

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

FSB RACING TEAM
PROJEKT FORMULA STUDENT - VULPESR

Zagreb, 2022.

Ovaj rad izrađen je pod mentorstvom prof. dr. sc. Darka Kozarca, dipl. ing. na Fakultetu strojarstva i brodogradnje te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2022.

Sadržaj:

Sadržaj:	I
Popis slika:	IV
Popis tablica:.....	VII
1. Uvod.....	1
1.1. Općenito o FSB Racing Teamu.....	1
1.2. Općenito o Formula Student natjecanjima	1
1.3. Bolid FSB-RT06R <i>VulpesR</i>	2
2. Glavni koncept bolida FSB-RT06R.....	4
2.1. Analiza bolida FSB-RT06E „ <i>Vulpes</i> “	4
2.2. Glavni koncept bolida FSB-RT06R <i>VulpesR</i>	6
3. Aeropaket	8
3.1. Općenito o aeropaketu	8
3.2. Teorijska podloga računalne dinamike fluida.....	8
3.3. Definiranje proračunskog prostora - domena	10
3.4. Razvoj komponenti aerodinamičkog paketa Formula Student bolida	13
3.5. Rezultati CFD simulacija <i>VulpesR</i> -a.....	26
3.6. Generalni pregled aero paketa bolida <i>VulpesR</i>	31
4. Šasija	33
4.1. Udarna zona	34
4.2. Ergonomija	39
4.3. Vozačko sjedalo.....	40
4.4. Sklop pedala.....	48
4.5. Vatrootporna stijenka	50
4.6. Mjerenje torzijske krutosti.....	52
5. Upravljački sustavi i dinamika vozila	57
5.1. Ciljevi	57

5.2.	Analiza opterećenja za ovjes.....	57
5.3.	Analiza ubrzanja i prijenosnog omjera.....	59
5.4.	Izbor i model pneumatika	61
5.5.	Analiza mehaničkog balansa vozila.....	65
5.6.	Analiza utjecaja aerodinamičkog paketa na performanse Formula Student bolida.....	70
5.7.	Model za generiranje reference klizanja i model <i>Traction Control</i> sustava	74
5.8.	Model sustava kontrole klizanja kotača (TCS).....	77
5.9.	Torque Vectoring.....	80
5.10.	Model baterije	81
6.	Unaprijeđenja ovjesa.....	89
6.1.	Prednji i stražnji ovjes	89
6.2.	Nosač kotača	91
7.	Pogonski sustav	96
7.1.	Odabir i proračun pogonskog vratila.....	96
7.2.	Reduktor.....	98
7.3.	Topološka optimizacija komponenata.....	101
7.4.	Električni motori.....	103
7.4.1.	Frekvencijski pretvarači.....	103
7.4.2.	Motori	105
8.	Sigurnosna unaprjeđenja baterijskog paketa.....	109
8.1.	Kućište baterijskog paketa.....	109
8.2.	Povećanje sigurnosti baterijskog paketa	109
8.2.1.	Keying.....	109
8.3.	Brtvljenje baterijskog paketa	110
8.4.	Poboljšano uzemljenje.....	110
8.5.	Osiguranje od odvrtnja i labavljenja konektora.....	111
8.6.	Kontaktori za izolaciju baterijskog paketa	112
8.7.	Promjene na <i>BMS Master</i>	114

8.8. Promjene na <i>BMS Slave</i>	118
8.9. Pločica za predpunjenje	119
9. Zaključak.....	121
10. Literatura.....	124
11. Sažetak.....	126
12. Abstract.....	127
13. Popis autora rada	128
14. Zahvale	129

Popis slika:

<i>Slika 1. Bolid FSB-RT06R "VulpesR"</i>	3
<i>Slika 2. Raspodjela komponenata električnog pogona u bolidu Vulpes</i>	5
<i>Slika 3. Prikaz članova Navier-Stokesove jednadžbe</i>	9
<i>Slika 4. Prikaz geometrijske mreže modela</i>	10
<i>Slika 5. Prikaz proračunskog prostora - domene za simulaciju čitavog bolida</i>	11
<i>Slika 6. Prikaz ploha na kojima se primjenjuju rubni uvjeti i njihov naziv</i>	11
<i>Slika 7. Prikaz različitih proračunskih prostora za različitu vrstu simulacija</i>	13
<i>Slika 8. Prikaz poboljšanje geometrijske mreže uz samu površinu aero elementa</i>	13
<i>Slika 9. Prikaz aerodinamičke učinkovitosti različitih položaja različitih aeroprofila</i>	15
<i>Slika 10. Prikaz prednjeg krila sa svim konstrukcijskim elementima</i>	16
<i>Slika 11. Prikaz konstrukcijski razrađenog stražnjeg krila sa svim elementima</i>	19
<i>Slika 12. Prikaz mehanizma DRS sustava.....</i>	20
<i>Slika 13. Prikaz zatvorene konfiguracije stražnjeg krila (lijevo) i aktiviranog DRS sustava (desno).....</i>	20
<i>Slika 14. Prikaz prvih iteracija smještaja hladnjaka C1 i C2</i>	21
<i>Slika 15. Prikaz presjeka podnice i difuzora sa smještenim hladnjakom</i>	22
<i>Slika 16. Prikaz nekoliko različitih iteracija položaja hladnjaka u difuzoru</i>	23
<i>Slika 17. Strujanje kroz kanal difuzora bez (lijevo) i sa implementiranim guiding vane-om (desno).....</i>	23
<i>Slika 18. Usporedba prošlogodišnjeg dizajna (lijevo) i implementiranog novog rješenja bočnog krila (desno) na bolidu</i>	24
<i>Slika 19. Prikaz razlike u brzinama nastrujavanja kada se horn implementira (donja slika)</i>	25
<i>Slika 20. Prikaz polja brzina po plohi presjeka i polja tlaka po prednjem krilu</i>	27
<i>Slika 21. Prikaz polja tlaka po središnjem presjeku bolida</i>	28
<i>Slika 22. Prikaz strujanja zraka preko elemenata stražnjeg krila.....</i>	28
<i>Slika 23. Prikaz strujanja zraka kroz podnicu i kanal u difuzoru</i>	29
<i>Slika 24. Prikaz čitavog aero paketa bolida VulpesR</i>	31
<i>Slika 25. Prikaz šasije</i>	33
<i>Slika 26. Plan dizajna i izrade</i>	34
<i>Slika 27. Udarne zona bolida VulpesR</i>	34
<i>Slika 28. Aluminijsko saće</i>	35
<i>Slika 29. Postava za testiranje udarne zone</i>	35
<i>Slika 30. Polimer ojačan isprepletenim ugljičnim i aramidnim vlaknima</i>	36
<i>Slika 31. Konstruiranje isprepletenih ugljičnih i aramidnih vlakana u programu TexGen</i>	36
<i>Slika 32. Računalna simulacija udarne zone</i>	37
<i>Slika 33. Prikaz testiranja udarne zone te postavljanje visine utega</i>	37
<i>Slika 34. Ploča udarne zone nakon testiranja prikazana bez vidljivih oštećenja</i>	38
<i>Slika 35. Prikaz rezultata s testiranja – graf ubrzanja.....</i>	38
<i>Slika 36. Prikaz rezultata s testiranja – upijena energija.....</i>	39
<i>Slika 37. Izrada otiska od poliuretanske pjene</i>	41
<i>Slika 38. Ekspandirana pjena u kokpitu</i>	42
<i>Slika 39. 3D skeniranje sjedala</i>	43
<i>Slika 40. Pojednostavljeni rezultat skeniranja</i>	43
<i>Slika 41. Model sjedala</i>	44
<i>Slika 42. Model kalupa sjedala</i>	44
<i>Slika 43. Glodanje kalupa sjedala</i>	45
<i>Slika 44. Površina kalupa nakon obrade</i>	46

<i>Slika 45. Priprema ugljičnih vlakana</i>	46
<i>Slika 46. Laminiranje sjedala</i>	47
<i>Slika 47. CAD model sjedala</i>	47
<i>Slika 48. Završeno sjedalo</i>	48
<i>Slika 49. Pedale Vulpesa u krajnjim položajima.....</i>	48
<i>Slika 50. Brzootpuštajući zatik korišten za pričvršćivanje pedala za vodilice</i>	49
<i>Slika 51. Sklop pedala bolida VulpesR – pedala kočnice (lijevo) i gasa (desno)</i>	50
<i>Slika 52. CAD model vatrootporne stijenke.....</i>	51
<i>Slika 53. Vatrootporna stijenka pozicionirana u CAD modelu šasije</i>	51
<i>Slika 54. Ispitni postav za mjerenje torzijske krutosti šasije.....</i>	53
<i>Slika 55. Referentne točke u CAD modelu</i>	53
<i>Slika 56. Raspodjela zakreta po presjecima duž šasije pri punom opterećenju</i>	54
<i>Slika 57. Trigonometrijski princip korišten pri određivanju kuta zakreta šasije</i>	55
<i>Slika 58. Konvergencija rezultata torzijske krutosti</i>	56
<i>Slika 59. Model bolida VulpesR u Adams Caru.....</i>	57
<i>Slika 60. Profil usporenja procedura kočenja do potpunog zaustavljanja.....</i>	58
<i>Slika 61. Komponente opterećenja na ležaj (bushing u programu) prednjeg donjeg prihvata vilice na šasiju.....</i>	58
<i>Slika 62. Analiza utjecaja prijenosnog omjera na vrijeme u disciplini Acceleration</i>	60
<i>Slika 63. Prikaz analitičke momentne krivulje i limita prijanjanja pneumatika</i>	61
<i>Slika 64. Konačne ocjene proizvoda s tržišta</i>	64
<i>Slika 65. Calspan pogon za testiranje guma.....</i>	64
<i>Slika 66. Pod/preupravljanje</i>	65
<i>Slika 67. Bočno ubrzanje pri dva pneumatika</i>	66
<i>Slika 68. Kut poniranja/podizanja vozila</i>	66
<i>Slika 69. Bočni kut klizanja dva modela pneumatika.....</i>	67
<i>Slika 70. Sklop stabilizatora u vozilu</i>	67
<i>Slika 71. Analiza različitih postavki stabilizatora u CRC proceduri</i>	69
<i>Slika 72. Usporedba utjecaja širine stražnjih pneumatika i postavke stabilizatora; početno (crveno)/ krajnje (plavo).....</i>	70
<i>Slika 73. Prikaz sučelja VSM-a</i>	71
<i>Slika 74. Staza Formula Student natjecanja u Nizozemskoj</i>	71
<i>Slika 75. Usporedba utjecaja aerodinamičkog paketa - bez (zeleno), sa (plavo)</i>	72
<i>Slika 76. Krak momenta aerodinamičke sile</i>	73
<i>Slika 77. Mapa utjecaja položaja CoP-a na bodove u dinamičkim disciplinama</i>	73
<i>Slika 78. Fizikalni model pneumatika – četkica [13]</i>	74
<i>Slika 79. Analiza maksimuma kuta klizanja pri različitim vertikalnim opterećenjima za definiranje optimuma klizanja</i>	75
<i>Slika 80. Usporedba rezultata estimacije i simulacije u AVL VSM-u</i>	76
<i>Slika 81. Traction Control System block.....</i>	77
<i>Slika 82. Pretvorba zahtjeva papučice gasa u zahtjev momenta</i>	78
<i>Slika 83. Jednostavan model dinamike vozila za definiranje stražnjeg bočnog klizanja....</i>	78
<i>Slika 84. Uvjeti aktivacije kontrolera i zaseban kontroler za svaki kotač</i>	78
<i>Slika 85. TCS regulirani moment – ubrzanje</i>	79
<i>Slika 86. Slip ratio i referenca – ubrzanje</i>	79
<i>Slika 87. TCS regulirani moment – dio simulacije discipline Autocross</i>	80
<i>Slika 88. Slip ratio i referenca te prekidač u trenutku aktivnosti TCSA-a – dio simulacije discipline Autocross</i>	80
<i>Slika 89. Torque vectoring kod bolida VulpesR.....</i>	81
<i>Slika 90. Ekvivalentni krug baterijske ćelije</i>	82

<i>Slika 91. Jedan RC krug</i>	82
<i>Slika 92. Dva RC kruga</i>	83
<i>Slika 93. Tri RC kruga</i>	83
<i>Slika 94. Primjer DCIR testa [literatura 15]</i>	84
<i>Slika 95. Stanja napunjenosti prilikom testiranja ćelija</i>	84
<i>Slika 96. Odzivi napona na svim temperaturama</i>	85
<i>Slika 97. Odzivi napona na svim temperaturama na jednom od stanja napunjenosti</i>	85
<i>Slika 98. Dio modela ekvivalentnog kruga baterije</i>	85
<i>Slika 99. Ovisnost napona otvorenog kruga (OCV) o stanju napunjenosti (SoC)</i>	86
<i>Slika 100. Ovisnost otpornika R_0 o stanju napunjenosti (SoC)</i>	86
<i>Slika 101. Usporedba simuliranog i mjerenog napona na 0°C</i>	87
<i>Slika 102. Usporedba simuliranog i mjerenog napona na 55°C</i>	87
<i>Slika 103. Mjereni napon u usporedbi sa simuliranim naponom</i>	88
<i>Slika 104. Prikaz prednjeg ovjesa VulpesR-a</i>	90
<i>Slika 105. Prikaz stražnjeg ovjesa VulpesR-a</i>	91
<i>Slika 106. Prikaz sklopa kotača na VulpesR-u</i>	92
<i>Slika 107. Nosač kotača proizveden tradicionalnom tehnologijom</i>	93
<i>Slika 108. Nosač kotača proizveden SLM tehnologijom</i>	94
<i>Slika 109. Nosač kotača VulpesR-a proizveden SLM tehnologijom</i>	95
<i>Slika 110. Obraden nosač kotača VulpesR-a</i>	95
<i>Slika 111. Relacija smanjenja mase i otpora presjeka šupljih pogonskih vratila</i>	97
<i>Slika 112. CAD model pogonskog vratila</i>	98
<i>Slika 113. Zupčanci u zahvatu</i>	99
<i>Slika 114. Sklop reduktora s motorima</i>	99
<i>Slika 115. Izlazno vratilo na Vulpes-u</i>	100
<i>Slika 116. Izlazno vratilo na VulpesR-u</i>	100
<i>Slika 117. Zupčanik Z2 prije provedbe topološke optimizacije (1959 g)</i>	101
<i>Slika 118. Zupčanik Z2 po provedenoj topološkoj optimizaciji (578,18 g)</i>	102
<i>Slika 119. Prikaz raspodjela opterećenja topološki optimiranog kućišta prijenosnika</i>	102
<i>Slika 120. PWM modulacija</i>	103
<i>Slika 121. Izmjenjivač MC-40</i>	104
<i>Slika 122. Sinkroni motor s trajnim magnetima</i>	106
<i>Slika 123. Pogonski motori spojeni na reduktor</i>	106
<i>Slika 124. Aluminijski priključci za cijevi</i>	107
<i>Slika 125. Kapa motora</i>	107
<i>Slika 126. Maksimalni zakretni moment i snaga</i>	108
<i>Slika 127. Kontinuirani zakretni moment i snaga</i>	108
<i>Slika 128: Prikaz pregrada na poklopcu modula</i>	109
<i>Slika 129: Prikaz ULTEM komponenti</i>	110
<i>Slika 130: Prikaz brtvljenja</i>	110
<i>Slika 131: Stari način osiguranja od labavljenja</i>	111
<i>Slika 132: Novi način osiguranja od labavljenja</i>	111
<i>Slika 133: Shematski prikaz kontaktora</i>	112
<i>Slika 134: Gigavac GX12SBB kontaktori u bateriji FSB-RT06R</i>	113
<i>Slika 135: Gigavac GX12BBB kontaktori u bateriji FSB-RT06</i>	114
<i>Slika 136: Krug za detekciju podnapona koji je dodan na BMS Master</i>	115
<i>Slika 137: Krug za nadzor kontaktora</i>	115
<i>Slika 138: Interlock krug</i>	116
<i>Slika 139: BMS Master prije preinaka</i>	117
<i>Slika 140: BMS Master nakon preinaka</i>	117

<i>Slika 141: 3D prikaz BMS Mastera nakon preinaka.....</i>	118
<i>Slika 142: Dodatni naponski regulator za temperaturne senzore</i>	119
<i>Slika 143: Shematski prikaz precharge PCB-a</i>	119
<i>Slika 144: 3D prikaz Precharge PCB-a</i>	120
<i>Slika 145. VulpesR na Formula 1 stazi Hungaroring, u sklopu natjecanja FS Easter....</i>	121
<i>Slika 146. VulpesR u vožnji na natjecanju FS Alpe Adria</i>	122
<i>Slika 147. Proslava 2. mjesta u disciplini Cost and Manufacturing Event (lijevo) i Skidpad (desno) na natjecanju FS Alpe Adria 2021.</i>	123

Popis tablica:

<i>Tablica 1. Prikaz izmjena dijelova i sklopova na kojima se dogodila promjena materijala ili tehnologije proizvodnje. Bojom su označene izmjene koje su tijekom projekta odbačene....</i>	7
<i>Tablica 2. Prikaz vrijednosti različitih iteracija implementacije horn flapa</i>	26
<i>Tablica 3. Numeričke vrijednosti sila za različite iteracije prednjeg krila</i>	26
<i>Tablica 4. Prikaz numeričkih vrijednosti iznosa sila za prednje krilo i bolid</i>	27
<i>Tablica 5. Prikaz numeričkih vrijednosti simulacije podnice i difuzora.....</i>	29
<i>Tablica 6. Prikaz numeričkih vrijednosti za sve komponente aeropaketa</i>	30
<i>Tablica 7. Prikaz analize utjecaja visine bolida na performanse komponenti aero paketa</i>	31
<i>Tablica 8. Usporedba rezultata testiranja kompozitne i čelične ploče udarne zone</i>	39
<i>Tablica 9. Plan mjerenja pri torzijskom opterećenju šasije.....</i>	52
<i>Tablica 10. Pomaci prednjih glavčina</i>	55
<i>Tablica 11. Opterećenja pri raznim procedurama</i>	59
<i>Tablica 12. Proračunata maksimalna sila trenja</i>	60
<i>Tablica 13. Ocjene karakteristike pneumatika</i>	62
<i>Tablica 14. Težinski faktori pri odabiru gume</i>	63
<i>Tablica 15. Kombinacije krutosti pri analizi mehaničkog balansa</i>	68
<i>Tablica 16. Vrijeme kruga ovisno o konfiguraciji stabilizatora i pneumatika</i>	70
<i>Tablica 17. Rezultati simulacije vremena kruga</i>	72
<i>Tablica 18. Dobiveni rezultati vremena na simuliranoj testnoj stazi pri ubrzanju 0 – 100 km/h</i>	80
<i>Tablica 19. Spektar opterećenja</i>	97
<i>Tablica 20. Usporedba prijenosnika bolida Vulpes i VulpesR.....</i>	102
<i>Tablica 21. Osnovni podaci izmjenjivača</i>	104
<i>Tablica 22. Podaci za žicu Lapp Kabel - ÖLFLEX® FD 90 CY 35mm².....</i>	105
<i>Tablica 23. Podaci za žicu Lapp Kabel - ÖLFLEX® FD 90 CY 10mm².....</i>	105
<i>Tablica 24. Osnovni podaci motora TM-40</i>	108

1. Uvod

1.1. Općenito o FSB Racing Teamu

Pod okriljem neprofitne udruge HSA-SF (*Hrvatska studentska asocijacija strojarских fakulteta*), krajem 2003. godine osnovan je projekt FSB Racing Team. Cilj ove zajednice entuzijastičnih studenata je, između ostalih, dokazati da je u Hrvatskoj moguće izraditi trkaći bolid za međunarodna Formula Student natjecanja i konkurirati najboljim timovima u Europi i širem svijetu. U proteklih devetnaest godina je tim porastao od svega nekoliko članova s Fakulteta strojarstva i brodogradnje do njih osamdesetak, pokrivajući većinu sastavnica Sveučilišta u Zagrebu, te je u sklopu projekta izrađeno sedam bolida s motorom s unutrašnjim izgaranjem te prvi FS bolid s električnom pogonom u široj regiji.

U ciljeve tima spada primjena znanja stečenog studijem, usavršavanje individualnih inženjerskih sposobnosti, stjecanje relevantnog radnog iskustva, te promoviranje Republike Hrvatske i kvalitete njenog visokog obrazovanja. Članovi imaju priliku samostalno koncipirati, razvijati i izrađivati vozila koja na natjecanjima voze pravim F1 stazama poput Hungaroring-a i Hockenheimring-a, te pisati završne i diplomske radove bazirane na svojem radu. Velik interdisciplinarni projekt poput FSB Racing Teama potiče kreativnost i usavršava sposobnosti studenata u širokom spektru profesija, te svake godine oblikuje nove i sposobne mlade inženjere spremne za izazove koji ih očekuju u industriji.

Tim je raspodijeljen u podtimove zadužene za aerodinamiku, šasiju, ovjes, mehanički pogon, električni pogon, električni motor, hlađenje, dinamiku vozila, upravljačke sustave, proizvodnju, marketing, dizajn, i IKT sustave. Svakim podtimom upravlja jedan voditelj, dok projektom u cjelini upravljaju organizacijski voditelj i tehnički voditelji električnog i autonomnog bolida.

1.2. Općenito o Formula Student natjecanjima

Formula Student natjecanja su inženjerska natjecanja u kojima timovi koncipiraju, konstruiraju i izrađuju bolide jednosjede prema strogom Formula Student pravilniku. Natjecanja su podijeljena u tri klase: CV za bolide s motorom s unutarnjim izgaranjem, EV za bolide s električnim pogonom, i DV za autonomne bolide, te su dodatno podijeljeni na statičke i dinamičke discipline.

FS natjecanja imaju sljedeće statičke discipline:

- **Engineering Design** – Bolid se prezentira sucima, koji ga ocjenjuju prema inovativnosti, primjeni naprednih tehnologija i znanja, te kvaliteti izvedbe.

- **Business Plan Presentation** – Tim, kao fiktivno poduzeće, sucima, kao fiktivnim investitorima, predstavlja detaljan financijski plan te pokušava ishoditi investiciju.
- **Cost and Manufacturing** – Tim predstavlja detaljan raspis svih dijelova i proizvodnih procesa korištenih u proizvodnji bolida. Potom suci ocjenjuju kvalitetu odabranih komponenti, trošak izrade, te jednostavnost izvedbe i održavanja bolida.

Dinamičke discipline su:

- **Acceleration** – Bolid iz stacionarnog stanja mora prevaliti 75 metara po ravnoj stazi.
- **Skidpad** – Bolid vozi stazom oblika „osmice“, demonstrirajući upravljivost.
- **Autocross** – Bolid vozi kompleksnom stazom koja se sastoji od serpentina, niza zavoja, uzbrdica, i drugih kompleksnih elemenata.
- **Endurance** – Krunska disciplina *FS* natjecanja zahtijeva uspješan prelazak distance od 22 km s izmjenom vozača na pola puta. Predstavlja ultimativan izazov pouzdanosti i performansi bolida, te shodno tome donosi daleko najveći broj bodova.
- **Efficiency** – Prema potrošnji električne energije, odnosno goriva na *Endurance* disciplini, postižu se dodatni bodovi proporcionalno učinkovitosti bolida.

Preduvjet za sudjelovanje u dinamičkim disciplinama je opsežan tehnički pregled (engl. *scrutineering*). Natjecanja se također dijele na *službena*, koja utječu na rang tima na svjetskoj ljestvici, te *neslužbena*, koja služe usavršavanju tima i stjecanju iskustva te poboljšanju bolida na temelju kritike sudaca.

1.3. Bolid FSB-RT06R *VulpesR*

VulpesR deveti je bolid FSB Racing Teama te drugi električni Formula Student bolid u timu i Hrvatskoj. Evolucija je bolida FSB-RT06E *Vulpes*, prvog hrvatskog električnog Formula Student bolida, čiju osnovu čini prva hrvatska *monocoque* šasija proizvedena od kompozita ojačanog ugljičnim vlaknima (eng. CFRP). Na ime *Vulpes* dodana je oznaka *R*, što znači „Redizajn“. Za bolid je odabran startni broj 54, u čast prostorije „S4“ na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u kojoj članovi FSB Racing Teama provode vrijeme radeći na projektu.



Slika 1. Bolid FSB-RT06R "VulpesR"

Tema ovog rada, bolid FSB-RT06R „VulpesR“, predstavlja evoluciju prvog električnog bolida tima, FSB-RT06E „Vulpes“. S obzirom na to da je originalni „Vulpes“ predstavljao velik iskorak, odabran je razvoj usavršene verzije bolida koja je zadržala šasiju i time oblik, ali su praktički svi ostali sustavi bolida redizajnirani te su im performanse i pouzdanost značajno poboljšane.

2. Glavni koncept bolida FSB-RT06R

Svaki projekt, pa tako i projekti Formula Student bolida, počinju analizom polaznog stanja i postavljanjem ciljeva koji se žele postići projektom. Za potpuno razumijevanje glavnih ciljeva razvoja bolida *VulpesR*, potrebno je razumjeti polazno stanje, a to je bolid *Vulpes*.

2.1. Analiza bolida FSB-RT06E „*Vulpes*“

Vulpes predstavlja veliku promjenu u odnosu na ranije bolide, koji su redom bili pogonjeni motorima s unutarnjim izgaranjem i temeljili se na čeličnim cijevnim šasijama. Razlog za prijelaz u kategoriju električnih bolida (EV) i razvoj kompozitne *monocoque* šasije, bila je težnja za stjecanjem novih znanja. Dodatan je razlog bio financijske naravi – globalni pomaci u automobilskoj industriji sve se više odvijaju u smjeru električnih vozila, stoga je veća mogućnost ostvarivanja sponzorstava ukoliko Tim počne razvijati električne bolide.

Postavljen je glavni cilj projekta: razvoj trkaćeg bolida kojim će se istražiti temeljna znanja na kojima će sljedeći projekti i bolidi graditi napredak.

S obzirom na to da se u istom projektu dogodio prijelaz na električni pogon i na kompozitnu *monocoque* šasiju, bitna nit vodilja bila je jednostavnost razvoja i proizvodnje, kako bi se projekt ostvario u zadanim vremenskim i financijskim okvirima.

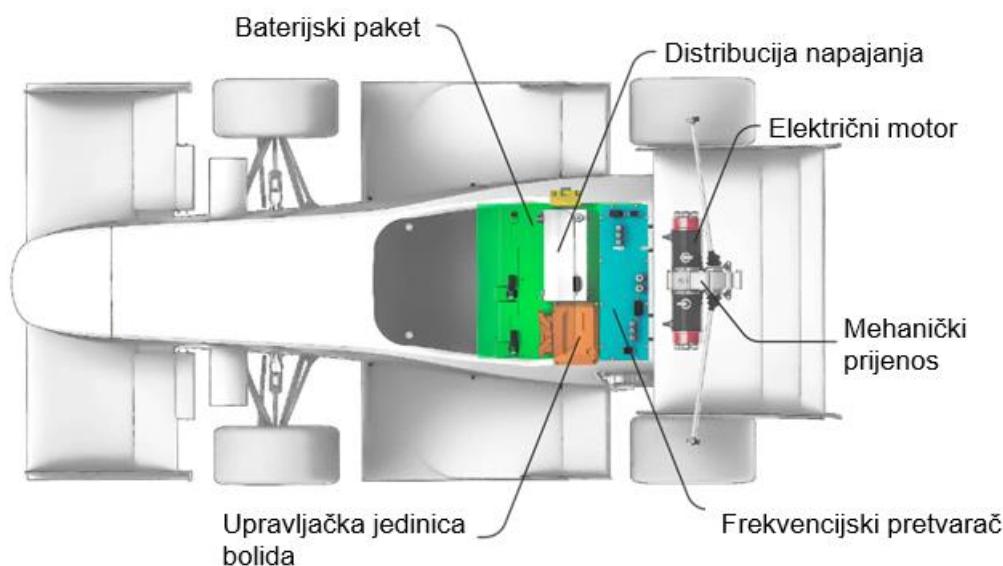
Ostali tehnički ciljevi, poredani po važnosti, su:

- niska masa
- nisko težište
- nizak moment tromosti oko vertikalne osi
- ujednačena uzdužna raspodjela mase.

Opisano je nekoliko koncepata električnog pogona i raspodjele komponenata pogona.

Odabran je koncept pogona na stražnje kotače, pri čemu svaki stražnji kotač pogoni po jedan električni motor sa zasebnim zupčaničkim prijenosnikom. Time je dokinuta potreba za upotrebom diferencijala i otvorena mogućnost različitog upravljanja kotačima kako bi se poboljšale vozne karakteristike bolida.

Prema odabranom konceptu pogona, između nekoliko koncepata, odabran je i koncept raspodjele velikih komponenata u bolidu, vidljiv ispod u Slika 2.



Slika 2. Raspodjela komponenata električnog pogona u bolidu Vulpes

Kako bi se ostvarilo nisko težište, dvije najteže „komponente“ bolida, vozač i baterijski paket, smješteni su na pod šasije, pri čemu je baterijski paket iza i ispod vozačevih leđa. Kako bi visokonaponski kabeli bili što kraći, frekvencijski pretvarači smješteni su iznad baterijskog paketa, a iza baterijskog paketa nalaze se dva električna motora spojena na dva zasebna zupčanička prijenosnika, koji su smješteni u zajedničko kućište.

Šasija *Vulpesa* razvijana je s težnjom za jednostavnošću proizvodnje i lakog pristupa komponentama električnog pogona za popravke. Stoga su površine šasije na koje se prihvaća ovjes ravne, a baterijski paket montira se u bolid i uklanja iz bolida odozdo, bez potrebe za uklanjanjem drugih većih komponenata. Šasija je razvijana s naglaskom na robusnost i krutost kako bi zadovoljila stroge zahtjeve *Formula Student* pravilnika za sigurnost te izdržala sva opterećenja kojima je podvrgnuta tijekom vožnje.

Za takvu šasiju, razvijen je ovjes s dvostrukim ramenima aktuiran potiskivanjem amortizera. Lijeve i desne kotače obje osovine povezuju torzijske opruge u obliku čeličnih cijevi, s mogućnošću podešavanja krutosti u ovisnosti o vertikalnom pomaku kotača. Takvim konceptom ovjesa je omogućen širok raspon postavki ovjesa kojima se može postići željeno ponašanje bolida pri vožnji.

Za bolid je razvijen aerodinamički paket koji se sastoji od prednjeg, stražnjeg i bočnih krila, kao i podnice. Bočna krila djelomično su oblikovana za učinkovito generiranje potisne aerodinamičke sile uz minimalno generiranje sile otpora zraka, a djelomično za usmjeravanje

zraka u hladnjake, jedan na lijevom bočnom krilu, a drugi na desnom, kako bi električni motori i frekvencijski pretvarači mogli neometano raditi.

Vulpes se natjecao 2019. godine na *Formula Student* natjecanjima. Robusno razvijena kompozitna *monocoque* šasija bez problema je izdržala sva opterećenja i uvjete rada, no problemi s pouzdanošću električnog sustava često su doveli do isključivanja bolida tijekom vožnji iz različitih razloga. Razvoj potpuno novog električnog bolida uveo bi mnoge promjene i nepoznanice u sustav kojim Tim nije u potpunosti ovladao. Stoga je umjesto razvoja potpuno novog električnog bolida odlučeno usredotočiti se na rješavanje problema postojećeg električnog sustava – unaprijediti *Vulpes* uz smanjenu potrošnju vremena i novca te osigurati dovoljno dug period testiranja na stazi za poboljšanje njegove pouzdanosti.

2.2. Glavni koncept bolida FSB-RT06R *VulpesR*

Odluka da se unaprjeđuje postojeći bolid umjesto razvoja potpuno novog, dovela je do toga da se neki dijelovi bolida preuzimaju od *Vulpesa*. Najveći od njih su:

- kompozitna *monocoque* šasija,
- kompozitni „nos“ bolida,
- baterijski segmenti (ali ne cijeli baterijski paket),
- frekvencijski pretvarači,
- električni motori
- amortizeri.

Preuzimanjem šasije *Vulpesa*, nužno je preuzet i glavni koncept bolida, stoga se fokus projekta usmjerio na sljedeće ciljeve:

- postizanje pouzdanosti pogona bolida i ostalih njegovih dijelova,
- smanjenje mase primjenom naprednih materijala i tehnologija proizvodnje,

kako bi se maksimalno iskoristio potencijal performansi ovog koncepta bolida te steklo znanje i iskustvo u tim novim područjima.

Pojedinačne promjene na dijelovima bolida previše su brojne da se navedu na jednom mjestu. Velika većina dijelova bolida koji nisu preuzeti s *Vulpesa* u potpunosti rekonstruirana i nanovo proizvedena. Dojam o obujmu izmjena može dati prikaz dijelova i sklopova na kojima se dogodila promjena koncepta, materijala ili tehnologije proizvodnje (Tablica 1.).

Detaljnije informacije o izmjenama i o tome kako su postignuti navedeni ciljevi, dostupne su u poglavljima koja slijede.

Tablica 1. Prikaz izmjena dijelova i sklopova na kojima se dogodila promjena materijala ili tehnologije proizvodnje. Bojom su označene izmjene koje su tijekom projekta odbačene

Izmijenjeni elementi	Vrsta izmjene	<i>Vulpes</i>	<i>VulpesR</i>
Mehanički prijenos - sklop	Koncept	Vlastiti razvoj, dvostupanjski prijenosnik s ravnim zubima	Vlastiti razvoj, jednostupanjski prijenosnik s ravnim zubima
Mehanički prijenos - pogonska vratila	Materijal	Čelik	Polimer ojačan ugljičnim vlaknima (CFRP)
Ovjes - sklop prednjeg ovjesa	Koncept	Zavisan ovjes aktuiran klackalicama, sa stabilizatorom	Nezavisan ovjes izravno aktuiran, bez stabilizatora
Ovjes - nosači kotača	Materijal i tehnologija proizvodnje	Aluminijska legura / 3-osno i 5-osno glodanje	Titanska legura / Selektivno lasersko topljenje
Ovjes - prednja poprečna ramena ovjesa	Materijal i tehnologija proizvodnje	Čelične cijevi	Cijevi od polimera ojačanog ugljičnim vlaknima (CFRP) / lijepljena s aluminijskim kućištima sfernih ležajeva
Ovjes - stražnja poprečna ramena ovjesa	Materijal i tehnologija proizvodnje	Čelične cijevi	Titanska legura / zavarena kućišta sfernih ležajeva
Upravljanje - letva upravljanja	Materijal	Čelik	Aluminijska legura
Kočnice - diskovi	Materijal	Čelik	Al-SiC kompozit s metalnom matricom
Naplatci	Materijal	Aluminijska legura	Polimer ojačan ugljičnim vlaknima (CFRP)
Sustav hlađenja	Koncept	2 potpuno odvojena sustava hlađenja, 2 bočno smještena hladnjaka	1 sustav hlađenja, 1 hladnjak smješten u difuzoru
Šasija - vozačevo sjedalo	Koncept	Vozač naslonjen na vatrootpornu stijenku (firewall), bez jedinstvenog sjedala	Ergonomski oblikovano sjedalo / sendvič kompozit s polimerom ojačanim ugljičnim vlaknima (CFRP)
Šasija - ploča udarne zone	Materijal	Čelik	Polimer ojačan aramidnim i ugljičnim vlaknima

3. Aeropaket

3.1. Općenito o aeropaketu

Aerodinamika je znanost koja se bavi proučavanjem djelovanja zraka na tijela koja se kroz njega gibaju te silama koje pritom nastaju. Područje je fizike koje je usko vezano uz mehaniku fluida i dinamiku plinova. Neke od osnovnih veličina koje se pojavljuju prilikom aerodinamičke analize jesu brzina, tlak, gustoća i temperatura koje se mijenjaju u prostoru i vremenu. Aerodinamička analiza može se podijeliti u dvije osnovne skupine, a to su teorijska i eksperimentalna. Teorijska aerodinamika zasniva se na zakonima mehanike čvrstih tijela, mehanike fluida kao i dinamike plinova te analitičkom rješavanju problema koji se mogu opisati zakonima opisanih područja. Eksperimentalna se aerodinamika zasniva na raznim ispitivanjima u aerodinamičkim tunelima ili drugim postavima kao i provedenim računalnim simulacijama, gdje se eksperimentalno provjeravaju i ispituju veličine sila koje djeluju na model. Ovisno o samom području ispitivanja, u eksperimentalnim se metodama često koristi teorija sličnosti kako bi se modeli mogli skalirati, a rezultati bili i dalje iskoristivi za daljnju analizu.

Druga gruba podjela aerodinamike je ovisna o brzini strujanja zraka odnosno brzini kojom se neko tijelo giba kroz zrak. Tako se ona dijeli na podzvučnu aerodinamiku (gdje je zbog manjih brzina strujanja zraka utjecaj kompresibilnosti samog fluida zanemariv) te na nadzvučnu aerodinamiku kod koje efekt kompresibilnosti fluida dolazi do značajnog izražaja.

Treća podjela zasniva se na utjecaju viskoznosti fluida. Kod većine promatranih problema aerodinamike utjecaj viskoznosti zraka može se zanemariti, međutim u pojedinim aerodinamičkim problemima (poput strujanja u graničnom sloju oko tijela) dominantan je utjecaj viskoznih svojstava zraka te se takva strujanja nazivaju viskoznim strujanjima, za razliku od neviskoznih strujanja kod kojih je utjecaj viskoznosti zraka zanemariv.

3.2. Teorijska podloga računalne dinamike fluida

Navier-Stokesove jednadžbe, nazvane po fizičarima Claude-Louis Navieru i George Gabriel Stokesu, opisuje gibanje viskoznih fluida, a zasniva se na pretpostavci da je fluid, na određenom promatranom volumenu, kontinuum umjesto skupina diskretnih čestica. Izvodi se primjenom jednadžbe kontinuiteta odnosno primjenom zakona o očuvanju mase, količine gibanja i energije. Navier-Stokesove jednadžbe služe kao osnovna polazna točka rješavanja problema u mehanici odnosno dinamici fluida uz dodatak termodinamičkih zakona i jednadžbe kontinuiteta. Iako izrazito široko primjenjive, za Navier-Stokesove formule ni dan danas nije dokazano da rješenja u tri dimenzije uvijek postoje ili da ako postoje, da ne sadrže

beskonačnosti, singularitete ili prekide. Analitička rješenja spomenutih jednažbi poznato je samo za jednostavnije slučajeve i to uz zanemarivanje određenih članova samih jednažbi. Stoga za rješavanje gore spomenutih jednažbi veliku ulogu imaju numeričke metode koje su postale glavni alat za rješavanje problema u aerodinamici. Slika 3 prikazuje raspisan oblik Navier-Stokesove jednažbe kada na fluid djeluju vanjske sile (f).

