin CR 120. Mehanička svojstva materijala definirala je tvrtka *HCI*, te su ona prikazana u Tablici 1 i 2.

Tablica 1. Mehanička svojstva materijala

Debljina sloja t [mm]	0,23
Gustoća ρ [kg/m3]	1600
Modul elastičnosti u smjeru vlakana E_1 [MPa]	50 000
Modul elastičnosti okomit na smjer vlakana E_2 [MPa]	50 000
Poissionov faktor υ [-]	0,05
Modul smičnosti G_{12} [MPa]	4550
Modul smičnosti G_{12} [MPa]	4550
Modul smičnosti G_{12} [MPa]	4550

Tablica 2. Mehanička svojstva materijala, kriteriji popuštanja

Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana X_t [MPa]	550
Tlačna čvrstoća u smjeru vlakana Xc [MPa]	352
Vlačna čvrstoća okomita na smjeru vlakana Y_t [MPa]	550
Tlačna čvrstoća okomita na smjeru vlakana Yc [MPa]	352
Smična čvrstoća S [MPa]	46

Mehanička svojstva aluminija korištena u numeričkoj analizu odabrana su iz [10] te iznose :

E = 70 000 MPa,

υ = 0,32.

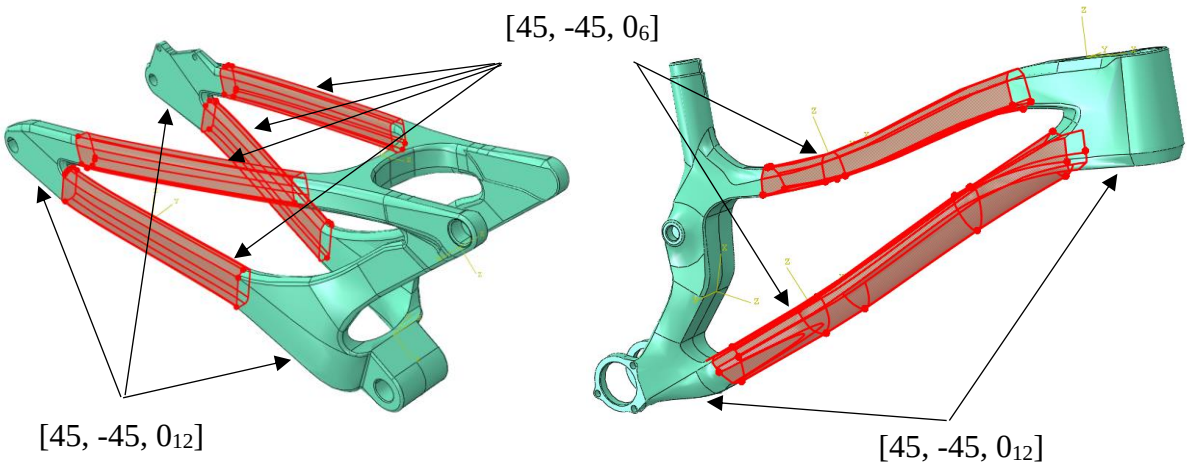
Temeljem iskustvenih vrijednosti te preporuka proizvođača odabran je početni raspored slojeva te se model s inicijalnim raspored slojeva u daljem dijelu teksta naziva *Model 1*. Odabrana su dva početna rasporeda slojeva, jedan od 8 te drugi od 14 slojeva. Manji broj slojeva postavljen je na mjestima tkz. ruku rama bicikla. Slojevi pod 45° stupnjeva postavljaju se prvi zbog torzijske krutosti konstrukcije.

Raspored slojeva prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Raspored slojeva

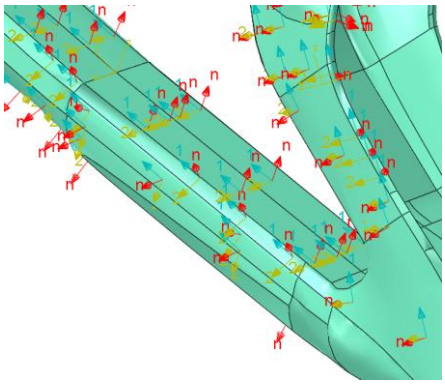
Broj slojeva	Raspored slojeva	Ukupna debljina kompozitne konstrukcije [mm]
8	[45, -45, 0_6]	1,84
14	[45, -45, 0_{12}]	3,22

Prikaz površina kojima su dodijeljeni odgovarajući raspored slojeva prikazan je na slici 19.



Slika 19. Prikaz površina s pripadajućim rasporedom slojeva

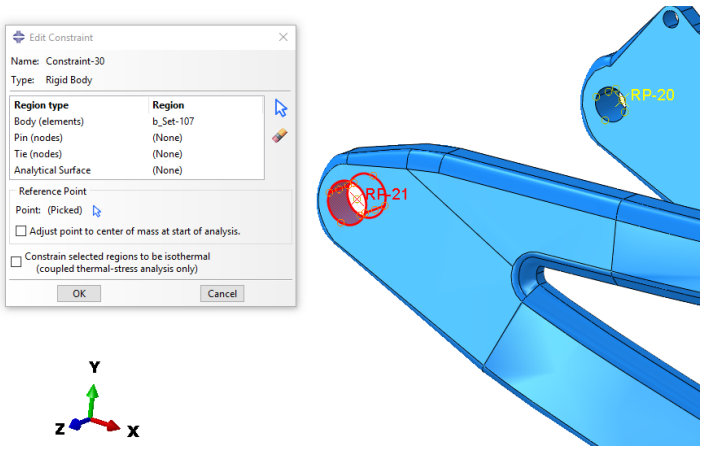
Prilikom zadavanja materijala potrebno je odrediti i pripadajuću orijentaciju koja se zadaje pomoću naredbe *Asign material orientation*. Orijentacija materijala zadaje se tako da glavna os *1* prati oblik konstrukcije. Prilikom zadavanja orijentacije potrebno je konstruirati lokalne koordinatne sustave. Primjer zadane orijentacije dan je na slici 20. Također na slici 20 prikazan je i smjer normala za zadanu orijentaciju materijala. Navedeni smjer normala odgovara i smjeru normala ljuskaste geometrije.



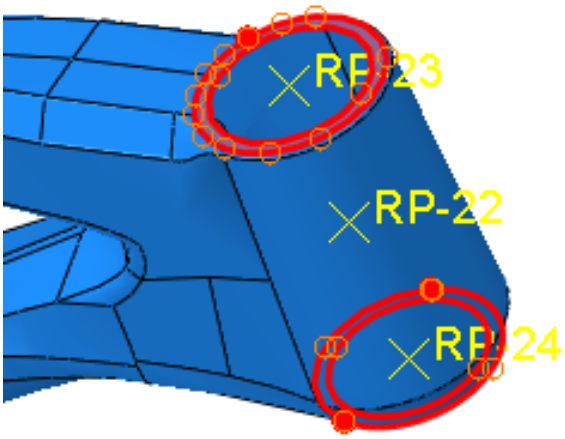
Slika 20. Prikaz površina s pripadajućom orijentacijom materijala

4.4. Rubni uvjeti

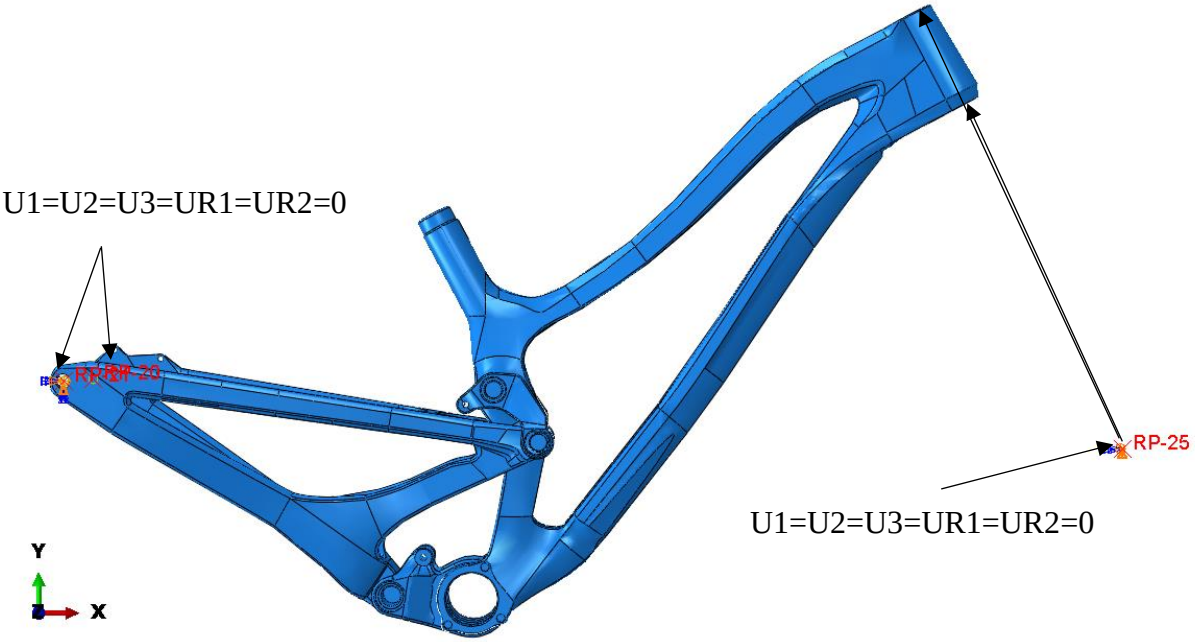
Radi eliminiranja lokalnih koncentracija naprezanja i postavljanja što realnijih rubnih uvjeta korištene su veze *Rigid body constraint.* Naime, na dijelu zadnje rame bicikla, na koju se spaja kotač, u realnom modelu nalazi se osovina. Radi jednostavnosti izračuna, osovina je modelirana kao kruto tijelo koje povezuje elemente u provrtu zadnje rame bicikla. Elementi su povezani kao kruto tijelo za referentnu točku koja se nalazi u središtu provrta. Referentnoj točki ograničeni su pomaci u svim smjerovima koordinatnih osi te su kutovi zakreta ograničeni u smjeru *x* i *y* osi. Također i za prednji dio rame bicikla nametnut je *Rigid body constraint.* Elementi na donjoj površini koje se spajaju s prednjom vilicom bicikla povezani su s krutom vezom za referentnu točku koja je postavljenja na mjesto prednje osovine kotača bicikla. Referentnoj točki ograničeni su pomaci u smjerovima *x, y* i *z* koordinatnih osi te su ograničeni kutovi zakreta oko osi *x i y*. Zadavanje veze referentne točke i pripadajućih površina prikazan je na slikama 21 i 22. Rubni uvjeti numeričkog modela prikazani su na slici 23.



Slika 21. Prikaz zadavanja rubnih uvjeta na desnom osloncu stražnje rame bicikla



Slika 22. Prikaz površina na koje se nameću rubni uvjeti

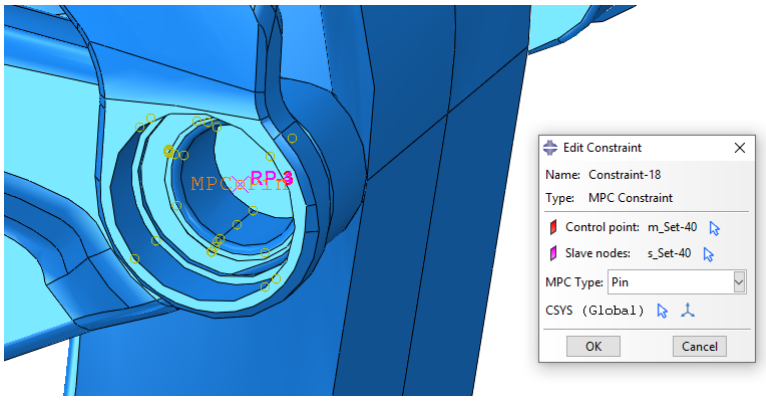


Slika 23. Prikaz zadavanja rubnih uvjeta na prednjoj kompozitnoj rami bicikla

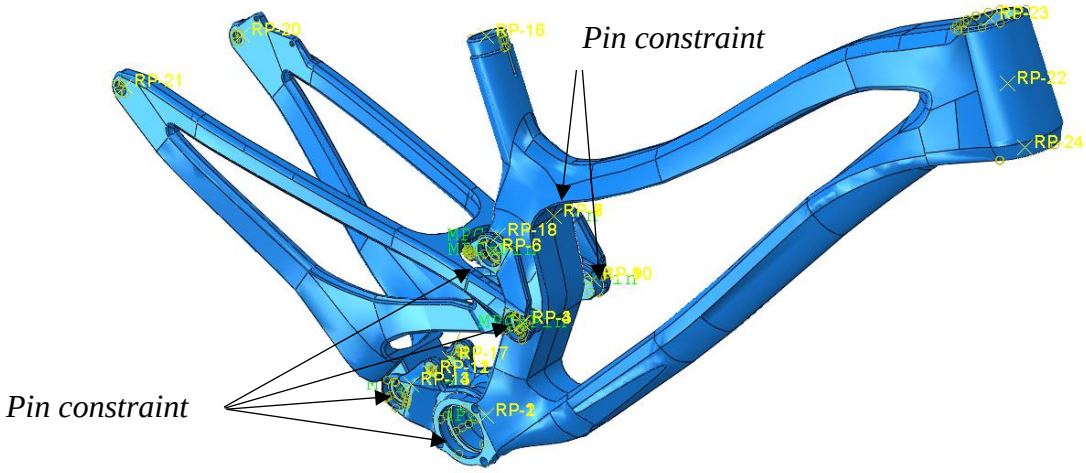
4.5. Kinematske veze

Kako je u ranijem dijelu teksta navedeno, u numeričkom modelu nisu uzeti svi dijelovi bicikla. Dijelovi koji povezuju spojeve spojnih srednjih elemenata i dijelova rame bicikla zamijenjeni su odgovarajućim kinematskim ograničenjima. Za zadavanje kinematskih ograničenja korištena su *MPC (multi point constraint)* ograničenja koja međusobno povezuju čvorove konačnih elemenata te definiraju vezu između njih. Površine su povezane s referentnom točkom preko *Rigid body constraint* ograničenja, dok su referentne točke međusobno povezane koristeći *MPC constraint* ograničenje. Navedeni način povezivanja je odabran jer najbolje odgovara stvarnom