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \nu \nabla^2 \mathbf{u} = -\nabla p + \mathbf{f}$$

Vremenska derivacija polja brzine Difuzijski član

Konvekcijski član Gradijent tlaka Sila po jedinici mase

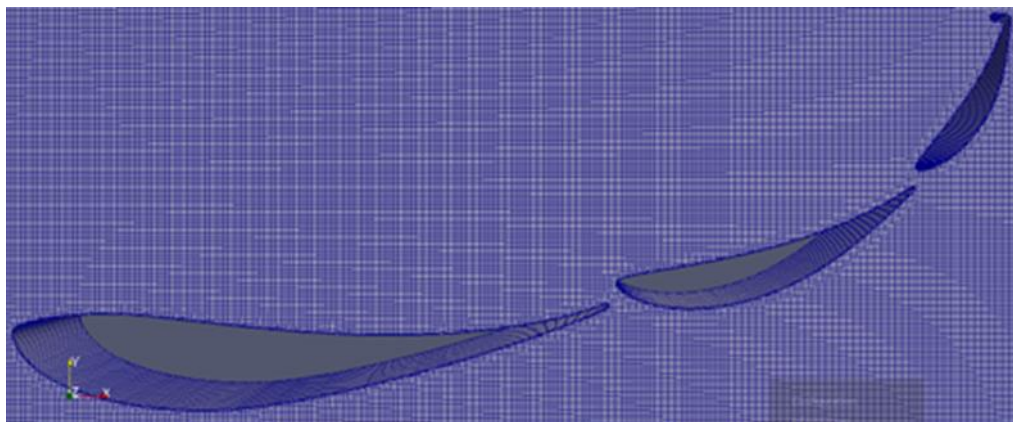
Slika 3. Prikaz članova Navier-Stokesove jednažbe

Razvojem računala stvorili su se uvjeti za numeričko modeliranje i rješavanje matematičkih problema koji opisuju strujanje fluida što je temelj za razvoj računalne dinamike fluida. (*engl.* computational fluid dynamics, dalje: CFD)

CFD se temelji na gore spomenutim teoretskim principima te uzima sve veći mah i omogućava modeliranje sve kompleksnijih modela i reprezentativniju vizualizaciju. Svaka računalna simulacija u dinamici fluida započinje definicijom problema i odabirom odgovarajućeg matematičkog modela u vidu sustava parcijalnih diferencijalnih jednažbi koji ima neko opće rješenje, a posebno rješenje tog sustava definira se rubnim uvjetima za odabrani problem. Korišteni računalni alati za rješavanje problema u našem području posjeduju već ugrađene odnosno predefinirane modele te mi kao korisnici pomoću sučelja odabiremo podvarijantu modela i definiramo rubne uvjete. Drugi korak računalne simulacije je riješiti postavljeni numerički problem, što se odvija u tri koraka:

- Diskretizira se prostor proračuna, što rezultira geometrijskom mrežom.
- Na definiranoj geometrijskoj mreži se diskretiziraju parcijalne diferencijalne jednažbe matematičkog modela uvažavajući specifične rubne uvjete, što rezultira sustavom algebarskih jednažbi.
- Nelinearni se sustav jednažbi zatim rješava iterativnim postupkom koji u sebi sadrži rješavanje sustava linearnih algebarskih jednažbi.

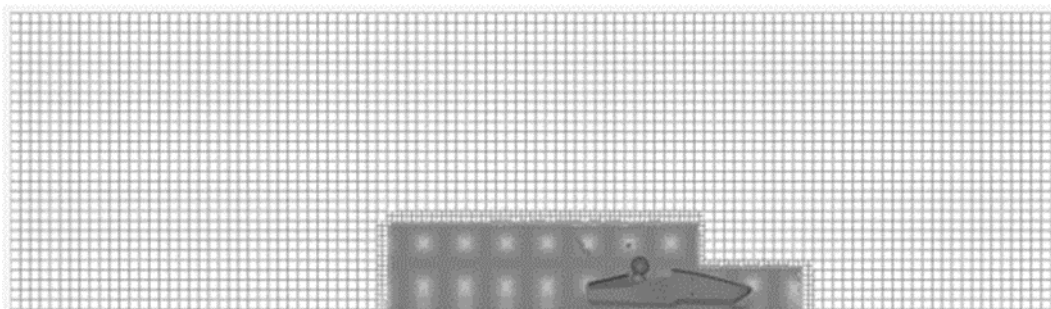
Nakon što je numeričko rješenje dobiveno, slijedi njegova analiza koja podrazumijeva prikaz skalarnih, vektorskih i tenzorskih polja, integraciju protoka sila, momenata, i sl. Slika 4. prikazuje generiranu geometrijsku prežu na glavnim elementima prednjeg krila.



Slika 4. Prikaz geometrijske mreže modela

3.3. Definiranje proračunskog prostora - domena

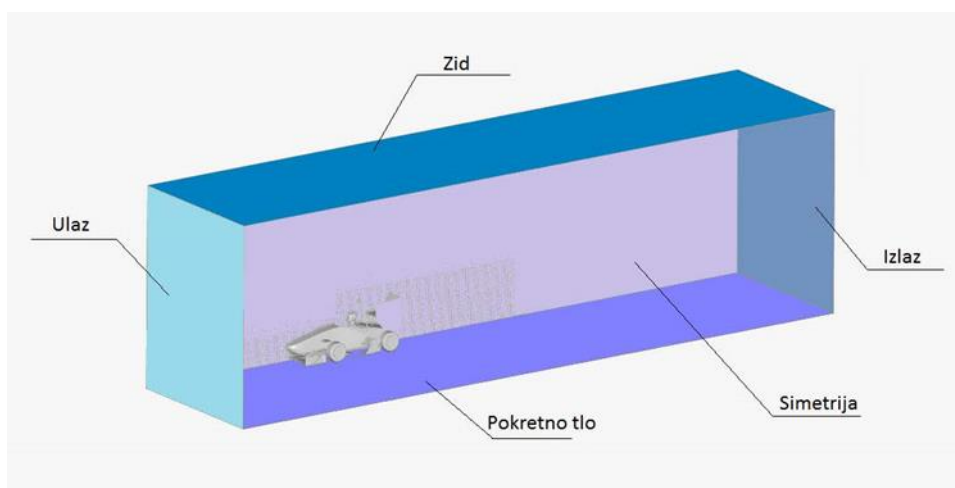
Za potrebe računalnih simulacija komponenti aero paketa definira se takozvana domena, odnosno virtualni zračni tunel. Njegove su dimenzije podosta veće od samih dimenzija komponente koja se simulira i promatra kako ne bi došlo do neželjenih utjecaja zbog blizina stijenka virtualnog zračnog tunela i uvjeti bili što sličniji neporemećenom strujanju zraka. Preporučene, a i korištene dimenzije su takve da je omjer širine i visine tunela spram najveće širine i visine promatranog modela otprilike 10:1. Duljina virtualnog zračnog tunela iznosi otprilike šesnaest duljina promatranog modela, s time da se ispred samog modela nalazi približno pet duljina, dok je ostatak smješten iza modela. Prostorna diskretizacija područja provedena je pomoću tetraedarskih i heksaedarskih konačnih volumena. Geometrijska je mreža najgušća u blizini promatranog modela, rastući s određenim faktorom od same površine modela prema van, te se prorjeđuje udaljavanjem od modela. Glavni je razlog tome veliki iznos gradijenata koji se očekuju u blizini površine promatranog modela te je za kvalitetno opisivanje i pouzdane rezultate potreban proračun u puno točaka prostora, odnosno nad velikim brojem konačnih volumena. Područje proračuna diskretizirano je pomoću trodimenzionalnog Kartezijevog koordinatnog sustava sa velikim brojem konačnih volumena. Kako bi se smanjio opseg, trajanje i zahtjevnost same računalne simulacije, u većini slučajeva korišten je uvjet simetrije geometrijskog modela. Time smo proračunsko područje prepolovili, i proporcionalno umanjili vrijeme trajanja simulacije. Slika 5. prikazuje proračunsko područje za model cijelog bolida te sa provedenom diskretizacijom, odnosno generiranom geometrijskom mrežom.



Slika 5. Prikaz proračunskog prostora - domene za simulaciju čitavog bolida

3.3.1. Definiranje rubnih uvjeta proračunskog modela

Nakon generiranja geometrijske mreže, potrebno je postaviti rubne uvjete kako bi parcijalne diferencijalne jednačbe dale rješenja za naš specifičan slučaj. Najčešće korišteni tipovi rubnih uvjeta jesu Dirichletov i Neumanov, pri čemu Dirichletov propisuje vrijednosti parcijalne diferencijalne jednačbe dok Neumanov propisuje vrijednost nultog gradijenta. U slučaju generaliziranog Neumanovog rubnog uvjeta propisuje se proizvoljan vrijednost gradijenta varijable u smjeru normale na površinu promatrane granice proračunskog prostora. Najčešće korišteni rubni uvjeti za modeliranje izvođenja računalnih simulacija za naše potrebe jesu ulazna granica, izlazna granica, uvjet simetrije te zid. Na ulaznoj granici, na kojoj zadajemo Dirichletov uvjet, određujemo zapravo brzinu nastrujavanja ulaznog fluida dok se na izlaznoj granici proračunskog prostora postavlja Neumanov uvjet, gdje se definira konstantna vrijednost tlaka na izlazu. Rubni uvjet zida ima ulogu opisivanja nepropusne granice gdje, kod viskozno strujanja, fluid ima brzinu jednaku brzini napredovanja zida, odnosno tijela, kroz fluid. Slika 6. prikazuje nazive ploha i definiciju rubnih uvjeta na proračunskom modelu korištenim za simuliranje čitavog bolida.



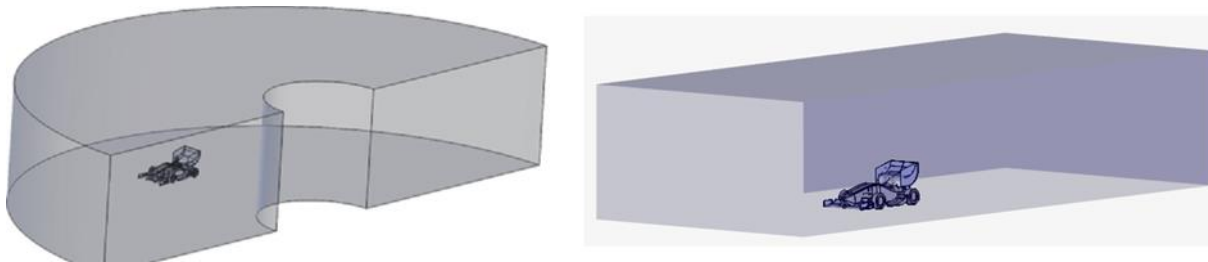
Slika 6. Prikaz ploha na kojima se primjenjuju rubni uvjeti i njihov naziv

Kao što je to vidljivo na prethodnoj slici, na ulaznoj se površini definira ulazna brzina fluida, odnosno brzina kojom bi se u stvarnosti tijelo, odnosno bolid gibao kroz fluid (zrak). Jednaka se vrijednost brzine definira i za zid (Pokretno tlo) kako bi model virtualnog zračnog modela bio realan. Nadalje, zid pod nazivom simetrija ima ulogu preslikavanja jednakih uvjeta nastrujavanja s druge strane zida što je primjenjivo zbog same simetrije geometrije bolida. Time se uvelike smanjuje vrijeme potrebno za izvršavanje simulacije i sama njezina kompleksnost. Na stražnjoj površini domene postavljen je uvjet propusne granice te je radi lakše analize rezultata odabrana konstantna vrijednost tlaka od 0 Pa .

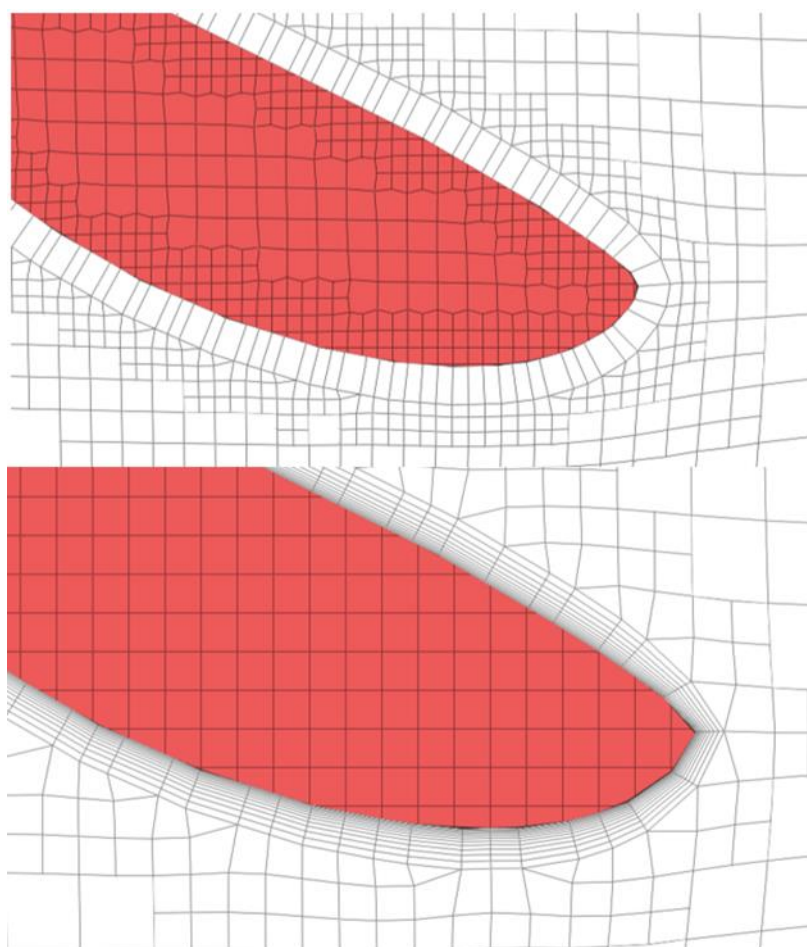
3.3.2. Vrste simulacija i načini analize performansi komponenti aero paketa

Kao što je to već prije spomenuto za razvoj komponenti koristi se računalna dinamika fluida te se analiza sastoji od nekoliko koraka. Pred-procesuiranja gdje se definiraju proračunski prostor i rubni uvjeti te se generira geometrijska mreža s velikim borjem konačnih volumena. Zatim slijedi proces samog izvršavanja simulacije u kojoj se kao što je to opisano računalno rješavaju sustavi jednadžbi kako bi se dobila raspodjela tlaka, polje brzina, sile i momenti, vrtloženje fluida i sl. Posljednji korak je takozvani *post-procesing* gdje dobivamo vizualizaciju rezultata, brožčane vrijednosti sila i momenata, raspodjelu tlaka po površini, ukupni aero balans bolida i slično. Kako bi rezultati bili što sličniji stvarnosti zadatak podtima aerodinamike je također optimizacija parametara simulacije što se najčešće odnosi na parametre geometrijske mreže pogotovo u blizini samog tijela koje se giba kroz fluid. Osim toga, kako bi se dobili kvalitetni podaci i na temelju njih donijeli zaključci koji kasnije rezultiraju dobrim performansama aero paketa i zadovoljavajućim balansom bolida, potrebno je provesti nekoliko različitih vrsta simulacija. Tako se u osnovi rade nekoliko različitih tipova simulacija za posebne slučajeve. Najrasprostranjenija i najčešća je simulacija pravocrtnog gibanja bolida koja daje najbolji uvid u ponašanje strujanja zraka preko komponenti aero paketa, ali sama kao takva nije dostatna za dobivanje potpune slike glede performansi aero elemenata. Važnu ulogu imaju i *cornering* simulacije gdje se simulira prolazak bolida kroz zavoje, odnosno nastrujavanje zraka na elemente aero paketa kao što se to dešava i u stvarnosti kada bolid prolazi zavojem određenog radijusa. Podaci dobiveni tim simulacijama izrazito su bitni za namještanje balansa čitavog bolida budući da su same staze na Formula Student natjecanjima sastavljene od velikog broja različitih zavoja i ponešto kraćih ravnica. Takve su simulacije dugotrajne i zahtjevne po pitanju računalne moći zbog toga što se rješavaju sustavi jednadžbi i u više od dvanaest milijuna točaka kako bi se dobili valjani rezultati. Također, simulira se i poniranje bolida prilikom kočenja i njegovo podizanje prilikom ubrzavanja kako bi se ustanovio utjecaj na performanse aero paketa. Slika 7. prikazuje različit oblik proračunskog prostora za različitu vrstu simulacija dok

Slika 8. prikazuje poboljšanje geometrijske mreže uz samu površinu aero elementa kako bi se povećala točnost dobivenih rezultata.



Slika 7. Prikaz različitih proračunskih prostora za različitu vrstu simulacija



Slika 8. Prikaz poboljšanje geometrijske mreže uz samu površinu aero elementa

3.4. Razvoj komponenti aerodinamičkog paketa

Formula Student bolida

Razvoj komponenti aerodinamičkog paketa *Formula Student* bolida podrazumijeva konceptualizaciju, razvoj i konstrukcijsku razradu komponenti aero paketa.

Komponente aero paketa koje ulaze u razvoj su prednje krilo, stražnje krilo, podnica s difuzorom, bočna krila i dodatni elementi koji služe za poboljšanje performansi samog bolida. Osim toga, u opseg posla ulazi i suradnja s podtimom hlađenja po pitanju optimalnog smještaja hladnjaka potrebnog za hlađenje komponenti pogonskog sustava kako bi brzina nastrujanja zraka na hladnjak bila dostatna za učinkovito hlađenje. Također dio razvoja je rezerviran za suradnju sa podtimom dinamike vozila kako bi se na kraju postigle optimalne performanse bolida uz maksimalnu efikasnost samog aero paketa.

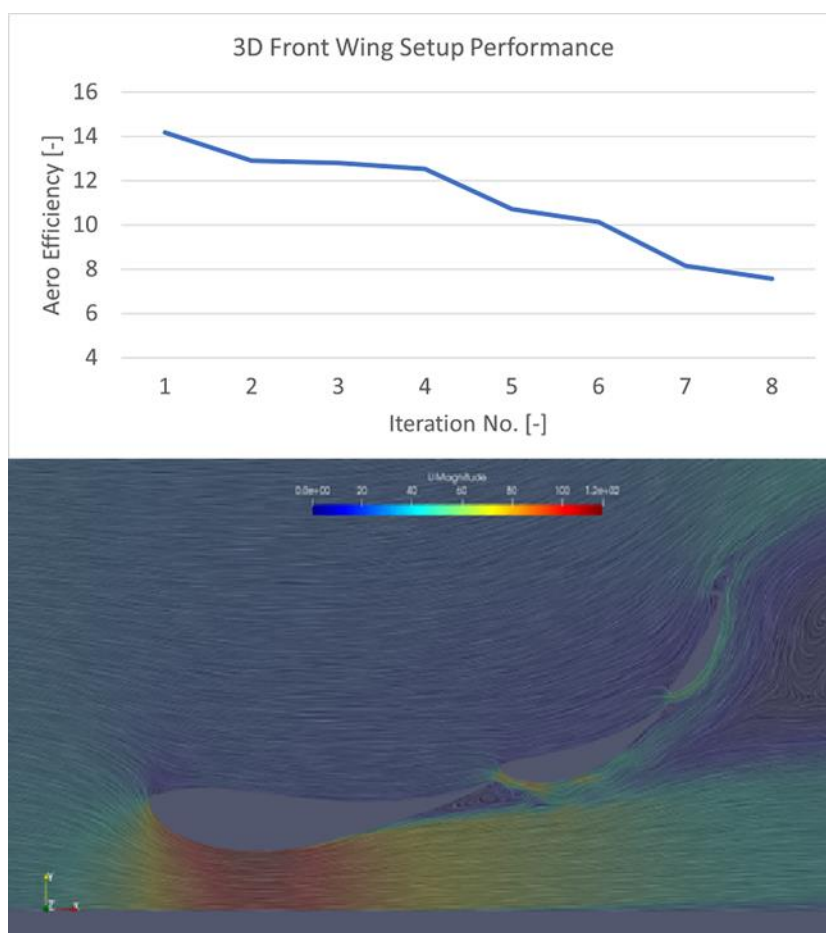
Prednje krilo je prvi element aero paketa koji dolazi u doticaj s neometanom strujom zraka i oblikuje čitavo strujanje oko šasije bolida te u određenoj mjeri definira performanse svih ostalih komponenti aero paketa te je logično započeti sa njegovim razvojem. Paralelno sa završetkom prvih faza razvoja prednjeg krila kreće se sa razvoje stražnjeg krila te kad se ugrubo definiraju dva glavna elementa aero paketa kreće se sa razvojem ostalih komponenti i njihovom razradom. Razvoj komponenti aero paketa iterativni je postupak te gotovo svaka promjena bilo koje komponente utječe na performanse druge. Zbog toga treba biti veoma pažljiv pri odabiru koncepata i procjeni osjetljivosti jedne komponente u odnosu na drugu.

3.4.1. Razvoj prednjeg krila

Glavna uloga prednjeg krila je generiranje sile uzgona u negativnom smjeru vertikalne osi bolida, odnosno potisne sile (engl. *Downforce*) koja djeluje u smjeru gravitacijske sile multiplicirajući tako ukupnu silu na prednjim kotačima kako bi se do same granice mogao iskoristiti potencijal gume za prijenos momenta sa kotača na podlogu. Prednje krilo ima značajan utjecaj na dinamiku vozila zbog količine *downforcea* koji generira te je uz stražnje krilo glavni element aero paketa za postizanje željenog balansa bolida prilikom prolaska kroz zavoje. Interakcija prednjeg krila i fluida kroz koji se bolid kreće započinje upravo na prednjem krilu te je neophodno analizirati ponašanje i tok fluida nakon odvajanja toka od prednjeg krila kako bi se ustanovio utjecaj na performanse ostalih komponenti. Budući da su pravilnikom propisana neka od osnovnih svojstava bolida kao što su to nepokriveni prednji kotači, prednje krilo ima zadatak oblikovati strujanje i u tom aspektu. Kako zrak nastrujava direktno na prednje kotače, guma koja rotira pri većim brzinama stvara turbulentne vrtloge koji nerijetko mogu naštetiti stabilnosti bolida te je potrebno oblikovanjem prednjeg krila taj efekt svesti na minimum. Kod manjih brzina pojava takvih turbulentnih vrloga izražena je u manjoj mjeri ali i dalje postoji, no potrebno je smanjiti mogućnost njihovog nastajanja na minimum.

Prednje krilo u našem se slučaju sastoji od 3 aero profila (engl. *Flap*), geometrijskog oblika visokog aerodinamičkog utjecaja te okomite ploče (engl. *Endplate*), elementa koji se nalazi na samim bočnim krajevima prednjeg krila. Budući da postoji izrazito veliki broj geometrijskih oblika (aero profila krila) potrebno je napraviti opširnu analizu primjenjivosti određenih

geometrijskih oblika kako bi oni zadovoljili određenu funkciju uz maksimalnu aerodinamičku efikasnost za određene slučajeve nastrujavanja zraka na krilo. Tako i sam razvoj prednjeg krila kreće od selekcije i 2D analize strujanja zraka preko *flapova* (elemenata prednjeg krila u obliku aero profila) prednjeg krila kako bi se ustanovio njihov optimalni raspored. Za uvjete strujanja koji se javljaju prilikom vožnje ovakve vrste bolida promatrani su slijedeći standardni aero profili iz svjetski poznatih aero dana baza: S1223, S1210, E420, E423, CH10, FX74-C15-140 i MSHD. Analiza se provodi za ravninski slučaj strujanja kako bi same simulacije bile što brže i pružile nam generalni uvid u ponašanje strujanja zraka na samom prednjem krilu te nam olakšale odabir optimalnog *setupa* za daljnji razvoj. Prilikom takve analize promatraju se generirana sila *downforcea*, sila otpora strujanja zraka te ukupna aerodinamička efikasnost. Slika 9. prikazuje graf aerodinamičke efikasnosti različitih geometrijskih iteracija sa spomenutom kombinacijom aeroprofila, što je poslužilo kao temelj za odabir konačne konfiguracije i daljnji razvoj.

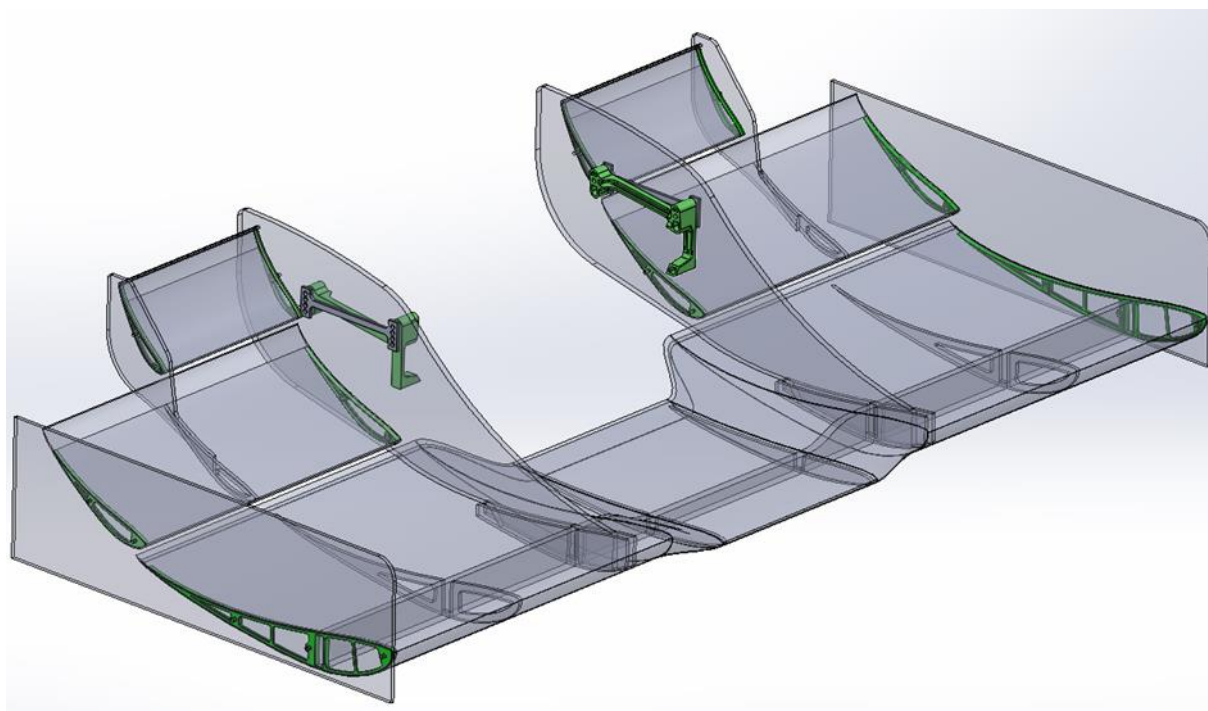


Slika 9. Prikaz aerodinamičke učinkovitosti različitih položaja različitih aeroprofila

Nakon što je odabrana pozicija svih *flapova* kreće se u optimizaciju geometrije *endplatea*. *Endplate* služi tome da zrak pod visokim tlakom sa gornje strane *flapova* ne prestrujava u polje niskog tlaka koje se nalazi ispod samih *flapova* jer bi se time smanjila učinkovitost samog krila te povećao generirani vrtlog na rubovima samih *flapova*. Na *endplateu* se najčešće nalaze

i dodatni elementi koji služe za vođenje struje zraka u željenom smjeru kao npr. elementi za stvaranje vrtloga pri dnu *endplatea* da se sačuva polje niskog zraka ispod krila i elementi za poboljšano opstrujavanje prednjeg kotača.

Nakon što se donese finalna odluka oko smještaja elemenata prednjeg krila kreće se u njegovu konstrukcijsku razradu. Kao i za svaku drugu komponentu u ovakvom području razvoja teži se maksimalnom smanjenju mase. Stoga je odlučeno da se *flapovi* izrađuju kao šuplji sa unutarnjom rebrastom konstrukcijom i vanjskim ljuskama koje osiguravaju dobivanje željenog oblika aero profila. Tako glavni *flap* prednjeg krila posjeduje uzdužnu goredu (remenjaču) na koju su zatim spajana sva ostala rebra u obliku aero profila te se kasnije na njih lijepila ljuska koja zatvara cijelu konstrukciju. Radi lakše izrade i kasnije montaže, vanjska rebra izrađena su tehnologijom 3D printanja gdje su već unaprijed predviđeni provrti za prolazak vijaka kao i utori za šesterokutne matice što uvelike ubrzava proces sklapanja svih komponenti prednjeg krila. Unutarnja rebra, remenjača (glavna greda) vanjske ljuske i glavni nosači izrađeni su tehnologijom mokrog laminiranja kompozitnih konstrukcija dok su vanjska rebra *flapova* i adapteri za montažu krila izraženi tehnologijom 3D printanja. Slika 10 prikazuje konstrukcijski razrađeno prednje krilo sa svim spomenutim elementima.



Slika 10. Prikaz prednjeg krila sa svim konstrukcijskim elementima

3.4.2. Razvoj stražnjeg krila

Glavna uloga stražnjeg krila je generiranje sile uzgona u negativnom smjeru vertikalne osi bolida, odnosno sile *downforcea* koja djeluje u smjeru gravitacijske sile multiplicirajući tako ukupnu silu na stražnjim kotačima kako bi se do same granice mogao iskoristiti potencijal gume

za prijenos momenta sa kotača na podlogu. Stražnje krilo ima izraziti utjecaj na samu dinamiku vozila i njegov balans pošto se pogon bolida nalazi na stražnjim kotačima te je potrebno pomoću generiranog *downforcea* stražnjeg krila maksimalno iskoristiti potencijal stražnjih guma. Stražnje krilo generira oko 40 % ukupne sile *downforcea* čitavog bolida što naravno za posljedicu ima i generiranje podosta velike sile otpora vožnji. Stoga je cilj bio optimirati položaj *flapova* da stražnje krilo zadrži maksimalnu aerodinamičku efikasnost uz generiranje dostatne vertikalne sile.

Na temelju desetak iteracija simulacija računalne dinamike fluida, odabrana je verzija krila s tri *flapa* koji imaju isti aero profil s modifikacijom u duljini njegove tetive i debljine. Krilo na svojim krajevima ima dva velika *endplatea* koji sprječavaju prestrujavanje zraka sa gornje strane *flapa* (visokotlačnog područja) prema donjoj polovici *flapa* (niskotlačno područje). Osim optimizacije samog položaja *flapova* i njihovog kuta nagiba optimira se i oblik i položaj *endplatea* da se u maksimalnoj mogućoj mjeri uštedi masa a da pri tome performanse stražnjeg krila ostanu iste. Želja je također bila da vizualno *endplate* nalikuje na *endplate* korišten prošle sezone kako bi se očuvao vizualni identitet bolida.

Kako zbog svoje velike površine stražnje krilo generira i veliku silu otpora vožnji, što je naravno nepoželjno, potrebno je bilo razviti sustav koji će taj negativni efekt smanjiti u maksimalnoj mogućoj mjeri a da pri tome ne poremeti u potpunosti balans i stabilnost bolida. Tako je po uzoru na F1 koncipiran i razvijen DRS sustav (engl. *Drag Reduction System*). Sustav radi na principu smanjenja sile otpora vožnje stražnjeg krila na način da se dva *flapa* zarotiraju u položaj u kojem se prednja površina značajno smanji, odnosno smanji im se napadni kut što rezultira manjom silom *downforcea* ali i manjom silom otpora vožnji. Vozač definira otvaranje *flapova* na način da pritiskom na tipkalo aktivira servo motor koji pomoću sustava poluga tada povlači, odnosno rotira same *flapove* oko njihove rotacijske osi. Servo motor nalazi se u unutrašnjosti šupljeg glavnog *flapa* stražnjeg krila tako da dodatno ne ometa nastrojavanje zraka na stražnje krilo, dok je polužni mehanizam smješten sa vanjske strane *endplatea* gdje nam samo ometanje strujanja nema preveliki utjecaj na performanse.

Nakon što su konceptualna i razvojna faza završile krenula je konstrukcijska razrada. Vođeni načelima konstruiranja lakih zrakoplovnih konstrukcija glavni *flap* stražnjeg krila kao i drugi *flap* izrađeni su kao šuplji dok je za treći iskorišten stiropor kao ispuna odnosno jezgra. Za oba šuplja *flapa* konstruirana je rebrasta konstrukcija koja se sastoji od glavne nosive remenjače na koju se tada spajaju sva rebra u obliku aero profila. Vanjska su rebra optimirana za tehnologiju izrade 3D printanjem dok su unutarnja rebra konstruirana za tehnologiju izrade mokro laminiranje. Na svim rebrima konstruirani su utori za smanjenje mase kako bi masu čitavog aero paketa sveli na minimum, a da krutost pri tome ostane zadovoljavajuća. Na vrhu

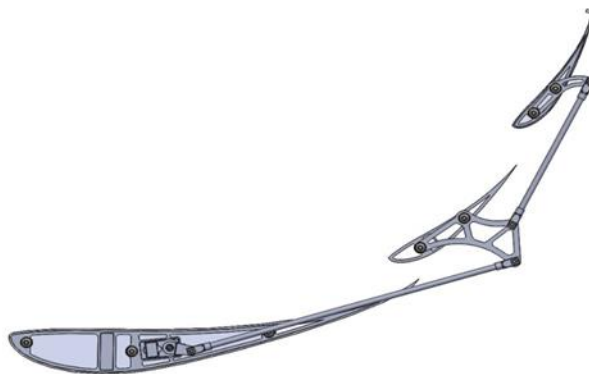
trećeg flapa dodan je takozvani *Gurney flap* kao i na rubove samog *endplatea* koji služi za prezervaciju i povećanje polja visokog tlaka na gornjoj površini trećeg flapa i povećanje polja niskog tlaka ispod samog stražnjeg krila.

Svi flapovi stražnjeg krila proizvedeni su na sličan način. Mokro laminiranje gornje i donje ljuske u kalupe, laminiranje i izrezivanje ostalih nosivih elemenata (remenjače, rebara, nosača krila i sl.) te njihovo naknadno lijepljenje u rebrastu konstrukciju. Zatim je slijedilo spajanje rebraste konstrukcije i ljusaka u jednu cjelinu uz prilagodbe, i njihovo lijepljenje i fiksiranje. U međuvremenu su bile izrađene ploče iz kojih su se izrezivali bočni *endplateovi* koji su tada povezali sve flapove u funkcionalnu cijelinu. Nosači stražnjeg krila također su proizvedeni tehnologijom mokrog laminiranja te su zalijepljeni na rebrastu konstrukciju stražnjeg krila. Oni su proračunati i simulirani FEM (eng. *Finite Element Methode*) metodom kako bi njihova čvrstoća bila dostatna za ciklus opterećenja kojem su podvrgnuti. Jasno je kako se sva generirana sila *downforcea* sa flapova mora prenijeti na kotače tako da ju nosači stražnjeg krila prenesu na šasiju bolida. Gotovo je fascinantno kako se sile veće i od 500 N prenose sa krila na nosače samo pomoću lijepljenog spoja. Nakon same proizvodnje, montaže i inicijalnih testiranja dodane su dodatne ukrute na stražnje krilo koje osiguravaju krutost *endplateova* i njihov međusobni razmak te time omogućuju rotaciju flapova bez zapinjanja, odnosno aktivaciju DRS sustava. U nastavku su dane slike koje prikazuju gore opisane elemente stražnjeg krila kao što su to DRS sustav, sam izgled stražnjeg krila nakon konstrukcijske razrade i sl.



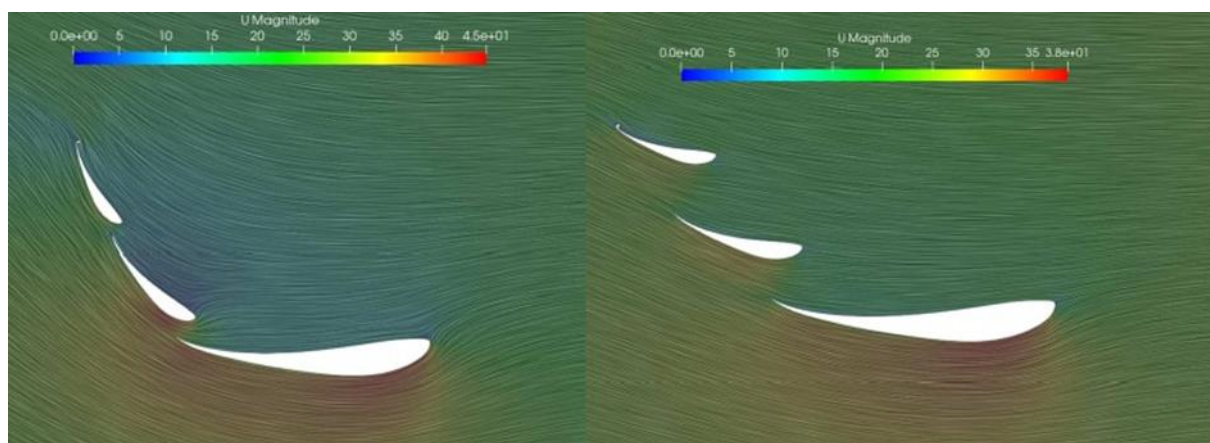
Slika 11. Prikaz konstrukcijski razrađenog stražnjeg krila sa svim elementima

Kao što je to vidljivo s prikazane slike (Slika 11.) nosači stražnjeg krila projektirani su i izrađeni u takozvanoj *Swan - neck* izvedbi koja osigurava minimalno ometanje struje zraka koja prolazi ispod donje površine stražnjeg krila kako bi se osigurala njegova maksimalna učinkovitost. Također na slici je jasno vidljiva rebrasta konstrukcija *flapova* krila kao i ispuna trećeg *flapa* koja je izrađena u obliku aero profila te obložena slojem tkanja ugljičnih vlakana. Ljuske šupljih *flapova* izrađene tehnologijom mokrog laminiranja sastoje se od jednog sloja tkanja ugljičnih vlakana (80 g/m^2) izvana, u sredini se nalazi pjenasta jezgra – *rohacell* debljine 1.5 mm, te je ona iznutra zatvorena slojem tkanja od staklenih vlakana (50 g/m^2). Kako bi se postigla ujednačena debljina sloja i podjednaka raspodjela epoksidne smole koja služi kao matrica kompozitnog materijala, nakon što se slojevi poslože i premažu smolom, čitavi se dio upakira u vakuum vreću te se crijevom spaja na vakuum pumpu koja kreiranjem vakuuma zapravo pritišće ljusku uz kalup na kojem se laminira te ravnomjernije raspoređuje smolu po tkanju. U postupku se koriste i dodatni materijali koji služe za lakše odvajanje vakuum vreće od proizvoda kao i uklanjanja viška smole iz samog proizvoda.



Slika 12. Prikaz mehanizma DRS sustava

Slika 12 prikazuje mehanizam DRS sustava koji je opisan u prijašnjim paragrafima. Kao što je to vidljivo sa slike servo motor kojeg vozač aktivira nalazi se unutar glavnog *flapa* stražnjeg krila te je polugom povezan na središnji element koji služi za rotaciju drugog *flapa* ali i za povlačene poluge koja je spojena na koljeno trećeg *flapa*. Kinematika mehanizma proračunata je i simulirana kako bi se prilikom aktivacije DRS-a postigao željeni zakret svakog od *flapova*.



Slika 13. Prikaz zatvorene konfiguracije stražnjeg krila (lijevo) i aktiviranog DRS sustava (desno)

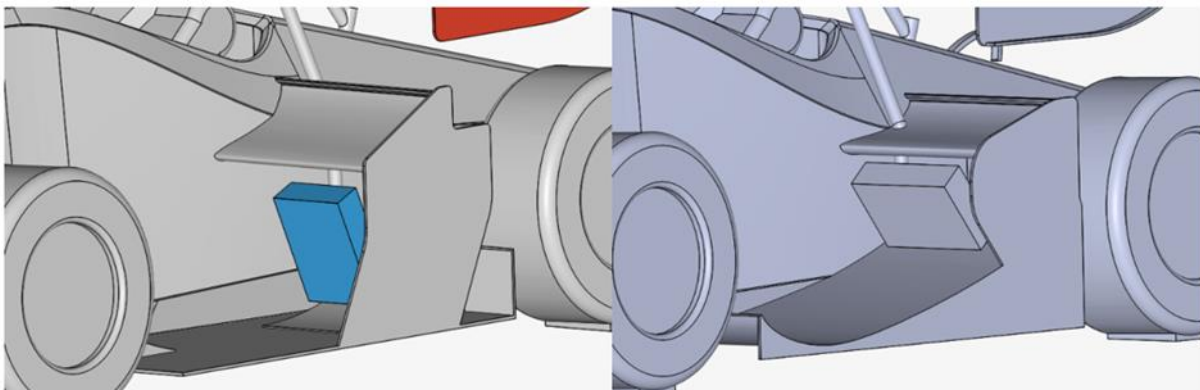
Slika 13 prikazuje razliku u samom strujanju zraka prilikom normalno zatvorenog *setupa* stražnjeg krila i prilikom aktiviranog DRS sustava. Prikazano je polje brzina gdje idući prema crvenoj boji brzina raste, odnosno idući prema plavoj ona opada.

3.4.3. Razvoj podnice i difuzora te sinteza s elementima hlađenja

Podnica je aerodinamički element koji se nalazi ispod šasije bolida. Pravilno dizajnirana i razvijena podnica može generirati veće polje niskog tlaka ispod bolida što dovodi do stvaranja efekta tla (eng. *ground effect*) i u konačnici doprinosi većim tlačnim gradijentima vozila čime se generira dodatna pritiska sila. Područje na stražnjem kraju podnice, odnosno mjesto na

kojem iz nje zrak izlazi naziva se difuzor te sadrži određeni profil naglijeg proširenja kako bi se iskoristio potencijal Venturijevog kanala te dodatno kreirao pad tlaka koji pospješuje privlačenje stražnjeg kraja bolida prema tlu. Dobro oblikovana podnica jedan je od vitalnih dijelova aero paketa modernih bolida svih kategorija pa tako i *Formule Student*. Iako je značajno ograničen pravilnikom i dizajnom šasije odabrani dizajn podnice doprinosi generiranjem oko 20% ukupne sile *downforcea*. Podnica, ili točnije rečeno difuzor, ima dvojnju namjenu, te mu je zadatak osim generiranja vertikalne sile i osiguravanje kvalitetnog i dostatnog nastrujavanja zraka na hladnjak koji je smješten u kanal u difuzoru.

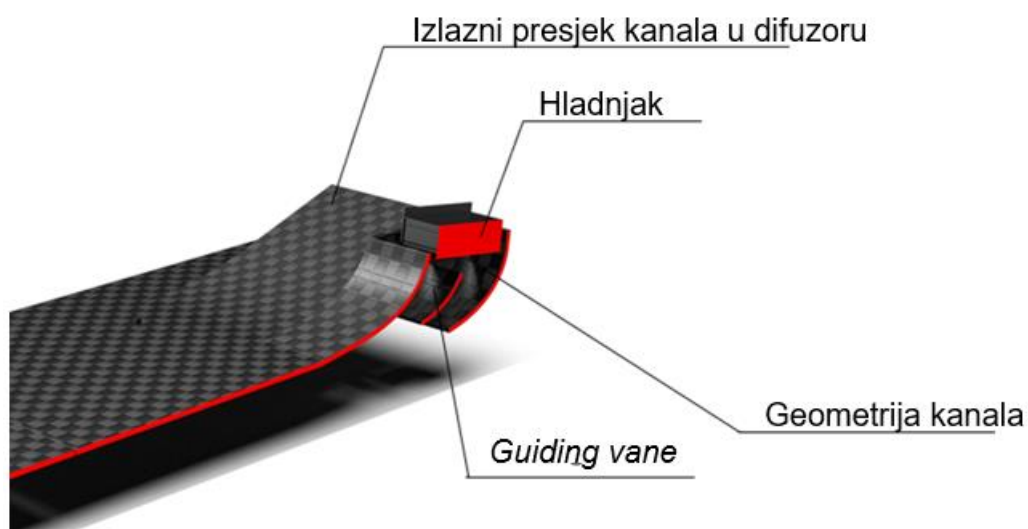
Na prethodnom projektu *Vulpes* korištena su dva hladnjaka pozicionirana uz bok šasije. Ova iteracija, nazvana C1, korištena je kao polazna iteracija za razvoj sustava hlađenja na novom bolidu. U drugoj iteraciji sustava za hlađenje, C2, hladnjaci su također bili pozicionirani uz bok šasije. Pri tome je napravljeno nekoliko modifikacija u položaju i orijentaciji radijatora, uzimajući u obzir zakrivljeni oblik novog bočnog krila. Ovim promjenama povećana je prosječna brzina nastrujavanja na hladnjak i povećan je *downforce* generiran na središnjem i bočnim dijelovima bolida. Na Slika 14. prikazane su prve dvije spomenute iteracije pozicije hladnjaka.



Slika 14. Prikaz prvih iteracija smještaja hladnjaka C1 i C2

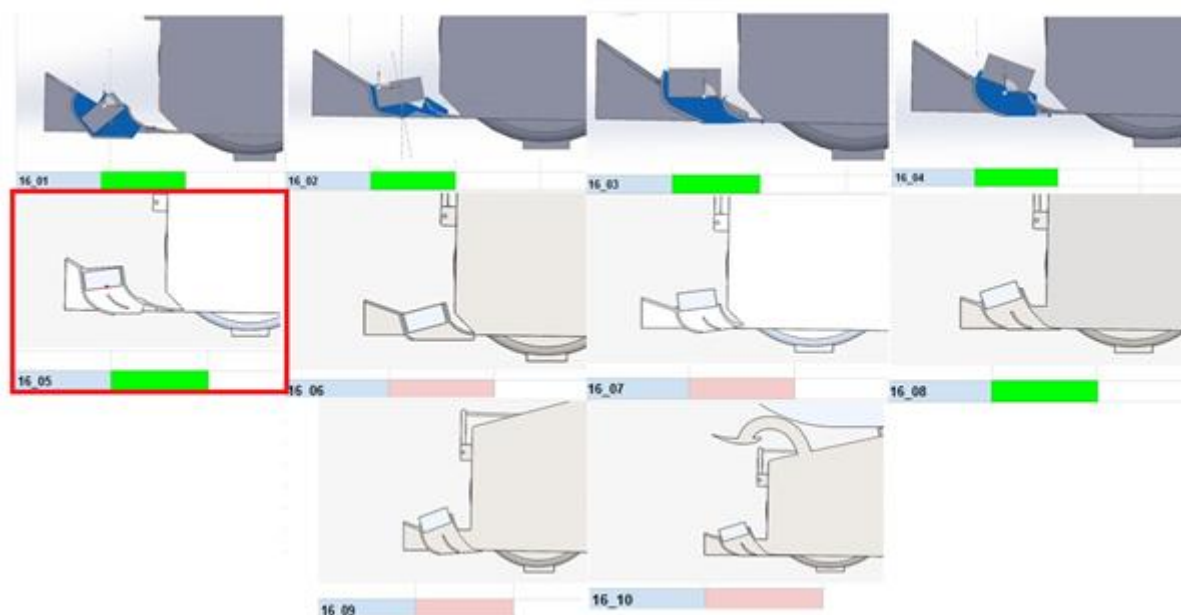
Treća iteracija, C3, imala je jedan radijator pozicioniran iza šasije. U difuzoru je modeliran kanal kroz koji struji zrak iz podnice na hladnjak. Korištenjem jednog hladnjaka značajno se smanjuje ukupna masa sustava za hlađenje, a novi položaj uz to daje i potpunu slobodu dizajniranja bočnog krila. Ovako pozicioniran hladnjak također stvara manje otpora zraka od radijatora postavljenog uz bok šasije. Dakako da se ovakvim pozicioniranjem hladnjaka smanjuje efikasnost difuzora, no to se rješenje pokazalo najboljim u vidu smanjenja mase i smanjena ukupnog otpora vožnje te je kao kompromisno prihvaćeno i implementirano. Računalne simulacije pokazale su da ova geometrijska iteracija daje najveću brzinu nastrujavanja zraka na hladnjak (C3: 10.9 m/s , C1: 9 m/s), a novi model bočnog krila stvara više *downforcea* od obje prethodne iteracije. Međutim, postavljanje kanala s radijatorom unutar difuzora značajno je smanjilo *downforce* koji proizvodi difuzor. Raspodjela tlakova na

iteracijama C1 i C2 prikaza je na prethodnoj slici (Slika 14.). Gubitak *downforcea* na difuzoru zajedno sa povećanjem *downforcea* na bočnom krilu (engl. *sidewing*), uzrokovalo je pomicanje CoP-a (engl. *center of pressure*) prema naprijed što je bio jedan od zahtjeva podtima dinamike vozila. Uzevši u obzir sve rezultate, za daljnji razvoj odabrana je iteracija C3. Svi simulirani modeli kanala prikazani su na idućoj slici (Slika 16.), a zbog najveće brzine nastrujavanja na hladnjak (10.9 m/s) odabran je model 16_05. Konačno, zbog agresivnog nagiba gornje površine kanala došlo je do separacije struje zraka, pa je unutar kanala implementiran *guiding vane* – geometrijski element koji osigurava zakretanje struje zraka i sprječavanje separacije od gornje površine Slika 15. prikazuje podnicu i difuzor u presjeku te strujanje zraka sa i bez dodanog *guiding vane-a*.



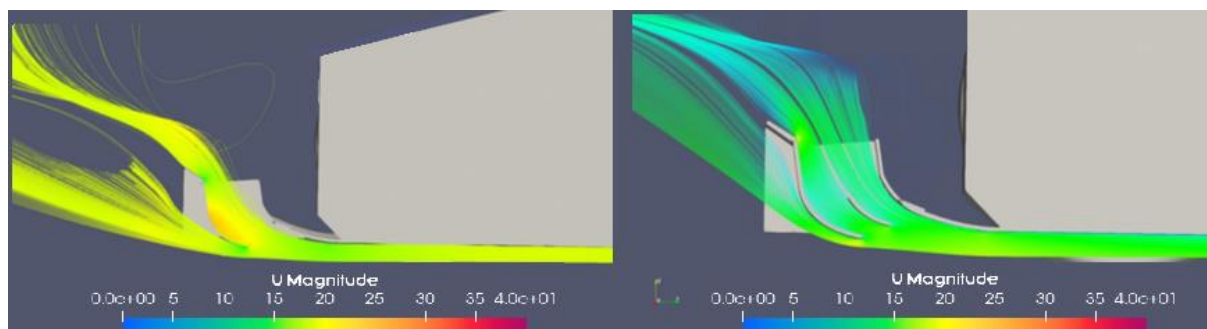
Slika 15. Prikaz presjeka podnice i difuzora sa smještenim hladnjakom

Slika 16. prikazuje nekoliko različitih geometrijskih iteracija smještaja hladnjaka u samom difuzoru. Cilj optimiranja položaja hladnjaka u kanalu difuzora bio je maksimalno povećati brzinu nastrujavanja zraka na hladnjak, smanjiti otpor zraka koliko je god to moguće, zadržati aerodinamičku efikasnost difuzora i omogućiti montažu i demontažu hladnjaka u kanal difuzora.



Slika 16. Prikaz nekoliko različitih iteracija položaja hladnjaka u difuzoru

Slika 17. prikazuje razliku u prostrujavanju zraka kroz hladnjak koji je smješten u kanal difuzora za slučaj kada je implementira *guiding* – vane (desno) te kada njega nema (lijevo). Prikaz strujnica zraka u iteracije bez *guiding vane* dan je u bojama polja tlaka dok su u iteraciji sa implementiranim *guiding vane*-om strujnice zraka prikazane u bojama polja brzine zraka.

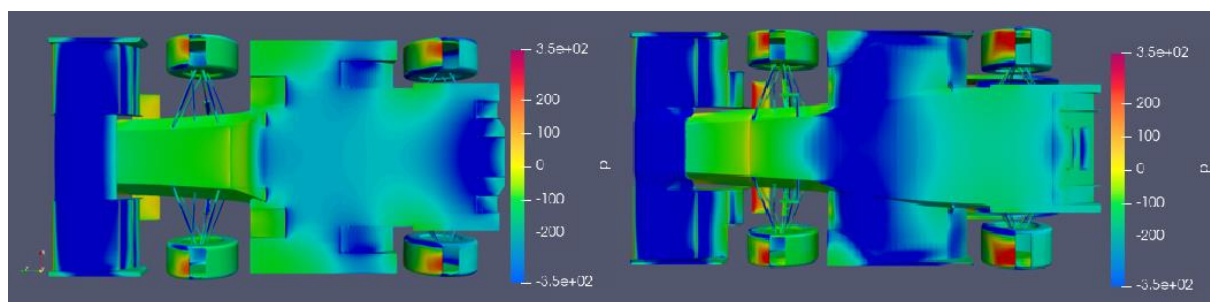


Slika 17. Strujanje kroz kanal difuzora bez (lijevo) i sa implementiranim *guiding vane*-om (desno)

3.4.4. Razvoj bočnih krila i dodatnih elemenata

Razvoj bočnih krila započeo je sa analizom prošlogodišnjeg dizajna elemenata aerodinamičkog paketa koji su se nalazili na mjestu gdje je bila predviđena implementacija bočnog krila. Kako je donesena odluka da sustav hlađenja i njegove komponente budu pozicionirane na stražnjem kraju bolida (hladnjak u difuzoru) tako su se otvorile dodatne mogućnosti u vidu mogućnosti oblikovanja bočnog krila. Implementirani dizajn je jedna od desetak iteracija koja je pokazala najbolje rezultate u sintezi sa podnicom. Takav dizajn doprinio je i globalnom cilju pomicanja CoP-a (engl. *center of pressure*) prema prednjoj osovini kako bi se udovoljilo zahtjevima da se postigne optimalni balans bolida. Konfiguracija bočnog

krila sastoji se od izdignutog ulaznog kanala koji se spušta prema najnižoj točki bočnog krila. Linija bočnog krila prati geometriju aero profila koja se izdiže od najniže točke kako bi se maksimizirao efekt Venturijevog kanala. Uz to, ulazni se kanal blago širi prema najnižem dijelu, nakon kojeg postiže svoju maksimalnu širinu. Ravna ploča koja je ujedno i najniži dio bočnog krila proteže se od vanjskog ruba do ulaznog kanala te prati vanjsku krivulju kanala. Ravna ploča najjednostavnije je rješenje za izbjegavanje prestrujavanja vrtložnog i nemirnog zraka generiranog prednjim kotačima u ulazni kanal bočnog krila. Bočno krilo također sadrži i jedan *flap* pozicioniran pri izlaznom dijelu kanala povrh čitavog krila koji je pomoću malog *endplatea* spojen sa ostatkom bočnog krila. Položaj *flapa* optimiran je prema nagibu izlaznog dijela kanala bočnog krila te prema željenom usmjeravanju protoka zraka prema stražnjem krilu. Na izlaznom bridu *flapa* bočnog krila nalazi se dodan *Gurney flap* kako bi se povećalo polje i iznos visokog tlaka na gornjoj strani kao i smanjilo polje tlaka ispod njega. Slika 18 prikazuje usporedbu prošlogodišnjeg dizajna (lijevo) i implementiranog novog rješenja bočnog krila (desno) na bolidu.

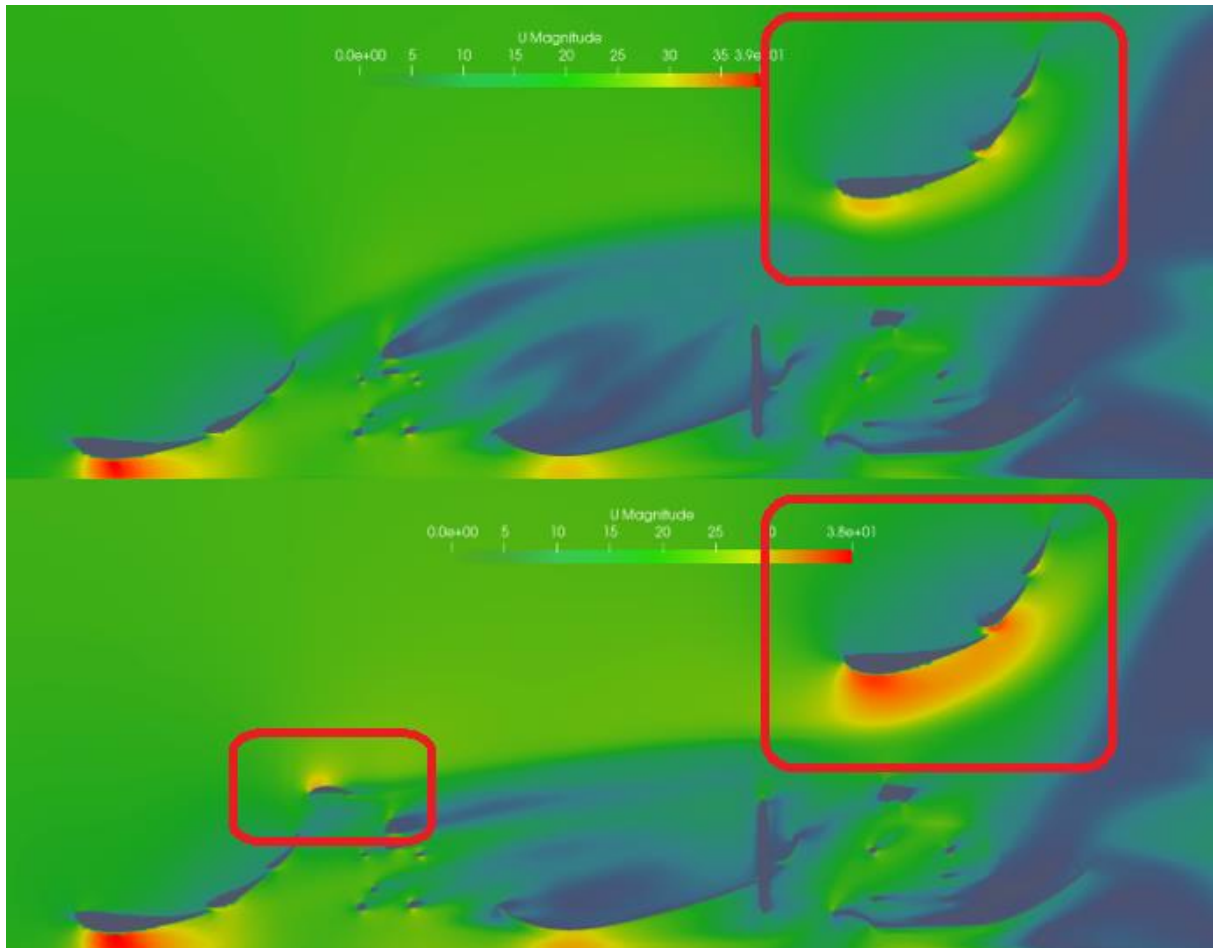


Slika 18. Usporedba prošlogodišnjeg dizajna (lijevo) i implementiranog novog rješenja bočnog krila (desno) na bolidu

Na slici iznad prikazana su polja tlaka na donjim površinama bolida, prednjem krilu, podnici i difuzoru. Tamno plava boja predstavlja polje niskog tlaka dok crvena prikazuje polje visokog tlaka. Zelena boja bila bi reprezentativna za normalan, okolišni tlak. Kao što je vidljivo na slici, sa implementiranim novim dizajnom bočnih krila generiralo se veliko polje niskog tlaka blizu središta bolida i ono se proteže sve do vanjskih bridova bočnog krila. Također, na gornjoj slici jasno je vidljiva razlika tlakova na samome difuzoru, odnosno polje niskog tlaka na lijevoj strani slike puno je veće i snažnije nego ono na desnoj strani budući da je hladnjak smješten u kanal difuzora. Takav gubitak performansi difuzora bio je očekivan nakon donošenja odluke o smještaju komponenti sustava hlađenja.

Jedan od elemenata aero paketa koji se nalazi na boku šasije je takozvani *horn-flap*. Njegov poprečni presjek također ima oblika aero profila no on je orijentiran drugačije od flapova na prednjem krilu. On zapravo generira silu uzgona lokalno no njegova glavna uloga je smirenje struje zraka koja dolazi sa prednjeg krila kao se ona ne bi dizala previsoko. Samim time

poboljšava se nastrujavanje zraka na stražnje krilo čime se poboljšavaju njegove performanse kao i ukupni balans bolida. Masa spomenutog elementa je gotovo zanemariva u odnosu na ostatak aero paketa, dok je njegov učinak značajan kao što se to može vidjeti na slici u nastavku. Slika 20 prikazuje razliku u brzinama nastrujavanja na stražnje krilo kao i samog toka zraka kada se *horn flap* implementira odnosno ne implementira.



Slika 19. Prikaz razlike u brzinama nastrujavanja kada se horn implementira (donja slika)

Kao dokaz poboljšanja performansi stražnjeg krila osim vizualne reprezentacije služe nam i numeričke vrijednosti dobivene iz računalnih simulacija koje nam dokazuju da postoji povećanje *downforcea* kada se *horn flap* implementira. U nastavku je dana Tablica 2 s numeričkim vrijednostima koje daju pregled nad nekoliko različitih iteracija i položaja *horn flapa*. Kao što se vidi iz tablice iteracija H2 kod koje *horn flapa* nema, daje najmanje vrijednosti *downforcea*, dok iteracija H3 iteracija koja je implementirana daje najveće vrijednosti *downforcea*.

Tablica 2. Prikaz vrijednosti različitih iteracija implementacije horn flapa

	H0	H1	H2	H3
Potisna sila (N)	200.999	219.136	183.032	217.204
Sila otpora zraka (N)	84.3729	87.6919	80.4426	86.6898

3.5. Rezultati CFD simulacija *VulpesR-a*

Rezultati CFD simulacija bolida *VulpesR* biti će prikazani u obliku slika koje prokazuju polje tlaka i polje brzine kao i strujnice fluida, grafova i tablica sa numeričkim vrijednostima.

Tablica 3. prikazuje numeričke vrijednosti *downforcea* i sile otpora vožnji za različite iteracije prednjeg krila. Tablica 4. prikazuje analizu osjetljivosti numeričkih vrijednosti sila s promjenom visine prednjeg krila u odnosu na podlogu. Vidljivo je da *downforce* raste sa spuštanjem prednjeg krila sve do određene mjere kada to spuštanje rezultira negativnim efektom te aerodinamička efikasnost prednjeg krila krene opadati.

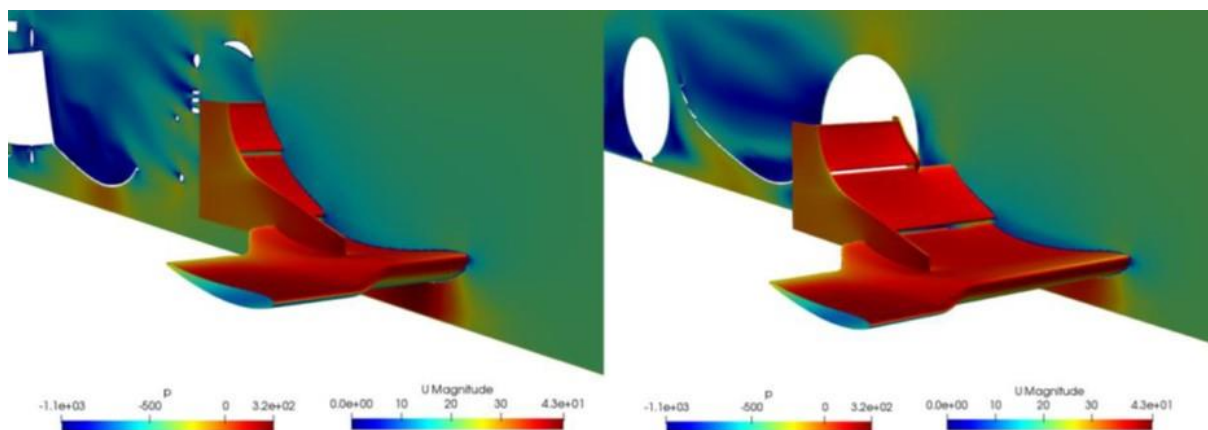
Tablica 3. Numeričke vrijednosti sila za različite iteracije prednjeg krila

Simulacije pri 80 km/h	Prednje krilo – aerodinamički potisak (N)	Prednje krilo – aerodinamičke sile otpora zraka (N)	Prednje krilo – aerodinamička efikasnost
RT06R_FW1	-344.78	71.44	4.826147816
RT06R_FW2	-319.92	72.12	4.4359401
RT06R_FW3	-323.98	71.24	4.547725997
RT06R_FW4	-333.86	69.28	4.81995381
RT06R_FW5	-329.16	69.86	4.711709133

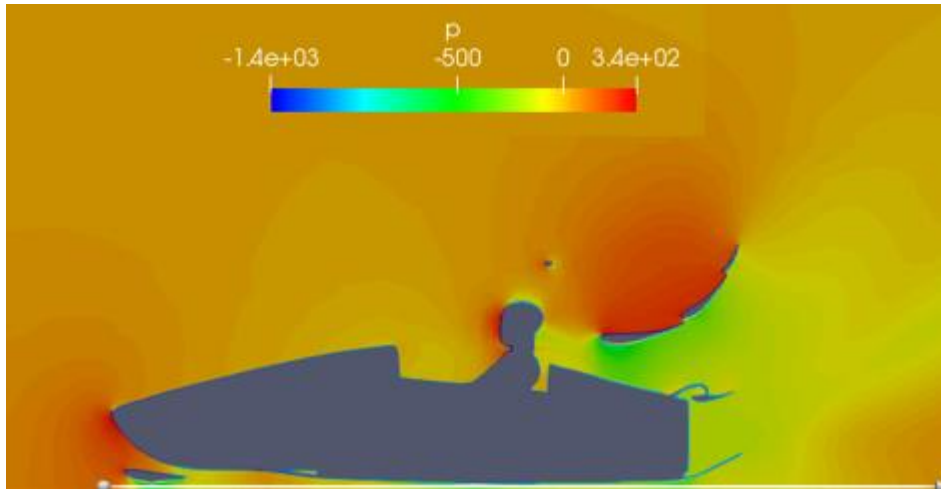
Tablica 4. Prikaz numeričkih vrijednosti iznosa sila za prednje krilo i bolid

Simulacije pri 80 km/h	Cijelo vozilo – aerodinamički potisak (N)	Cijelo vozilo – aerodinamičke sile otpora zraka (N)	Cijelo vozilo – aerodinamička efikasnost
RT06R_FW6_40 mm	-955.76	469.1	2.037433383
RT06R_FE6_50 mm	-944.14	471.14	2.003947871
Simulacije pri 80 km/h	Prednje krilo – aerodinamički potisak (N)	Prednje krilo – aerodinamičke sile otpora zraka (N)	Prednje krilo – aerodinamička efikasnost
RT06R_FW6_40 mm	-441.72	77.36	5.70992761
RT06R_FW6_50 mm	-434.5	78.02	5.56908485

Slika 20 prikazuje presjek domene simulacije i prednjeg krila te se u toj ravnini prikazuje strujanje zraka odnosno polje brzina, dok je na krilu prikazano polje tlakova.

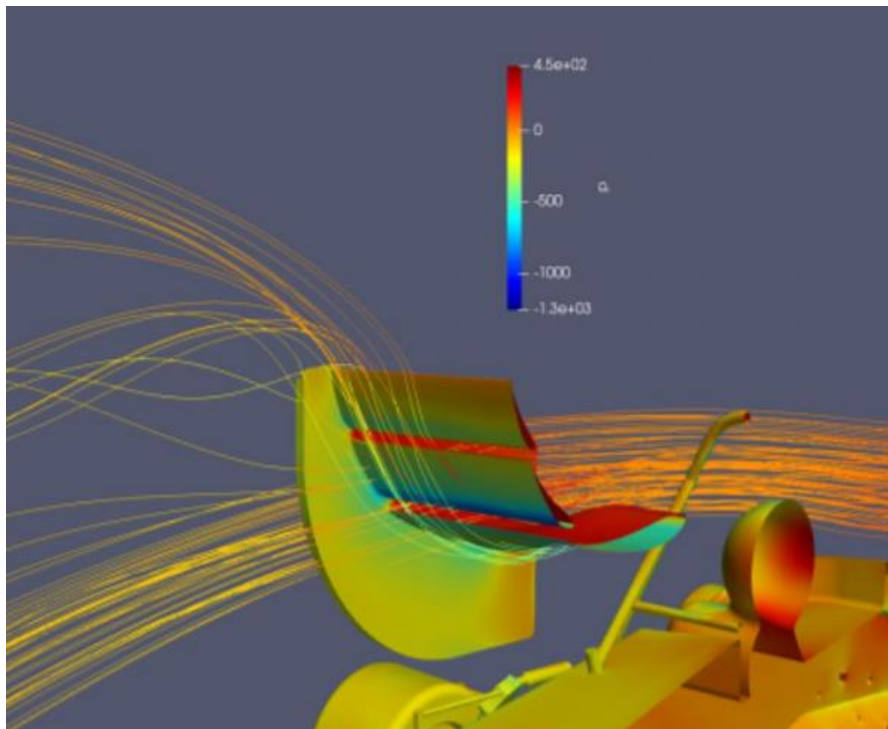
**Slika 20. Prikaz polja brzina po plohi presjeka i polja tlaka po prednjem krilu**

U poglavlju o razvoju stražnjeg krila i u poglavlju o razvoju dodatnih bočnih elemenata prikazani su presjeci na kojem se vidi opstrujavanje aero profila stražnjeg krila. Stoga će u ovom odjeljku fokus biti na prikazivanju rezultata prilikom implementacije sustava DRS-a. U suradnji sa odjelom Dinamika vozila napravljene su simulacije vremena krugova jedne od Formula student staze, gdje je pokazano da se implementacijom i korištenjem sustava smanjenja otpora vožnje na stražnjem krilu poboljšava vrijeme po krugu i do 0,65 s po krugu staze. Slika 21 prikazuje polje tlaka po presjeku središta bolida. Kao što je to vidljivo na gornjem dijelu stražnjeg krila nalazi se polje se polje visokog tlaka (crveno) dok je ispod stražnjeg krila rasprostranjeno polje nižeg tlaka (zeleno) što rezultira generiranjem sile *downforcea* na samim *flapovima* krila.



Slika 21. Prikaz polja tlaka po središnjem presjeku bolida

Slika 22 prikazuje strujnice zraka koje opstrujavaju elemente stražnjeg krila kako bi se dobio dojam o ponašanju struje zraka koja dolazi do stražnjeg krila.



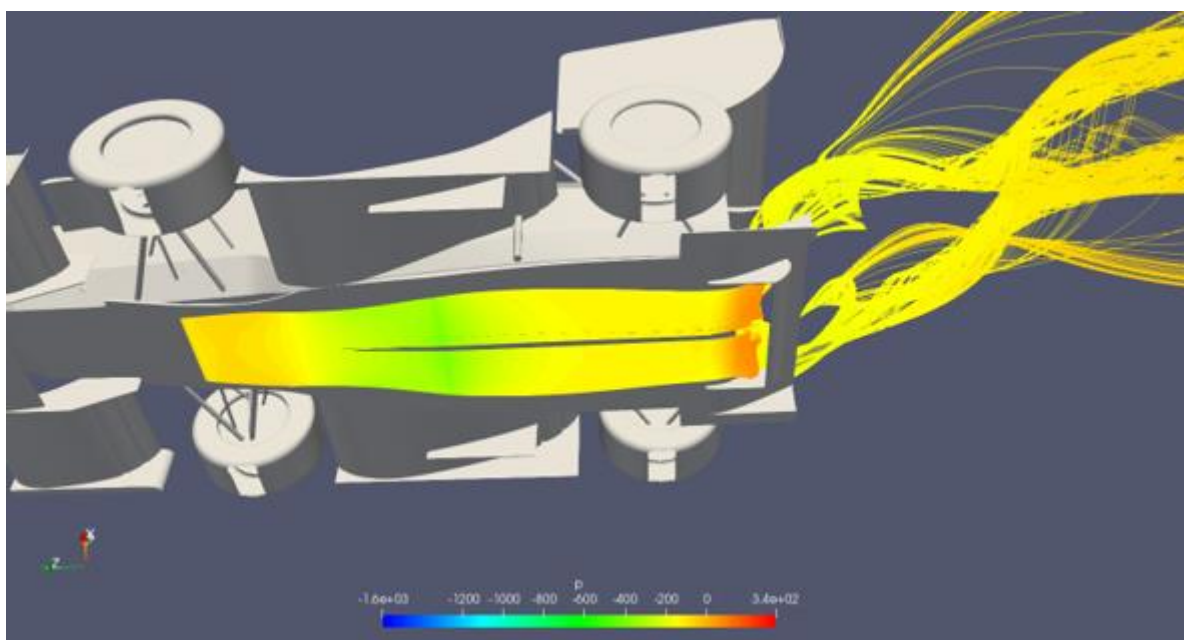
Slika 22. Prikaz strujanja zraka preko elemenata stražnjeg krila

Tablica prikazuje numeričke vrijednosti simulacija implementirane geometrije podnice i difuzora iz koje se vidi da je njihov doprinos poprilično velik u pogledu ukupne pritisne sile. Aerodinamička efikasnost prilično je visoka budući da se radi o elementima sa malom prednjom površinom pa je samim time i sila otpora vožnje mala.

Tablica 5. Prikaz numeričkih vrijednosti simulacije podnice i difuzora

Parametri / brzina		80 km/h		
Element	Površina [m ²]	Sila otpora [N]	Downforce [N]	Aerodinamička efikasnost
Podnica i difuzor	0.1218708	31.5	-386	-12.25396

Slika 23 prikazuje strujanje zraka u samoj podnici i difuzoru te se iz nje jasno može vidjeti prestrujavanje zraka kroz kanal u kojem se nalazi hladnjak za hlađenje invertera i motora.

**Slika 23. Prikaz strujanja zraka kroz podnicu i kanal u difuzoru**

Tablica 6. daje nam uvid u numeričke vrijednosti simulacija komponenti aero paketa u cjelini. Vrijednosti se temelje na CFD simulaciji čitavog bolida sa svim komponentama kako bi bili pokriveni i utjecaji jednih komponenti na druge.

Tablica 6. Prikaz numeričkih vrijednosti za sve komponente aeropaketa

Komponente	Prednje područje (mm ²)	Prednje područje (mm ²)	Aerodinamički potisak (N)	Aerodinamičke sile otpora zraka	Cl (izračunato)	Cd (izračunato)	Efikasnost
Cijelo vozilo	1210000	1.21	-1085	465.66	-3.24	1.39	-2.330935252
Prednje krilo	217082.64	0.21708264	-424	68	- 7.126585378	1.142942938	- 6.235294118
Stražnje krilo	387210.33	0.38721033	-405	183	- 3.81635546	1.724427282	- 2.213114754
Podnica (srednja+stražnji difuzor)	82472.18	0.08247218	-210	20	- 9.290788006	0.884836953	-10.5
Bočno područje (podnica + flap)	226236.4	0.2262364	-212	33.5	- 3.419118161	0.540285181	- 6.328358209
Bočno krilo flap (samo flap)	104365.6	0.1043656	-36	22	- 1.258594579	0.769141132	- 1.636363636
Prednji pneumaci	187187.22	0.18718722	20	-12.586	0.306552526	- 0.245330906	- 1.249547116
Stražnji pneumaci	222216.78	0.22221678	33	-18.64	0.386927397	- 0.306062265	- 1.264211373
Šasija + horn flap	274100	0.2741	113	43.61	0.02384	0.04135	0.576
Podnica (cijela)	121870.8	0.1218708	-386	31.5	-11.55655453	0.943086704	-12.25396825

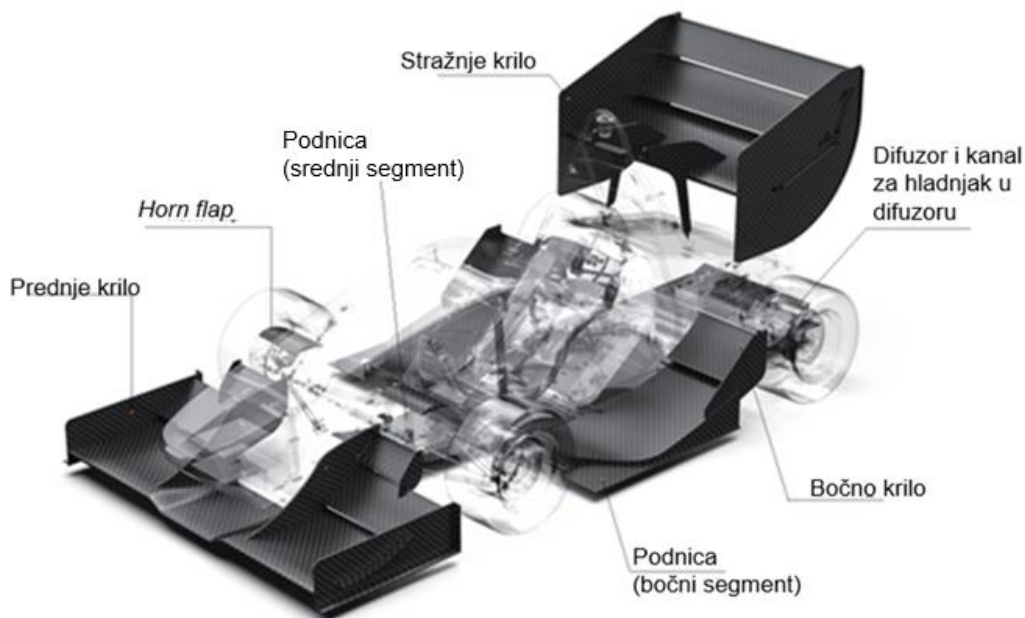
Vidljivo je da kod vožnje brzinom od 80 km/h aero paket generira 1085 N *downforce*-a, 564,7 N sile otpora vožnje što rezultira sa koeficijentom aerodinamičkom učinkovitosti od 2,331. Također, lako se uoči da prednje krilo generira oko 40% *downforce*-a kao i stražnje krilo, no stražnje krilo pritom generira puno veću silu otpora vožnje što je i logično s obzirom na njegovu geometriju i površinu. Uz ovu tablicu, dana je i Tablica koja prikazuje analizu utjecaja visine čitavog bolida, odnosno komponenti aero paketa na njihove performanse. U toj su tablici promatrane komponente koje se nalaze bliže podlozi (prednje krilo, podnica s difuzorom i bočna krila) jer spuštanje ili podizanje bolida ima značajniji utjecaj na performanse tih komponenti te je dan i pregled vrijednosti za čitavi bolid. Može se zaključiti da se spuštanjem komponenti povećava pritisna sila i ukupna aerodinamička učinkovitost do određene granične visine kada ti efekti počinju imati negativan utjecaj.

Tablica 7. Prikaz analize utjecaja visine bolida na performanse komponenti aero paketa

Utjecaj promjene visine voznje (45 mm referenca)	25 mm		10 mm		-10 mm		-25 mm	
	Downforce [N]	Sile otpora zraka [N]	Downforce [N]	Sile otpora zraka [N]	Downforce [N]	Sile otpora zraka [N]	Downforce [N]	Sile otpora zraka [N]
Prednje krilo	302.66	60.5	341.48	65.58	424.64	69.32	419.08	68.02
Bočno krilo - cijelo	104.14	33.44	140.18	18.33	190	51.94	178.84	52.88
Podnica - cijela	195.66	6.36	208.7	3.52	208.32	2.62	207.66	5.9
Cijelo vozilo	901.96	431.7	986.84	449.62	1,073.12	460.12	1,052.56	475

3.6. Generalni pregled aero paketa bolida *VulpesR*

Kao što je to spomenuto i na samom početku, aerodinamički paket sastoji se od prednjeg krila, stražnjeg krila, podnice s difuzorom, bočnih krila i dodatnih elemenata. Slika 24 prikazuje čitavi aerodinamički paket montiran na šasiju bolida.

**Slika 24. Prikaz čitavog aero paketa bolida *VulpesR***

Ukupna masa svih komponenti aero paketa bolida *VulpesR* iznosi 7,916 kg, a pri vožnji brzinom od 80 km/h na ravnom pravcu, generira 1085 N *downforce*-a, od čega 52% na prednjoj osovini i 48% te sile na stražnjem dijelu bolida.