modelu. Na mjestu spojeva u kompozitnoj rami ugrađeni su metalni dijelovi te drugi elementi koji povećavaju lokalnu krutost navedenih dijelova. Radi navedenih razloga korištenje *Rigid body* ograničenja dovoljno dobro odgovara stvarnoj situaciji jer je realno za očekivati da će se elementi lokalno ponašati kao kruto tijelo. *Rigid body constraint* ograničava sve pomake i kutove zakreta između referentne točke i referentnih površina te se oni ponašaju kao kruto tijelo. Nadalje, koristeći opciju *MPC constraint* povezuju se referentne točke s vezom *pin* koja najbolje odgovara stvarnom modelu jer ograničuje pomake između *master* i *slave* elemenata, a dozvoljava kutove zakreta. Primjer zadavanja kinematkse veze prikazan je na slici 24. te su pripadajuće kinematske veze prikazane na slici 25.



Slika 24. Prikaz zadavanja kinematkse veze



Slika 25. Prikaz kinematskih veza

4.6. Opterećenja

Numerička analiza *Modela 1* provedena je za četiri slučaja opterećenja. Prva dva slučaja definirana su prema normi ISO 4210-6-2015 koja je prikazana u poglavlju 3.1.2. Treći i četvrti slučaj predstavljaju opterećenje bicikla vertikalnom odnosno horizontalnom silom koje se pojavljuju tijekom vožnje bicikla.

4.6.1. Prvi slučaj opterećenja prema ISO 4210-6-2015

Za prvi slučaj opterećenja odabrana je sila definirana prema normi ISO 4120-6-2015 koja je opisana u ranijem dijelu ovog rada, slika 11. Kako bi se provela statička analiza, potrebno je odrediti iznos sile koja se pojavljuje na prednjoj osovini bicikla prilikom pada utega. Za izračun navede sile koriste se ranije navedeni izrazi (18) te se uzimaju slijedeći podaci:

masa utega, $m = 22,5$ kg,
gravitacija $g = 9,81$ m/s^2,
visina pada $h = 0,36$ m,
hod sile $s = 0,05$ m.

Hod sile *s* uzima se pretpostavljeni pomak oslonca (osovine prednjeg kotača) u vertikalnom smjeru.

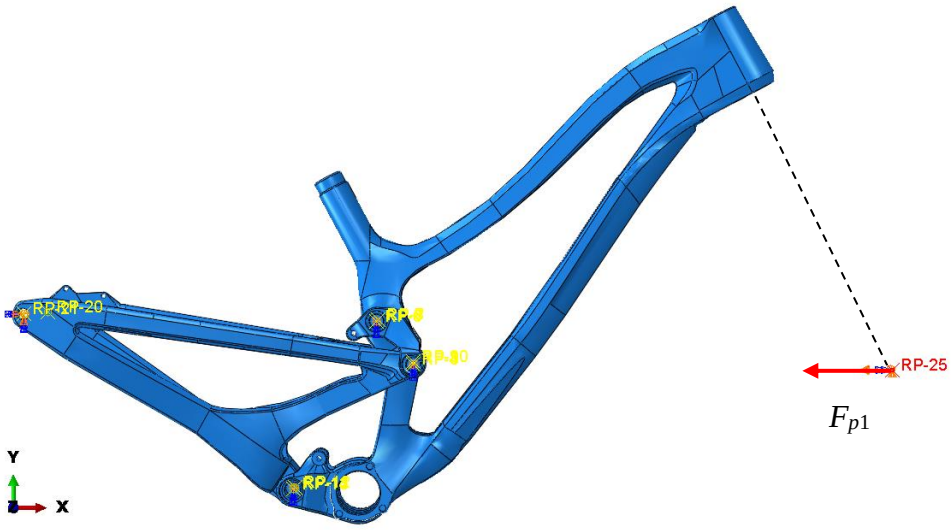
Dobiva se iznos sile:

$$F = \frac{m \cdot g \cdot h}{s} = \frac{22,5 \cdot 9.81 \cdot 0,36}{0,05} = 1589,22 \text{ N}. \tag{23}$$

Sila odabrana za numerički proračun:

$$F_{p1} = 1600 \text{ N}. \tag{24}$$

Hvatište sile postavlja se u referentnu točku koja je ujedno i oslonac prednjeg dijela bicikla. Prikaz zadavanja sile dan je na slici 26.

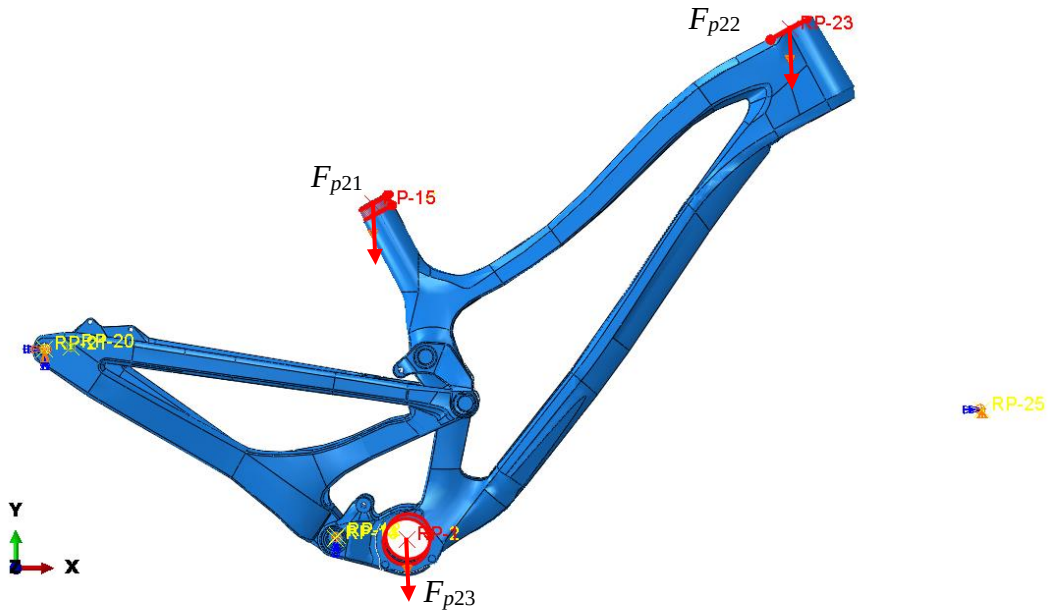


Slika 26. Položaj horizontalne sile prema normi ISO 4210-6-2015

4.6.2. Drugi slučaj opterećenja prema ISO 4210-6-2015

Za drugi slučaj opterećenja odabrana je sila definirana prema normi ISO 4120-6-2015 koja je opisana u ranijem dijelu ovog rada, slika 12. Kako bi se provela statička analiza potrebno je odrediti iznos sile koja se pojavljuje na prednjoj osovini bicikla prilikom pada utega.

Hvatišta sila postavljena su u referentne točke koje su pomoću *rigid body* ograničenja povezane s površinama na koje djeluju. Prikaz sila i površina na koje djeluju dan je na slici 27. Također je potrebno napomenuti kako u ovom modelu dolazi do promjena rubnih uvjeta kako bi se mogla nametnuti sila na prednji dio rame bicikla, na mjesto gdje se u stvarnosti nalazi volan bicikla. Naime, kao rubni uvjet oslonca *Modela 1* uzimaju se obje površine (gornja i donja) mjesta spajanja rame bicikla s prednjom vilicom bicikla te se za ovaj slučaj uzima samo donja površina kako bi se na gornju površinu nametnulo zadano opterećenje.



Slika 27. Prikaz vertikalnih sila prema normi ISO 4210-6-2015

Analogno kao i za prethodni slučaj opterećenja prilikom određivanja ekvivalentne sile za statičku analizu koristi se izraz 18 te je potrebno uvesti određene pretpostavke. U normi je navedeno da visina pada prednje osovine za brdske bicikla iznosi 300 mm. Navedena visina se uzima kao visina pada utega M_2, a za visinu pada utega M_1 i M_3 uzima se pola visine norme, odnosno 150 mm. Hod hvatišta akumulirane sile za uteg M_2 uzima se 0,1 m, dok se za hod hvatišta sile za utege M_1 i M_3 uzima 0,05m. Uvrštavanjem navedenih podatak u (18) dobivaju se slijedeći iznosi sila:

$$\begin{aligned} F_{21} &= \frac{M_1 g h_1}{s_1} = \frac{30 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}15}{0{,}05} = 882{,}9 \text{ N}, \\ F_{22} &= \frac{M_2 g h_2}{s_2} = \frac{10 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}3}{0{,}1} = 294{,}3 \text{ N}, \\ F_{23} &= \frac{M_3 g h_3}{s_3} = \frac{50 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}15}{0{,}05} = 1471{,}5 \text{ N}. \end{aligned} \tag{25}$$

Odabrani iznosi sila za proračunski model su:

$$\begin{aligned} F_{p21} &= 900 \text{ N}, \\ F_{p22} &= 300 \text{ N}, \\ F_{p23} &= 1500 \text{ N}. \end{aligned} \tag{26}$$

4.6.3. Treći slučaj opterećenja

Za treći slučaj opterećenja proučavaju se sile prilikom slobodnog pada bicikla i vozača. Pojava slobodnog pada se vrlo često pojavljuje kod brdskih bicikala zbog konfiguracije terena. Vrlo česti skokovi te spuštanja niz strme nizbrdice dovode do pojave velikih opterećenja na ramu bicikla. Sila će se analizirati kao statička sila jer se opterećenje promatrao kao kvazistatičko. Silu je moguće dobiti preko zakona očuvanja energije. Kako je prikazano u ranijem navedenom poglavlju, silu koja djeluje na ramu bicikla može se dobiti koristeći jednadžbu (18). Ako se koriste slijedeći podaci:

masa čovjeka, $m = 80$ kg,
gravitacija $g = 9{,}81$ m/s^2,
visina pada $h = 1$ m,
hod sile $s = 0{,}07$ m.

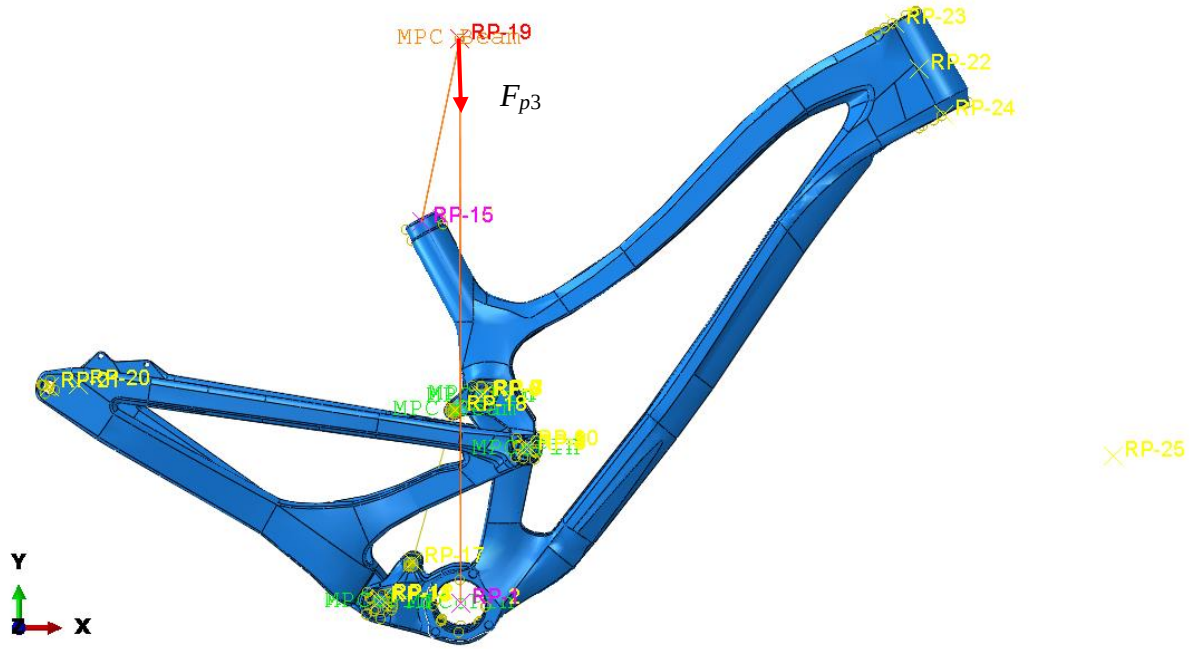
Dobiva se iznos sile:

$$F = \frac{m \cdot g \cdot h}{s} = \frac{80 \cdot 9.81 \cdot 1}{0{,}07} = 11211{,}4 \text{ N}. \tag{27}$$

Sila odabrana za numerički proračun:

$$F_{p3} = 12000 \text{ N}. \tag{28}$$

Prilikom izrade numeričkog modela hvatište sile postavljeno je u referentnu točku RP-19 te je navedena točka povezana *Beam* ograničenjem s dvije referentne točke. Referentne točke su preko *Rigid body* ograničenja povezane s površinama koje su uzete kao površine koje preuzimaju silu. Sila je usmjerena u negativnom smjeru osi *y*. Prikaz veza i površina prikazan je na slici 28.



Slika 28. Prikaz zadavanja hvatišta i smjer sile za treći slučaj opterećenja

4.6.4. Četvrti slučaj opterećenja

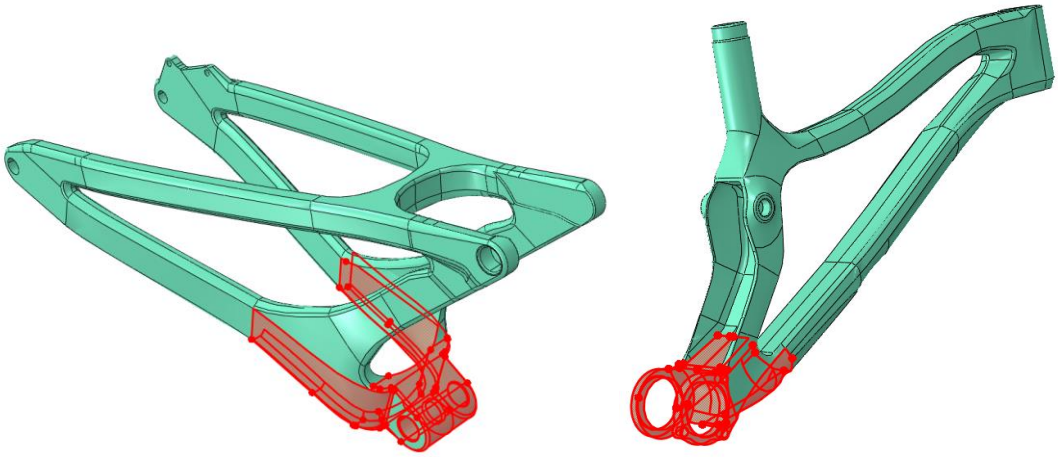
Za četvrti slučaj opterećenja uzima se opterećenje koje nastaje prilikom naleta bicikla na neravnu podlogu. Sile koje se pojavljuju djeluju na prednju osovinu kotača te se promatraju kao sile koje djeluju u vodoravnom smjeru u odnosu na podlogu.

Numerički model za ovaj slučaj isti je kao i drugi slučaj samo je razlika u iznosu sile koja je za ovaj slučaj znatno veća. Kako je prikazano u eksperimentu opisanom u poglavlju 3.2., iznos sile pri kojem dolazi do loma kompozitne rame konstrukcije iznosi 9130 N te je navedeni iznos približno 2,5 puta veći od opterećenja koje se pojavljuje u realnim uvjetima prilikom vožnje. Za ovaj slučaj opterećenja odabrana je sila:

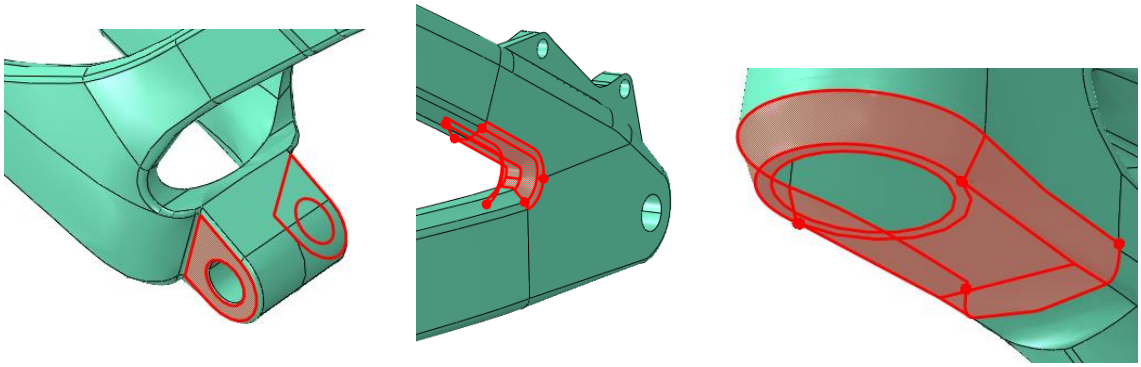
$$F_{p4} = 4000 \text{ N}. \tag{29}$$

5. Rezultati

Prilikom provedbe numeričke analize *Model 1* utvrđene su pojave velikih koncentracija naprezanja. Postavljaju se lokalna povećanja broja slojeva materijala kako bi se manjila pojava koncentracija naprezanja. Prikaz površina na kojima je povećan broj s odgovarajućim rasporedom slojeva prikazan je na slici 31, a raspored slojeva je $[45, -45, 0_8]_s$. Zbog pojave složenog stanja naprezanja na određenim površinama bilo je potrebno povećati broj slojeva pod 45°. Površine su prikazane na slici 32, a raspored slojeva je $[(-45, 45)_2 , 0_8]_s$.



Slika 29. Prikaz ojačanih površina



Slika 30. Prikaz ojačane površine spoja

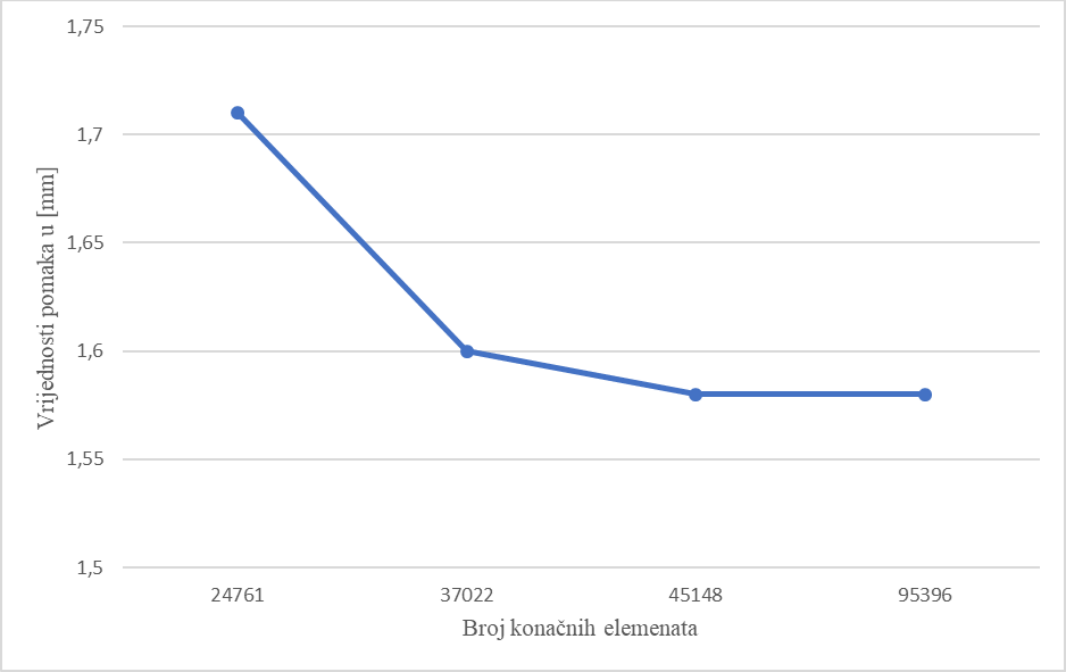
5.1. Konvergencija mreže

Kako bi se pokazala konvergencija mreže, provedene su 4 analize pri kojima je mijenjan broj elemenata. Analize su provedene za drugi slučaj opterećenja te se za rezultat promatra pomak referentne točke koja se nalazi u središtu kružnog dijela prednje rame bicikla (dio na koji se veže sic bicikla). Broj elemenata za dijelove konstrukcije prikazan je u Tablici 4. Prilikom

analize utvrđeno je da zbog složene geometrije nije moguće provoditi velike razlike u veličini elementa. Prikaz grafa konvergencije rezultata dan je na slici 31.

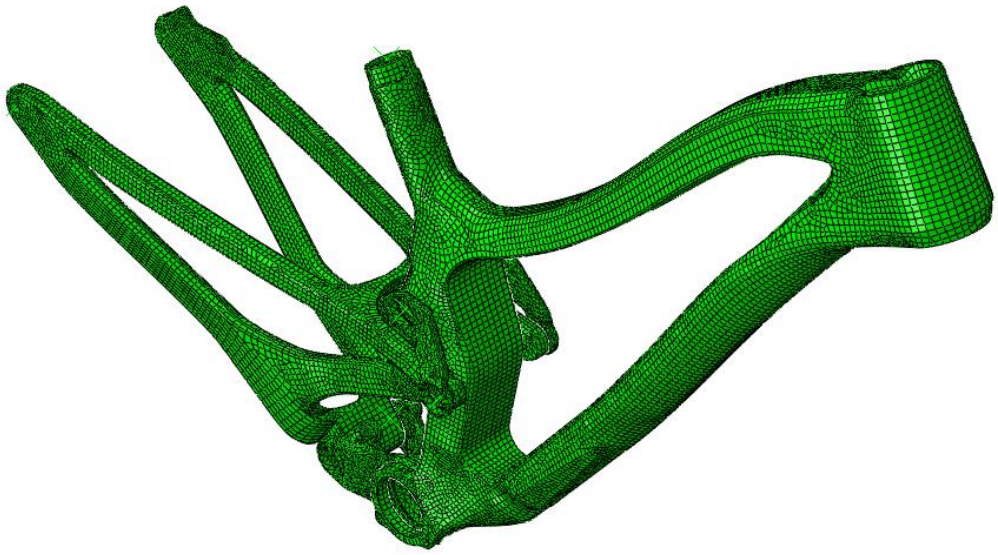
Tablica 4. Broj konačnih elemenata

Analiza br.	Broj elemenata prednje rame bicikla	Broj elemenata stražnje rame bicikla	Broj elemenata spojnih dijelova	Ukupni pomak U referentne točke [mm]
1.	8514	8 395	7 852	1,71
2.	13 670	10 861	12 491	1,6
3.	18 473	13 734	12 941	1,58
4	44 195	31 942	19 259	1,58



Slika 31. Graf konvergencije rješenja

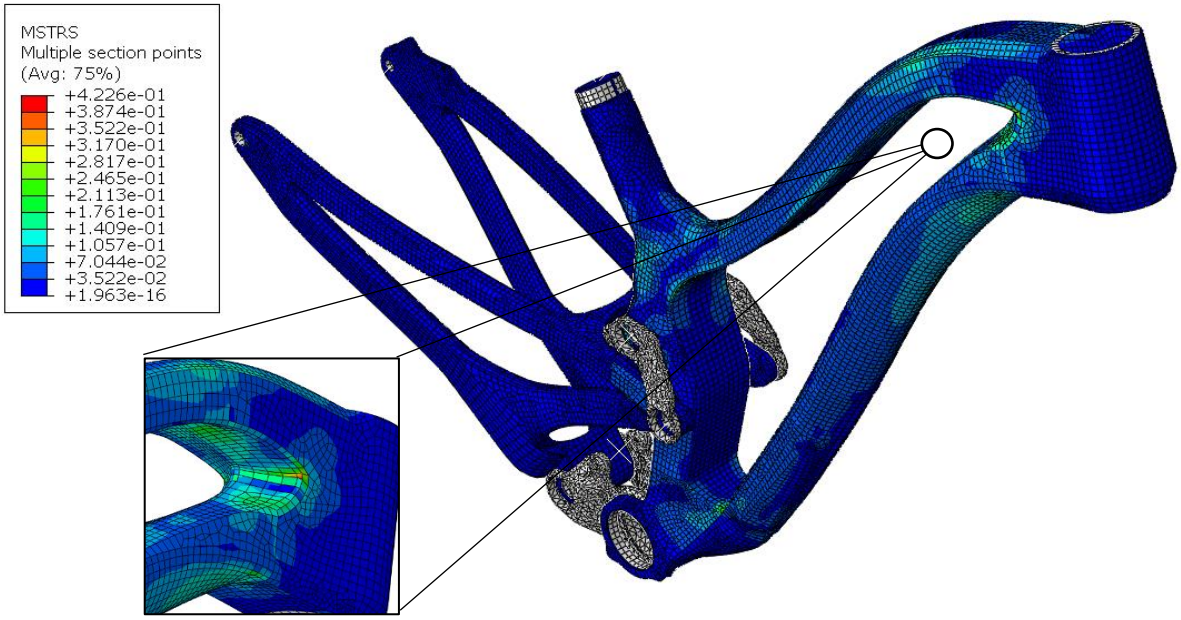
Prikaz mreže konačnih elemenata za analizu broj 3. dan je na slici 32. Kreirana mreža prikazana na slici sastoji se od 45 148 elemenata od kojih je: 30977 S4R, 1230 S3R i 12941 C3D10 elemenata. Odabrana mreža koristi se u daljnjoj numeričkoj analizi kompozitne rame bicikla.