4. Šasija

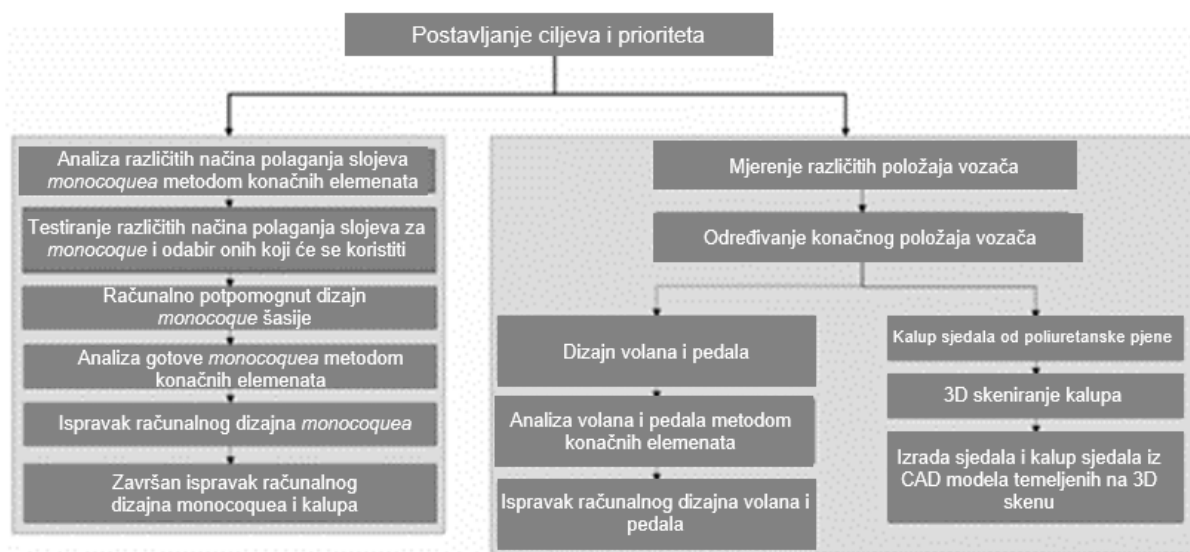
Šasija ima ulogu preuzimanja svih opterećenja, kojima je bolid izložen, te prihvata komponente. Šasija može biti izvedena kao cijevna, ljuskasta ili hibridna. Šasije svih bolida FSB Racing Teama s motorima s unutarnjim izgaranjem izvedene su kao cijevne šasije, odnosno kao prostorne čelične rešetke. Prilikom razvoja svakog pojedinog bolida, masa šasije se smanjivala, a krutost se povećavala zahvaljujući povoljnijem rasporedu cijevi prostorne rešetke i odabiru dimenzija cijevi. S namjerom da se dodatno smanji masa šasije i istovremeno poveća torzijska krutost, za *Vulpes*, odnosno za prvi bolid s električnim pogonom FSB Racing Teama, odlučeno je da će se konstruirati *monocoque* šasija. Ova ista šasija se koristila pri izrađivanju *VulpesRa* (Slika 25).



Slika 25. Prikaz šasije

Glavni ciljevi kod izrade *monocoque* šasije bili su jednostavan dizajn te robusna struktura, ali i prijenos znanja na naredne generacije.

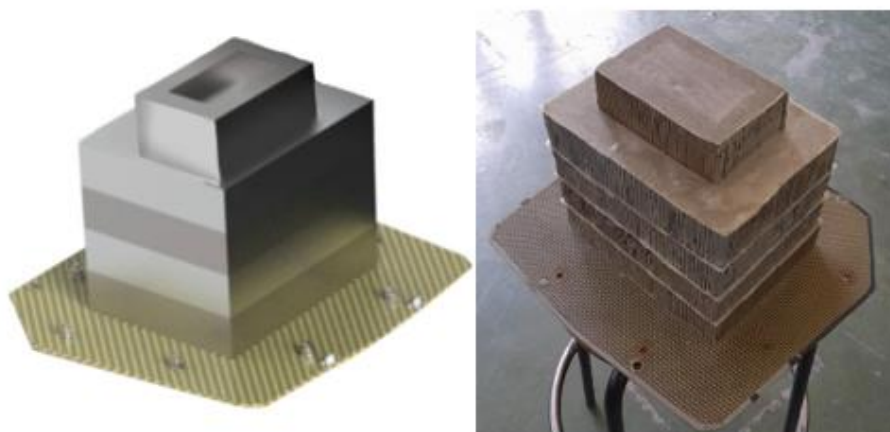
Tijek rada podijeljen je u dva glavna smjera – *monocoque* i ergonomija (Slika 26). Izrada *monocoquea* može se podijeliti na simuliranje *layupa monocoquea* te na testiranje uzoraka kako bi se potvrdila simulacija. Nakon izabranih *layupa* definira se CAD *monocoquea* koji se potom simulira metodom konačnih elemenata te se po njoj prepravlja CAD *monocoquea* i priprema se za izradu kalupa. Kod ergonomije najprije treba napraviti mjerenja u *ergobenchu* kako bi se utvrdio konačan položaj vozača. Zatim se po tom definiranom položaju izradilo kompozitno sjedalo te volan i pedale.



Slika 26. Plan dizajna i izrade

4.1. Udarne zona

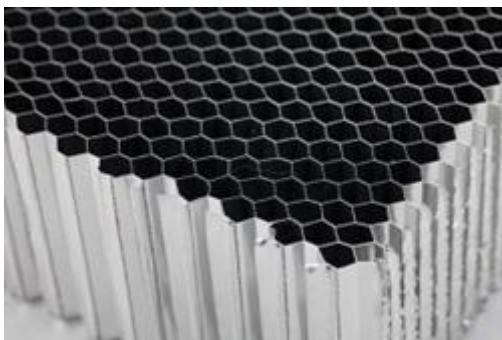
Udarne zona sigurnosni je dio bolida koji štiti vozača u slučaju frontalnog sudara. Sastoji se od ploče udarne zone – *Anti-Intrusion Plate* (AIP) te od uređaja za upijanje energije – *Impact Attenuator* (IA). Prema pravilniku, nalazi se na prednjem kraju šasije gdje ploča udarne zone u slučaju sudara ne smije prodrijeti unutar prednje pregrade strukturalnog dijela šasije. AIP mora biti istih dimenzija kao prednji kraj šasije na kojeg se montira, a IA s prednje strane mora imati zatvorenu strukturu. Na Slika 27. je prikazana udarna zona bolida *VulpesR*.



Slika 27. Udarne zona bolida *VulpesR*

Glavni dio zaslužan za apsorpciju energije je aluminijsko saće od kojeg je izrađen IA. Aluminijsko saće idealan je odabir materijala radi male mase te izrazito povoljnih mehaničkih

svojstava, kao što su savojna čvrstoća i krutost. Da bi se osiguralo da udarna zona upije potrebnu energiju, nekoliko slojeva aluminijskog saća zalijepljeno je jedno na drugo pomoću jednog sloja staklenih vlakana i smole. Također, da bi se osigurala zatvorena struktura, na vrh se postavlja sloj staklenih vlakana i smole. Aluminijsko saće (Slika 28) zalijepljeno je na ploču udarne zone.



Slika 28. Aluminijsko saće

Pravilnik *Formula Student* propisuje fizičko testiranje svih ploča udarne zone koje nisu izrađene od čelika debljine 1,5 mm ili aluminijske debljine 4 mm u svrhu dokazivanja ekvivalencije mehaničkih svojstava. Također, u slučaju alternativnih materijala ploče udarne zone, testiranje udarne zone potrebno je montirati na reprezentativnom uzorku prvih 100 mm šasije. Na već postojećim kalupima izradio se reprezentativni dio šasije prikazan na Slika 29. ispod.



Slika 29. Postava za testiranje udarne zone

Formula Student pravilnik definira sljedeće zahtjeve na udarnu zonu:

- apsorbirana energija mora odgovarati sudaru bolidu od 300 kg brzinom 7 m/s u krutu prepreku
- ukupna upijena energija mora biti minimalno 7350 J
- deceleracija ne prekoračuje 20 g u prosjeku i 40 g u vršnoj vrijednosti

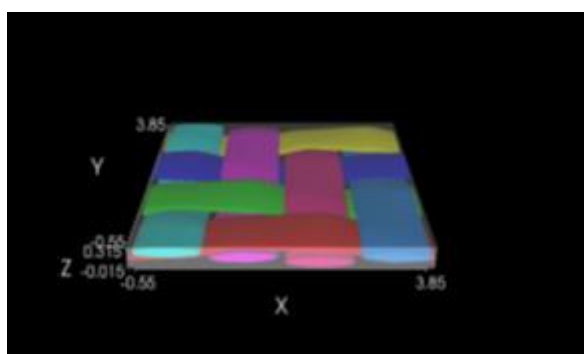
Dogovoreni materijal ploče udarne zone je polimer ojačan isprepletenim ugljičnim i aramidnim vlaknima prikazanim na Slika 30. u nastavku. Ugljična vlakna su lagana te imaju visoku čvrstoću i krutost. Aramidna vlakna imaju nisku kompresijsku čvrstoću pa se ne koriste za

nosive konstrukcije. Imaju relativno visoku vlačnu čvrstoću i puno su žilavija od ugljičnih vlakana. Zbog slabijeg vezanja za polimernu matricu, u kompozitnim materijalima kod udarnog oštećenja dolazi do delaminacije (odvajanja aramidnih vlakana od matrice) pa se koriste općenito za izradu apsorpcijskih sredstava poput vojničkih kaciga i pancirki.

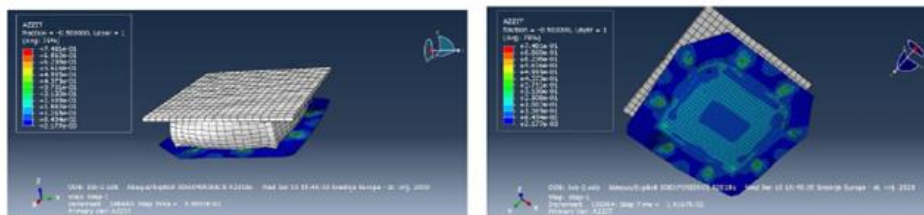


Slika 30. Polimer ojačan isprepletenim ugljičnim i aramidnim vlaknima

Kako bi se odredio potreban broj slojeva i raspored slojeva u laminatu, korištene su dinamičke eksplicitne simulacije. Za određivanje mehaničkih svojstava takvog kompozita, u programu *TexGen* konstruirala su se takva isprepletana ugljično-aramidna vlakna prikazana na Slika 31. Određena je matrica krutosti te čvrstoća takvog laminata. U programu *Abaqus/Explicit* zatim se iterativnim postupkom simulirala ploča udarne zone u sklopu sa uređajem za upijanje energije te reprezentativnim idealno krutim utegom mase 300 kg prikazana na Slika 32. Odabrana je ploča sa ukupno 10 slojeva rasporeda $[0^\circ, 45^\circ, \dots]$ i faktorom sigurnosti $S = 1,34$.



Slika 31. Konstruiranje isprepletenih ugljičnih i aramidnih vlakana u programu TexGen



Slika 32. Računalna simulacija udarne zone

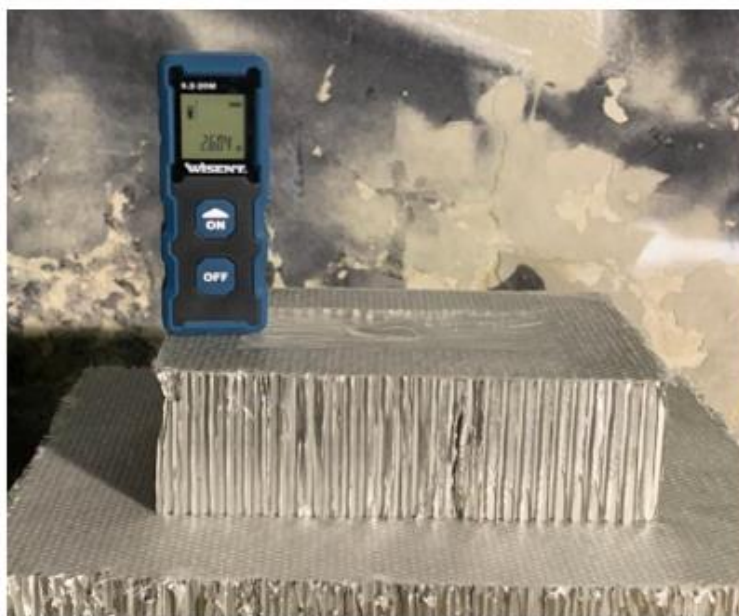
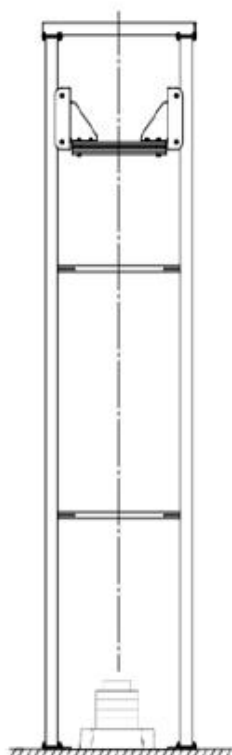
Na uteg mase 300 kg postavljen je senzor akceleracije *Dytran 7500AX*. Potrebna visina utega prije pada određena je kao:

$$E_k = E_p \quad (1)$$

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = m \cdot g \cdot h \quad (2)$$

$$h = \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{7^2}{2 \cdot 9,81} = 2,497 \approx 2,5 \text{ m} \quad (3)$$

Zbog pojavljivanja trenja između vodilica naprave i utega, odabrana visina utega je 2,6 m.

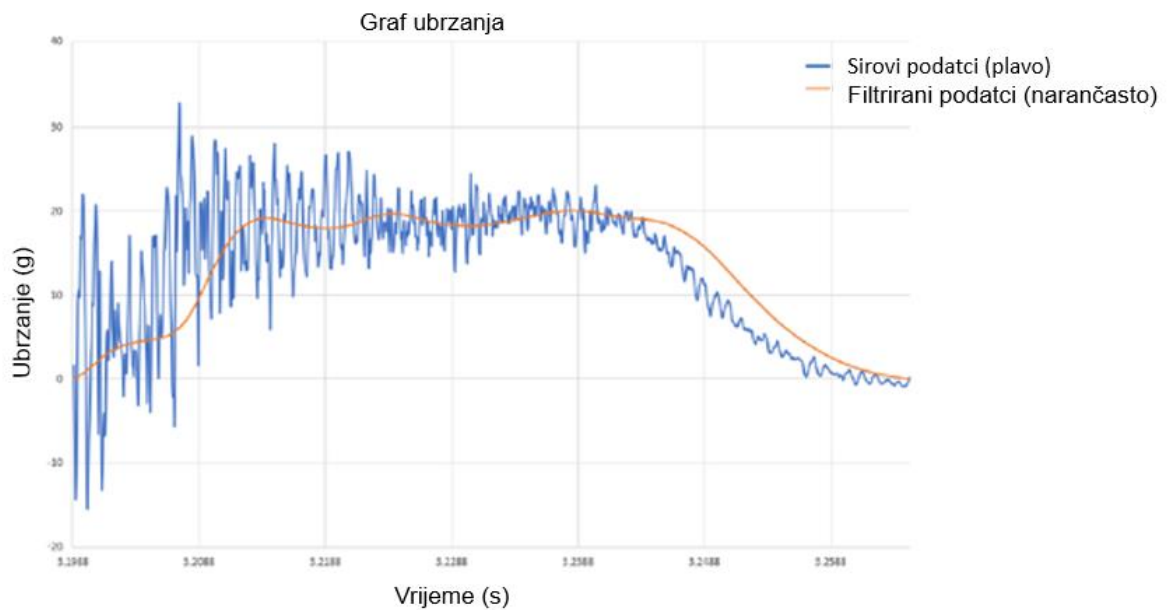


Slika 33. Prikaz testiranja udarne zone te postavljanje visine utega

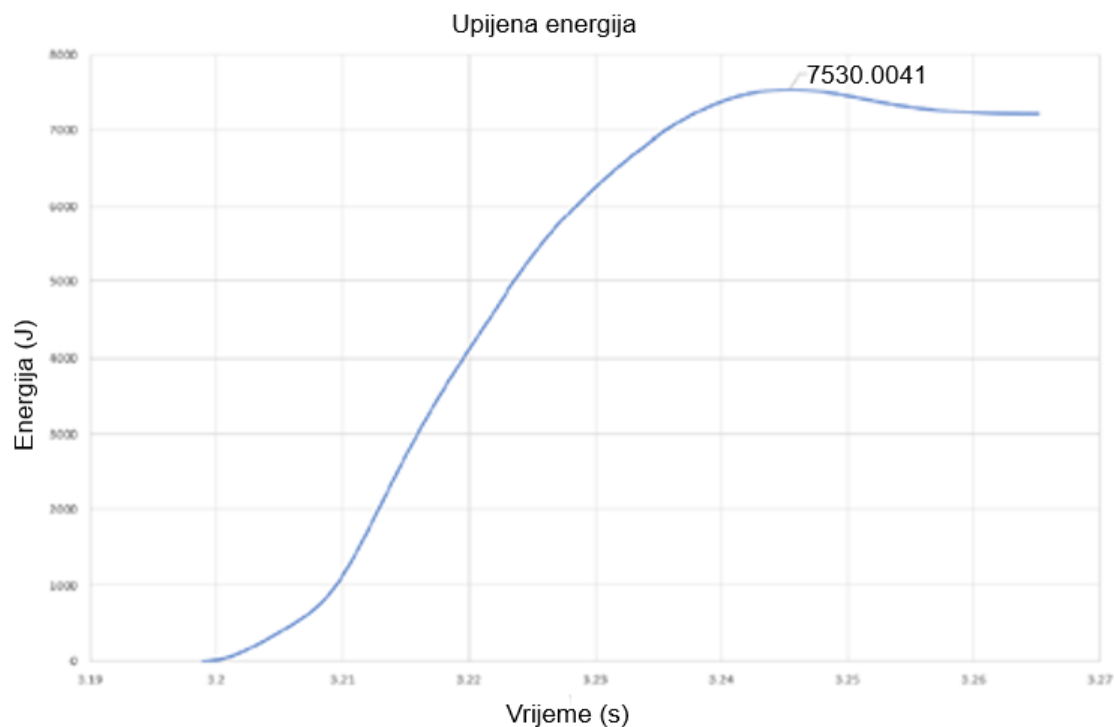


Slika 34. Ploča udarne zone nakon testiranja prikazana bez vidljivih oštećenja

Rezultati testiranja prikazani na grafovima ispod pokazuju kako su ispunjeni svi zahtjevi pravilnika: ubrzanje ne prelazi 20 g (Slika 35), upijena energija premašuje 7350 J (Slika 36). Također, ploča udarne zone nije pokazala vidljiva oštećenja, vidljivo na Slika 33. i Slika 34.



Slika 35. Prikaz rezultata s testiranja – graf ubrzanja



Slika 36. Prikaz rezultata s testiranja – upijena energija

Usporedba rezultata testiranja kompozitne i čelične ploče udarne zone prikazani su u Tablica 8. Kompozitna ploča pokazuje nižu ukupnu apsorbiranu energiju, ali je pritom manje mase. Smanjenje mase iznosi ~1 kg.

Tablica 8. Usporedba rezultata testiranja kompozitne i čelične ploče udarne zone

	Kompozitna ploča	Čelična ploča
Maksimalna deceleracija [g]	20,04	14,78
Srednja deceleracija [g]	13,03	9,52
Maksimalna ostvarena sila [N]	58943	49730
Apsorbirana energija [J]	7530	8486
Plastična deformacija ploče [mm]	0	10
Masa [kg]	0,83	1,85

4.2. Ergonomija

Zadatak ergonomije je osigurati udobno okruženje za vozača i povezanost s bolidom. Najprije je potrebno odrediti poziciju sjedenja, poziciju pedala i upravljača, prihvata pojaseva itd. Budući da pod ergonomiju spada sve što vozač dotiče u vožnji, nakon određivanja položaja slijedi određivanje oblika sjedala, upravljača i pedala.

Oblik i dimenzije prednjeg dijela šasije, onog u kojemu sjedi vozač, uvelike definira ergonomija vozača. Preuzevši šasiju *Vulpesa*, ergonomija bolida *VulpesR* se nije mogla mnogo mijenjati, no neke promjene ipak su napravljene.

4.3. Vozačko sjedalo

U bolidu *Vulpes* sjedalo nije postojalo. Vozač se naslanjao na vatrootpornu stijenkicu uz male umetke od ekspanzirajuće poliuretanske (dalje: PU) pjene s lijeve i desne strane kukova. Kako bi vozač što bolje osjećao gibanje bolida, sjedalo treba biti napravljeno prema njegovim dimenzijama. Tijesno sjedalo poboljšava udobnost vozača pri vožnji i bolju koncentraciju jer ga čvrsto drži na mjestu, stoga je odlučeno izraditi ergonomski oblikovano vozačko sjedalo.

Sjedalo vozača treba biti udobno, lagano i kruto. Prema tome, odabran je materijal izrade sjedala – kompozit s korama od ugljičnih vlakana s jezgrom od *Rohacell* pjene. Svaka kora sastojala se od 3 sloja ugljičnih vlakana, gdje je debljina jezgre 3 mm, tako da je ukupna debljina sjedala između 5,5 – 6 mm.

Proces izrade sjedala se sastojao od:

- određivanja oblika sjedala
- 3D skeniranja dobivenog oblika
- izrade modela sjedala prema 3D skenu
- izrade modela kalupa
- glodanja kalupa
- pripreme kalupa za laminiranje
- laminiranja
- obrade dobivenog sjedala.

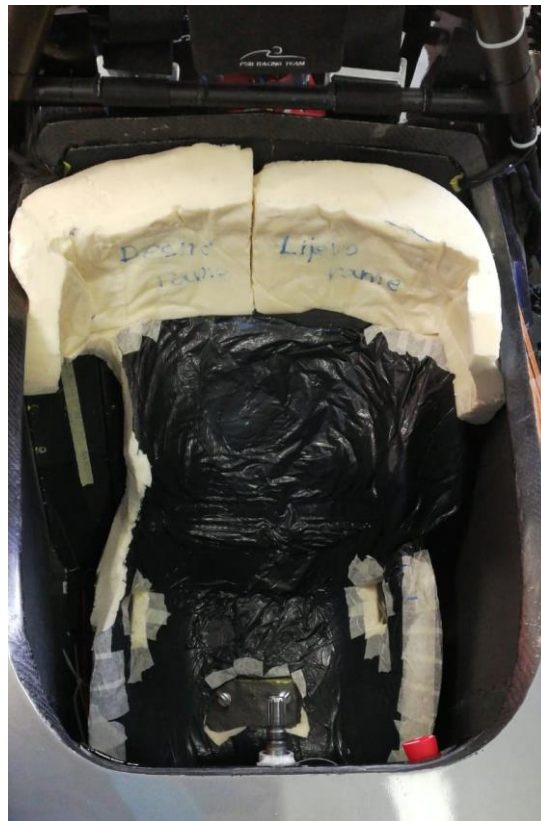
Sjedalo vozača u bolidu *VulpesR* oblikovano je prema obliku tijela najvećeg vozača, dok su za ostale vozače korišteni umetci od pjene. Složeni proces oblikovanja započet je korištenjem ekspanzirajuće PU pjene i postojećeg bolida *Vulpes*. Odabrani vozač sjeo je na veliku vreću u bolid u punoj vozačkoj opremi. Prethodno je namješten položaj pedala prema njemu kako bi mogao osloniti noge i primiti volan točno onako kako bi to činio tijekom vožnje. Također, u bolid su smještene drvene daščice koje su ograničile prostor za ekspanziranje pjene, kako bi se smanjila potrošnja materijala. Manja količina dvokomponentne ekspanzirajuće PU pjene zamiješana je u posudi prema uputama proizvođača, pritom pazeći na dozvoljeno vrijeme miješanja i vrijeme do početka umrežavanja dvaju komponenata PU pjene. Odmah nakon miješanja, dobivena gusta tekućina ulivena je u vreću ispod vozača, koji se pridigao kako bi tekućina doprla u sve bitne dijelove vreće ispod i oko vozača. Vozač se zatim namjestio u položaj sjedenja koji se želi postići, te prima volan i prislanja noge na pedale. U narednim

minutama, dvije komponente PU pjene umrežavaju oslobađajući toplinu i prelaze iz guste tekućine u krutu pjenu. Zatim vozač izlazi iz bolida, provjerava se dobivena ekspanzirana pjena i priprema se sljedeće ulijevanje pjene dok se ne izrade svi dijelovi otiska vozača od PU pjene, koji svojim oblikom odgovaraju budućem sjedalu. Proces je vidljiv na Slika 37.



Slika 37. Izrada otiska od poliuretanske pjene

S dobivenog otiska od PU pjene odrezani su suvišni dijelovi prema uputama vozača dok je svojim kretnjama simulirao vožnju bolida (okretanje volana, pritiskanje pedala, oslanjanje na bočne strane otiska kao što bi se oslanjao pod utjecajem inercijskih sila u zavojima). Provjereno je postoje li u konačnom otisku mjesta koncentriranog pritiska na tijelo vozača tako da je vozač sjedio 30 minuta u otisku u bolidu, potvrđujući udobnost svih dijelova sjedala.

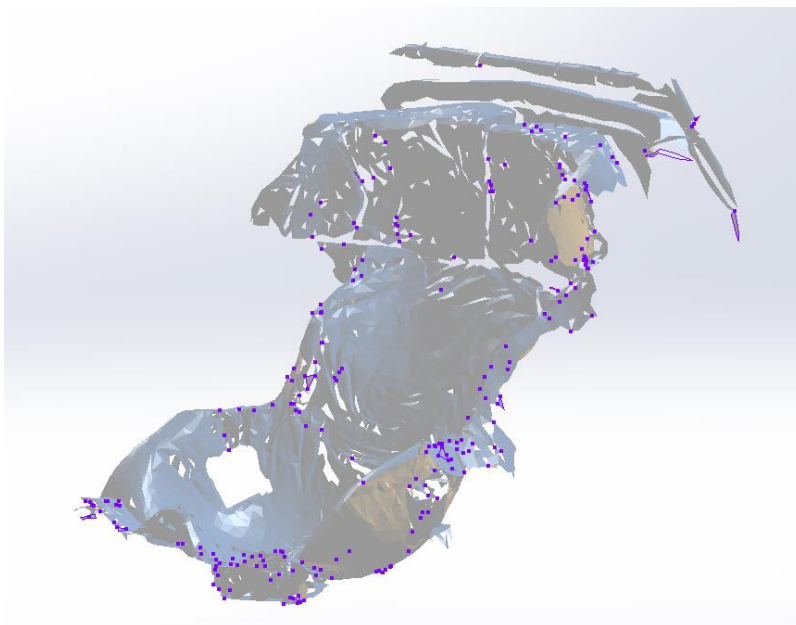


Slika 38. Ekspandirana pjena u kokpitu

Obrađeni je otisak 3D skeniran kako bi se mogao izraditi model sjedala za smještanje u 3D model sklopa auta i kalupa za izradu sjedala. Proces je vidljiv na Slika 39., a rezultat na Slika 40.

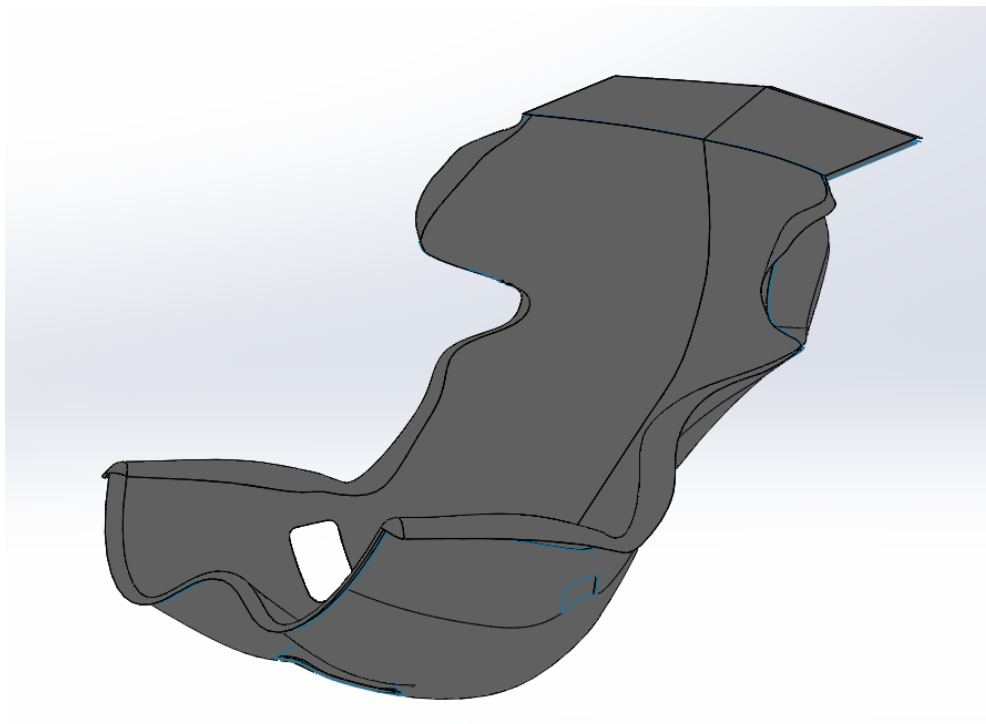


Slika 39. 3D skeniranje sjedala



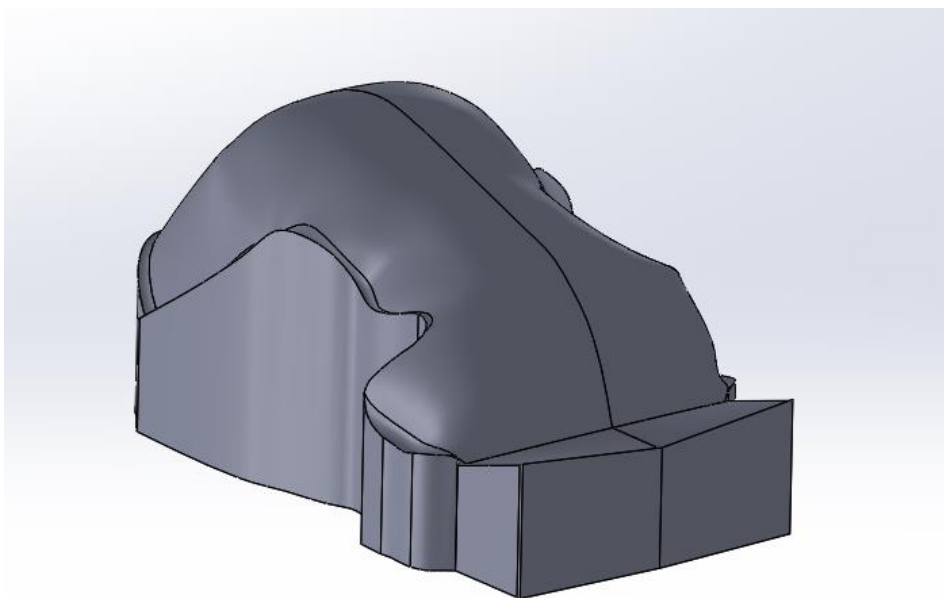
Slika 40. Pojednostavljeni rezultat skeniranja

Nakon pojednostavljenja skena uslijedilo je modeliranje površine sjedala. Površina je dobivena tako da se kroz razne presjeke ovog skena provukao velik broj krivulja. Konačan model je vidljiv na Slika 41.



Slika 41. Model sjedala

Iz dobivenog modela sjedala vrlo je lako dobiti model kalupa, vidljiv na Slika 42. Nakon modeliranja kalupa slijedi glodanje kalupa iz bloka PU pjene Kuka robotskom rukom. Proces je vidljiv na Slika 43.



Slika 42. Model kalupa sjedala



Slika 43. Glodanje kalupa sjedala

Priprema kalupa za laminiranje sastojala se od naizmjeničnog nanošenja slojeva špric-kita i brušenja nepravilnosti dok se nije postigla zadovoljavajuća površina kalupa za laminiranje. Bilo je izrazito bitno dobiti vrlo ravnu površinu. Ako kalup nema vrhunsku površinu, onda niti proizvod izrađen prema njemu ne može imati zadovoljavajuću kvalitetu površine. Površina kalupa nakon obrade je vidljiva na Slika 44.



Slika 44. Površina kalupa nakon obrade

Sjedalo je izrađeno od ugljičnih vlakana mokrim laminiranjem na kalup koji je prethodno premazan s nekoliko slojeva odvajača i voska kako bi se sjedalo moglo odvojiti od kalupa.



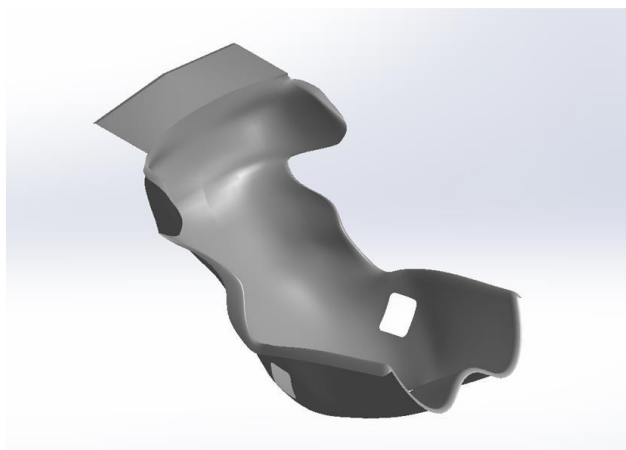
Slika 45. Priprema ugljičnih vlakana

Zbog kompleksnosti geometrije, prvo se laminirala unutarnja kora, zatim se vakuumirala kako bi smola umrežila. Nakon toga pripremljeni su komadi *Rohacella* koji dolaze između unutarnje i vanjske kore ugljičnih vlakana. Komade *Rohacella* trebalo je zagrijavati i savijati kako bi postigli odgovarajuću zakrivljenost i priljubili se uz sjedalo. Nakon pripreme *Rohacella* izlaminirana je vanjska kora, koju također čine 3 sloja ugljičnih vlakana.



Slika 46. Laminiranje sjedala

Nakon laminiranja, odrezani su viškovi s rubova sjedala i odrezane su rupe za prolaz pojaseva vozača kroz sjedalo. Rubovi su zatim brušeni i oblijepljeni ljepljivom trakom da se odijelo vozača ne ošteti prilikom ulaska i izlaska iz bolida. CAD model konačnog sjedala je vidljiv na Slika 47., a konačno proizvedeno sjedalo na Slika 48.



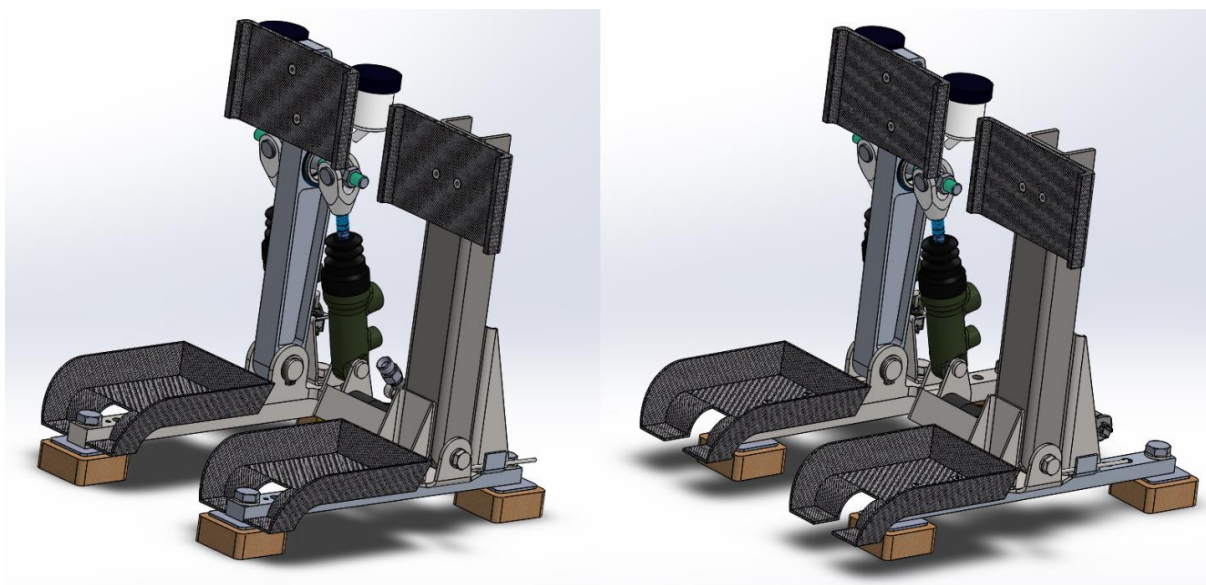
Slika 47. CAD model sjedala



Slika 48. Završeno sjedalo

4.4. Sklop pedala

Sklop pedala sredstvo je kojim vozač upravlja uzdužnom dinamikom bolid. Budući da bolid ima električni pogon, za to su potrebne dvije pedale – pedala gasa i kočnice. Na Slika 49. je vidljiv sklop pedala *Vulpesa* u položaju najbliže vozaču (desno) i najdalje od vozača (lijevo).



Slika 49. Pedale Vulpesa u krajnjim položajima

Kako bi vozač mogao neometano koristiti pedale, potrebno je da budu postavljene na položaju koji mu odgovara. Vozačevo sjedalo je nepomično kod većine Formula Student bolida, pa tako i u *VulpesRu*, primarno zato što bi to inače uzrokovalo značajno povećanje mase. Stoga je za različite vozače potrebno postaviti pedale na različitu udaljenost od sjedala. Sklop pedala *Vulpesa* je imao jednu vodilicu po pedali koja je omogućavala raspon položaja pedala od 120 mm, što je zadržano za novi sklop pedala.

Jedan od zahtjeva na sklop pedala je i brza mogućnost promjene položaja pedala. Tijekom dinamičke discipline *endurance*, potrebno je obaviti zamjenu vozača i potrebne prilagodbe na bolidu u 3 minute kako se timu ne bi dodijelilo kazneno vrijeme na rezultat utrke. Pedale *Vulpes-a* bile spajale su se za vodilice vijcima, a prema pravilu *T 10.2.1* pravilnika *Formula Student* vijci pedale kočnice spadaju u kritične spojeve [1]. To znači da moraju biti osigurani od odvrtanja. Konstrukcija sklopa pedala *Vulpes-a* bila je takva da je jedina moguća metoda osiguranja od odvrtanja bila osiguranje žicom, za što je vještom mehaničaru potrebno oko 10 minuta za 2 vijka na pedali kočnice.

Kako bi se omogućila sigurna promjena položaja pedala u tri minute, učinjene su značajne promjene na sklopu pedala. Za pričvršćenje pedala gasa i kočnice za njihove vodilice vijke su zamijenili brzootpuštajući zatiki, kakvi se mogu vidjeti na Slika 50. Držanjem plastičnog izdanka napne se opruga smještena u tijelu zatika, te se kuglicama na vrhu zatika omogućava ulazak u tijelo zatika do mjere da su potpuno unutar valjkastog tijela zatika. Otpuštanjem izdanka, opruge vrte kuglice na vrhu zatika u izbočeni položaj, čime se osigurava da zatik ne ispadne.



Slika 50. Brzootpuštajući zatik korišten za pričvršćivanje pedala za vodilice

Kako bi korištenje takvih zatika bilo moguće, rupe u vodilicama za pričvršćivanje pedala više nisu postavljene okomito, već vodoravno, vidljivo ispod na Slika 51.

Pri promjeni položaja svake pedale na *Vulpes-u*, bilo je potrebno zasebno skinuti oslonac za petu vozača da bi se moglo pristupiti vijcima za podešavanje položaja pedale. To su dodatna

dva vijka koji troše vrijeme prilikom izmjene vozača. Stoga su na pedalama *VulpesRa* oslonci za pete zalijepljeni za pedale i pomiču se zajedno s njima.

Cijeli sklop je u potpunosti rekonstruiran te su čvrstoća i krutost komponenata provjerene metodom konačnih elemenata kako bi se smanjila masa sklopa pedala. Težilo se smanjenju broja čeličnih komponenata na minimum. Umjesto njih, koristili su se aluminij 7075-T6 i polimer ojačan ugljičnim vlaknima (CFRP). Ostvarena masa sklopa pedale kočnice zajedno s vodilicom iznosi 1800 g, a sklopa pedale gasa 380 g.

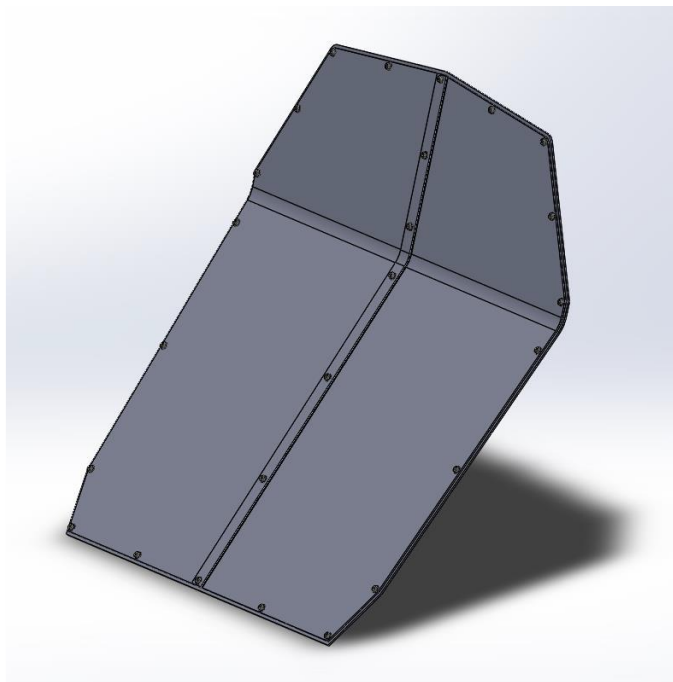
Uzevši u obzir omogućeni raspon za podešavanje položaja pedala i zahtjeve poput onog da prema pravilu *T 6.1.8* iz *Formula Student* pravilnika pedala kočnice mora izdržati 2000 N potisne sile vozača [1], to su iznimno niske vrijednosti.



Slika 51. Sklop pedala bolida *VulpesR* – pedala kočnice (lijevo) i gasa (desno)

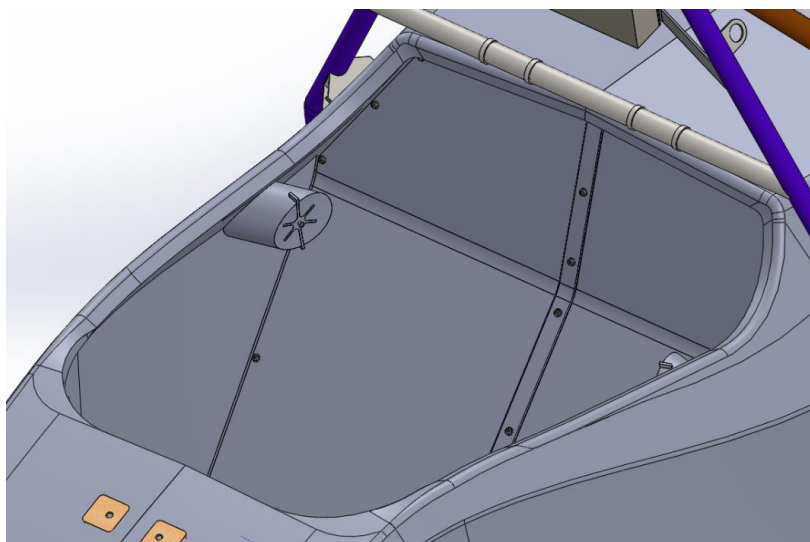
4.5. Vatrootporna stijenka

Da bi se vozač zaštitio od izlaganja dijelovima bolida koji se nalaze na temperaturama višim od 60 °C, koristi se izolacija u obliku vatrootporne stijenke (engl. *firewall*). Stijenka mora odjeljivati vozača od bilo kojeg dijela bolida koji drže hidrauličku tekućinu, zapaljive kapljevine te baterije, ali i od ostalih dijelova električnog pogona.



Slika 52. CAD model vatrootporne stijenke

Stijenka mora biti izrađena od čvrstog, neprobojnog, vatrootpornog materijala koji mora biti čvrsto montiran i zabrtvljen. Nalazi se iza sjedala, koje se na njega naslanja, i odvaja vozača od stražnjeg dijela bolida u kojem se nalazi baterija. Prema pravilniku, izrađen je od aluminijskog lima debljine 0,5 mm usmjerenog prema dijelu gdje se nalaze zapaljive komponente. Na aluminij je zalaminiran sloj aramidnih vlakana u kombinaciji s vatrootpornom smolom. Kevlar, odnosno aramid, je otporan na visoku temperaturu te je električni izolator.



Slika 53. Vatrootporna stijenka pozicionirana u CAD modelu šasije

Pravilnik zahtijeva da stijenka pokriva svaki prostor između zapaljivih komponenata i površine 100 mm iznad donjeg dijela kacige kod najvišeg vozača, stoga je tu svrhu izrađena dodatna

vatrootporna stijenka koja se nalazi iza glavnog obruča (engl. *main hoop*) te ispod vozačevog oslonca za glavu.

4.6. Mjerenje torzijske krutosti

Torzijska krutost šasije izmjerena je pomoću naprave pričvršćene za prednji i stražnji ovjes. Budući da se moralo osigurati da ne postoji pomak osim onoga induciranog mjerenjem, opruge i ublaživači sila su zamijenjeni krutim čeličnim šipkama.

Mjerenje je zamišljeno kao kvazi-statičko mjerenje, pri čemu se moment uvijanja šasije aplicira preko naprave, a dobiva se utegom poznate mase. Svaki uteg ima 27,5 kg te se uzima da je promjena kraka djelovanja težine radi zakretanja glavne grede naprave zanemariva. Za duljina kraka težišta utega (k) uzeto je 1112 mm.

Proces mjerenja naveden je u Tablica 9.

Tablica 9. Plan mjerenja pri torzijskom opterećenju šasije

Mjerenje br.	Broj utega	Opterećenje	
		[kg]	[Nm]
1	0	0	0
2	1	27,5	300
3	2	55	600
4	3	82,5	900
5	4	110	1200
6	5	137,5	1500
7	6	165	1800
8	5	137,5	1500
9	3	82,5	900
10	1	27,5	300

Prvi korak predstavlja referentno snimanje šasije, dok drugi korak predstavlja snimanje pomaka pri opterećenju šasije jednim utegom te ujedno služi za poništavanje svih zračnosti u sustavu. Pri mjerenju će biti promatrani pomaci i pri rastućem i padajućem opterećenju.

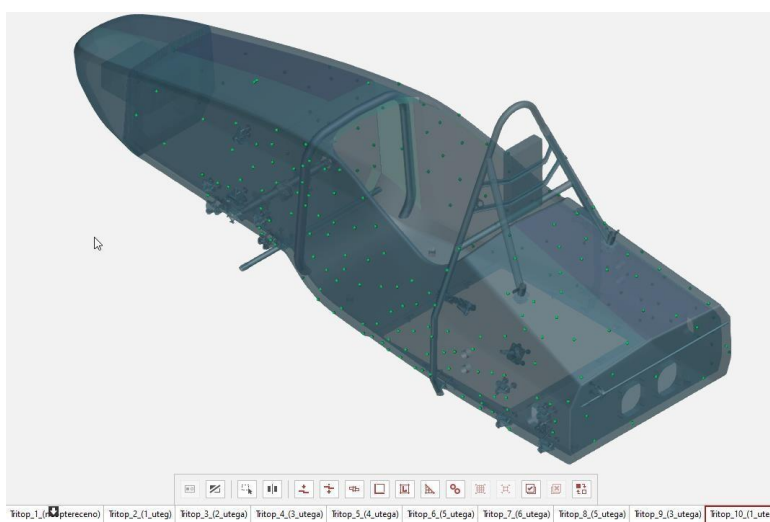
Nakon kalibracijskog snimanja, kreće snimanje bolida sa svih strana i to u svakom položaju s tri različite visine, odnosno iz normalne perspektive, žablje perspektive te ptičje perspektive. Kada se obavi potpuno snimanje bolida, fotografije se provjeravaju u programu te se prije

nastavka provjerava treba li ponoviti mjerenje. Nakon završetka snimanja svih koraka iz prethodno navedene tablice, slijedi obrada fotografija te analiza rezultata.



Slika 54. Ispitni postav za mjerenje torzijske krutosti šasije

Dobiveni rezultati uvedeni su u CAD model šasije. Točke na stražnjem dijelu šasije su valjane točke (pojavljuju se u svim mjerenjima) te se nalaze u području oko prihvata stražnjeg ovjesa preko kojeg je šasija pričvršćena za okolinu za vrijeme ispitivanja. Pomoću tih točaka napraviti će se kompenzacija pomaka krutog tijela (engl. *rigid body movement compensation*, dalje: RBMC). Time se pomaci stražnjeg dijela fiksiraju, dok se svi ostali pomaci prikazuju relativno na te točke na stražnjem dijelu šasije, što odgovara stvarnom ispitivanju. Nakon toga možemo generirati polje vektora pomaka zajedno sa komponentama vektora u sva tri glavna smjera.



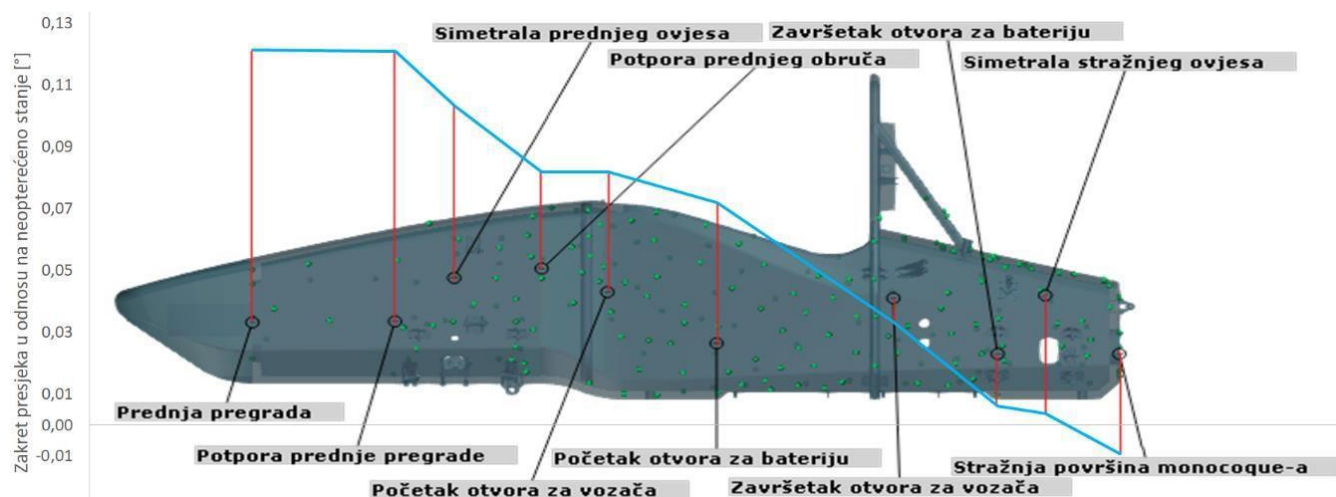
Slika 55. Referentne točke u CAD modelu

Torzijsku krutost šasije računamo preko zakreta prednje pregrade jer je ona neopterećena te se može slobodno zakretati, i to formulom:

$$M_t = D * \varphi$$

gdje je M_t moment torzije, D torzijska krutost, a φ zakret promatranog dijela.

Slika 56 prikazuje raspodjelu zakreta (relativno prema položaju šasije nakon opterećenja jednim utegom) po duljini šasije u slučaju maksimalnog opterećenja.



Slika 56. Raspodjela zakreta po presjecima duž šasije pri punom opterećenju

Numerička simulacija šasije provedena je metodom konačnih elemenata u odgovarajućem programu. Analiza modela analogna je eksperimentalnom mjerenju, ali je u simulaciji moguće koristiti apsolutno krute elemente.

Model je učvršćen na analogan način ispitivanju, tj. fiksirane su stražnje glavčine u prostoru. Na taj način se osigurava jednak apsolutni pomak lijeve i desne prednje glavčine. Sila se primjenjuje izravno na jednu od glavčina te je preračunata kako bi dala moment jednak maksimalnom momentu korištenom pri ispitivanju.

Simulacija je provedena koristeći tetraedarske elemente drugog reda, te je napravljena konvergencija rezultata koristeći četiri različite razine gustoće elemenata:

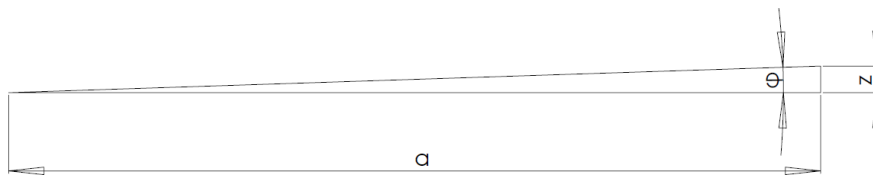
- 1 600 000 elemenata
- 2 600 000 elemenata
- 3 200 000 elemenata
- 4 400 000 elemenata

Kako je u simulaciji ovjes predstavljen apsolutno krutim elementima, zakret je moguće promatrati izravno na točkama koje predstavljaju središte prednjih glavčina. Pomaci prednjih glavčina prikazani su u Tablica 10.

Tablica 10. Pomaci prednjih glavčina

Broj elemenata	Vertikalni pomak točke glavčine, z [mm]	Torzijska krutost modela, D [Nm]	Greška u odnosu na vrijednost dobivenu ispitivanjem
1600000	1,58	12687,74	1,50%
2600000	1,49	13433,45	7,47%
3200000	1,47	13640,42	9,12%
4400000	1,44	13914,15	11,31%

Pri određivanju kuta zakreta šasije prilikom numeričke analize je korišten trigonometrijski princip opisan na Slika 57. gdje je a udaljenost točke središta prednje glavčine od ravnine simetrije auta, z vertikalni pomak središta prednje glavčine, a φ zakret šasije.

**Slika 57. Trigonometrijski princip korišten pri određivanju kuta zakreta šasije**

Kako su vertikalni pomaci točke središta glavčine vrlo mali u odnosu na udaljenost glavčine do ravnine simetrije, te su pomaci te iste točke u drugim smjerovima zanemarivi, može se pretpostaviti gibanje točke u samo vertikalnom smjeru. Tada prema Slika 57. slijedi jednačba za određivanje kuta zakreta:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{z}{a}$$

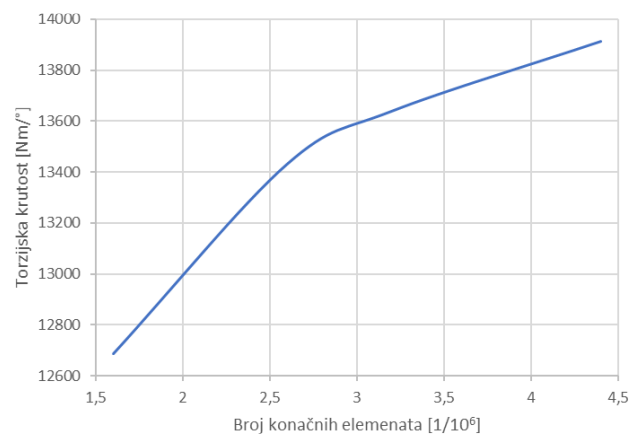
gdje je φ kut zakreta šasije pri torzijskom opterećenju, z pomak središta prednje glavčine u vertikalnom smjeru pri torzijskom opterećenju šasije, a ($= 637,17 \text{ mm}$) poprečna udaljenost točke središta glavčine od ravnine simetrije bolida.

Uvrštavanjem vrijednosti dobiva se kut zakreta šasije pomoću kojeg se računa torzijska krutost šasije koristeći jednačbu:

$$D = \frac{M_t}{\varphi}$$

Pri tome se uzima moment torzije $M_t = 1800 \text{ Nm}$.

Na Slika 58. se može vidjeti dijagram konvergencije rezultata. Prema dijagramu se vidi da nije došlo do potpune konvergencije, ali su rezultati zadovoljavajući u odnosu na rezultate dobivene mjerenjem. Potpuna konvergencija nije napravljena jer analiza tako guste mreže elemenata zahtijeva puno vremena i računalnih resursa.



Slika 58. Konvergencija rezultata torzijske krutosti

5. Upravljački sustavi i dinamika vozila

5.1. Ciljevi

Cilj je upravljačkih sustava pokušati doseći maksimalni mehanički potencijal vozila i vozača, dok je cilj dinamike vozila električnog bolida *VulpesR* unaprijediti postojeće sustave ovjesa, prijenosa snage i aerodinamike sa strane performansi i upravljivosti vozila. Ovjes prethodnog vozila na kojem se bazira *VulpesR* sastoji se od četvrtinskih ovjesa, s podesivim opružnim karakteristikama, podesivim kinematičkim značajkama i statičke visine bolida.

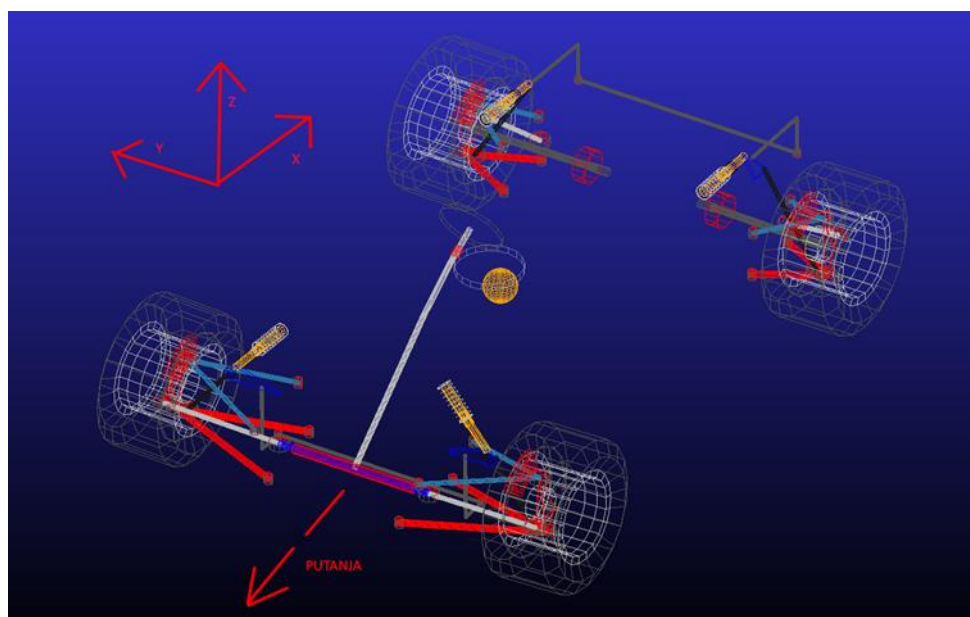
S ciljem zadržavanja upravljivosti i smanjenja mase ovjesa razmatrane su sljedeće promjene:

- Uklanjanje prednjeg stabilizatora
- Promjena širine guma
- Pomicanje virtualnog središta aerodinamičkog potiska i otpora zraka

Također provedena je ponovno analiza opterećenja s ciljem poboljšanja konstrukcijskog rješenja ovjesa, i analiza ubrzanja vozila s ciljem postizanja boljih uzdužnih performansi.

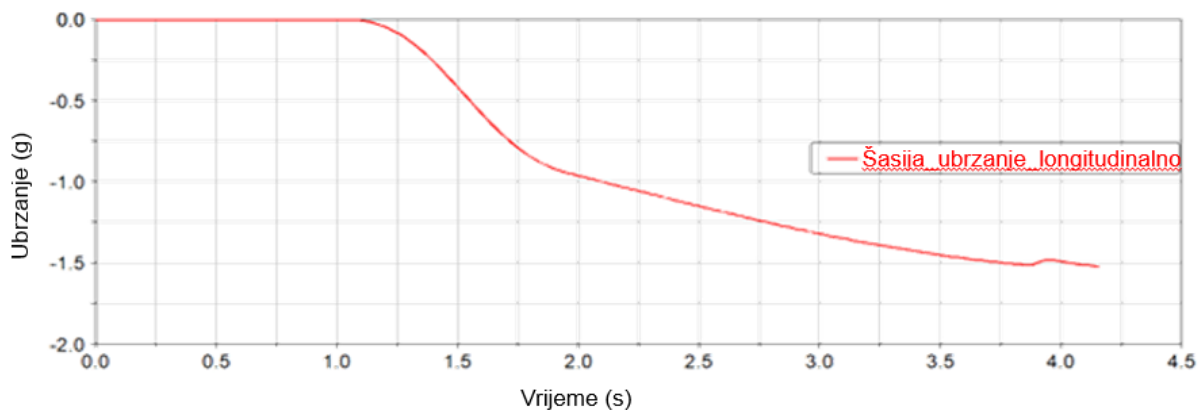
5.2. Analiza opterećenja za ovjes

S ciljem unaprjeđenja konstrukcije ovjesa i uporabe lakših materijala (npr. vilice ovjesa od CFRP cijevi) provedena je analiza opterećenja u simulacijskom alatu za dinamiku više tijela (engl. *multibody dynamics*, dalje: MBD) Adams Car. Na Slika 59. je prikazan model bolida *VulpesR* u alatu Adams Car.



Slika 59. Model bolida *VulpesR* u Adams Caru

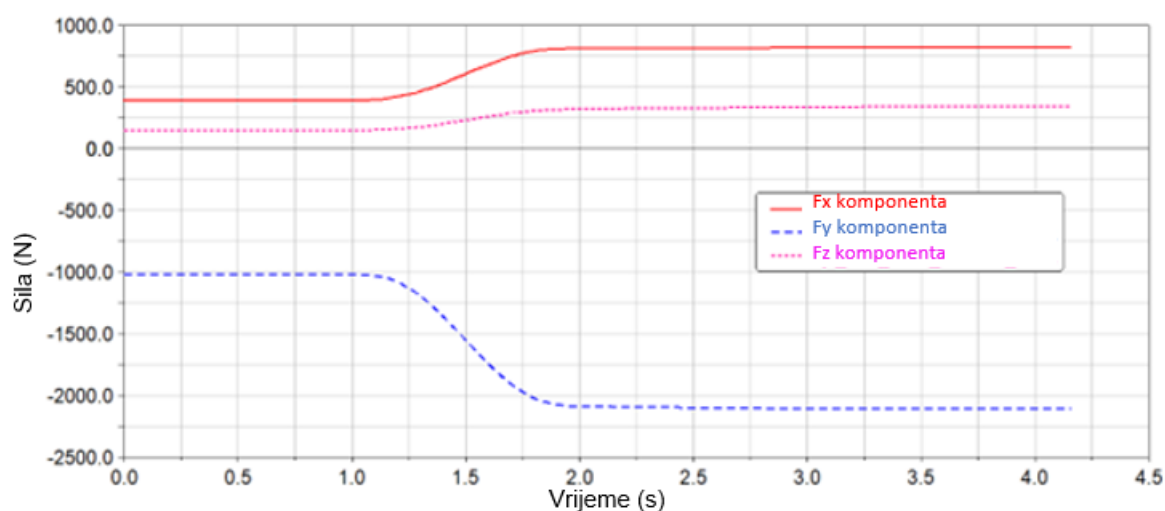
Provedene su standardne procedure koje predstavljaju stvarne uvjete vožnje s natjecanja poput dinamičke discipline *Acceleration* i CRC (engl. *constant radius cornering*), manevar koji simulira disciplinu *Skidpad*. Simulirane su i izbočine (engl. *bump*) za faktor sigurnosti. Iako nema izražene vertikalne dinamike na stazama *Formula Student* natjecanja, mogu biti prisutna oštećenja, rupe, grbe, i sl.



Slika 60. Profil usporenja procedura kočenja do potpunog zaustavljanja

Prethodna slika prikazuje primjer simulacije usporenja vozila unutar alata Adams Car. Na temelju ove i drugih procedura dobivene su sile u zglobovima mehanizma ovjesa. Adams Car je, kao što je već naglašeno, MBD alat, odnosno program koji omogućava slaganje stvarnog mehanizma preko krutih elemenata, zglobova i *bushinga* (zglobova s podesivom krutošću). *Bushinzi* su korišteni da simuliraju sferne ležajeve, budući da se mogu definirati velike krutosti koje su sukladne ponašanju kugle ležaja u kućištu tijekom pomaka.

Nakon definiranja vozila provedene su analize sila.



Slika 61. Komponente opterećenja na ležaj (*bushing* u programu) prednjeg donjeg prihvata vilice na šasiju

Gornja slika (Slika 61) prikazuje primjer komponenti sila u jednom takvom zglobu pri proceduri kočenja. Maksimalna opterećenja su potom uzeta i korištenja za dimenzioniranje ovjesa i izbor lakše konstrukcije. Drugi dijelovi konstrukcije poput sklopa kotača mogu se preračunati preko opterećenja direktno na kontaktnoj površini između kotača i asfalta. U Tablica 11. navedena su spomenuta opterećenja za sve procedure.

Tablica 11. Opterećenja pri raznim procedurama

	Sila [N]	Kut (2g, desni zavoj)	Ubrzanje (2g)	Kočenje (1,5g)	Izbočina (vert. 2,5g,
Središnja točka gazne površine prednjeg lijevog kotača	X	-340	-8	-2080	-196
	Y	-3344	-71	-42	-780
	Z	1576	771	1245	5308
Središnja točka gazne površine stražnjeg lijevog kotača	X	-82	1412	-169	2464
	Y	-2551	-10	17	244
	Z	1550	1133	736	3782

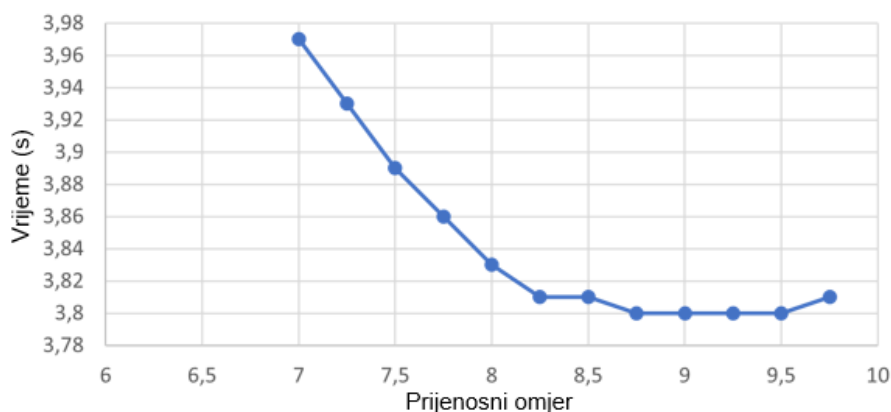
5.3. Analiza ubrzanja i prijenosnog omjera

S ciljem unaprjeđenja procedure ubrzanja i performansi provedena je analiza ubrzanja kojoj je cilj bio optimizirati i odabrati prijenosni omjer prijenosnika. Način definiran za postizanje najboljeg rezultata na ubrzanju je osigurati kontinuirano ubrzanje kroz svih 75.3 m ubrzanja definiranih pravilnikom. Također je dodan dodatni zahtjev da pri početku ubrzanja bude osiguran 5 % viška momenta koji predstavlja sigurnost, a pripada pod djelovanje *Traction control* sustava. Proračun je proveden u Excelu gdje je proračunata maksimalna sila trenja iz lineariziranog modela gume ovisnog o vertikalnom opterećenju te je odabran prijenosni omjer koji osigurava 5 % viška momenta. Rezultati su vidljivi u Tablica 12.

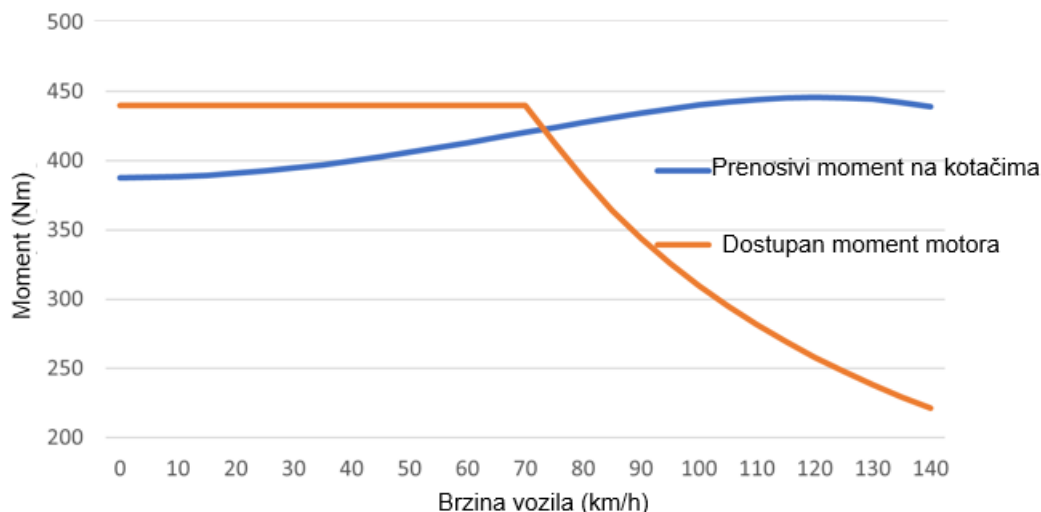
Tablica 12. Proračunata maksimalna sila trenja

Naziv	Vrijednost	Mjerna jedinica
Akceleracija	1.3	g
Radijus opterećenog pneumatika	215	mm
Potrebna sila trakcije po pojedinom stražnjem kotaču	1987.628	N
Dostupna sila trenja po pojedinom stražnjem kotaču	1865.126	N
Potreban moment kotača po pojedinom stražnjem kotaču	401002.1	Nmm
Dostupan moment trenja po pojedinom stražnjem kotaču	378.92	Nm
Višak momenta	408.47	Nm

Kao dodatno ograničenje uzeta je konstrukcija samog prijenosnika s ciljem osiguranja manje mase s obzirom na to da promjena prijenosnog omjera može uzrokovati skok s jednostupanjskog prijenosnika na dvostupanjski te popratno veće mase. Uzevši sve uvjete u obzir, odabran je prijenosni omjer 8. Također je provedena i simulacijska usporedba utjecaja prijenosnog omjera vidljiva na Slika 62.

**Slika 62. Analiza utjecaja prijenosnog omjera na vrijeme u disciplini Acceleration**

Jasno je vidljivo da optimalna rješenja tangiraju s prijenosnim omjerom 8.5 do 9.5 gdje su najmanja vremena ubrzanja. Prijenosni omjer 8 odabran je kao kompromis između najboljih rezultata i konstrukcijskih rješenja. Slika 63 opisuje gdje se ostvarivi moment motora (plavo) nalazi u odnosu na prenosivi gumom (narančasto). Iz Slika 63 vidljiva je zadovoljena sigurnost od viška momenta 5 % pri području konstantnog momenta motora.



Slika 63. Prikaz analitičke momentne krivulje i limita prijanjanja pneumatika

5.4. Izbor i model pneumatika

S ciljem unaprjeđenja upravljivosti i/ili redukcije mase ovjesa vozila, provedena je analiza mehaničkog balansa vozila. Analiza balansa uključuje postizanje najveće moguće bočne akceleracije uz zadržavanje upravljivosti vozila. Upravljivost je veličina koju je izazovno definirati i objektivno promatrati, no ona je najpoznatiji pokazatelj koji ujedno obuhvaća i najveće ubrzanje ili tzv. *understeer* gradijent. Promatrani mehanički balans analiziran je promjenom pneumatika i promjenom stražnjeg stabilizatora. U svrhu moguće promjene pneumatika s onim dostupnima na tržištu, provedena je analiza dostupnih pneumatika kako bi se preko težinskih faktora prikazanih u Tablica 14. lakše došlo do odluke za pneumatikom najboljih karakteristika. Tablica 13. pokazuje karakteristike pneumatika koje su ocjenjivane te popis razmatranih pneumatika s tržišta.

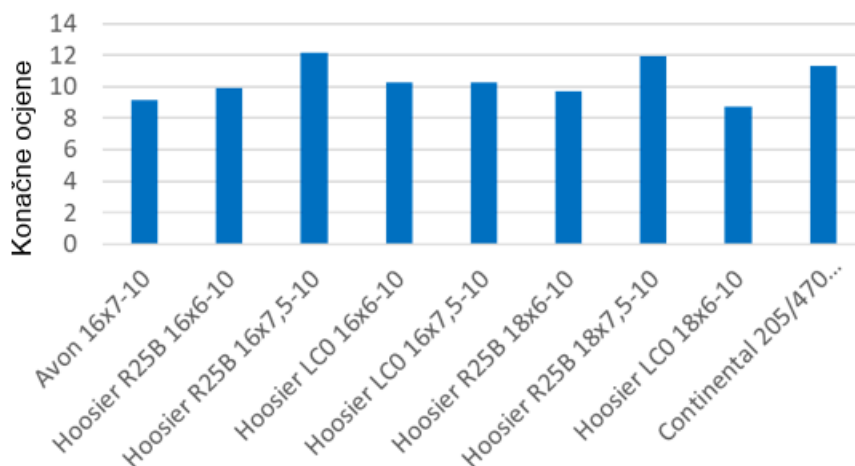
Tablica 13. Ocjene karakteristike pneumatika

Pneumatik	Maksimalna bočna sila		Bočna osjetljivost na opterećenje	Bočna osjetljivost	Maksimalna longitudinalna sila	Uzdužna krutost (na 0,02 SL)		Osjetljivost uzdužnog nagiba	Vanjski promjer["]	Rotacijska inercija	Masa	Cijena
	Krutost u zavojima (mjereno na SA=2)	Uzdužna osjetljivost na opterećenje pneumatika										
Avon 16x7-10	1	2	5	3	2	3	3	5	5	4	4	5
Hoosier R25B 16x6-10	3	3	4	1	1	4	4	4	5	5	5	4
Hoosier R25B 16x7,5-10	3	4	4	3	5	5	3	5	5	4	4	3
Hoosier LC0 16x6-10	2	3	4	4	1	4	4	5	5	5	5	4
Hoosier LC0 16x7,5-10	3	3	5	4	1	3	4	5	5	4	4	3
Hoosier R25B 18x6-10	4	3	1	4	2	4	4	5	4	3	3	4
Hoosier R25B 18x7,5-10	4	4	5	4	5	5	3	5	4	2	2	3
Hoosier LC0 18x6-10	3	2	2	5	1	3	3	5	4	3	4	3
Continental 205/470 R13	5	5	2	4	4	3	5	4	4	1	3	2

Tablica 14. Težinski faktori pri odabiru gume

Kriterij	Težinski faktori – Osoba 1	Težinski faktori – Osoba 2	Težinski faktori – Osoba 3	Konačan težinski faktor
Maksimalna bočna sila	10	10	10	10
Bočna krutost	6	7	7	7
Bočna osjetljivost na vertikalno opterećenje	3	7	8	6
Bočna osjetljivost na nagib kotača	3	6	4	4
Maksimalna uzdužna sila	10	9	10	10
Uzdužna krutost	4	3	7	5
Uzdužna osjetljivost na vertikalno opterećenje	3	7	4	5
Uzdužna osjetljivost na nagib kotača	3	6	4	4
Vanjski promjer gume	3	3	6	4
Rotacijska inercija	4	5	4	4
Masa	7	6	4	6
Cijena	1	1	0	1

Konačni rezultati kada su ocjene iz tablice 13 pomnožene težinskim faktorima tablice 14 i zbrojene prikazani su grafom na Slika 64.



Slika 64. Konačne ocjene proizvoda s tržišta

Nakon što su izabrani pneumatici metodom težinskih faktora, dostupni podaci mjerenja guma [8] koje je udruga dobila od *Calspan-TTC* istraživačkog centra iz Amerike korišteni su za modeliranje gume koje će se kasnije koristiti u simulacijama.



Slika 65. Calspan pogon za testiranje guma

Calspan posjeduje testne stolove s pokretnom trakom koja simulira asfalt (Slika 65), te gume su podvrgnute različitim kutovima i opterećenjima simulirajući stvarne situacije i pri tome se bilježe podaci kao uzdužna i bočna sila, bočni kut klizanja, uzdužni omjer klizanja i dr. Iz dobivenih mjerenja pomoći alata *Adams Car*, modeliran je model gume na temelji empirijskog modela gume prema Pacejki [5].

5.5. Analiza mehaničkog balansa vozila

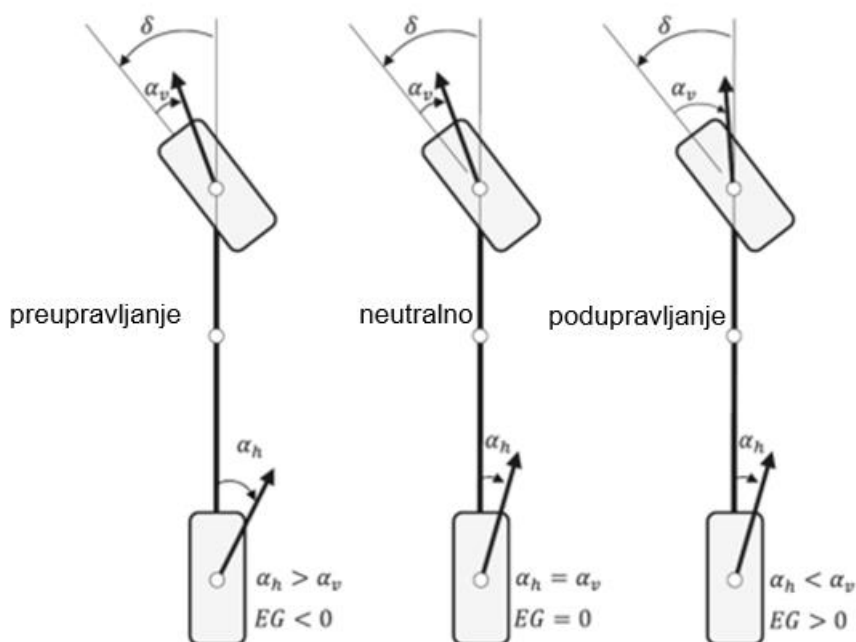
5.5.1. Utjecaj pneumatika

Najbolje rezultate za primjenu na projektu FSB-RT06R imale su *Hoosier R25B 18x7,5-10* i *Hoosier R25B 18x6-10* koje će biti korištene za analizu mehaničkog balansa upravo zbog različitih širina gazišta, koja utječe na bočnu površinu deformacije i bočnu krutost, te je cilj bio otkriti poboljšava li to bočna ubrzanja.

Zbog toga što se kružnica trenja nalazi na stražnjim kotačima koji su pogonski pa iz tog razloga prenose momente i sile na podlogu, odlučeno je isprobati promjenu stražnjih kotača, dok su prednji kotači ostali isti.

Model je izrađen u Adams Caru, preko *Simulate - Compound analysis - Tire data and fitting tool*. Izrada modela je opisana u [3]. Model je rađen preko *Pacejkin* magične formule čija funkcija se nalazi u *fitting tool*-u, parametri funkcije su filtrirani i ekstrapolirani.

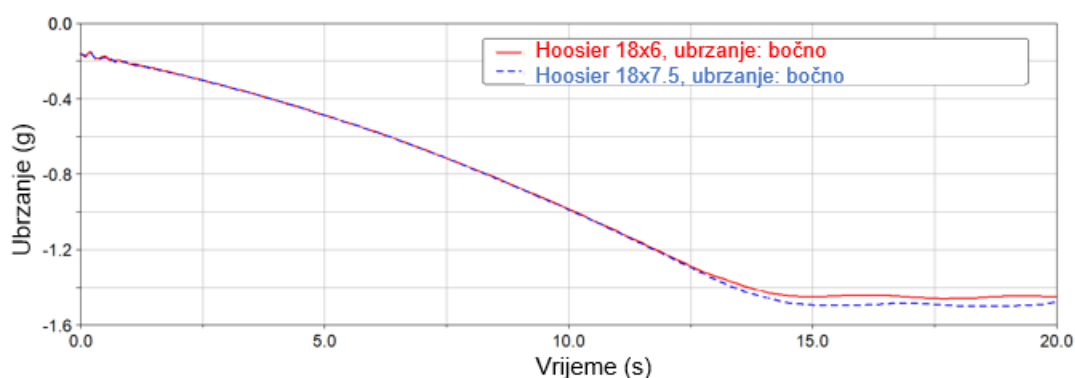
Mehanički balans definiran je preko upravljivosti vozila, odnosno podupravljivosti i preupravljivosti. Podupravljavanje predstavlja bočni kut prednjih kotača α_v koji je veći od bočnog kuta stražnjih kotača α_h , gdje prednja osovina ne generira dovoljno bočne sile da vozilo ostane u putanji. Preupravljavanje ima suprotan utjecaj, a vidljiv je na Slika 66. koja prikazuje odnos na modelu s dva kotača.