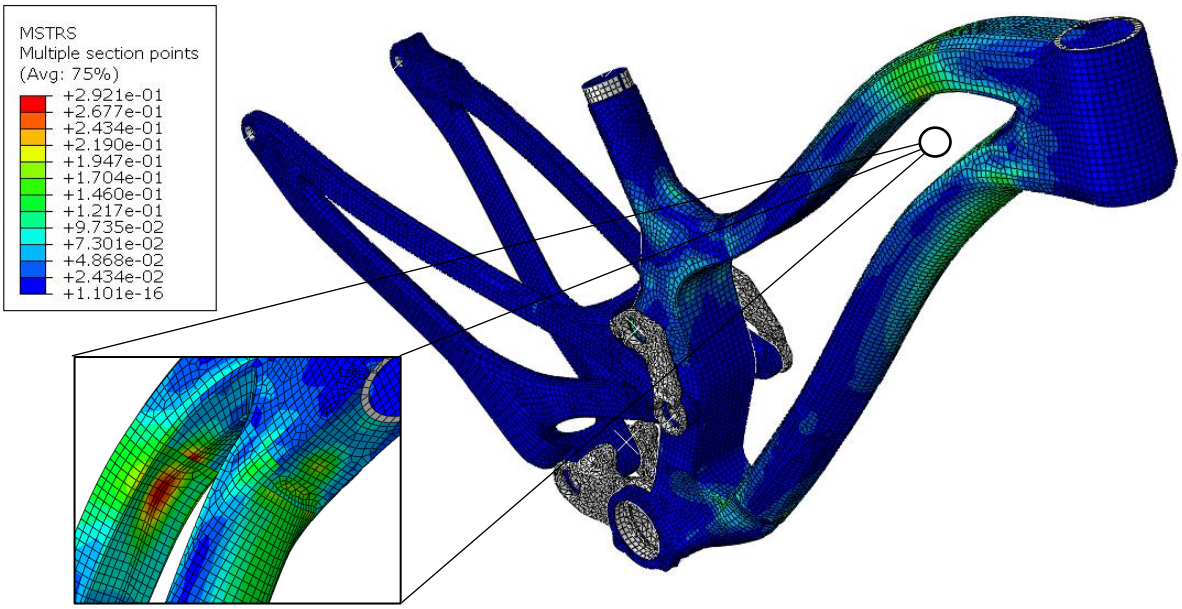
Slika 32. Prikaz mreže konačnih elemenata

5.2. Rezultati za prvi slučaj opterećenja

Na slikama 33 i 34 prikazani su rezultati kriterij maksimalnih naprezanja za prvi odnosno zadnji sloj kompozitne konstrukcije. U programskom paketu *Abaqus* odabran je prikaz varijable MSTRS koja predstavlja vrijednosti kriterija maksimalnih naprezanja preračunate na način da do popuštanja dolazi kada je iznos varijable veći od 1.

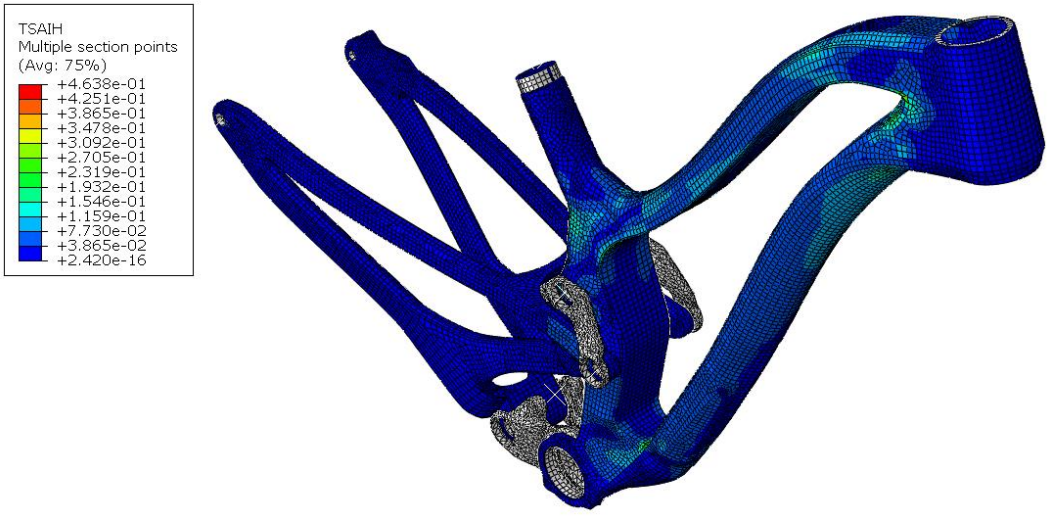


Slika 33. Prikaz kriterija maksimalnog naprezanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije

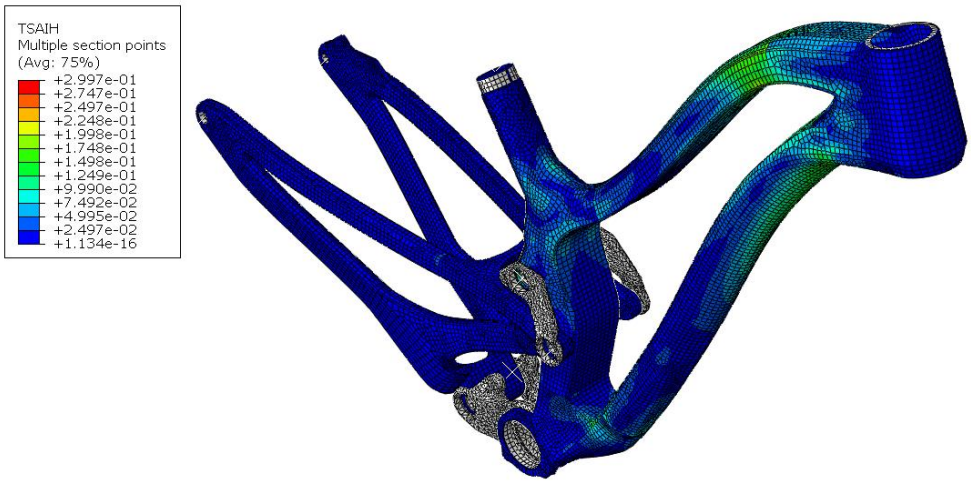


Slika 34. Prikaz kriterija maksimalnog naprezanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije

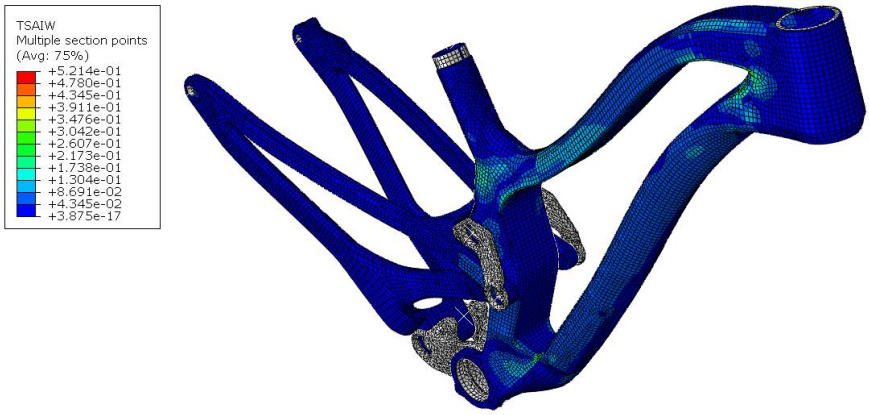
Za kriteriji popuštanja materijala analiziraju se i kriteriji maksimalnih naprezanja te Tsai-Wu i Tsai-Hill kriteriji. Vrijednosti za navedene kriterije prikazani su na slikama 35, 36, 37 i 38. Kritična mjesta konstrukcije ista su kao i za kriterij maksimalnih naprezanja. Također, prikazane su i vrijednosti pomaka U1 u smjer osi *x*, što je ujedno i smjer djelovanja sile, kako bi se dobio uvid u krutost konstrukcije. Vrijednosti pomaka U1 prikazani su na slici 39.



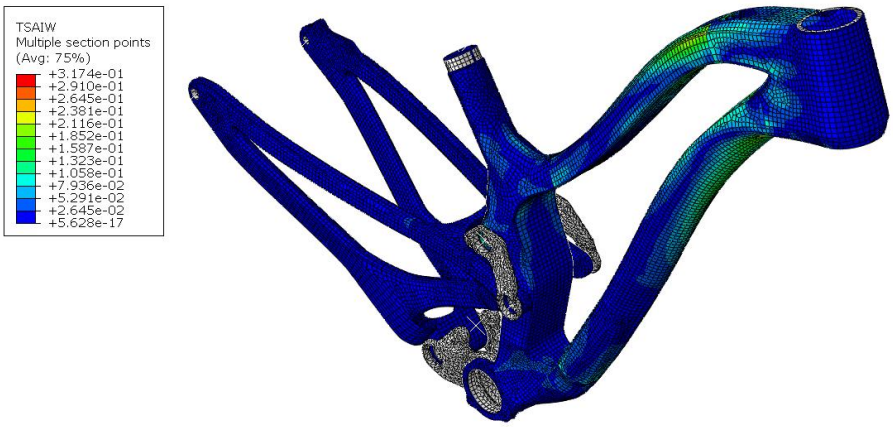
Slika 35. Rezultati Tsai-Hill kriterija popuštanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije



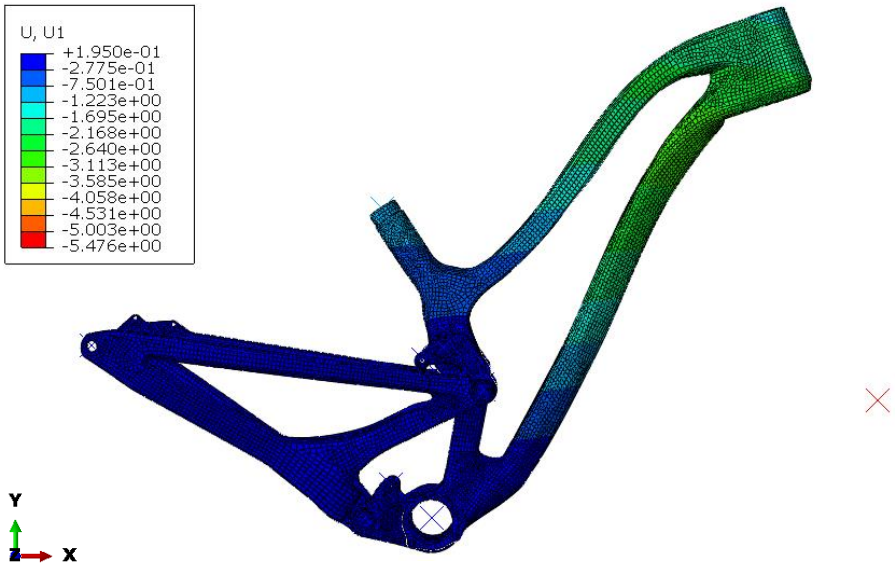
Slika 36. Rezultati Tsai-Hill kriterija popuštanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije



Slika 37. Rezultati Tsai-Wu kriterija popuštanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije



Slika 38. Rezultati Tsai-Wu kriterija popuštanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije