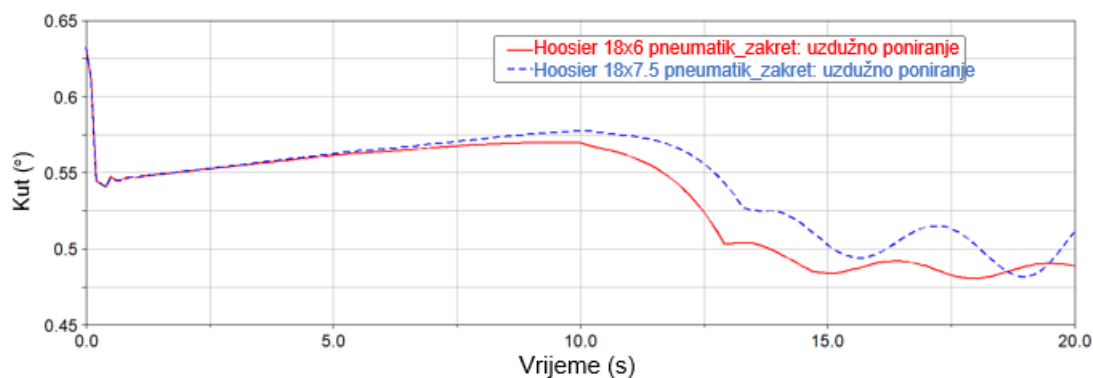
Slika 66. Pod/preupravljavanje

Prilikom djelovanja bočnih sila na vozilo uslijed zavoja stvara se i povratni *yaw* moment koji nastoji zadržati auto u putanji uslijed inercije. Taj moment ima različito djelovanje na auto, a ovisi o podupravljenom ili preupravljenom stanju vozila. Položaj težišta utječe na položaj djelovanja centrifugalne sile, odnosno što je težište više prema stražnjem dijelu auto to je očekivana veća tendencija preupravljanju.

Za oba pneumatika izvršena je CRC procedura prema Slika 67. tj. dobiveno je maksimalno ubrzanje prema parametru maksimalne održive konstantne brzine vozila u zavoju. Nakon izvršene simulacije dobivena je bolja maksimalna brzina skretanja s novim modelom pneumatika. Iako razlika nije značajna, važna je radi upravljivosti i stabilnosti vozila pri nižoj brzini, tj. vozač bi u toj situaciji lakše zadržavao brzinu.

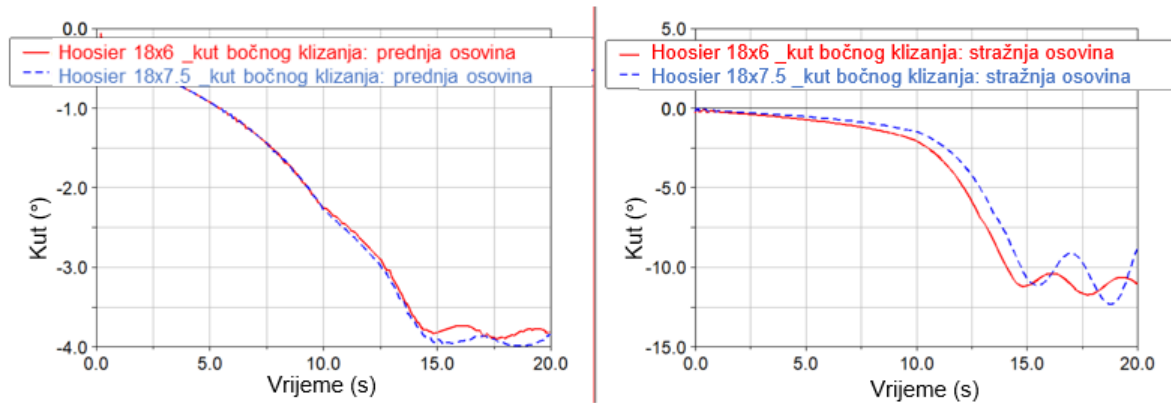


Slika 67. Bočno ubrzanje pri dva pneumatika



Slika 68. Kut poniranja/podizanja vozila

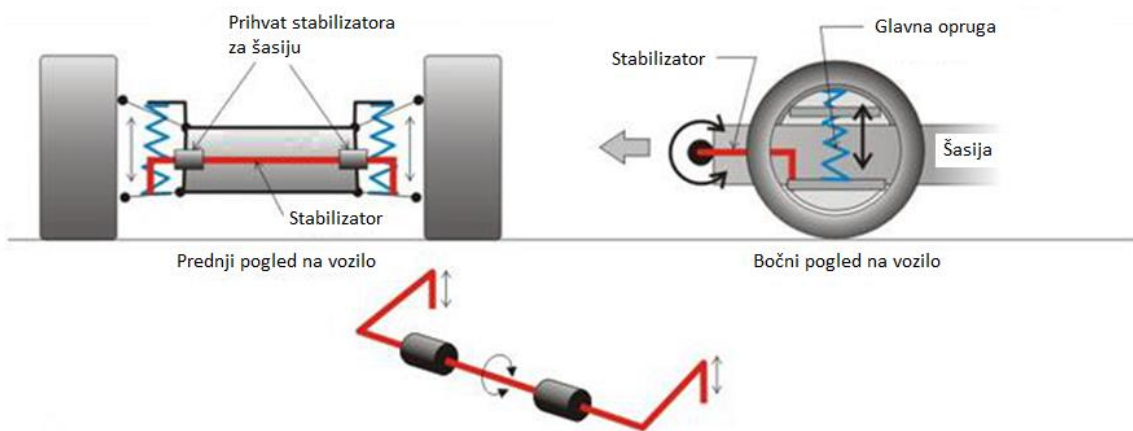
Na Slika 68. zanimljivo je primijetiti da širi pneumatici s boljom bočnom krutosti utječu na poboljšanje, odnosno na smanjenje kuta poniranja. Prema Slika 69. vidljivo je i kako se radi o većem ubrzanju s čime se povećava i valjanje ovješene mase.



Slika 69. Bočni kut klizanja dva modela pneumatika

Zaključuje se da je samom promjenom u širini pneumatika dobivena bolja bočna krutost i poboljšanje ponašanja vozila u zavojima, što povećava sposobnost vozača da upravlja vozilom. Novoizabrani pneumatik smanjio je i stražnji bočni kut klizanja, vidljivo na Slika 69., te se time smanjilo preupravljanje vozila. Odabir i smjer pneumatika važan je i za vozača jer se vozilo podešava prema karakteristikama njegove vožnje.

5.5.2. Utjecaj promjene stabilizatora i novih širih stražnjih guma



Slika 70. Sklop stabilizatora u vozilu

Važan utjecaj na poprečnu dinamiku, tj. ponašanje vozila u zavojima imaju stabilizatori, odnosno krutost koja se dodaje na krutost opruge amortizera. Glavni elementi koji definiraju krutost vozila su opruge koje odvajaju ovješenu od neovješene mase, a za ostvarivanje optimalnih uvjeta skretanja, tj. boljih bočnih ubrzanja sa što manjim valjanjem bolida zanimljivo je promotriti krutost stabilizatora. Glavna uloga stabilizatora je da pri vertikalnom udarcu ili pri zavojima preko torzijske cijevi preuzimaju i prenose vertikalno opterećenje s opterećenijeg kotača na drugi kotač preko sklopa klackalica prikazanih na slici bolida (Slika 70.).

Ukupna krutost u Nm/° prednjeg ili stražnjeg kraja vozila računa se preko analitičkog izraza krutosti:

$$K_{UK,prednja} = \frac{(K_{opruga,prednja} + K_{ARB,prednja}) \times K_{gume,prednja}}{(K_{opruga,prednja} + K_{ARB,prednja}) + K_{gume,prednja}}$$

gdje se razmatrao samo utjecaj stabilizatora (oznaka $K_{ARB,prednja}$), na valjanje vozila u zavoju:

$$K_{Ovj. ARB,prednja} = \frac{FT^2 \times \tan(1^\circ) \times K_{ARB,prednja}}{(MR_{ARB})^2}$$

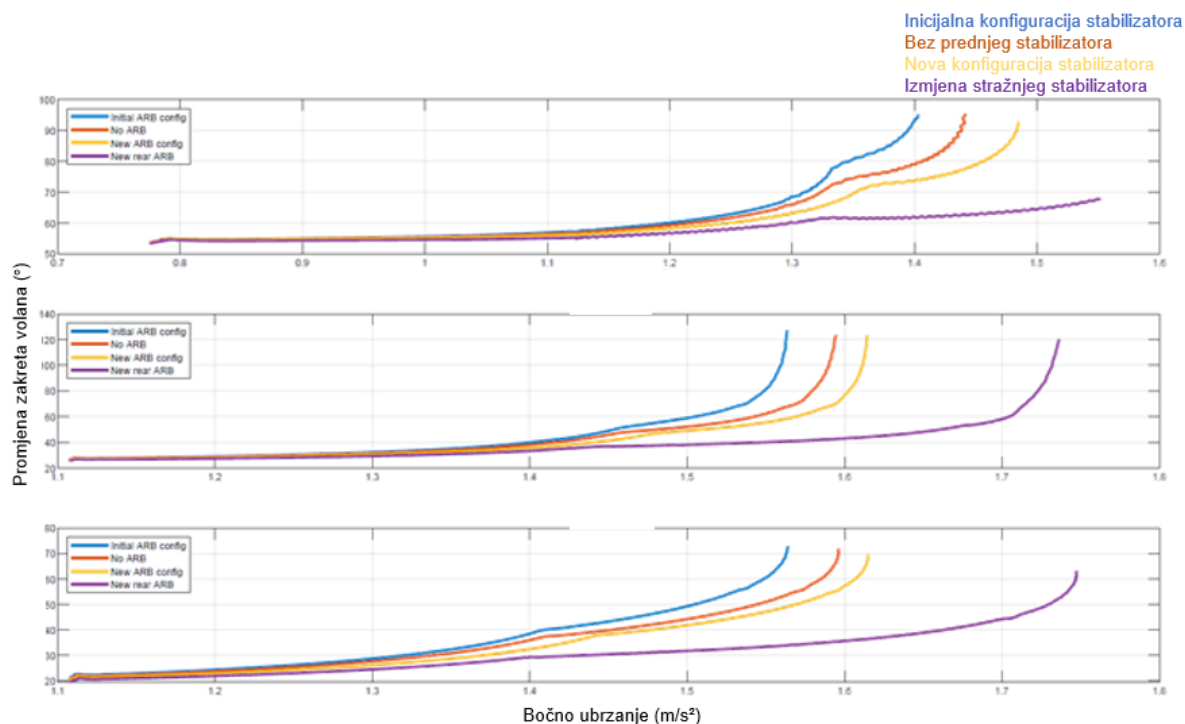
Tablica 15. pokazuje kombinacije krutosti pri analizi mehaničkog balansa.

Tablica 15. Kombinacije krutosti pri analizi mehaničkog balansa

Konfiguracija ARB	Radijus zavoj a [m]	$K_{Ovj. ARB,prednja}$ [Nmm/°]	$K_{Ovj. ARB,stražnja}$ [Nmm/°]	Početa brzina [km/h]	Postignuta konačna brzina [km/h]	Maks. bočno ubrzanje [G]	Gradijent podupravljivosti na 1.25g [°/G]
Old ARB	9.125	11313.86	1176.32	30	41.3	1.4	74
	20			50	62.9	1.48	50.76
	30			65	79.3	1.56	42.43
No ARB	9.125	0.00	0.00	30	41.73	1.44	62
	20			50	63.6	1.52	45
	30			65	80	1.6	38
New rear ARB	9.125	0.00	5661.63	30	44	1.6	32
	20			50	70	1.67	28.6
	30			65	85	1.75	25.32
Stiffer rear ARB	9.125	0.00	7366.94	30	44.38	1.62	27.3
	20			50	70	1.7	25.89
	30			65	85	1.78	22.58

Rezultati simulacije CRC procedure, grafovi zavoji 9.125 m, 20 m, 30 m, pokazuju poznatu značajku za definiranje upravljivosti, gradijent podupravljivosti, koji predstavlja promjenu zakreta volana u ovisnosti o bočnom ubrzanju. Iz rezultata je vidljivo da najbolje performanse

pokazuje konfiguracija bez prednjeg stabilizatora i sa krućim stražnjim stabilizatorom označenim ljubičastom bojom. Zadržan je *understeer*, odnosno podupravljivost vozila te je time osigurano najveće bočno ubrzanje.

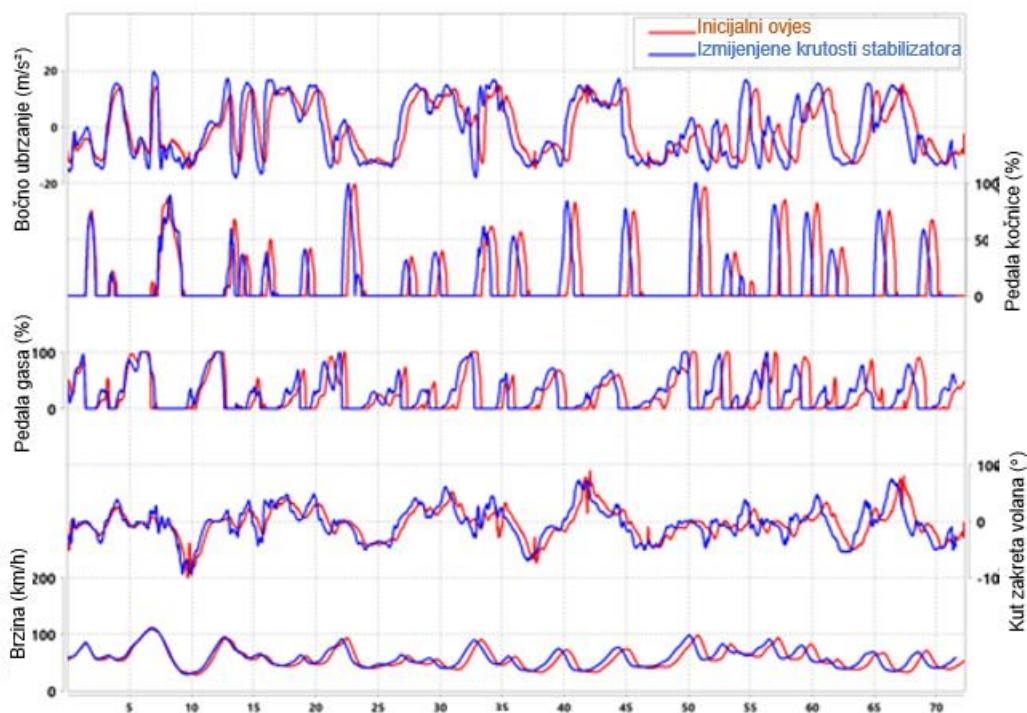


Slika 71. Analiza različitih postavki stabilizatora u CRC proceduri

Kasnije tijekom razvoja, kada je projekt sadržavao dovoljno informacija o masi, geometriji i ostalim karakteristikama vozila, provedena je *lap-time* simulacija usporedbe stare i krajnje konfiguracije dobivene analizama iz alata *Adams Car*.

Lap-time simulacija provedena je pomoću AVL VSM simulacijskog paketa, unutar kojeg je izrađena staza *FS Netherlands* iz 2017. godine. Slika 73 prikazuje napredak u bočnoj akceleraciji. Također je vidljiva razlika u ponašanju vozača, posebice u primjeni pedale gasa i zakretu volana vozila, što je očekivano s novom distribucijom krutosti.

U Tablica 16. navedena su vremena kruga za inicijalnu i krajnju konfiguraciju.



Slika 72. Usporedba utjecaja širine stražnjih pneumatika i postavke stabilizatora; početno (crveno)/ krajnje (plavo)

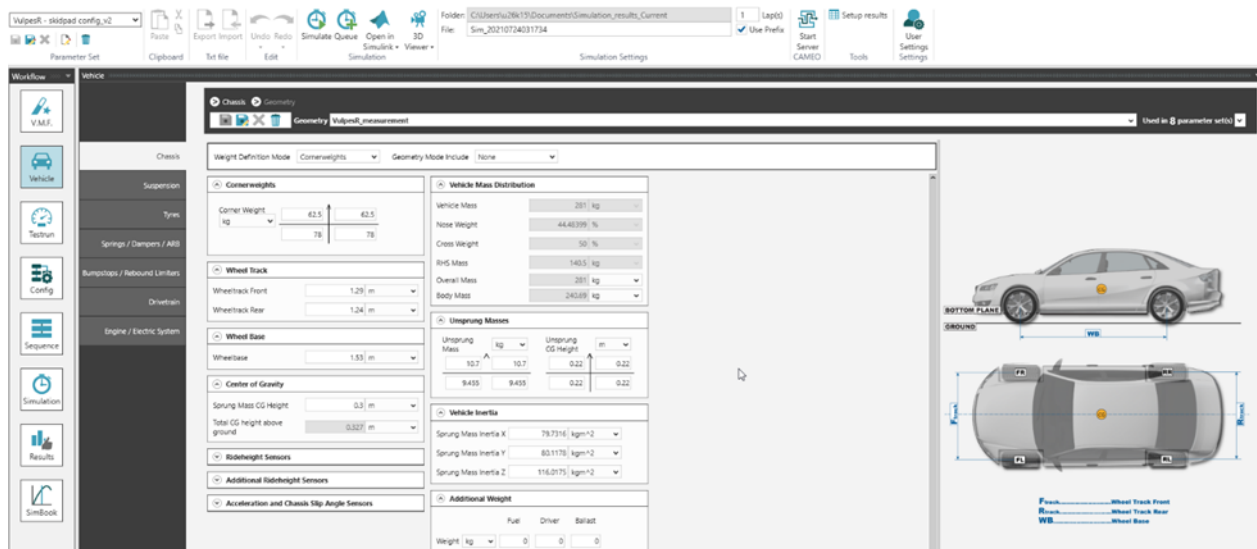
Tablica 16. Vrijeme kruga ovisno o konfiguraciji stabilizatora i pneumatika

Značajke testne vožnje	Vrijeme kruga [s]
Bez prednjeg stabilizatora Početna konfiguracija pneumatika Prednji 6", Stražnji 6"	72.26
Sa krućim stražnjim stabilizatorom Nova konfiguracija pneumatika Prednji 6", Stražnji 7.5"	71.5

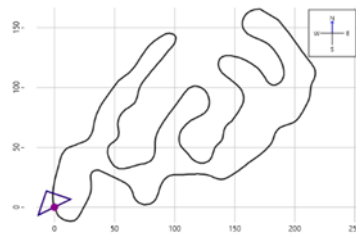
5.6. Analiza utjecaja aerodinamičkog paketa na performanse Formula Student bolida

5.6.1. Analiza aerodinamičkog paketa na vrijeme kruga na stazi Formula Student

Provedena je analiza *lap-time* simulacija preko AVL VSM simulacijskog paketa. Unutar AVL VSM simulacijskog paketa definirano je vozilo preko matematičkog modela gdje su geometrija, kinematika te karakteristike pogonskog sustava definirane za proračunat model kočenja.

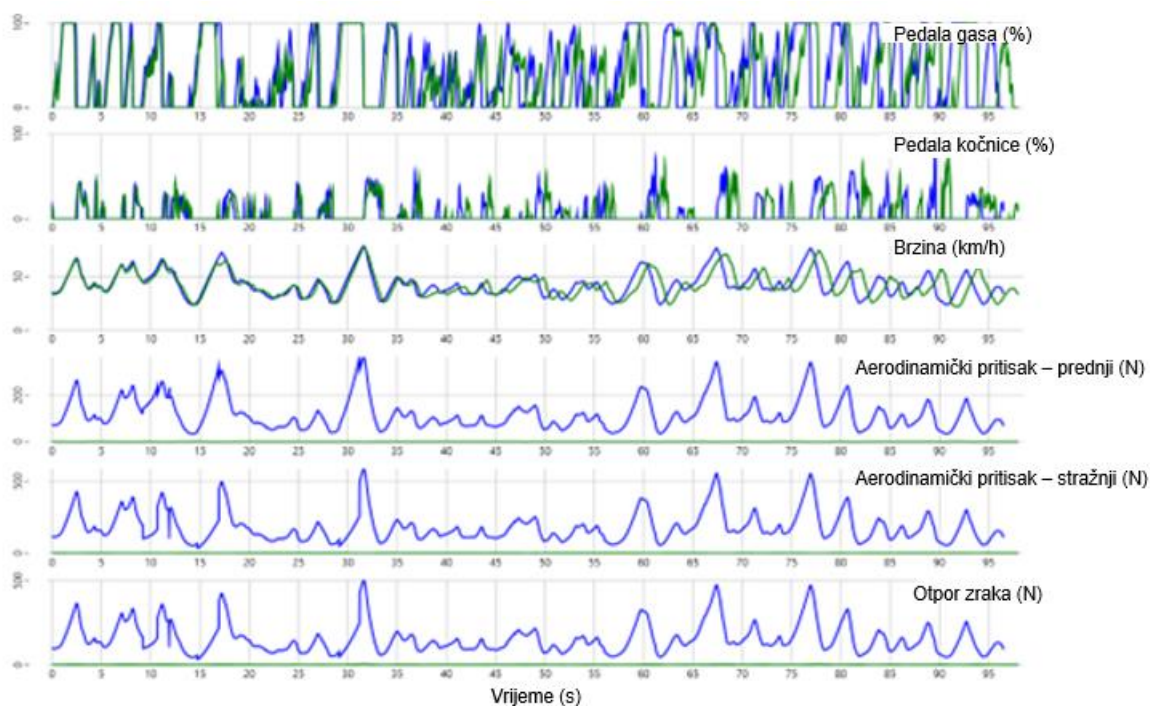


Slika 73. Prikaz sučelja VSM-a



Slika 74. Staza Formula Student natjecanja u Nizozemskoj

Provedena je *lap-time* simulacija sa i bez aerodinamičkog paketa kako bi se potvrdila korisnost aeropaketa. Simulacija je, prema Tablica 17, dokazala pozitivan utjecaj aeropaketa.



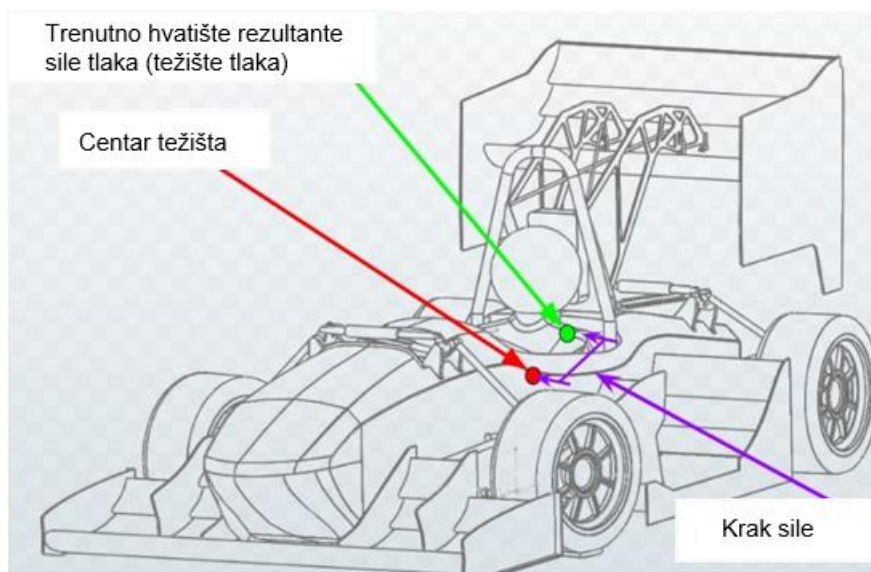
Slika 75. Usporedba utjecaja aerodinamičkog paketa - bez (zeleno), sa (plavo)

Tablica 17. Rezultati simulacije vremena kruga

Značajke za testnu vožnju	*Vrijeme kruga [s]	*Prosječna brzina [km/h]
Bez aeropaketa	98	42.6
S aeropaketom	96.55	43.2

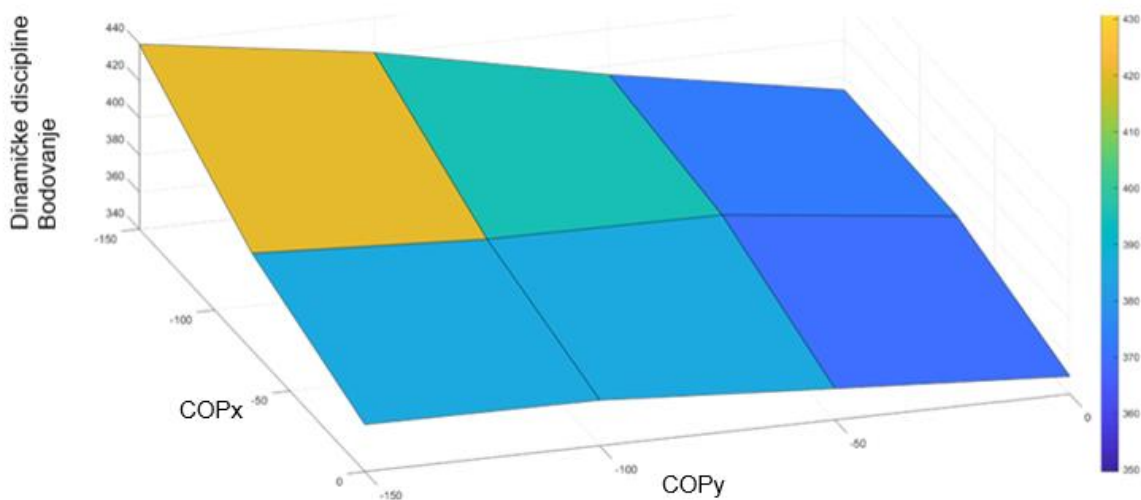
5.6.2. Analiza utjecaja položaja CoPa

U sljedećem koraku provedena je varijacija položaja virtualnog središta aerodinamičkog potiska i otpora zraka. (engl. *Centre of Pressure*, dalje: CoP) Središte definira krak momenta od težišta (engl. *centre of gravity*) vozila koji direktno utječe na raspodjelu aerodinamičkog potiska između prednje i stražnje osovine, a time i na balans te postignuto bočno ubrzanje.



Slika 76. Krak momenta aerodinamičke sile

Simulacije *lap time*-a ponovno su rađene u VSM-u u nizu različitih CoP položaja. Prema Formula Student pravilniku, korišten je sustav bodovanja te su izračunati bodovi za najbolji položaj CoP-a vidljivo prema Slika 77.



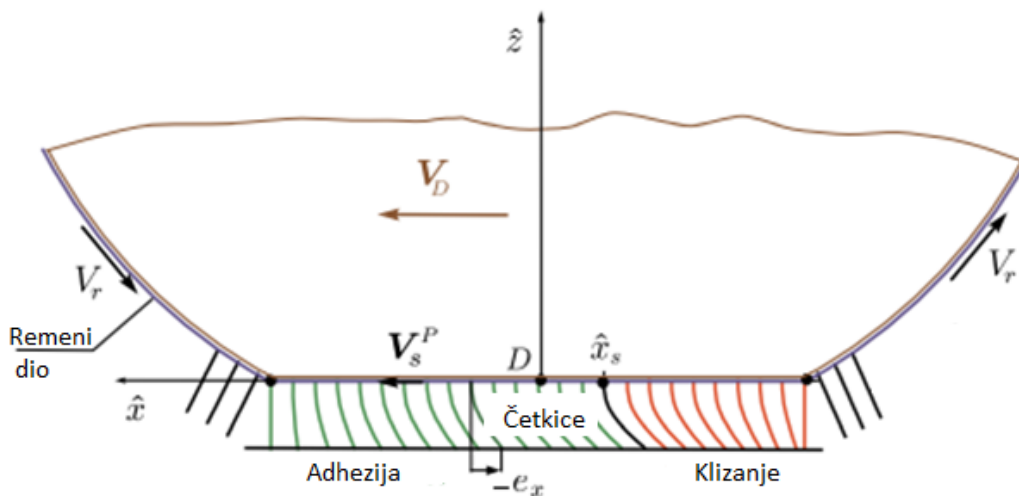
Slika 77. Mapa utjecaja položaja CoP-a na bodove u dinamičkim disciplinama

Najveći doprinos plasmanu donosi uzdužni pomak CoP u negativnom smjeru osi x.

5.7. Model za generiranje reference klizanja i model *Traction Control* sustava

5.7.1. Model za generiranje reference klizanja

Pneumatici su ključan dio u definiranju dinamike bilo kojeg cestovnog vozila jer su mjesto kontakta između vozila i tla, glavnog izvora sila koje djeluju na to vozilo. Studentski bolid *VulpesR* je RWD vozilo s jednim električnim motorom za svaki stražnji kotač koji nam omogućuje neovisno kontroliranje okretnog momenta na svakom kotaču. Cilj je iskoristiti prednost takvog rasporeda vozila pomoću algoritama aktivne dinamike. Razvija se sustav za kontrolu klizanja kotača (engl. *traction control system*, dalje: TCS), što će biti prikazano kasnije. Razvoj modela pneumatika četkice, izvedenog, bit će ukratko predstavljen u ovom poglavlju i iskorišten za generiranje referenci kao ulaz kontrolera. Pacejkina formula za modele pneumatika pruža krivulje koje se prilično dobro uklapaju u eksperimentalne podatke, ali ne pokušava opisati fizičku interakciju između pneumatika i ceste. Tu interakciju u svrhu generiranja reference klizanja dobivamo iz modela fizičke gume - model četkica. U osnovi, u modelu četkice (Slika 78), pojas opremljen sa beskonačno mnogo neovisnih fleksibilnih niti je omotan oko cilindričnog krutog tijela (obruč) koje se kreće ravnom površinom (kolnik).



Slika 78. Fizikalni model pneumatika – četkica [13]

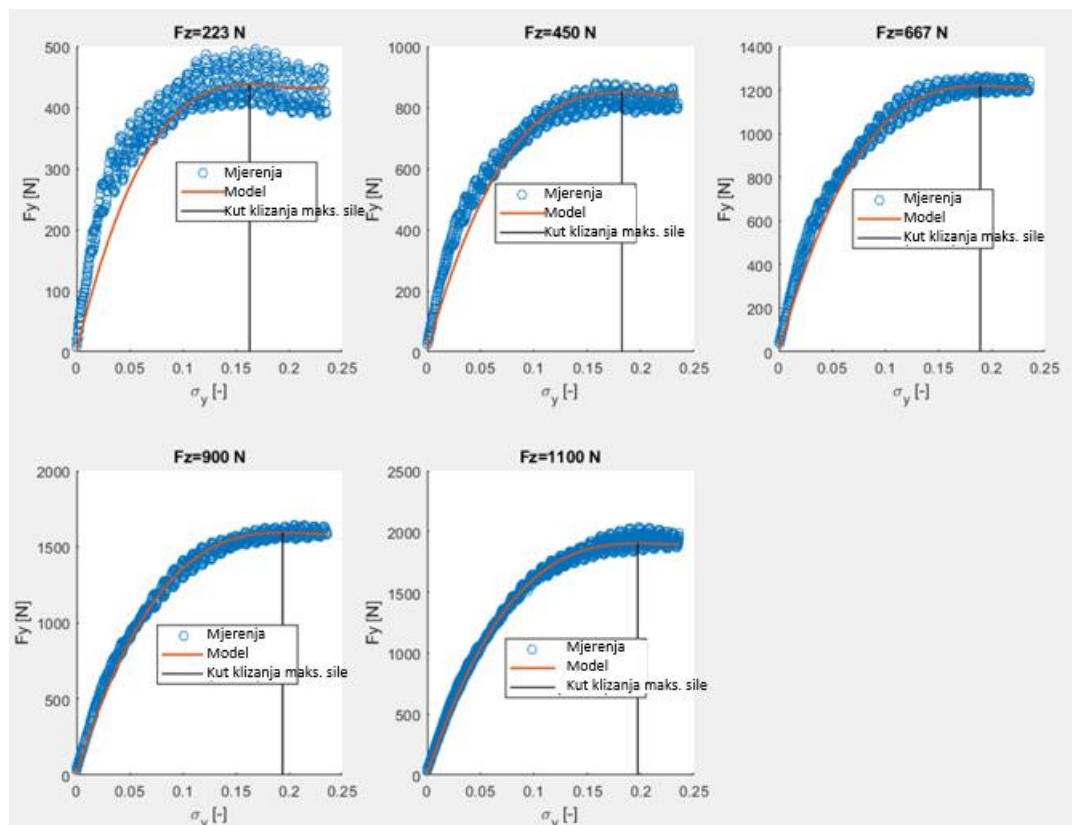
Matematički izraz za ovisnost tangencijalne sile F_t o vektorskom intenzitetu klizanja σ :

$$F_t(\sigma) = C_{\sigma}\sigma * \left[1 - \frac{\sigma}{\sigma_s} \left(\frac{1+2\chi}{1+\chi} \right) + \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^2 \left(\frac{1+3\chi}{3(1+\chi)} \right) \right]$$

Također se može izvesti i s obzirom na σ te se može potražiti vršna vrijednost, tj. lokalni maksimum. Slijedi da se vršna tangencijalna sila postiže pri intenzitetu vektora klizanja od σ_p :

$$\sigma_p = \frac{1 + \chi}{1 + 3\chi} * \sigma_S$$

Grafički se to može prikazati za različita vertikalna opterećenja F_z :



Slika 79. Analiza maksimuma kuta klizanja pri različitim vertikalnim opterećenjima za definiranje optimuma klizanja

Slika 79 prikazuje traženi izlaz modela pneumatika- generaliziranu referencu klizanja. Ona se naziva generaliziranom jer se model bavi odstupanjima čekinje, a uzdužni i bočni klizači definirani su na takav način da rezultirajući model gume opisuje tangencijalnu silu pneumatika (bočna i uzdužna kombinirana), s poštivanjem intenziteta vektora klizanja.

5.7.2. Estimacija dinamičkih vertikalnih sila

Vertikalne sile teško su mjerljive veličine koje je jednostavnije i jeftinije estimirati nego mjeriti. Sama estimacija vertikalnih sila prilično je jednostavna ako se posjeduje nekoliko veličina:

- Fizikalne karakteristike vozila (ukupna masa vozila, međuosovinski razmak i trag vozila, visina CoG-a itd.)
- Mjerenja uzdužne (engl. *longitudinal*) i poprečne (engl. *lateral*) akceleracije
- Brzina vozila

U obzir su još uzete i aerodinamičke sile otpora zraka (engl. *drag*) i aerodinamičkog potiska (engl. *lift*). Kada su te veličine poznate, moguće je izračunati vertikalne sile pomoću jednadžbi:

$$F_{Z,f} = \frac{m * g * l_r + F_{Z,l,front} * l - F_{x,d} * h_{CoP} - a_x * m * h_{CoG}}{l} \quad (1)$$

$$F_{Z,r} = \frac{m * g * l_f + F_{Z,l,rear} * l + F_{x,d} * h_{CoP} + a_x * m * h_{CoG}}{l} \quad (2)$$

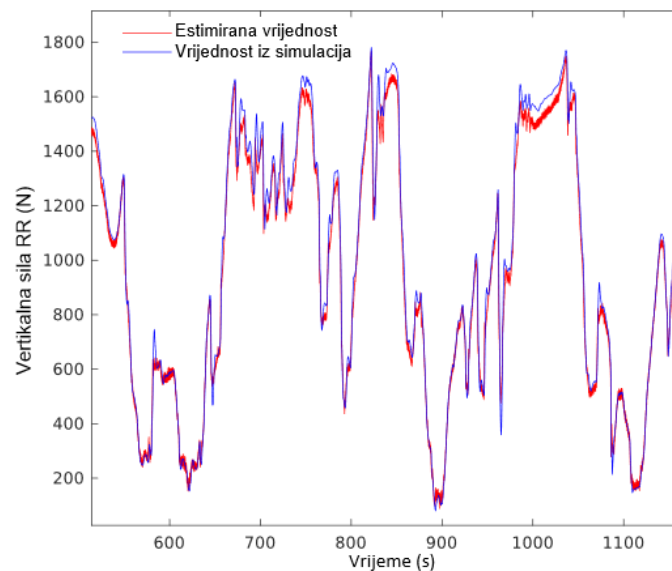
$$F_{Z,FL} = \frac{F_{Z,f}}{2} - \frac{a_y * m * h_{CoG}}{w_f} * \frac{l_r}{l} \quad (3)$$

$$F_{Z,FR} = \frac{F_{Z,f}}{2} + \frac{a_y * m * h_{CoG}}{w_f} * \frac{l_r}{l} \quad (4)$$

$$F_{Z,RL} = \frac{F_{Z,r}}{2} - \frac{a_y * m * h_{CoG}}{w_r} * \frac{l_f}{l} \quad (5)$$

$$F_{Z,RR} = \frac{F_{Z,r}}{2} + \frac{a_y * m * h_{CoG}}{w_r} * \frac{l_f}{l} \quad (6)$$

Rezultati estimacije vertikalnih sila uspoređeni su sa simulacijskih rezultatima dobivenim u simulacijskom sučelju AVL VSM-a te su prikazani na Slika 80. gdje je crvenom bojom označena estimirana, a plavom vrijednost iz simulacije.



Slika 80. Usporedba rezultata estimacije i simulacije u AVL VSM-u

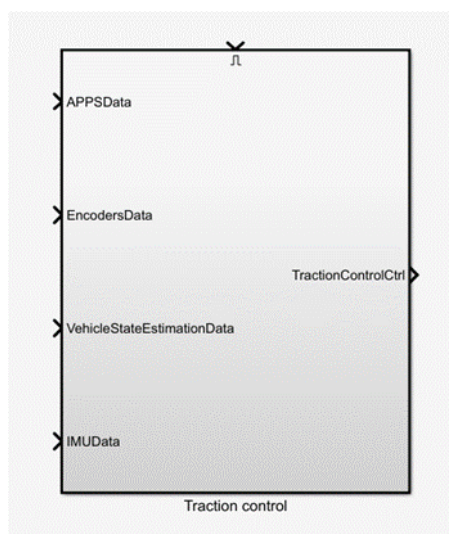
5.8. Model sustava kontrole klizanja kotača (TCS)

Glavna je ideja sustava kontrole klizanja kotača regulirati brzinu kotača putem okretnog momenta koji djeluje na njemu. Brzina kotača izražena je uzdužnom klizanjem kotača, što je kinematička količina koja uzima u obzir omjer između trenutne kutne brzine kotača i kutne brzine slobodno valjajućeg kotača u istom trenutku.