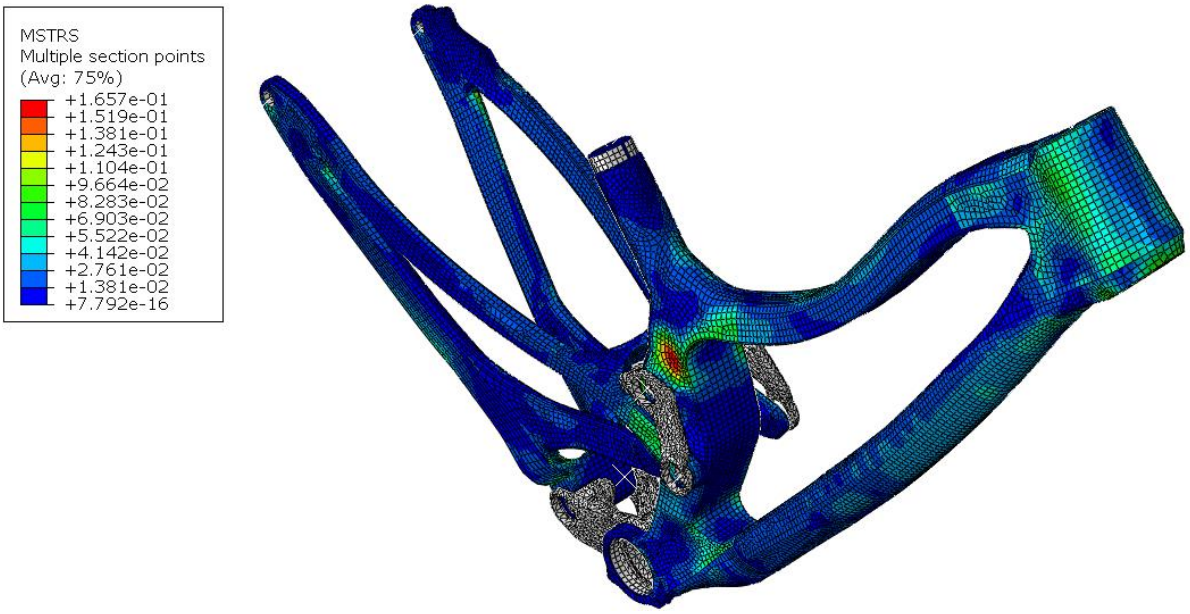


Slika 39. Vrijednosti pomaka U1 [mm] za prvi slučaj opterećenja

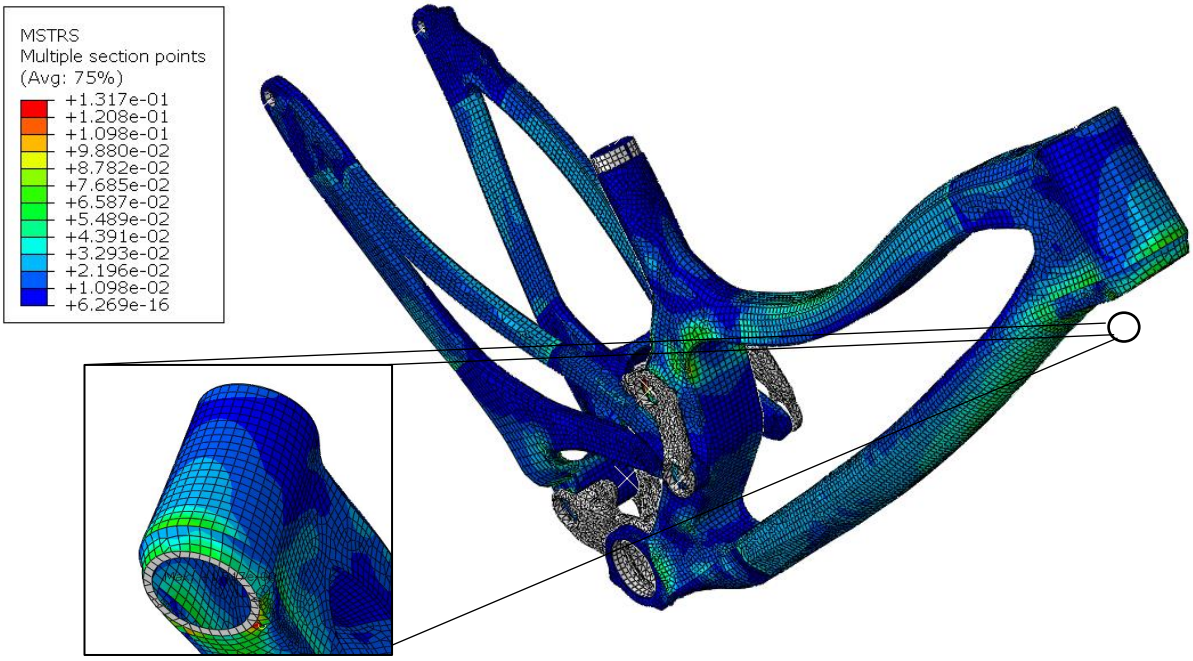
Kako je vidljivo iz navedenih rezultat, najkritičniji dio konstrukcije je u skladu s očekivanjima kako je prikazano u [8]. Najveće vrijednosti kriterija popuštanja pojavljuju se prednjem dijelu konstrukcije te najveću vrijednost poprima za prvi sloj konstrukcije na mjestu spajanja cjevastih dijelova rame bicikla. Vrijednosti kriterija su znatno ispod kritične vrijednosti te je najveći iznos kriterija popuštanja dobiven za Tsai-Wu kriterij koji iznosi 0,52.

5.3. Rezultati za drugi slučaj opterećenja

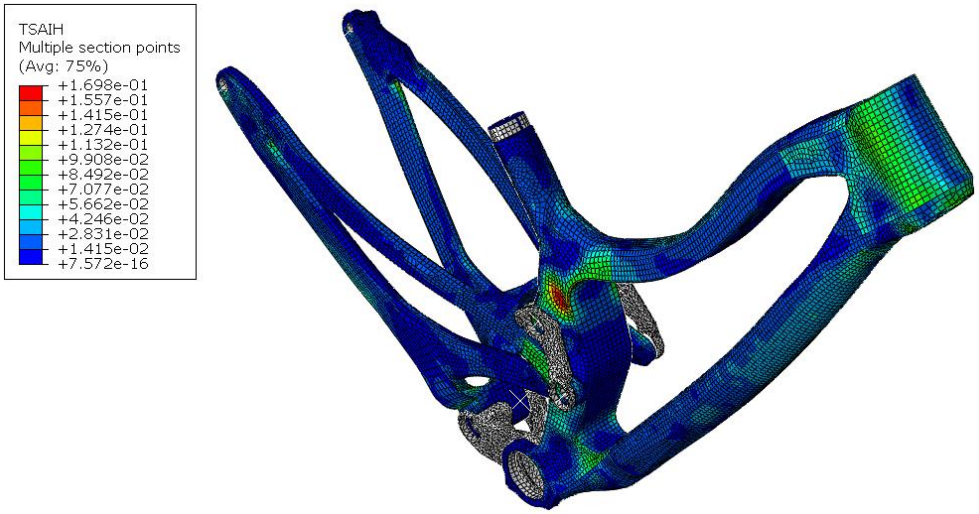
Prilikom analize rezultata za drugi slučaj opterećenja utvrđeno je da se najveći iznosi kriterija popuštanja pojavljuju za prvi sloj [45°]. Navedeni rezultati prikazani su na slikama 40, 42 i 43. Na slici 41 prikazana je vrijednost kriterija maksimalnih naprezanja za zadnji sloj konstrukcije [0°]. Vrijednosti ukupnih pomaka U prikazani su na slici 44. Faktor uvećanja deformacije za prikazane modele je 240.



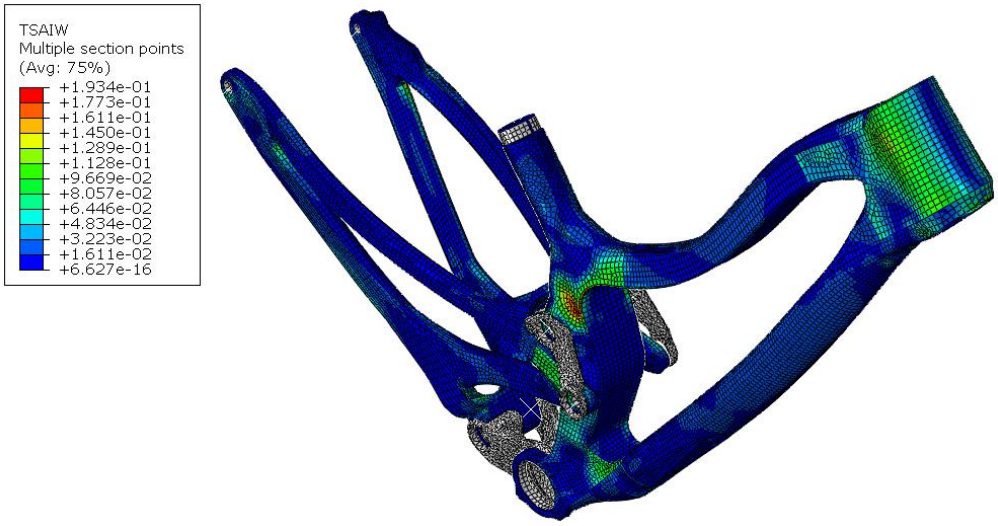
Slika 40. Kriterij maksimalnog naprezanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, drugi slučaj opterećenja



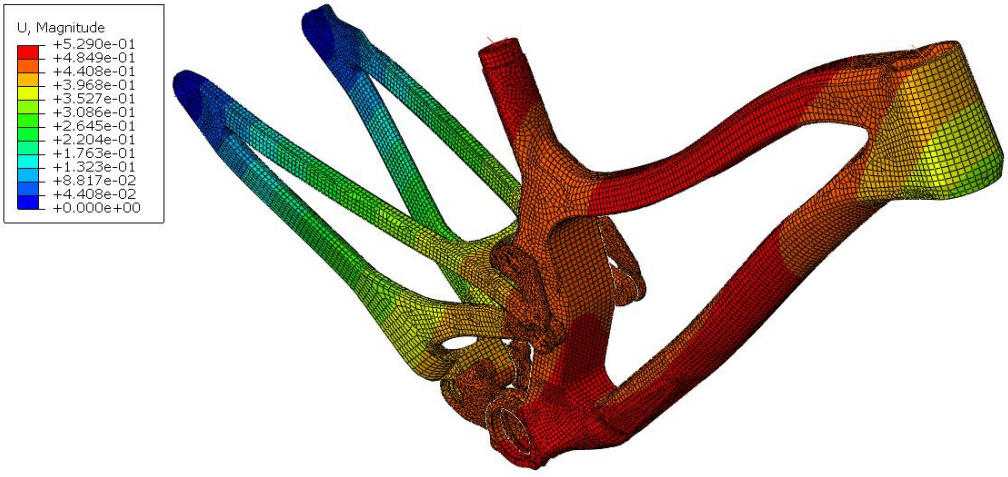
Slika 41. Kriterij maksimalnog naprezanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije, drugi slučaj opterećenja



Slika 42. Tsai-Hill kriterij za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, drugi slučaj opterećenja



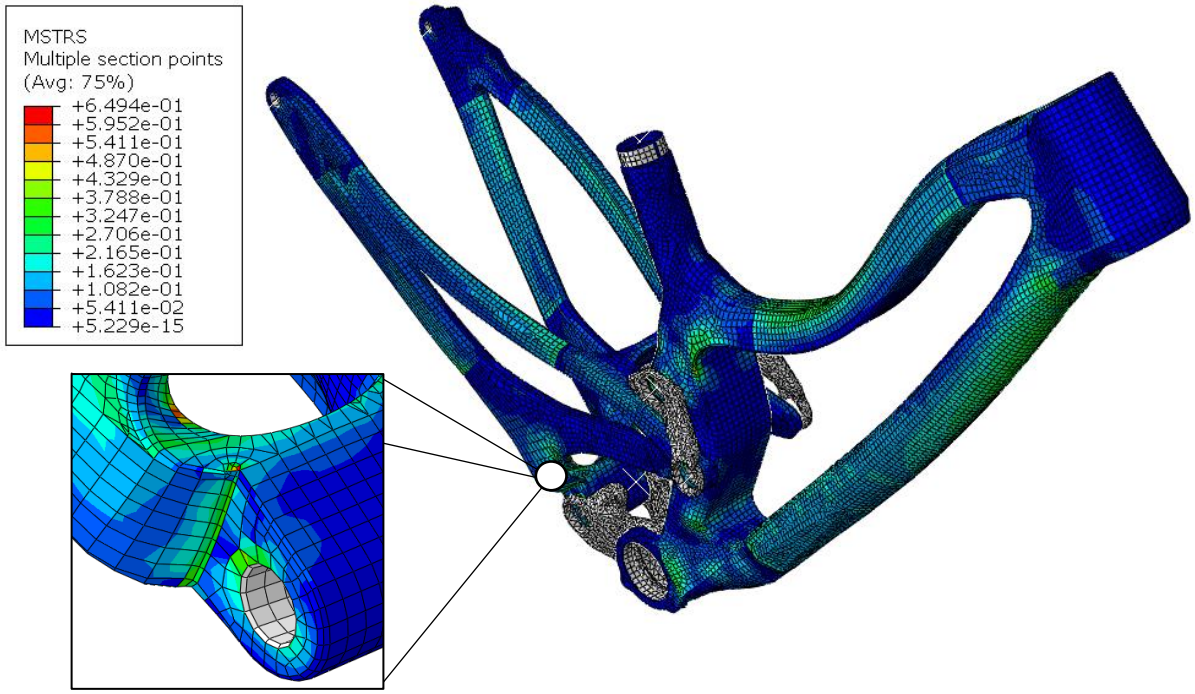
Slika 43. Tsai-Wu kriterij za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, drugi slučaj opterećenja