Slika 81 prikazuje najviši sloj kontrolnog bloka TC-a u Simulinku, sa sljedećim ulazima:

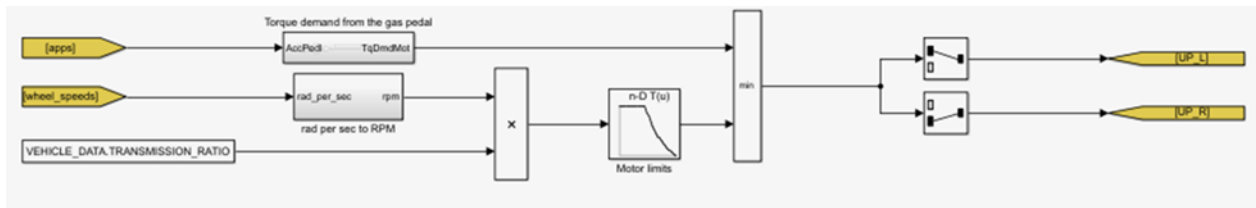
- Senzor položaja papučice za akcelerator (0-100 %)
- Podaci iz enkodera - senzori brzine kotača
- Podaci o procjeni stanja vozila - procijenjene količine su uzdužne brzine vozila i vertikalne sile koje djeluju na svaki kotač
- Podaci inercijalne mjerne jedinice (IMU) – kutna brzina rotacije

Razlog zašto je kutna brzina rotacije jedini skup koji se koristi iz svih podataka IMU-a jest što se procjena uzdužne brzine vozila i vertikalne sile na kotačima vrši odvojeno na upravljačkoj jedinici vozila (engl. *vehicle control unit*, VCU).

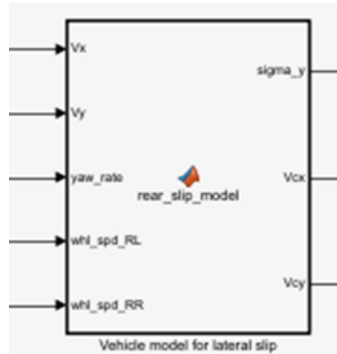


Slika 81. Traction Control System block

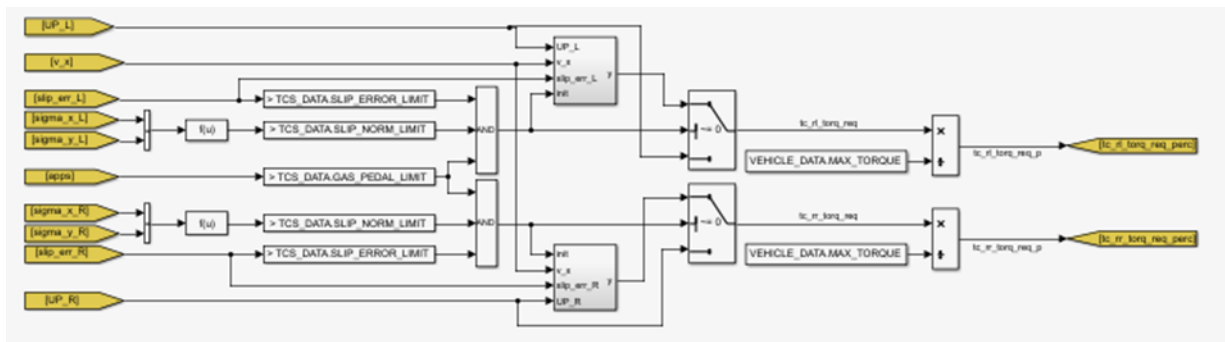
Sljedeće slike (Slika 82, Slika 83, Slika 84) prikazuju sastav modela TCS koji je pogodan ne samo za disciplinu *acceleration*, već i za dinamičke discipline *autocross* i *endurance*. Iz tog razloga prvi dio algoritma izračunava bočno klizanje na svakom pneumatiku (Slika 83), koja zatim prelazi na ranije opisani model. Taj model stvara referencu uzdužnog proklizavanja, koja se koristi kao ulaz u kontroler koji oduzima potražnju zakretnog momenta zaprimljenog od vozača preko papučice gasa. (Slika 82)



Slika 82. Pretvorba zahtjeva papučice gasa u zahtjev momenta



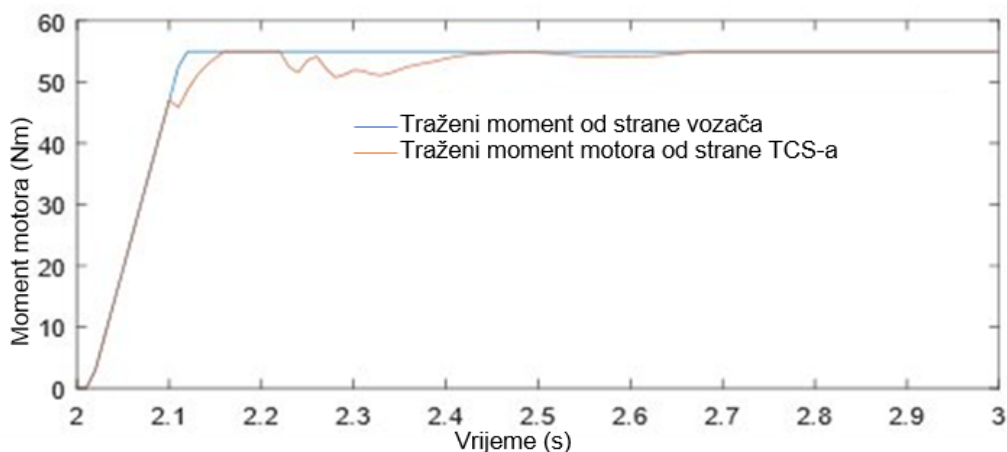
Slika 83. Jednostavan model dinamike vozila za definiranje stražnjeg bočnog klizanja



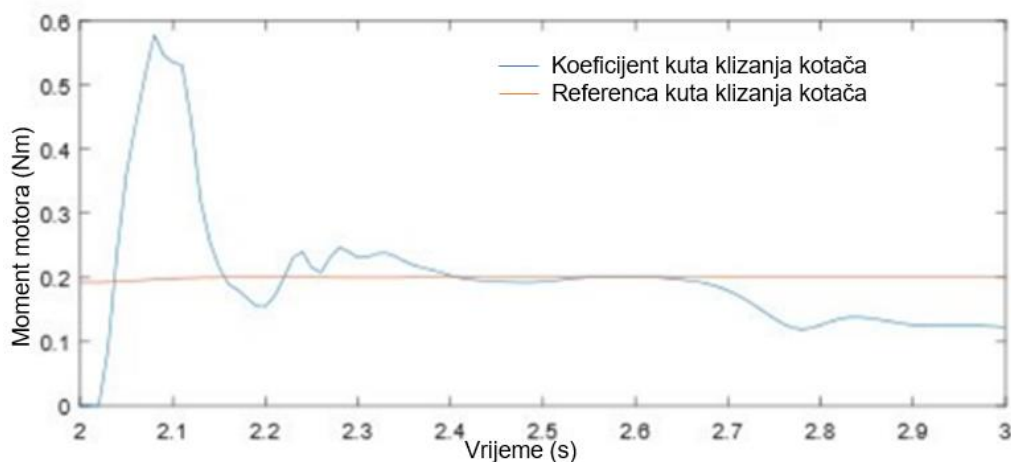
Slika 84. Uvjeti aktivacije kontrolera i zaseban kontroler za svaki kotač

Pomoću AVL VSM-a, namjenskog softvera za simulaciju dinamike vozila, izrađen je model vozila koji je povezan u ko-simulacijskom okruženju s modelom TCS-a u MATLAB Simulinku. AVL VSM namijenjen je simulacijama dinamike vozila visoke vjernosti i kao takav ima implementiranu dinamiku prijenosa težine i inercijske učinke kotača i električnog motora. Također, sadrži i puni Pacejkin model gume, čiji su parametri zamijenjeni parametrima gore spomenutog modela dobivenog iz eksperimentalnih podataka. Mogućnosti modeliranja dinamike torzijske krutosti električnog motora i osovina nisu korištene i ostaju kao jedno od mogućih budućih poboljšanja za ovu vrstu modela-okruženja u petlji. Kalibracija je izvedena u potpunosti ručno metodom pokušaja i pogreške, bez ikakvog sustavnog pristupa, sve dok nije dobiveno zadovoljavajuće ponašanje u simulaciji ili su poboljšanja postala premala, s obzirom da je to učinjeno na nevalidiranom modelu guma.

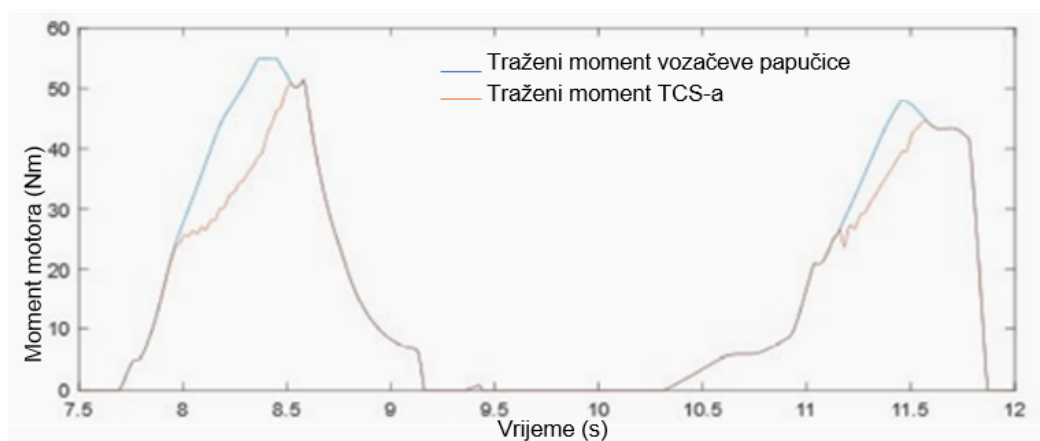
Kako još nismo iskoristili mogućnost modeliranja tranzijentnih karakteristika guma, koja fizikalna guma posjeduje, rezultati nisu savršeni, ali još uvijek pokazuje kako smanjenje vremena ubrzanja tako i poboljšanje vremena u svim disciplinama Formule Student. Slika 85, Slika 86, Slika 87, Slika 88. pokazuje kako algoritam smanjuje traženi moment od vozačeve papučice tijekom procedure ubrzanja i kako se izračunava stacionarno klizanje regulirano s obzirom na njegovu referencu.



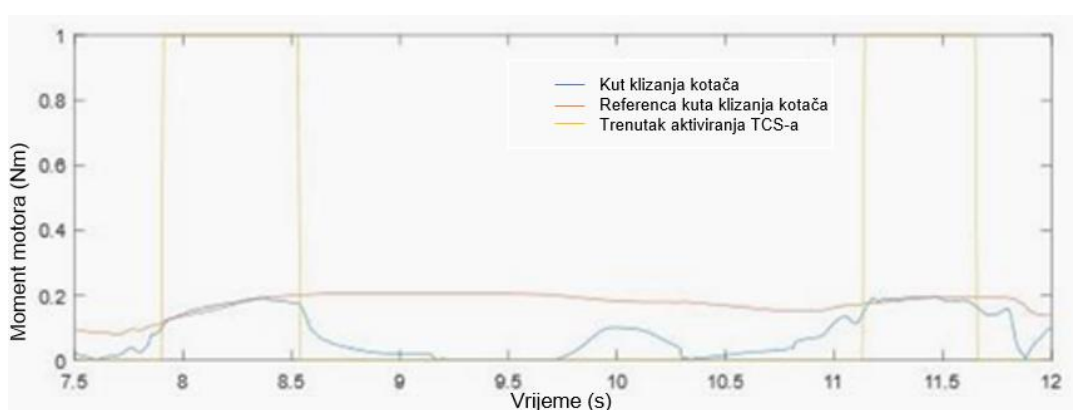
Slika 85. TCS regulirani moment – ubrzanje



Slika 86. Slip ratio i referenca – ubrzanje



Slika 87. TCS regulirani moment – dio simulacije discipline Autocross



Slika 88. Slip ratio i referenca te prekidač u trenutku aktivnosti TCS-a – dio simulacije discipline Autocross

Utjecaj rezultata ubrzanja 0 – 100 km/h na vrijeme kruga na testnoj stazi prikazuje Tablica 18:

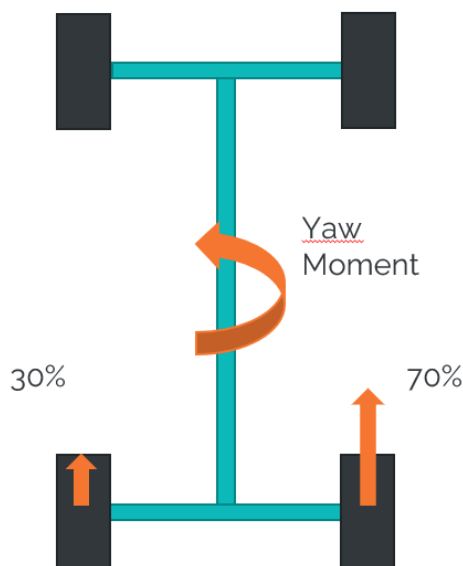
Tablica 18. Dobiveni rezultati vremena na simuliranoj testnoj stazi pri ubrzanju 0 – 100 km/h

Rezultati simulacija	0-100 km/h	Testna staza
Bez TCS-a	4,3 s	24,6 s
S TCS-om	3,2 s	23,4 s

5.9. Torque Vectoring

Koristeći dva nezavisno upravljiva elektromotora, moguće je dobiti željeno ponašanje vozila jednostavnom preraspodjelom momenata. Kako bi se smanjila kompleksnost algoritma korišten je jednostavni P kontroler koji, ovisno o zakretu volana, oduzima ili dodaje moment na kotače u jednakom omjeru. Navedeno znači da bi za puni zakret volana u potpunosti bio oduzet

moment s jednog kotača, dok bi na drugome ostao puni moment. Primjer je prikazan na Slika 89. gdje je 30 % ukupnog momenta vozila na stražnjem lijevom kotaču dok je ostalih 70 % na stražnjem desnom kotaču.



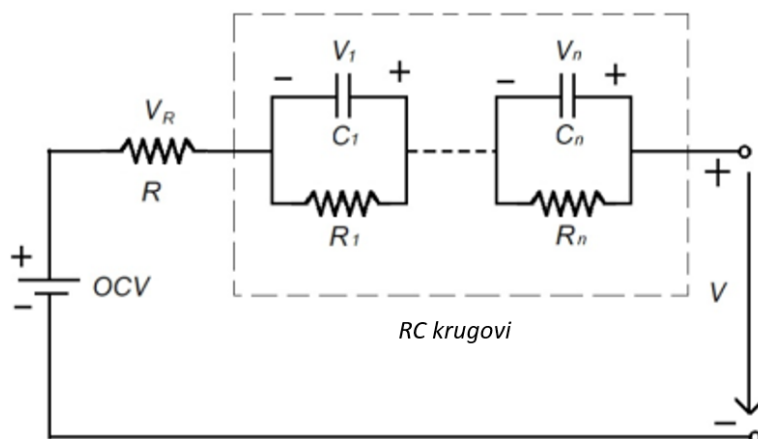
Slika 89. Torque vectoring kod bolida VulpesR

Zanimljivo je da čak i ovakav jednostavan kontroler omogućava značajno poboljšanje performansi u dinamičkoj disciplini *skidpad* gdje je vrijeme smanjeno s 5.4 s na 4.9 s.

5.10. Model baterije

Baterijski paket električnih *Formula Student* bolida je dimenzioniran prema najzahtjevnijoj dinamičkoj disciplini *endurance*. Kako je baterijski paket jedna od najtežih komponenata bolida, cilj mu je smanjiti veličinu do najmanje mjere koja omogućuje završavanje *endurance* discipline. Time se poboljšava i plasman u disciplini *efficiency*. Kako bi bolid sigurno završio disciplinu i time ostvario dobar plasman, potrebno je u svakom trenu moći procijeniti stanje napunjenosti (engl. *state of charge*, dalje: SoC) baterijskog paketa i po potrebi limitirati isporučenu snagu (engl. *power derating*) bez obzira na vozačev pritisak na papučicu gasa. Preduvjet za takve primjene je dobar model baterije koji precizno opisuje njeno ponašanje.

Zbog jednostavnosti i primjenjivosti u slučaju vozila *VulpesR*, odlučeno je koristiti model baterije ekvivalentnog kruga (Slika 90) koji omogućava opisivanje termalno-električnih svojstva baterijskih ćelija. Baterije su nelinearne prirode, no ovaj model omogućava da se pomoću dodatnih parametara opiše i navedeno ponašanje.



Slika 90. Ekvivalentni krug baterijske ćelije

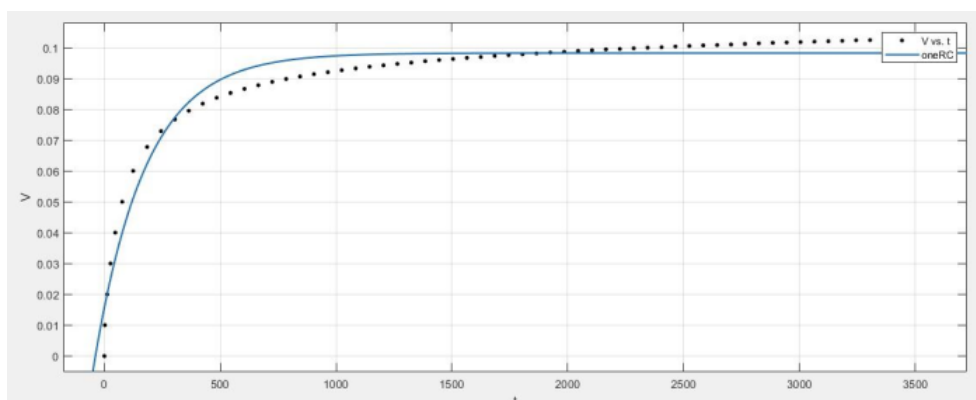
Ekvivalentni krug sastoji se od naponskog izvora (engl. *open circuit voltage*, dalje: OCV), otpornika te n , broja RC krugova. Opisan je jednadžbama (za $n = 2$):

$$v = OCV - v_R - v_1 - v_2 = OCV - iR - v_1 - v_2, \quad (4)$$

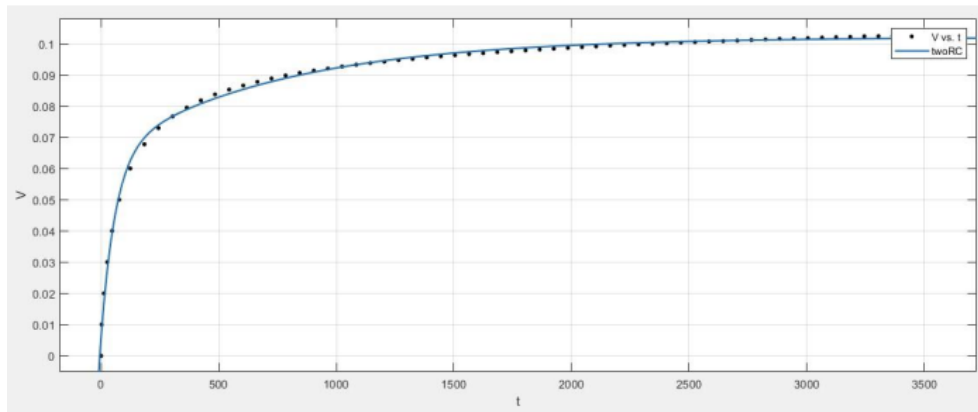
$$\dot{v}_1 = -\frac{1}{R_1 C_1} v_1 + \frac{1}{C_1} i, \quad (5)$$

$$\dot{v}_2 = -\frac{1}{R_2 C_2} v_2 + \frac{1}{C_2} i, \quad (6)$$

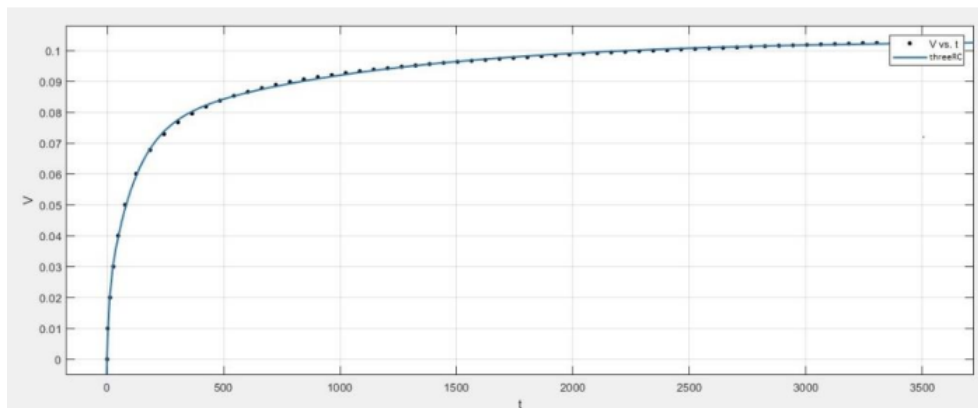
Odzivi sustava ekvivalentnog kruga uspoređeni su s izmjerenim odzivima stvarnih baterijskih ćelija (Sony VTC6) te je odlučeno da se za opis sustava koriste dva RC kruga. Razlog tome je veća preciznost od jednog RC kruga, a ujedno i manji zahtjev na količinu estimiranih parametara nego što bi to bio slučaj kod tri RC kruga, iako takav krug daje neznatno bolje podudaranje s mjerenim podacima.



Slika 91. Jedan RC krug

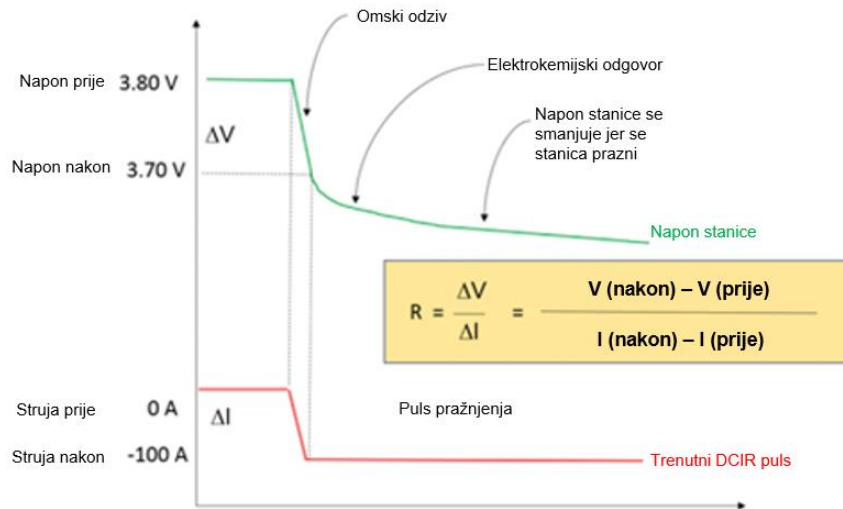


Slika 92. Dva RC kruga



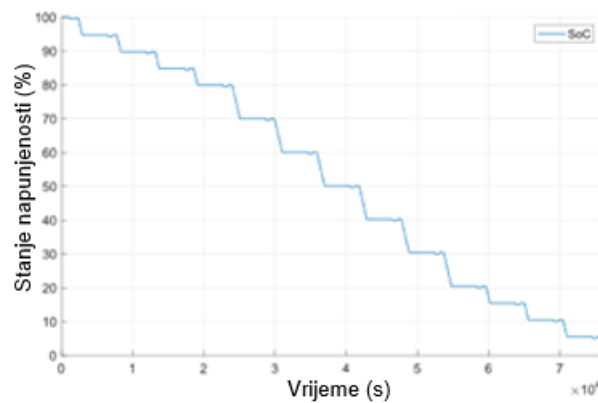
Slika 93. Tri RC kruga

Svi parametri ekvivalentnog kruga mijenjaju se s temperaturom, stanjem napunjenosti te raznim drugim faktorima koji su u ovome slučaju zanemareni. Iz tog su razloga parametri estimirani na način da se u obzir uzimaju promjena temperature te stanje napunjenosti. Parametri modela estimirani su uz pomoć DCIR testova, a primjer jednog DCIR testa prikazan je na Slika 94.



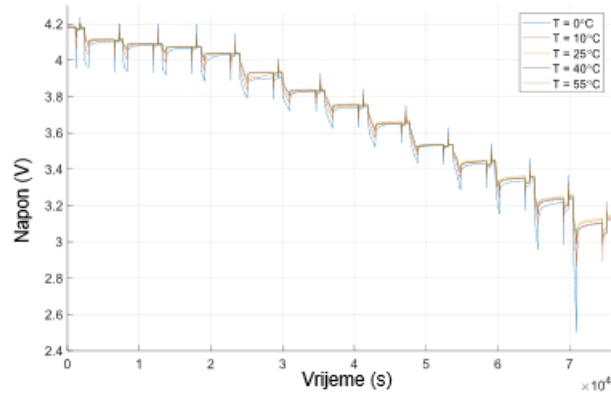
Slika 94. Primjer DCIR testa [literatura 15]

DCIR testovi napravljeni su u intervalima pet različitih temperatura (0°C – 55°C) te na 14 stanja napunjenosti (Slika 95).

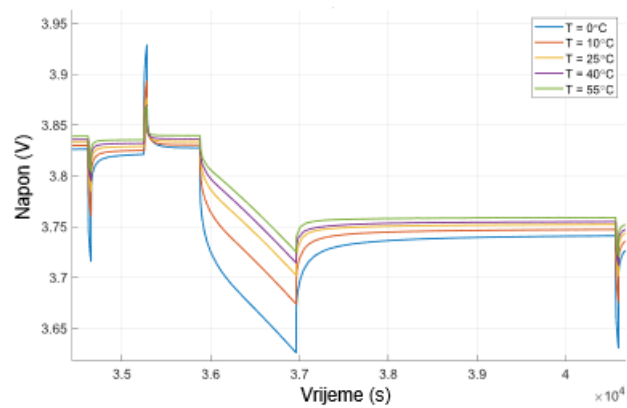


Slika 95. Stanja napunjenosti prilikom testiranja ćelija

Nakon navedenih testiranja, dobili su se odzivi napona (Slika 96, Slika 97).

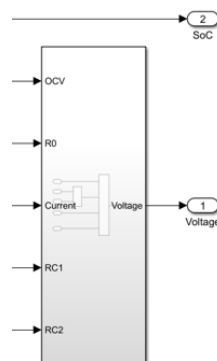


Slika 96. Odstiz napona na svim temperaturama



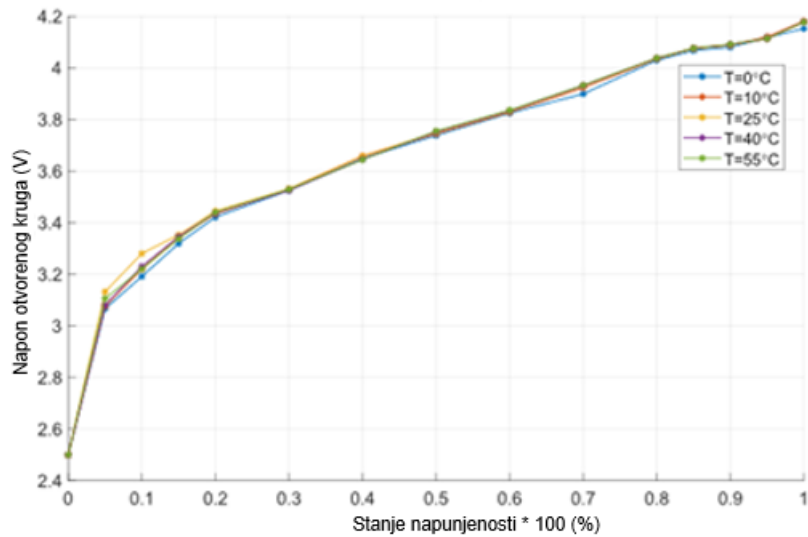
Slika 97. Odstiz napona na svim temperaturama na jednom od stanja napunjenosti

Model baterije modeliran je u MATLAB Simulink sučelju (Slika 98) uz pomoć kojeg su estimirani parametri ekvivalentnog kruga na način da se odzivi modela pokušaju poklopiti s odzivima napona dobivenih pomoću mjerenja.

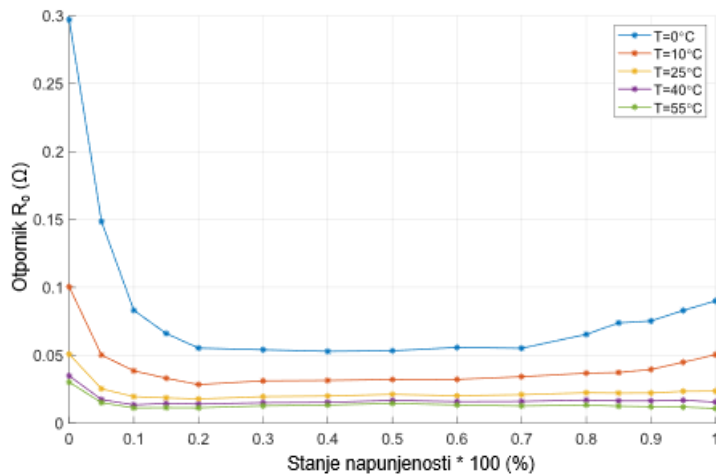


Slika 98. Dio modela ekvivalentnog kruga baterije

Neki od dobivenih estimiranih parametara u odnosu na SoC prikazani su na slikama ispod (Slika 99, Slika 100).

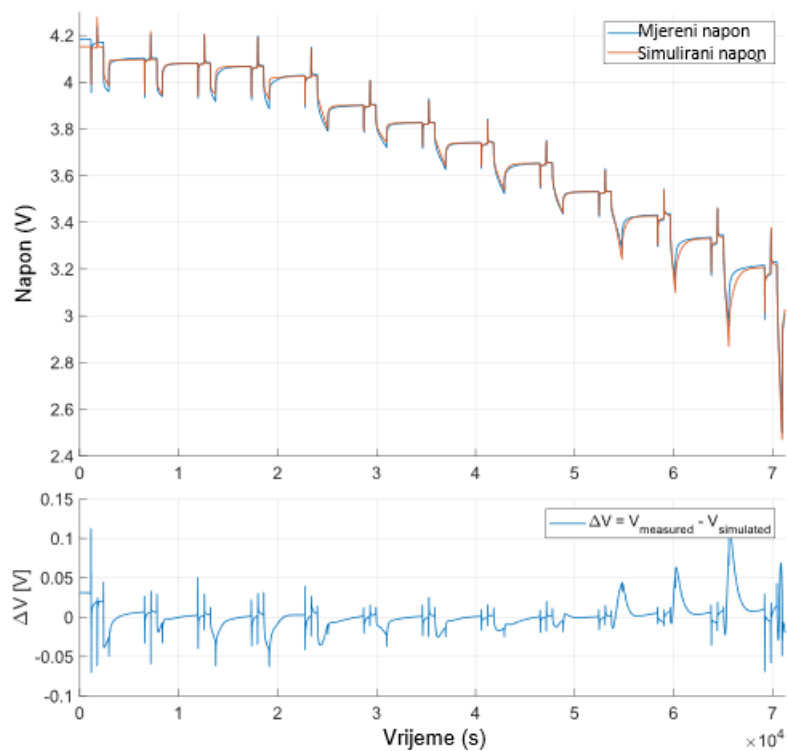


Slika 99. Ovisnost napona otvorenog kruga (OCV) o stanju napunjenosti (SoC)

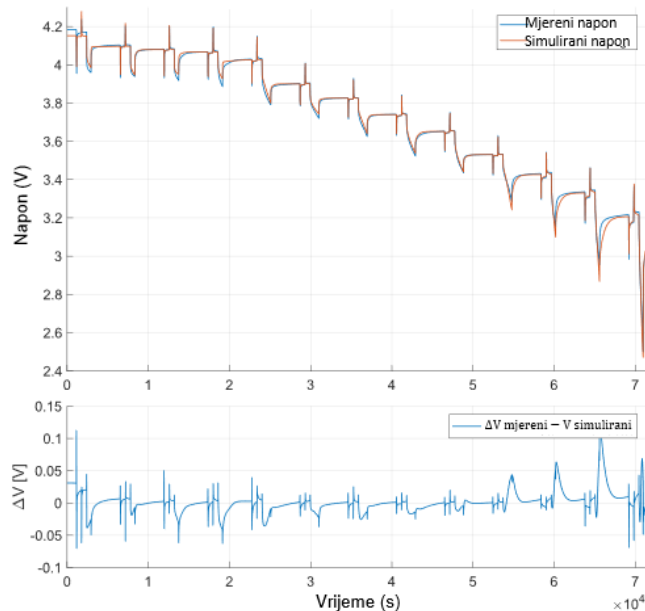


Slika 100. Ovisnost otpornika R_0 o stanju napunjenosti (SoC)

Odzivi sustava koji koristi estimirane parametre za temperature 0°C i 55°C, prikazani su na Slika 101. i Slika 102. ispod.

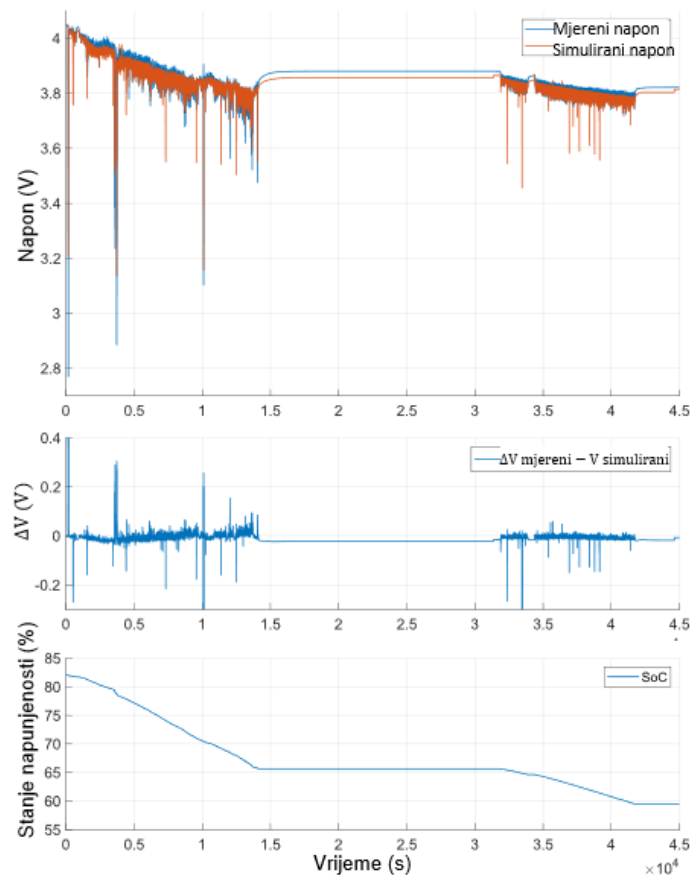


Slika 101. Usporedba simuliranog i mjenog napona na 0°C



Slika 102. Usporedba simuliranog i mjenog napona na 55°C

Estimirani parametri validirani su pomoću mjerenja dobivenih prilikom testiranja bolida. Na Slika 103. može se vidjeti da model uspjeva opisati ponašanje sustava.



Slika 103. Mjereni napon u usporedbi sa simuliranim naponom

6. Unapređenja ovjesa

Pri koncipiranju i razvoju sustava ovjesa bolida *VulpesR*, kao glavni cilj postavljen je kriterij što većeg smanjenja mase u odnosu na prethodni bolid. Budući da je u skladu s pravilima Formula Student natjecanja dopušteno korištenje šasije prethodnog bolida, sama ideja bila je poboljšanje performansi novog električnog bolida u odnosu na performanse njegovog prethodnika. Naime, prethodni bolid bio svojevrsan veliki korak za cijeli tim i studente zbog prelaska s izrade bolida pogonjenog motorom s unutarnjim izgaranjem na bolid s električnim pogonom, no neke komponente, kao i dijelovi ovjesa, nisu bili optimalno konstruirani što se očitivalo i u pogledu korištenih materijala, posljedično utječući na samu masu komponenti.

Navedeni nedostatak, odnosno veća masa komponenti ovjesa, nastojala se riješiti koristeći dvije metode. Prva uključuje primjenu materijala manje gustoće, poput aluminijskih i titanskih legure te kompozitnih materijala, umjesto dosadašnje uporabe čelika. Druga, gotovo jednako važna metoda je optimiranje geometrije, odnosno topologije prema očekivanim opterećenjima koja su dobivena iz simulacija dinamike vozila.

6.1. Prednji i stražnji ovjes

Koncept ovjesa nije se značajno mijenjao u odnosu na ovjes prethodnog bolida. Naime, i dalje je zadržan oblik četvrtinskog ovjesa s dva poprečna ramena po kotaču pri čemu prednji sklop ovjesa karakterizira nezavisnost lijeve i desne strane, što znači da vertikalni pomak prednjeg lijevog kotača ne utječe na pomak prednjeg desnog kotača.

Uz to, aktuacija prigušivača i opruga odvija se direktno putem tlačne šipke (engl. *pushrod*) koja je s donje strane vezana na donje poprečno rame, a s gornje na prigušivač. Gibanjem kotača vertikalno prema gore, tlačna šipka prenosi gibanje s određenim prijenosnim omjerom koji nije konstantan te komprimira prigušivač i oprugu. U usporedbi s prethodnim bolidom, kod kojeg je postojala veza prednje lijeve i prednje desne strane, uklonjen je prednji stabilizator (engl. *anti-roll bar*) čija je zadaća povećavanje krutosti vozila prema valjanju (rotacija oko uzdužne osi vozila) povezivanjem lijevog i desnog dijela ovjesa torzijskom oprugom. Iako se time inicijalno smanjuje mogućnost podešavanja ovjesa, a samim time i ponašanja vozila pri djelovanju bočnog ubrzanja/sile, odluka je bila opravdana simulacijom dinamike vozila kojom je zaključeno da se zadovoljavajuće podešavanje može ostvariti i zadržavanjem samo stražnjeg stabilizatora. Prednost je, dakako, smanjena masa.



Slika 104. Prikaz prednjeg ovjesa VulpesR-a

Za razliku od prednjeg ovjesa, stražnji se ovjes nije konceptualno mijenjao u odnosu na prethodni bolid. Također se koristio četvrtinski ovjes, no ostala je zavisnost lijeve i desne strane zbog zadržavanja stražnjeg stabilizatora. Uz to, zbog postojanja stabilizatora, akcija prigušivača i opruge nije direktna preko tlačne šipke kao na prednjem ovjesu, nego se vertikalni pomak kotača pomoću navedenog elementa prenosi na zakretnu polugu/klackalicu (engl. *rocker/bellcrank*) koja je u jednoj točki vezana za prigušivač, u drugoj za stabilizator, a u trećoj za tlačnu šipku.



Slika 105. Prikaz stražnjeg ovjesa VulpesR-a

Kao što je vidljivo na prethodnim slikama (Slika 104., Slika 105.), komponente razvijene u sklopu ovog projekta uključuju gornja i donja dvostruka poprečna ramena, tlačne šipke, zakretnu polugu, nosače kotača, glavčine kotača te prihvate komponenata ovjesa na šasiju. Nakon proizvodnje istih, ovjes se sastavljao kako bi se bolid doveo u vožno stanje.

Nakon sklapanja bolida, uslijedila su testiranja u sklopu kojih se, između ostaloga, provjeravala pouzdanost bolida te korelacija simulacija sa stvarnošću. Jedan od načina validacije simulacija uključivao je ispitivanje komponenata ovjesa tenzometarskim trakama gdje su na testnom poligonu vožene ispitne procedure definirane u simulacijama dinamike vožnje te su zatim uspoređivana opterećenja predviđena simulacijom i izmjerena opterećenja.

Na testiranju se također provodilo i ispitivanje lijepljenih spojeva aluminijskih umetaka u kompozitnim cijevima izrađenim od ugljičnih vlakana (CFRP). Cilj je bio potvrditi nosivost tako izrađenih dvostrukih poprečnih ramena.

6.2. Nosač kotača

Nosač kotača (engl. *upright*) ima više funkcija, a neke od njih su prenošenje sile s kotača, omogućavanje ležajnih mjesta za ležajeve kotača te držanje kočionih kliješta na njihovom

mjestu. Sila iz pneumatika prenosi se na naplatak, s naplatka se preko tri vijka prenosi na glavčinu kotača, a s glavčine se prenosi na nosač kotača. Nakon prijenosa sila, one se raspoređuju na gornju i donju vilicu, sponu, amortizer i oprugu. Omjer u kojem će se sile rasporediti, najviše ovisi o kinematičkim značajkama ovjesa bolida.