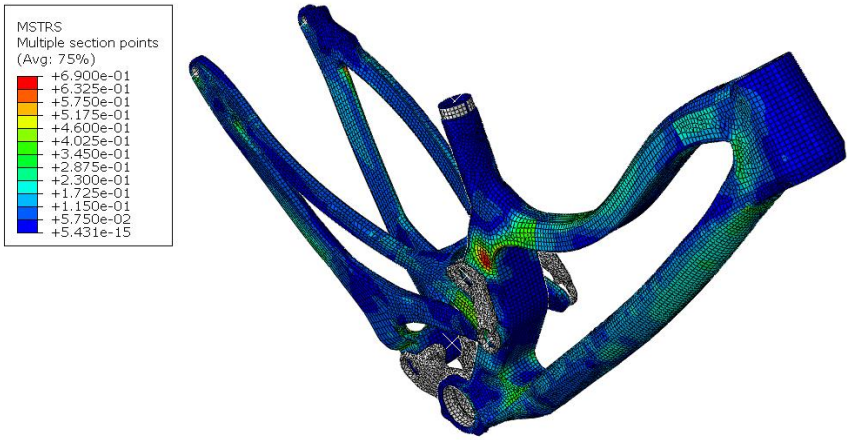
Slika 44. Vrijednosti ukupnog pomaka U za drugi slučaj opterećenja, nedeformirani oblik

5.4. Rezultati za treći slučaj opterećenja

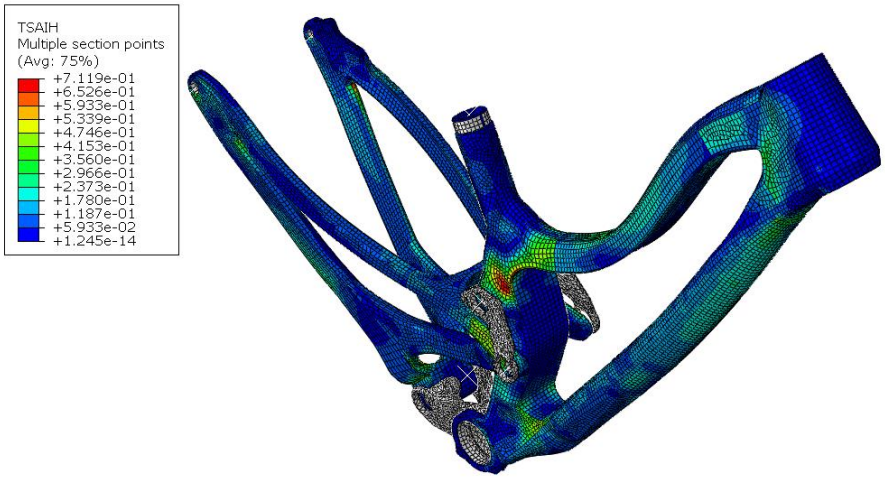
Kao i kod drugog slučaja opterećenja, prilikom analize rezultata utvrđeno je da se najveći iznosi kriterija popuštanja pojavljuju za prvi sloj [45°]. Navedeni rezultati prikazani su na slikama 46, 47 i 48. Na slici 45 prikazana je vrijednost kriterija maksimalnih naprezanja za zadnji sloj konstrukcije [0°]. Vrijednosti ukupnog pomaka U prikazani su na slici 49. Kako ovaj slučaj opterećenja predstavlja realne uvjete zanimljivo je prikazati raspodjelu naprezanja za konstrukciju. Na slici 50 prikazani su rezultati za *Von Mises* raspodjelu naprezanja koji nije relevantan za proračun čvrstoće kompozitne konstrukcije, ali se dobiva jasniji uvid o rasporedu naprezanja nego u usporedbi s prikazom za slučaj kod prikazivanja teorija popuštanja.



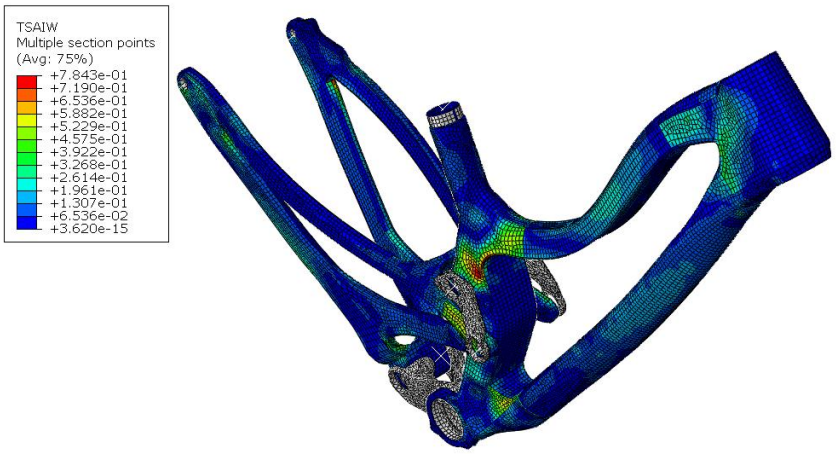
Slika 45. Kriterij maksimalnog naprezanja za zadnji sloj [0°] kompozitne konstrukcije, treći slučaj opterećenja



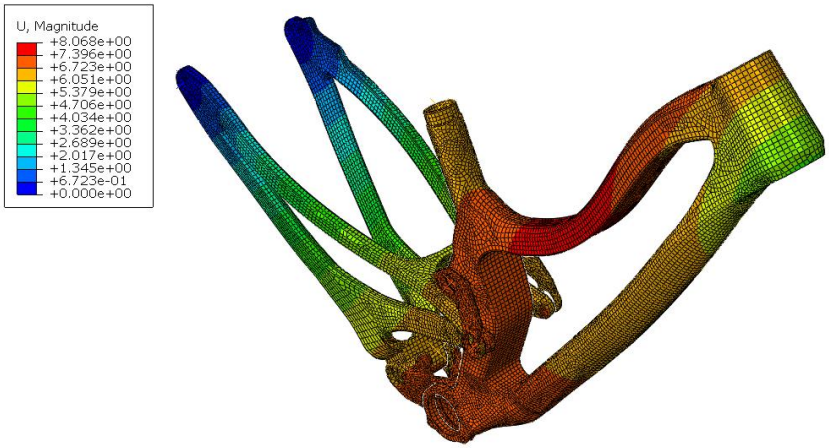
Slika 46. Kriterij maksimalnog naprezanja za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, treći slučaj opterećenja



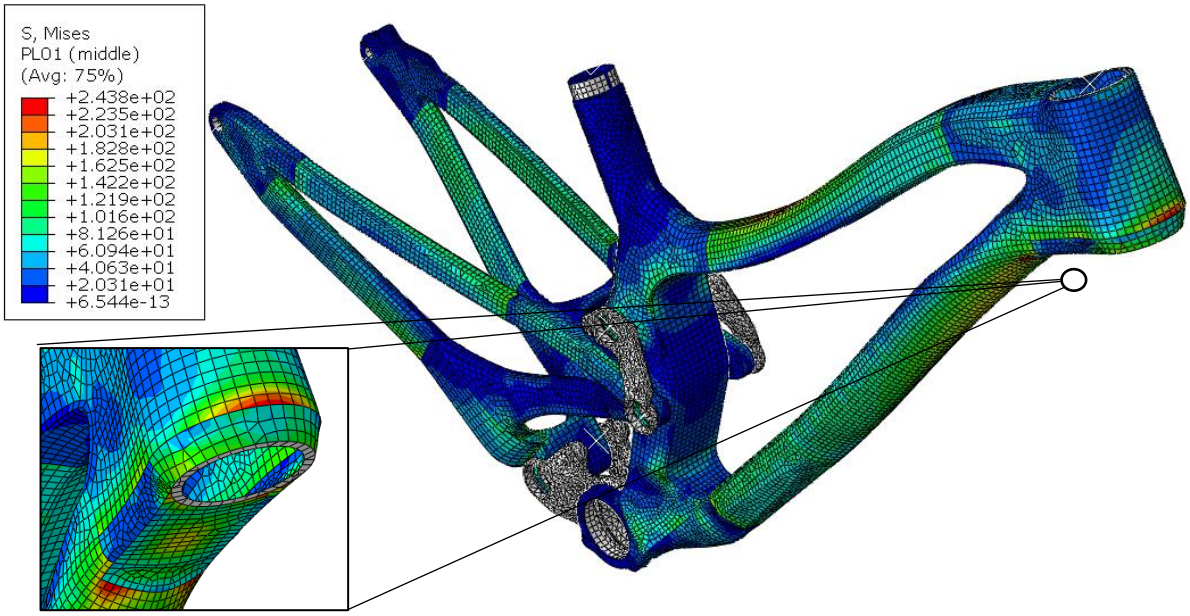
Slika 47. Tsai-Hill kriterij za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, treći slučaj opterećenja



Slika 48. Tsai-Wu kriterij za prvi sloj [45°] kompozitne konstrukcije, treći slučaj opterećenja



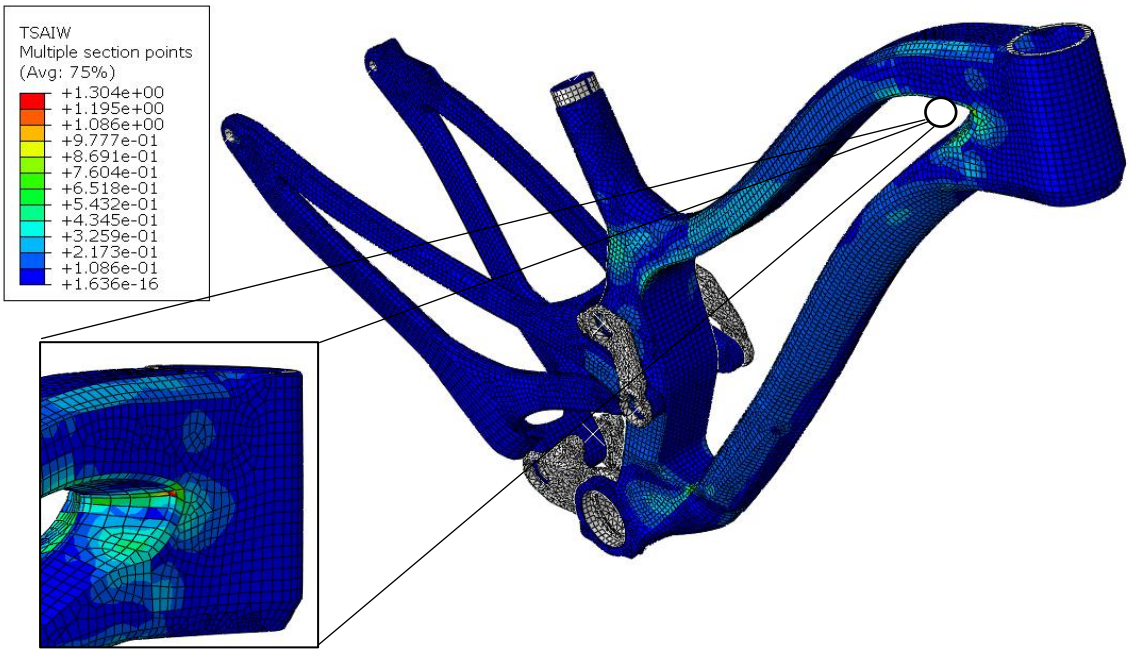
Slika 49. Vrijednosti ukupnih pomaka U [mm] za treći slučaj opterećenja



Slika 50. Prikaz raspodjele naprezanja [MPa] prema *Von Mises* za zadnji sloj konstrukcije [0°]

5.5. Rezultati za četvrti slučaj opterećenja

Četvrti slučaj opterećenja pokazao se kao najkritičniji slučaj opterećenja. Očekivano, raspored rezultata je isti kao i za prvi slučaj, ali je iznos znatno veći. Najveći iznos kriterija popuštanja pojavljuje se na prvom sloju kompozitne konstrukcije, pri čemu je najveći iznos kriterija popuštanja dobiven za Tsai-Wu kriteriji. Rezultati za Tsai-Wu kriteriji prikazani su na slici 51.



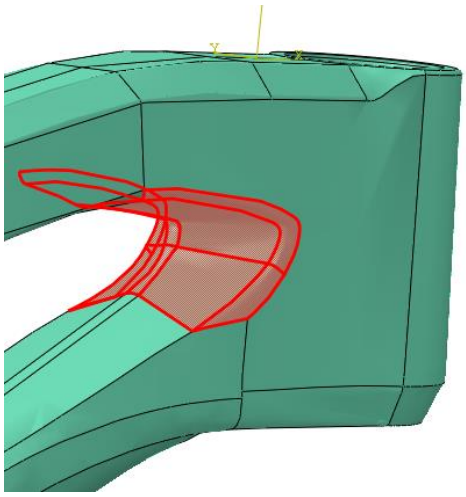
Slika 51. Tsai-Wu kriterij za zadnji sloj [45°] kompozitne konstrukcije, četvrti slučaj opterećenja

U tablici 5 prikazani su maksimalni iznosi kriterija popuštanja za ovaj slučaj opterećenja

Tablica 5. Iznosi kriterija popuštanja za odabrane slojeve rasporeda slojeva materijala

Sloj	Kriteriji maksimalnih naprezanja	Tsai-Hill kriteriji	Tsai-Wu kriteriji
1. [45]	1,1	1,16	1,3
2. [-45]	0,94	1,04	1,17
3. [0]	0,44	0,48	0,55
14. [0]	0,68	0,69	0,73

Kako je vidljivo, rezultati prelaze vrijednost 1 što znači da za navedeni slučaj dolazi do popuštanja materijala odnosno kompozitnog sloja. Najkritičniji slojevi su slojevi pod 45° i -45° koji su ujedno i prvi slojevi. Na navedenim mjestima pojave koncentracije naprezanja, prikazano na slici 54, inicijalni raspored slojeva [45, -45, 0_{12}] variran je na način da su u prvom slučaju dodana dva sloja pod 0° , [45, -45, 0_{14}], odnosno $\mp$45°, [$(-45, 45)_2$, 0_{12}], te 30 i 60°, [45, -45, 30, 60, 0_{12}]. Površine rame bicikla na kojima je variran raspored slojeva prikazane su na slici 52.



Slika 52. Prikaz kritičnog mjesta prednje rame bicikla

Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 6. Iz tablice je vidljivo kako na smanjenje iznosa kriterija popuštanja veći utjecaj ima raspored slojeva nego njihov broj. Dodavanjem slojeva pod 0° ne dolazi do značajnijeg smanjenja rezultata za kriterij popuštanja. Rezultati analize su pokazali kako dodavanje slojeva pod 45° najznačajnije utječe na povećanje čvrstoće konstrukcije. Kako se radi o *woven* materijalu, nisu dodavani slojevi pod 90°. Za daljnju analizu *Modela 1* odabran je raspored slojeva $[(-45, 45)_2, 0_{12}]$.

Tablica 6. Iznosi kriterija popuštanja za varirane rasporede slojeva

Dodavanje dva sloja pod 0°, $[45, -45, 0_{14}]$			
Sloj	Kriterij maksimalnih naprezanja	Tsai-Hill kriterij	Tsai-Wu kriterij
1. [45]	0,99	1,1	1,25
2. [-45]	0,9	1	1,1
3. [0]	0,61	0,65	0,74
16. [0]	0,66	0,67	0,71
Dodavanje dva sloja $\mp$45°, $[(-45, 45)_2, 0_{12}]$			
Sloj	Kriterij maksimalnih naprezanja	Tsai-Hill kriterij	Tsai-Wu kriterij
1. [45]	0,84	0,9	0,98
2. [-45]	0,75	0,8	0,88
3. [45]	0,7	0,74	0,82
4. [-45]	0,65	0,68	0,75
5. [0]	0,44	0,45	0,51
16. [0]	0,68	0,68	0,77

Dodavanje slojeva pod 30 i 60°, [45, -45, 30, 60, 0_{12}]			
Sloj	Kriterij maksimalnih naprezanja	Tsai-Hill kriterij	Tsai-Wu kriterij
1. [45]	0,88	0,94	1,04
2. [-45]	0,78	0,84	0,93
3. [60]	0,66	0,7	0,77
4. [30]	0,65	0,67	0,72
5. [0]	0,44	0,45	0,52
16. [0]	0,67	0,68	0,71

5.6. Analiza rezultata

Prilikom analize rezultata vidljivo je kako su najkritičnija opterećenja 3. i 4. slučaj opterećenja što je i očekivano jer su ta opterećenja značajno veće nego opterećenja propisana normama. Najkritičnije mjesto je prednji dio prednje rame bicikla što je u skladu s rezultatima dobivenim u eksperimentu [4]. Za rezultate dobivene prilikom testiranja normi utvrđeno je kako su vrijednosti kriterija popuštanja značajno ispod dopuštene granice. Za sve slučajeve naprezanja najkritičniji kriteriji se pokazao Tsai-Wu kriterij, a najkritičnije sloj konstrukcije je prvi sloj. U praksi se prvi slojevi uvijek postavljaju pod $\mp 45°$ jer se na vanjskim slojevima pojavljuju najveća torzijska naprezanja. Kako u ovom radu nije provedena torzijska analiza te se nije moglo odrediti koliko raspored slojeva utječe na torzijsku krutost konstrukcije, prvi slojevi $\mp 45°$ nisu varirani te su oni uvijek postavljeni kao prva dva sloja.

Prilikom provedbe varijacija rasporeda slojeva prikazano je kako dodavanje rasporeda slojeva pod 30 i 60° ne utječe značajno na povećanje čvrstoće kompozitne rame bicikla te se zbog toga nisu vršile daljnje analize variranja rasporeda slojeva. Nadalje, inicijalni odabir rasporeda slojeva pokazao se kao granični model te je bilo potrebno uvesti povećanja rasporeda slojeva te zbog toga nije provedeno variranje rasporeda u kojem bi se smanjivao broj slojeva.

6. Izvijanje

Gubitak stabilnosti ili izvijanje predstavlja veliki izazov za inženjere prilikom dimenzioniranja konstrukcije. Kako je brdski bicikli izrađen od tankostijene konstrukcije te se prilikom prijašnjih analiza pokazalo da se u srednjim dijelovima rame tkz. rukama, pojavljuju značajni iznosi naprezanja potrebno je izvršiti numerički izračun sile izvijanja. Kritična sila izvijanja određuje se tako da se pronalazi prva vlastita frekvencija konstrukcije.

Numerički izračun proveden je na način da se za zadana opterećenja i rubne uvjete izračunava prva vlastita frekvencija konstrukcije te se ona uspoređuje s 1. Naime, prilikom klasičnog izračuna sile izvijanja za inicijalnu silu se postavlja sila iznos 1 N te iznos prve vlastite frekvencije predstavlja iznos za koliko je puta kritična sila izvijanja veća od 1. Ako se želi izračunati dolazi li do izvijanja za zadanu silu F, tada F_{kr}/F , gdje je F_{kr} kritična sila izvijanja, mora biti veće od 1. Ako je iznos sile manji od 0, kritična sila izvijanja je u suprotnom smjeru djelovanja postavljene sile.

6.1. Rezultati

Proračun sile izvijanja za *Model 1* provodi se za treći i četvrti slučaj opterećenja koji su opisani u ranijem dijelu rada te je za njih određena kritična sila izvijanja. Prilikom izrade numeričkog modela nisu se mijenjali parametri već je samo u modelu kreiran dodatni *Step (Linear,Buckling)* koji je potreban za numerički izračun kritične sile izvijanja.

6.1.1. Prvi slučaj izvijanja

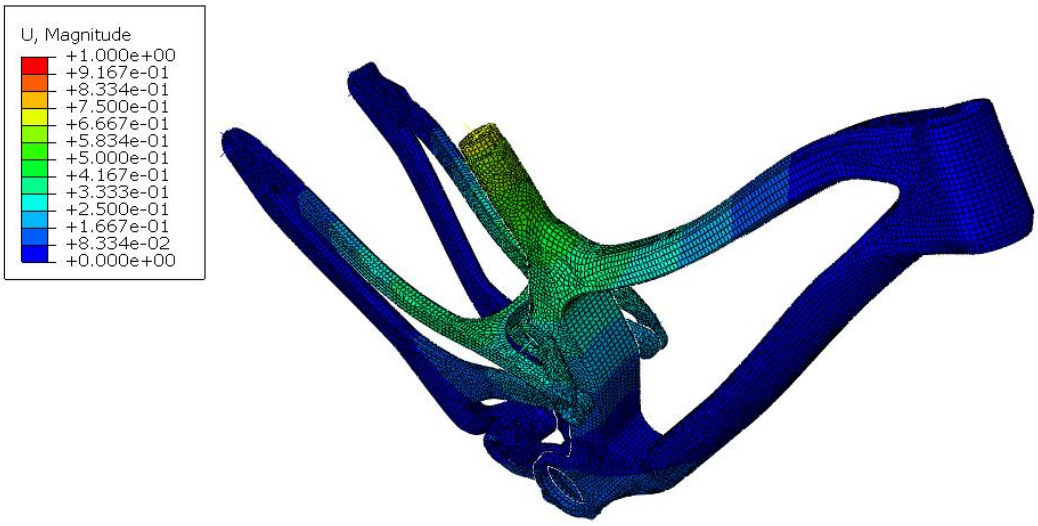
Prilikom analize izračunata su dva načina izvijanja te pripadajuće kritične sile izvijanja. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Dobiveni rezultati za prvi slučaj opterećenja

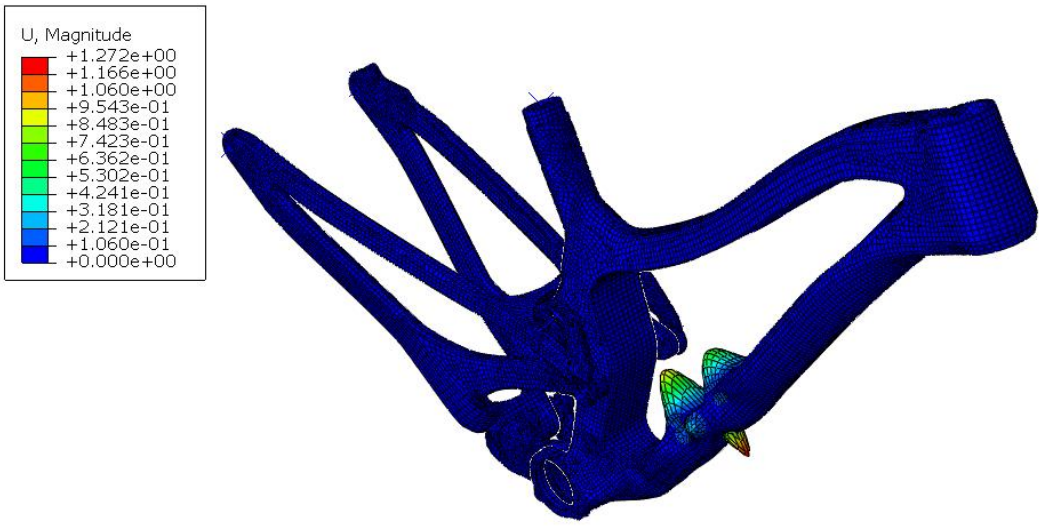
Početna sila F [N]	Vlastita vrijednost [-]	Kritična sila izvijanja F_{kr} [N]
12 000	2,53	30 360
12 000	-3,16	-37 920

Kako je vidljivo iz prikazan rezultata za ovaj slučaj opterećenja kritična sila izvijanja je znatno veća od postavljene sile. Za drugu formu izvijanja dobiven je negativan iznos sile što znači da je kritična sila izvijanja suprotna od navedene sile. Evidentno je kako se navedeno opterećenje ne može pojaviti u realnim uvjetima, ali je svejedno navedeno zbog prikaza forme izvijanja.

Oblik prve i druge forme izvijanja prikazan je na slikama 53 i 54.



Slika 53. Prikaz prve forme izvijanja za treći slučaj opterećenja



Slika 54. Prikaz druge forme izvijanja za treći slučaj opterećenja

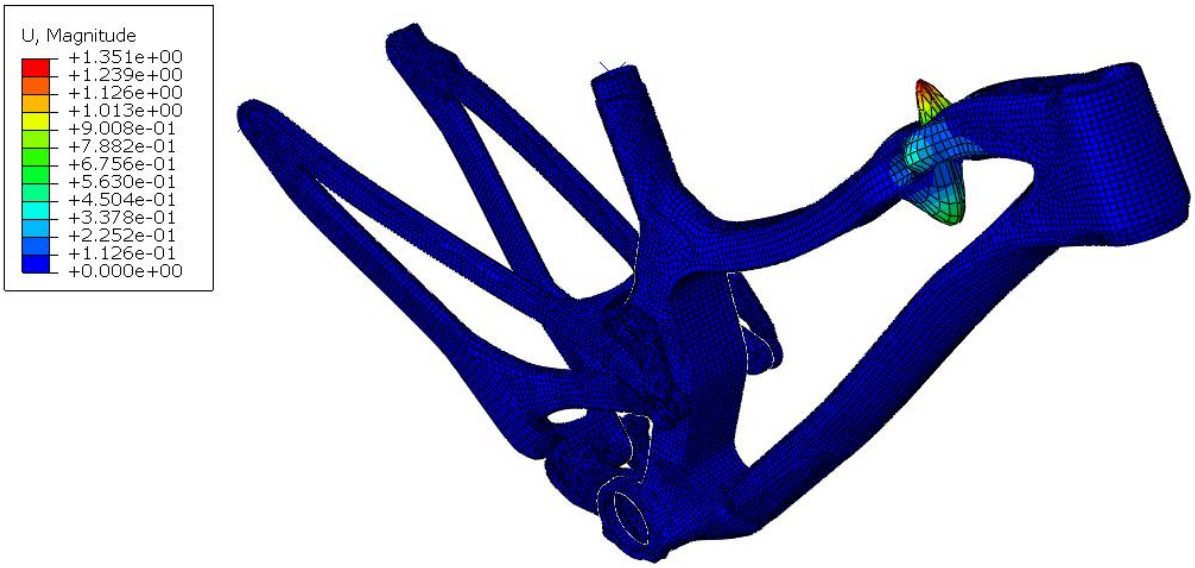
6.1.2. Drugi slučaj izvijanja

Prilikom analize izračunata su dva načina izvijanja te pripadajuće kritične sile izvijanja. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 8.

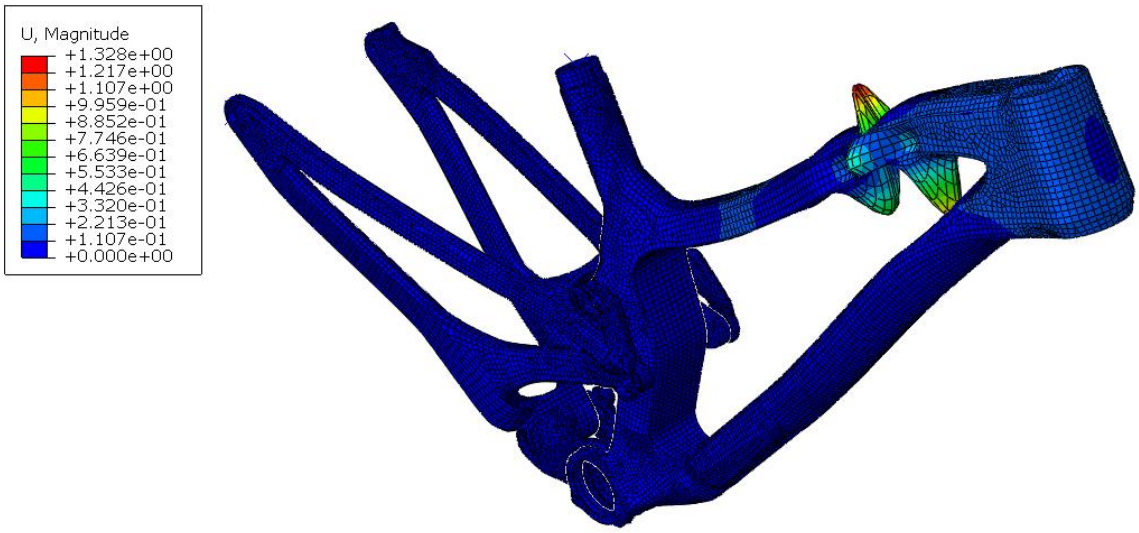
Tablica 8. Dobiveni rezultati za drugi slučaj opterećenja

Početna sila F [N]	Vlastita vrijednosti [-]	Kritična sila izvijanja F_{kr} [N]
4 000	7,51	30 040
4 000	7,64	30 560

Oblik prve i druge forme izvijanja prikazan je na slikama 55 i 56.



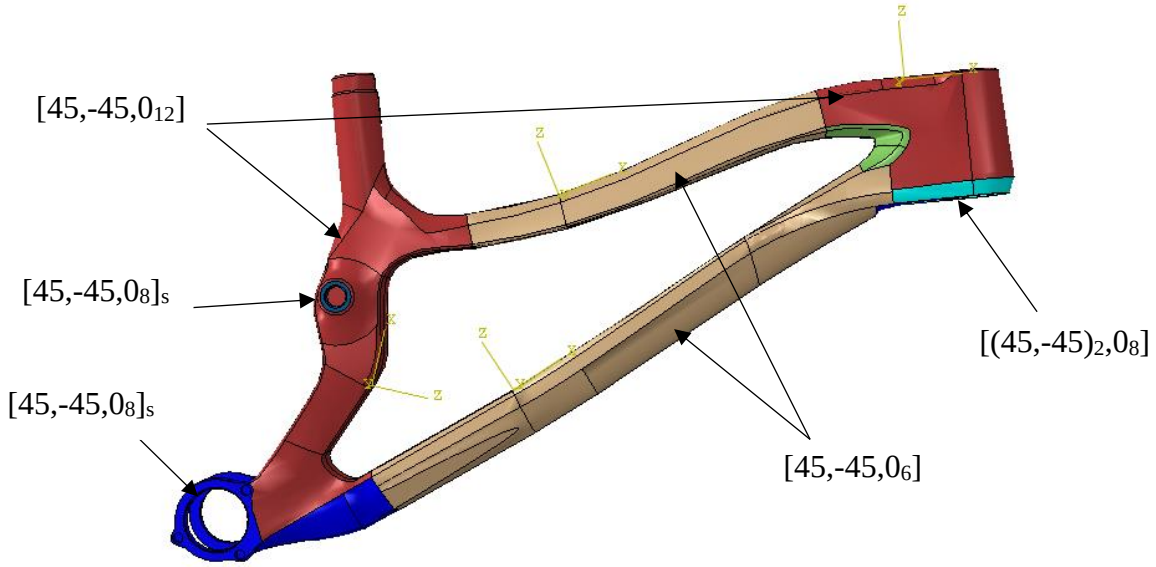
Slika 55. Prikaz prve forme izvijanja za četvrti slučaj opterećenja



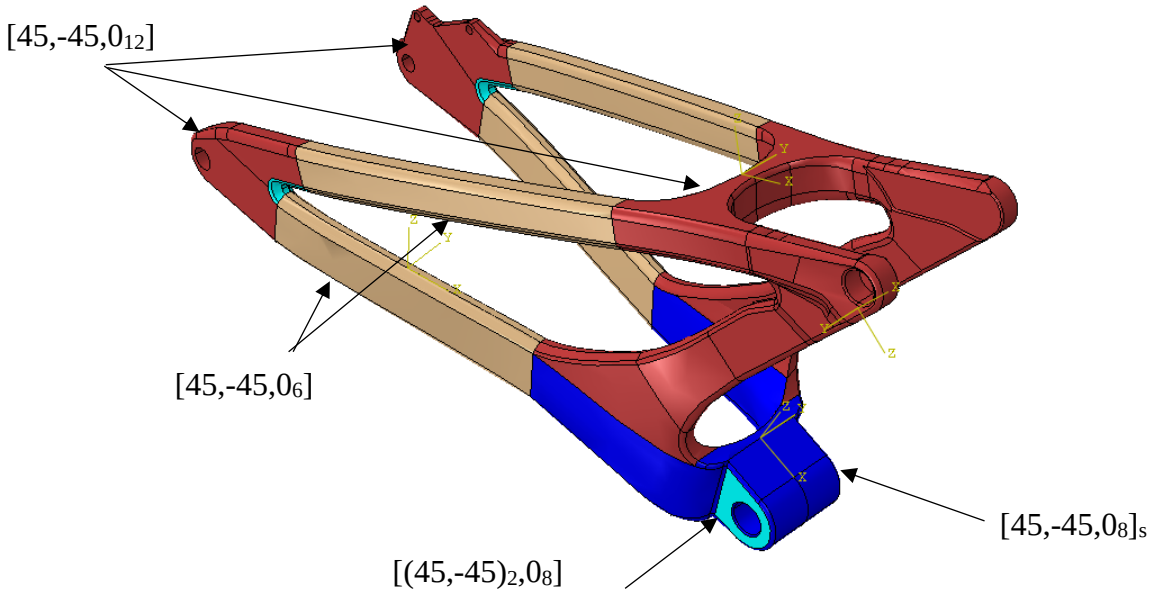
Slika 56. Prikaz druge forme izvijanja za četvrti slučaj opterećenja

7. Konačni rasporeda slojeva

U ranijem dijelu ovog rada veću su provedene određene varijacije rasporeda slojeva od početnog inicijalnog rasporeda za *Model 1*. Raspored slojeva nakon provedenih analiza za *Model 1* prikazan je na slikama 57. i 58.



Slika 57. Prikaz rasporeda slojeva za prednji dio rame *Modela 1*



Slika 58. Prikaz rasporeda slojeva za stražnji dio rame *Modela 1*

Ukupna masa kompozitnih dijelova iznosi 2,51 kg od čega je masa prednje rame 1,5 kg dok je masa zadnje rame 1,01 kg. U tablici 9 dana je usporedba dobivene mase bicikla sa sličnim modelima *downhill* bicikla koji se mogu pronaći na tržištu. Podaci za navedene mase dobiveni

su u suradnji s tvrtkom *HCI* i preglednom dostupnih materijala na internetskim stranicama proizvođača.

Tablica 9. Usporedba masa rami bicikla

	Ukupna masa rame bicikla [kg]
Model 1	2,51
Antidote Dark Matter	2,9
Mondraker Summum Carbon	2,8
Trek sesion C29	3,29
Giant Glory MTB (aluminij)	4,6

Kako je prikazano u tablici 9, dobivena masa *Modela 1* manja od većine masa ostalih proizvođača bicikla. U ovom radu nije prikazana detaljna analiza smanjenja mase jer se koristi samo jedan materijal te jedini parametar koji utječe na smanjenje je broj slojeva za koji je prilikom analize kako se na njega ne može značajno utjecati.

8. Zaključak

U ovom radu dan je numerički izračun čvrstoće kompozitne rame bicikla proizvođača *HardCore Industry*. Opisani su kompozitni materijali, karakteristike, način izrade te osnovni izrazi iz mehanika kompozitnih materijala. Kako bi se odredila potrebna čvrstoća bicikla, potrebno je odrediti kojim je opterećenjima bicikl podvrgnut prilikom vožnje. Analizirane su norme u kojima su opisana opterećenja koje rama bicikla mora izdržati. Kompozitni materijali nisu izotropni te se za njihov proračun čvrstoće uzimaju posebne teorije popuštanja. Kriterij popuštanja koji su korišteni u ovom radu su kriteriji maksimalnih naprezanja te Tsai-Wu i Tsai-Hill kriterij. Numerička analiza provedena je u programskom paketu *Abaqus*. Zbog složen geometrije bicikla bilo je potrebno pojednostaviti geometriju modela. U rezultatima numeričke analize pokazalo se kako se najveća naprezanja pojavljuju na mjestima naglih promjena oblika konstrukcije (mjesta spajanja cjevastih dijelova bicikla tzv. ruke i tijela bicikla). Kao najkritičniji sloj konstrukcije pokazao se prvi sloj koji je postavljen pod 45°, a najveće vrijednosti kriterija popuštanja dobiva se za Tsai-Wu kriterij. Pokazano je kako opterećenja definirana normama ne predstavljaju visoke zahtjeve za čvrstoću konstrukcije te se najveći zahtjevi postavljaju prilikom vožnje bicikla.

Nažalost model kompozitne rame je još u razvojnoj fazi te nije bilo mogućnosti testiranja modela. Za daljnju analizu čvrstoće rame kompozitnog bicikla bilo bi potrebno izraditi testni model te usporediti dobivene rezultate s numeričkima. Numerički proračun čvrstoće kompozitne rame bicikla je zahtijevan i dugotrajan proračun te su u ovom radu prikazani samo određeni dijelovi proračuna. Velike zahtjeve prilikom izrade numeričkog modela predstavlja složena geometrija bicikla te sama analiza zahtijeva određenu snagu i kapacitete računala što uzima određenu količinu vremena.

Raspored slojeva dobiven numeričkom analizom za *Model 1* zadovoljava sve kriterije koji su u ovom radu postavljeni. Kako bi se dobiveni raspored daljnje analizirao potrebno je izraditi prototipni model te analizirati njegovo ponašanje u stvarnim realnim uvjetima prilikom vožnje po zahtijevanim brdskim stazama.

9. Literatura

[1] https://www.rog-joma.hr/hr/bicikl/marlin-5-silver-20059/, pristup 8.5.2019.

[2] https://www.westbrookcycles.co.uk/scott-genius-700-plus-tuned-full-suspension-mountain-bike-2017-p314479, pristup 8.5.2019.

[3] *O nama*, http://hcibikes.com, pristup 10.4.2019.

[4] *Proizvodnja kompozitnih tvorevina centrifugalnim lijevanjem*. Vlahović, Marin, Diplomski rad , Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje 2010.

[5] *Mehanika kompozitnih materijala*, I. Smojver, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje 2007.

[6] *Utilization of Finite Element Analysis in Design and Performance Evaluation of CFRP Bicycle Frames,*Yong-Sung Lee, Ki-Hoon Shin, Hong-Seok Kim, 2012.

[7] *The influence of drop height on ground reaction forces in mountain biking*, Kevin C. Phillips, Matt A. Kilgas, Randall L. Jensen School of Health and Human Performance, Northern Michigan University, Marquette, Michigan, USA

[8] *Santa Cruz Bicycles - Test Lab*, Pinkbike, Mike Levy 2./2012

[9] *Osnove numeričkog proračuna kompozitnih konstrukcija*, D. Ivančević

[10] *Elementi strojeva*, Karl-Heinz Decker, Golden markenting- Tehnička knjiga. 2006.