Slika 106. Prikaz sklopa kotača na VulpesR-u

Nosač kotača na prethodnom projektu, odnosno bolidu *Vulpes* bio je glodana pozicija, a sam nosač kotača napravljen je iz jednog bloka aluminijske legure 7075-T5 na tro-osnom CNC stroju. Pri konstruiranju komponenti, bitno je voditi računa o tehnologiji proizvodnje, što u konačnici znači da konstruirana pozicija mora biti proizvediva.

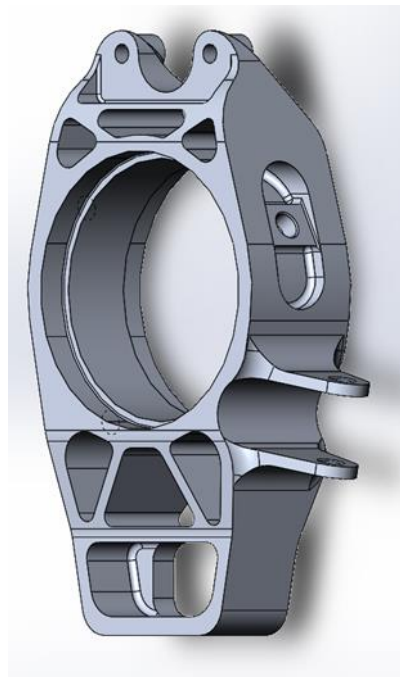
Glodanje je jedna vrsta tehnologije obrade odvajanjem čestica gdje se oštricom skida materijal sa sirovca. Postoje i tehnologije obrade odvajanjem čestica koje ne koriste alat, primjerice rezanje vodom, no takva i slične tehnologije nisu prikladne za ovu specifičnu upotrebu.

Postupak započinje obradom sirovca te se postepeno odvaja materijal sve do konačnog, željenog oblika. Konačan oblik se nalazi unutar sirovca. Mana ove tehnologije je limitiranost alata jer nije moguće proizvesti dijelove vrlo kompleksne geometrije i dijelove sa šupljinama.

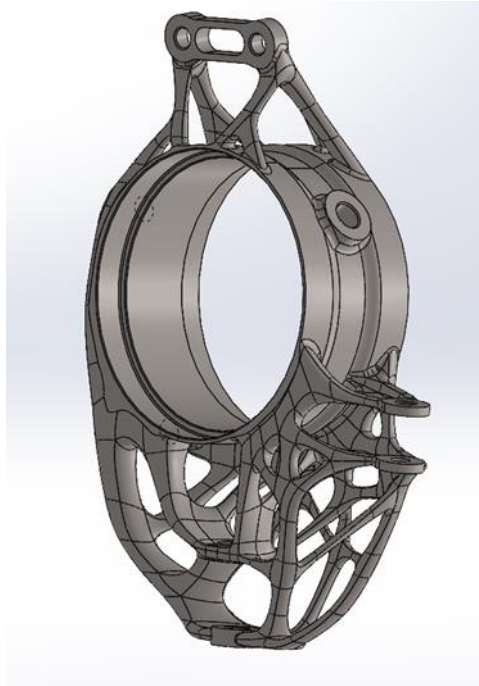
Pri konstruiranju određenih dijelova, korisno je potražiti inspiraciju u samoj prirodi. Kosti su adekvatan primjer lagane, no izuzetno čvrste i krute konstrukcije. Površinski su slojevi građeni

od tvrdog i kompaktnog koštanog tkiva, a unutrašnjost kosti je građena od spužvastog tkiva. One prirodno zadebljaju na dijelovima gdje su više opterećena, dok su tanje na dijelovima koji su manje opterećeni. Inženjeri mogu oponašati takve strukture koristeći topološke optimizacije, koje optimiraju oblik dijela. S pravilno postavljenom simulacijom, moguće je dobiti optimalnu konstrukciju, najmanju masu te najveću krutost za definirane rubne uvjete i opterećenja. Prilikom optimiranja, dobit će se većinom organski oblici koji su kompleksnih oblika s mnogo šupljina, veoma slično ljudskim kostima.

Pri izradi nosača kotača za *VulpesR*-a korištena je topološka optimizacija, a da bi proizvedeni proizvod bio što vjerniji rezultatu simulacije, odlučeno je da se ne proizvodi tradicionalnim putem, već aditivnom proizvodnjom. Nosač kotača proizveden je iz jednog komada titanske legure Ti 6AL-4V tehnologijom laserskog selektivnog taljenja (engl. *selective laser melting*, dalje: SLM). Na slici je prikazana usporedba nosača kotača proizvedenog tradicionalnim tehnologijama te nosača kotača proizvedenog SLM tehnologijom.



Slika 107. Nosač kotača proizveden tradicionalnom tehnologijom



Slika 108. Nosač kotača proizveden SLM tehnologijom

Proces SLM tehnologije odvija se u nekoliko koraka:

- stroj polaže tanak sloj titanskog praha na podlogu
- laser prelazi preko podloge te selektivno zavaruje prah
- podloga se uvlači za debljinu sloja titanskog praha
- stroj ponavlja prethodna dva koraka do dobivanja završnog proizvoda
- tehničar iz stroja vadi komad koji je utopljen u titanski prah
- tehničar čisti komad od viška praha koji se može koristiti u sljedećem ciklusu

Gotov komad ima hrapavu površinu, a izgledom podsjeća na lijevani komad. Nakon što je proizveden, potrebno je skinuti sav dodatan (engl. *support*) materijal koji je bio potreban prilikom proizvodnje, ali ne i na konačnom proizvodu. Sam proces skidanja dodatnog materijala je dugotrajan, a okvirno procijenjeno vrijeme za jedan nosač iznosi 5-6 sati rada. Površina proizvoda je nakon aditivne proizvodnje pregruba te nema dovoljnu dimenzijsku točnost, stoga je potrebno obraditi nosače kotača na CNC stroju. Završni proizvod je krući i lakši od nosača kotača proizvedenog "tradicionalnim" metodama.



Slika 109. Nosač kotača VulpesR-a proizveden SLM tehnologijom



Slika 110. Obraden nosač kotača VulpesR-a

7. Pogonski sustav

7.1. Odabir i proračun pogonskog vratila

Pogonsko vratilo predstavlja vrlo važan dio koji prenosi moment s motora na kotač te je najčešće izrađeno od čelika. Isti je i slučaj s pogonskim vratilom bolida Vulpes. U svrhu smanjenja mase pogonskog vratila novog bolida, evaluirala su se nova pogonska vratila izrađena od kompozitnih materijala- polimera ojačanih ugljičnim vlaknima (engl. *CFRP*).

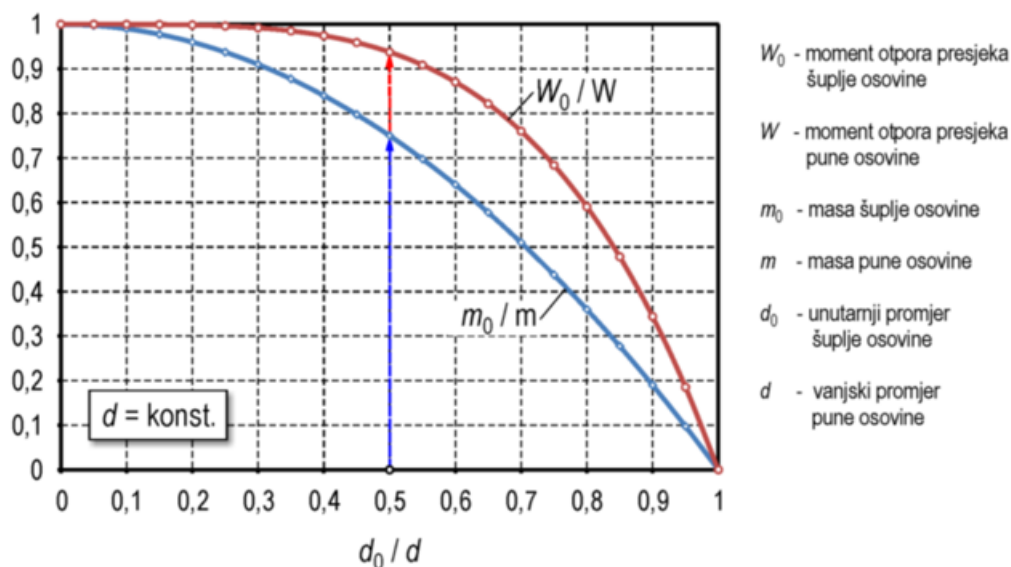
Analitički proračun je napravljen u programu MS Excel dok je numerička provjera rezultata napravljena metodom konačnih elemenata u programskom paketu Abaqus. Cijeli proces proračuna je opisan u [18].

Zbog toga što VulpesR nasljeđuje šasiju prethodnika i geometrije ovjesa, pogonsko vratilo nije smjelo biti promjera većeg od 22mm. Kompozitno vratilo tako malog promjera zahtijeva relativno veliku duljinu lijepljenog spoja i umetaka koji ulaze u provrt vratila kako bi se postigla zahtijevana površina spoja. Takva konstrukcija ne bi rezultirala značajnijim smanjenjem mase.

Kompozitni materijali također imaju određene nedostatke. Njihova svojstva se mijenjaju s temperaturom i količinom vlage u zraku, posebno u smjeru različitom od smjera vlakana. Kompozitni materijali su relativno krhki i osjetljivi na zarezno djelovanje, a veliku opasnost predstavljaju teško vidljiva oštećenja uslijed udara, tzv. BVID (engl. *barely visible impact damage*). Iz tih je razloga odabrana izvedba čeličnog pogonskog vratila.

U svrhu smanjenja mase je odabrana izvedba šupljeg pogonskog vratila, što je opravdano na Slika 111. Vidljivo je da masa pada brže nego moment otpora presjeka W_0 .

Iako je izvedba šupljeg pogonskog vratila kompleksnija opcija s obzirom na to da se unutrašnjost mora obraditi odvajanjem čestica, i dalje je odabrana zbog velike uštede na masi. (~28%, ~1,265 g umjesto ~1,770 g).

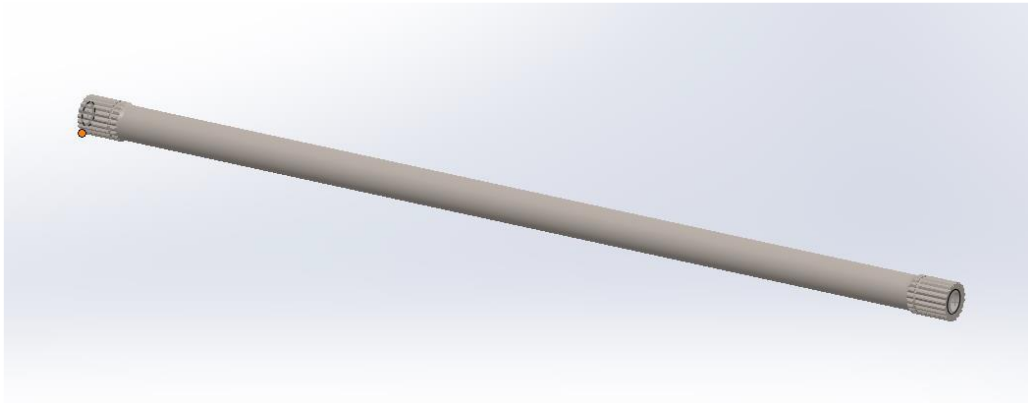


Slika 111. Relacija smanjenja mase i otpora presjeka šupljih pogonskih vratila

Pri proračunavanju vratila se promatralo vremenski varijabilno opterećenje umjesto konstantnog kako bi se spriječilo predimenzioniranje. U Tablica 19. je prikazano u kolikom je vremenskom udjelu konstrukcijski element opterećen određenim momentom pri određenoj brzini vrtnje. To je pogodno jer ga je u tom obliku moguće unijeti u alat *KISSsoft* koji je korišten za proračunavanje spomenutih dijelova. Spektar je izrađen na taj način da je simulirana „autocross“ dinamička disciplina na odabranim *Formula Student* stazama.

Tablica 19. Spektar opterećenja

Učestalost slučaja opterećenja [%]		Brzina vrtnje motora [min^{-1}]						
		2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000
Okretni moment motora [Nm]	10	1,95	4,02	19,12	31,06	9,99	5,24	0,61
	20	0	0,12	3,78	3,05	0,97	0,97	0
	30	0	0	1,34	4,38	1,58	0,49	0
	40	0	0	1,34	1,58	2,68	0,97	0
	50	0,61	0,49	0,61	1,83	1,22	0	0



Slika 112. CAD model pogonskog vratila

Proračun je prema svojstvima materijala i spektru opterećenja proveden u programu *KISSsoft 2016*, te su dobivena maksimalna naprezanja od 385 MPa uz faktor sigurnosti $S \geq 1,2$.

Proizvedeno je vratilo imalo sljedeće karakteristike:

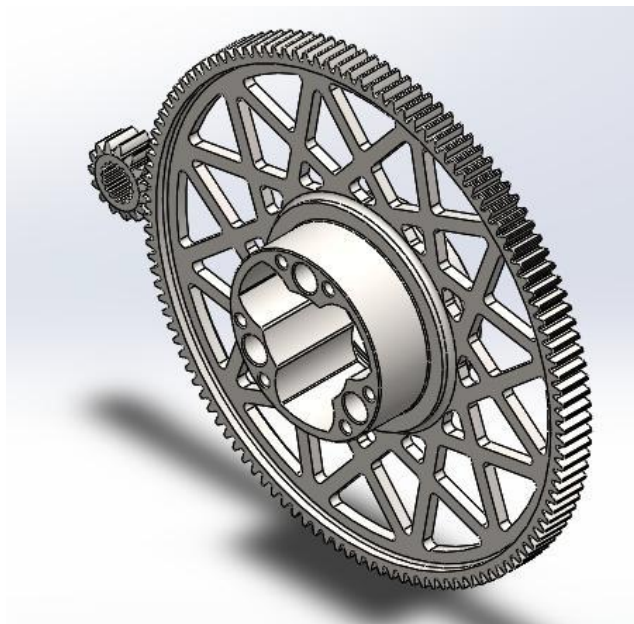
- Maksimalna brzina vrtnje: 1750 min
- Moment torzije: 400 Nm
- Snaga: 40 kW (ograničeno pravilnikom *Formula Student*)
- Masa: 874,1 g
- Materijal: K600 BÖHLER (45NiCrMo16)
- Vanjski promjer: 21 mm
- Unutarnji promjer: 12 mm

7.2. Reduktor

Svrha reduktora je smanjenje broja okretaja, odnosno povećavanje momenta elektromotora na optimalnu vrijednost za pogon *Formula Student* bolida.

Prilikom razvoja *VulpesR*-a, kao glavni cilj postavilo se unaprijeđivanje prethodnog koncepta. Prema proračunima, određen je novi prijenosni omjer $i = 8$. Za 8 okreta na ulazu u reduktor, izlazno vratilo se okreće samo jednom. Razlog za izmjenu prijenosnog omjera je taj što *Vulpes* nije mogao prenijeti sav moment na podlogu sa omjerom $i = 11,57$ zbog proklizavanja kotača prilikom kretanja iz mirovanja.

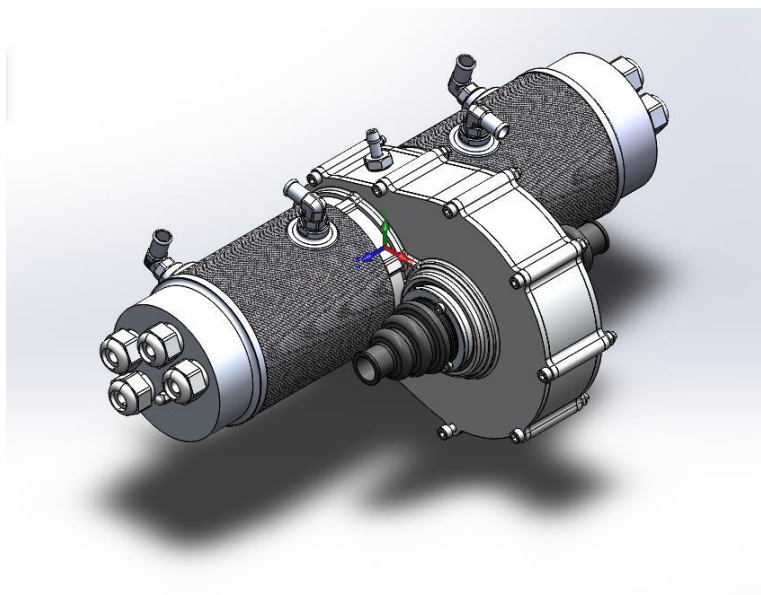
Prema preporukama iz [19], za prijenosne omjere ispod 8 treba izvesti jednostupanjski reduktor, što je naposljetku i učinjeno. Simulacije su potvrdile da s novim prijenosnim omjerom pogonski kotači ne proklizavaju prilikom kretanja iz mirovanja.



Slika 113. Zupčanici u zahvatu

Iako kosi zubi osiguravaju bolji stupanj prekrivanja i bolje uvjete opterećenja, sprezanjem zupčanika generira se aksijalna sila. Zaključeno je da ta aksijalna sila predstavlja velik nedostatak te otežava izradu, zbog čega je odabran čelnički par s ravnim zubima.

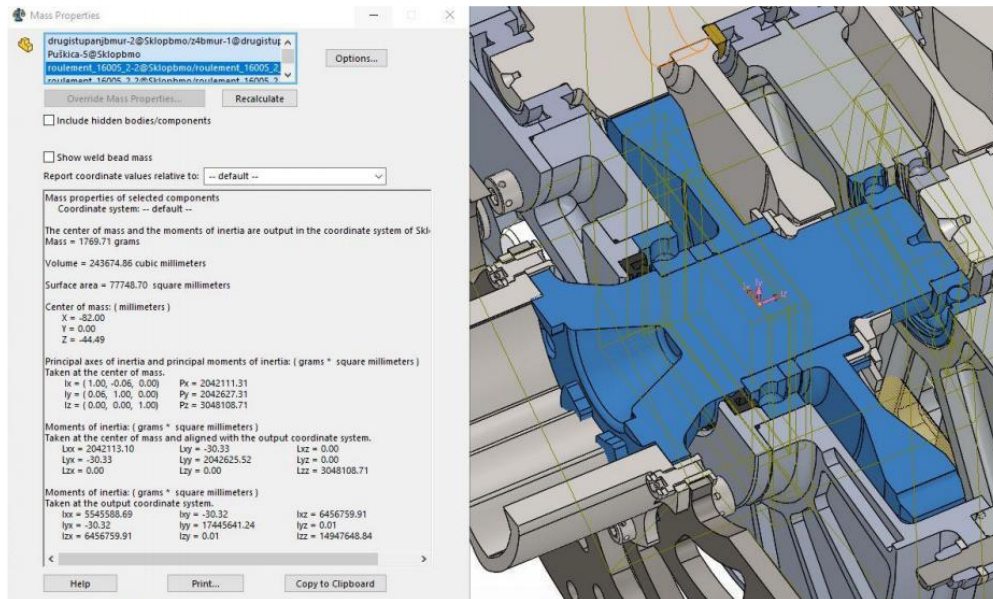
Odabrani modul za zupčanički par iznosi 1,5 mm, dok je broj zubi manjeg (pogonskog) zupčanika 15. Sukladno tome je, iz prijenosnog omjera, broj zubi gonjenog zupčanika 120.



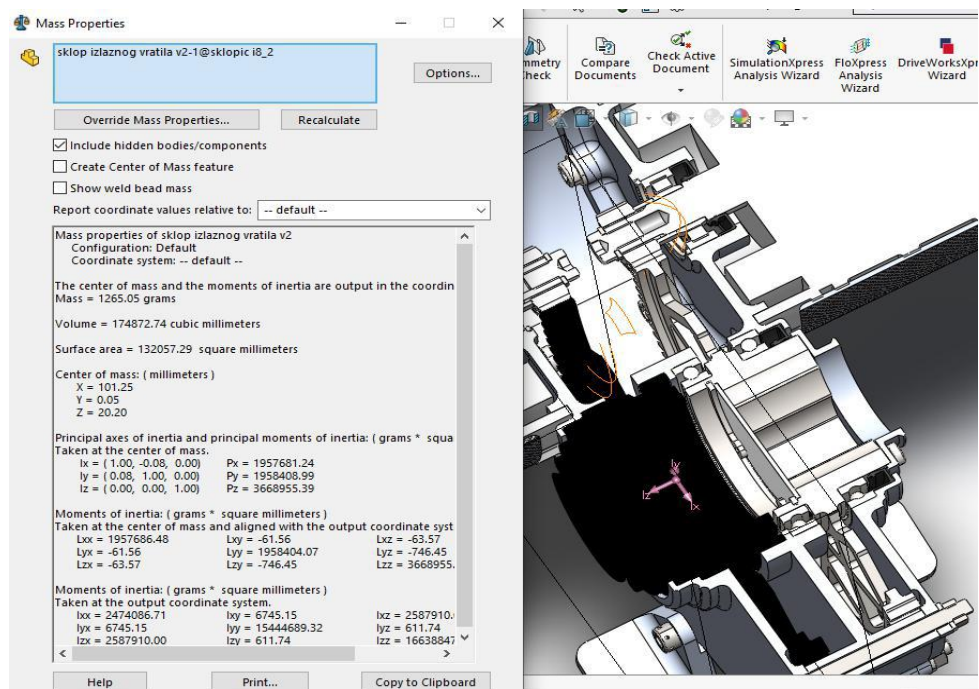
Slika 114. Sklop reduktora s motorima

Kao što je već spomenuto, izveden je jednostupanjski čelnički prijenosnik sa ravnim zubima sa dijeljenim kućištem i integriranim izlaznim vratilom u svrhu smanjenja mase.

Izlazno vratilo *Vulpes*-a ima masu 1770 g, a izlazno vratilo *VulpesR*-a ima masu 1265 g što predstavlja uštedu 505 g, tj. ~28% uštede na masi.



Slika 115. Izlazno vratilo na *Vulpes*-u



Slika 116. Izlazno vratilo na *VulpesR*-u

Za materijal ozubljenja odabran je čelik za cementiranje. Procesom cementacije se postiže potrebna tvrdoća boka zuba. Za izradu reduktora su odabrani sljedeći materijali:

- Pogonski zupčanik (Z1) → 18CrNi8
- Gonjeni zupčanik (Z2) → 18CrNiMo7-6
- Vratila → XNiCrMo4
- Kućište → Al7075-T6

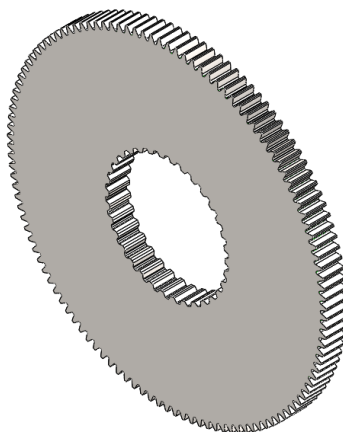
7.3. Topološka optimizacija komponenata

Topološka optimizacija korištena je u svrhu dobivanja optimalnog oblika sa minimalnom masom za specifičan način opterećivanja konstrukcije.

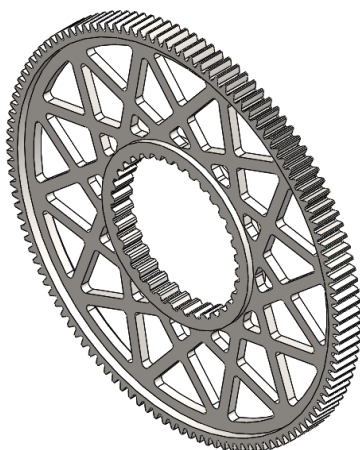
Prvo je potrebno proračunati početnu geometriju s ciljem određivanja pomaka i naprezanja, zatim nakon topološke optimizacije i otkrivanja područja gdje je moguće oduzeti materijal, potrebno je modificirati model.

Na modelu smanjene mase sljedeći je korak ponovno provođenje analize sa identičnim rubnim uvjetima koja pokazuje novi iznos pomaka i naprezanja.

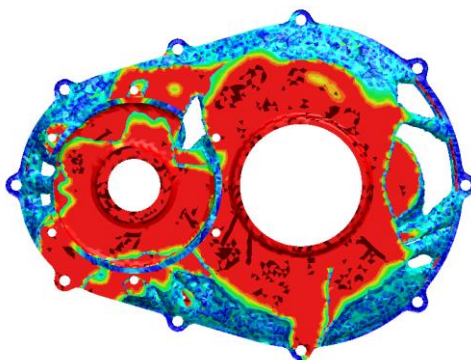
Ukoliko novodobiveni pomaci i naprezanja ulaze unutar granice dopuštenih vrijednosti, a masa je smanjena za željeni iznos, može se reći da je topološka optimizacija uspješno provedena.



Slika 117. Zupčanik Z2 prije provedbe topološke optimizacije (1959 g)



Slika 118. Zupčanik Z2 po provedenoj topološkoj optimizaciji (578,18 g)



Slika 119. Prikaz raspodjela opterećenja topološki optimiranog kućišta prijenosnika

Tablica 20. Usporedba prijenosnika bolida Vulpes i VulpesR

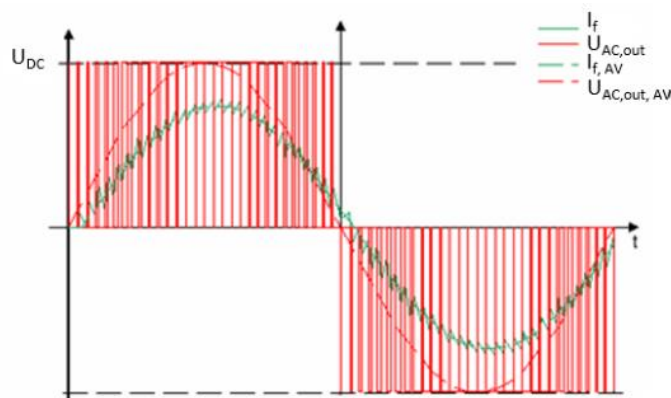
Prijenosnik	Masa (g)	Relativna kompleksnost	Broj rotirajućih dijelova	Efikasnost [%]
Vulpes dvostupanjski	3800	2	10	95
VulpesR jednostupanjski	1300	1	6	97

Manje rotirajućih dijelova te dijelova u dodiru predstavljaju manje mjesta za gubitke, što rezultira većom efikasnošću i manjim zagrijavanjem, te shodno tome boljim plasmanom na dinamičkim plasmanima.

7.4. Električni motori

7.5. Frekvencijski pretvarači

Za mogućnost upravljanja brzinom vrtnje električnih motora, potrebno je imati odgovarajući učinski pretvarač. Izmjenični motori, poput sinkronih motora s trajnim magnetima, zahtijevaju pretvarač koji će na izlazu osigurati izmjenični valni oblik napona promjenjive amplitude i frekvencije. Prethodno opisani pretvarač naziva se *izmjenjivač* (engl. *inverter*) i on omogućava pretvorbu istosmjernog napona baterije na ulazu u pravokutni napon (zbog tzv. PWM modulacije) čiji je prvi harmonik izražen (Slika 120), dok su viši harmonici premješteni na visoke frekvencije (zbog visokih sklopnih frekvencija izmjenjivača koje mogu biti i preko 16 kHz). Na taj je način moguće osigurati rotirajuće magnetsko polje armature potrebno za elektromehaničku pretvorbu.



Slika 120. PWM modulacija

U ovom bolidu, koji je unaprijeđena verzija prijašnjeg bolida, koristit će se isti pretvarač zbog dokazane kompatibilnosti izmjenjivača s korištenim motorima u bolidu. Korišteni su izmjenjivači MC-40, vidljivi na Slika 121., koje proizvodi Cognitio elektronika. Kako iz visokonaponskog napajanja postoji samo jedan istosmjerni izlaz/ulaz, izrađeno je zajedničko kućište za oba izmjenjivača od legure Al6061 debljine 2 mm, dok je poklopac kućišta izrađen od čelične ploče debljine 1 mm. Unutrašnjost kućišta prekrivena je izolacijskim papirom Nomex 410, dok su ostali spojevi, kojima teče visoka struja, osigurani mehanizmima za zaključavanje propisanim *Formula Student* pravilnikom. Osim samog kućišta, izrađeni su i hladnjaci za IGBT tranzistore koji rasipaju toplinu prilikom sklapanja, koji su redizajnirani s namjerom uštede na ukupnoj masi.



Slika 121. Izmjenjivač MC-40

Tablica 21. prikazuje karakteristike izmjenjivača. Tablica 22. opisuje kablove koji povezuju izmjenjivač i baterijski paket, a Tablica 23. kablove koji povezuju faze motora i izmjenjivač.

Tablica 21. Osnovni podaci izmjenjivača

Izmjenjivač:	Cognitio Elektronika MC-40
Kontinuirana snaga:	40 kW
Vršna snaga:	55 kW u trajanju 10 s
Maksimalni ulazni napon:	450 V (DC)
Kontinuirana izlazna struja:	100 A RMS
Vršna izlazna struja:	180 A RMS u trajanju 10 s
Sklopna frekvencija:	Do 16 kHz
Metoda upravljanja:	CAN, Analogni signal
Hlađenje:	Vodeno hlađenje
Napajanje logike izmjenjivača:	12 V (DC) ili 24V (DC)
Masa:	5.3 kg
Dimenzije (D x Š x V):	140 x 320 x 82.5 mm

Tablica 22. Podaci za žicu Lapp Kabel - ÖLFLEX® FD 90 CY 35mm²

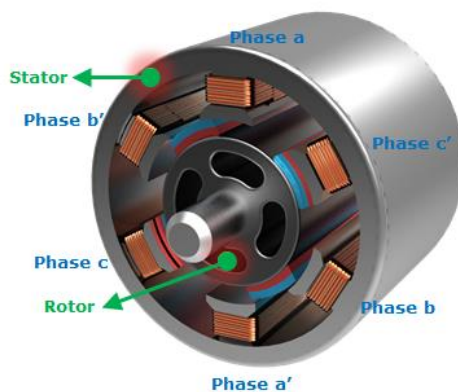
Vrsta žice:	Lapp Kabel - ÖLFLEX® FD 90 CY 35mm ²
Dozvoljena struja:	216 A
Dozvoljena struja osigurača:	150 A
Maksimalni radni napon:	600 V (DC)
Dozvoljena temperatura:	90 °C

Tablica 23. Podaci za žicu Lapp Kabel - ÖLFLEX® FD 90 CY 10mm²

Vrsta žice:	Lapp Kabel - ÖLFLEX® FD 90 CY 10mm ²
Dozvoljena struja:	73 A
Dozvoljena struja osigurača:	Osiguran interno u izmjenjivaču
Maksimalni radni napon:	600 V (DC)
Dozvoljena temperatura:	90 °C

7.6. Motori

Električni motor je stroj koji električnu energiju s ulaznih stezaljki pretvara u mehaničku energiju na vratilu. Najveća prednost električnih motora naspram motora s unutarnjim izgaranjem jesu velika gustoća snage, pa time i manje dimenzije i manja masa, visoki potezni moment i visoke razine korisnosti, često preko 90%. Za potrebe električnih pogona sve se češće koriste sinkroni motori s trajnim magnetima, vidljivi na Slika 122. Oni zbog magneta na rotoru nemaju gubitke u uzbudnom namotu, ali je potrebno pripaziti na magnete koji se pri visokim temperaturama mogu demagnetizirati. Kako bi se spriječilo pregrijavanje motora, potrebno je dizajnirati dobar sustav hlađenja. Kanali za vodeno hlađenje motora su relativno jednostavni za proizvodnju, s obzirom da se radi o protoku vode kroz plašt kućišta.



Slika 122. Sinkroni motor s trajnim magnetima

Korišteni motori (Tablica 24) tvrtke Alta Motors iz Sjedinjenih Američkih Država dizajnirani su za pogon *motocross* vozila zajedno s izmjenjivačima MC-40. Na motorima (Slika 123) nije potrebna zamjena dijelova, osim oklopa kućišta koji omogućava tok rashladne tekućine i brtvljenje strane gdje se nalaze prihvat faza i enkoder. Prema klasi izolacije motora definirana je maksimalna temperatura statorskog namota koja iznosi 150 °C te je potrebno oklop što kvalitetnije izraditi odabirom materijala koji je lagan, ali podnosi visoke temperature. Nakon pažljivog razmatranja, odlučeno je oklop napraviti od ugljičnih vlakana, dok će cijevi za vodu biti spojene na aluminijske priključke (Slika 124) koji će naknadno biti zalijepljeni zbog lakše izrade priključaka i plašta. Kapa motora (Slika 125), koja nije toplinski opterećena, izrađena je od aluminija. S obzirom da je tehnologija izrade s aluminijem relativno jednostavna, ovo je bio logičan odabir za relativno kompliciranu geometriju kape motora, uz malu masu.



Slika 123. Pogonski motori spojeni na reduktor



Slika 124. Aluminijski priključci za cijevi

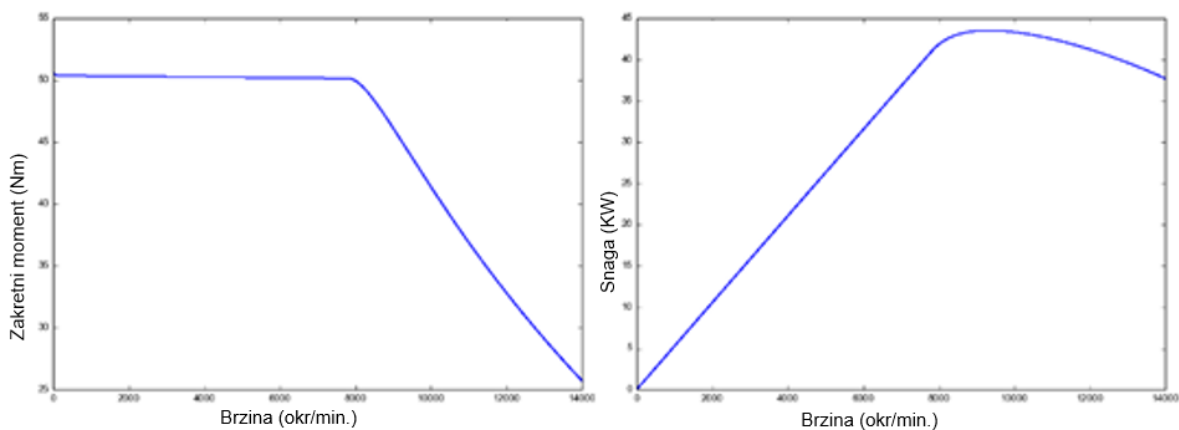


Slika 125. Kapa motora

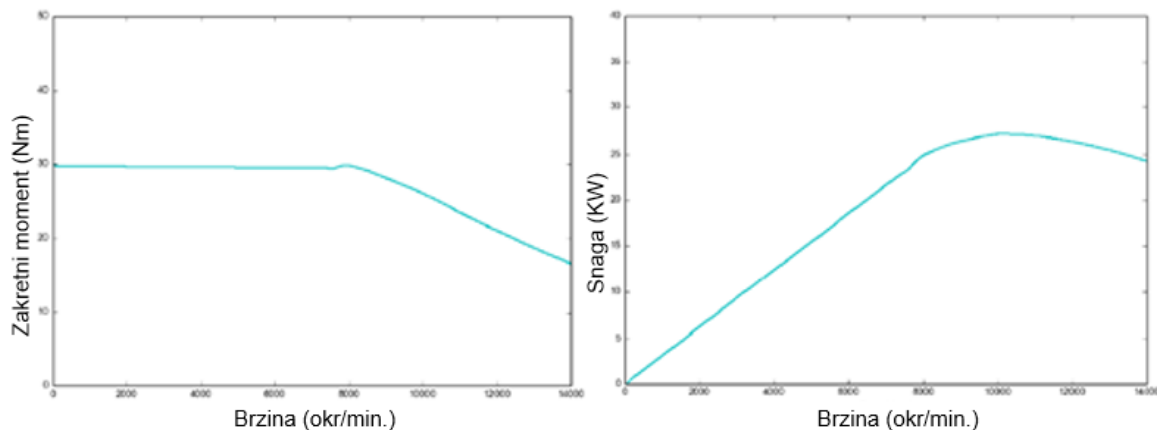
Tablica 24. Osnovni podaci motora TM-40

Motor:	Alta Motors TM-40
Tip motora:	Sinkroni motor s permanentnim magnetima
Kontinuirana snaga:	30 kW
Vršna snaga:	43 kW u trajanju 5 s
Ulazni napon:	300 V (AC)
Nazivna struja:	100 A RMS
Vršna struja:	180 A RMS
Nazivni moment:	30 Nm
Vršni moment:	50 Nm
Maksimalna brzina:	14000 o/min
Masa:	6.8 kg
Maksimalna temperatura namota:	150 °C
Vrsta hlađenja:	Vodeno hlađenje
Tip mjeraca brzine i položaja:	Inkrementalni enkoder

Slika 126 i Slika 127 predstavljaju krivulje ovisnosti zakretnog momenta i snage o brzini vrtnje vratila za kontinuiran rad i prikaz krivulja maksimalnog zakretnog momenta i snage.



Slika 126. Maksimalni zakretni moment i snaga



Slika 127. Kontinuirani zakretni moment i snaga

8. Sigurnosna unapređenja baterijskog paketa

8.1. Kućište baterijskog paketa

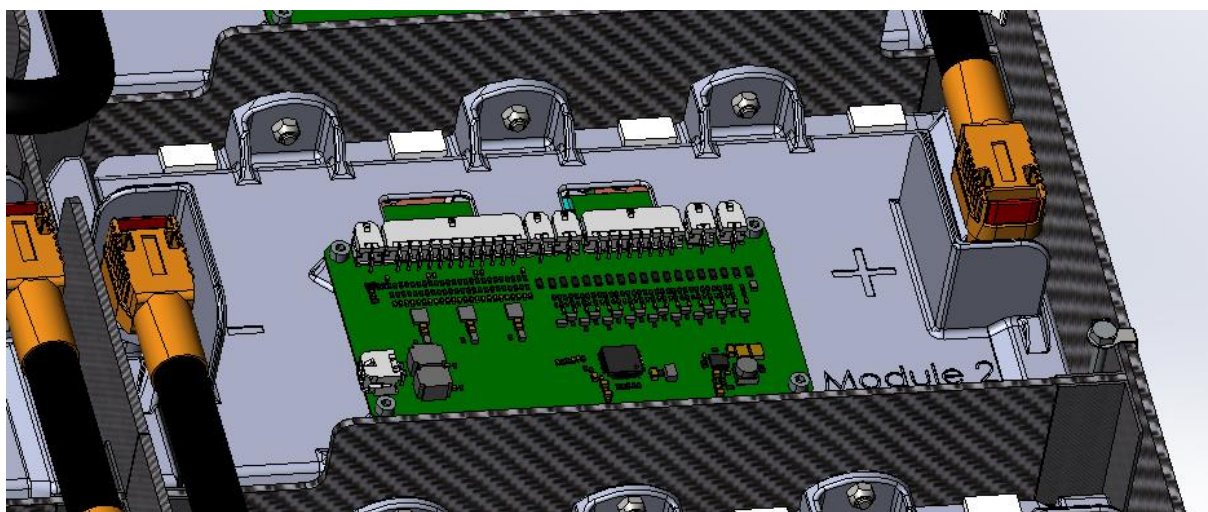
Za razliku prethodnog kućišta baterijskog paketa, na bolidu FSB-RT06R kućište je znatno olakšano. Baterija više nije smještena pri dnu, već je ugrađena dodatna ploča koja ima ulogu strukture bočnog udara (eng. *side impact structure*) što dodatno osigurava bateriju. Također je dodano i staklo za izolaciju baterijskog paketa s unutarnje strane.

8.2. Povećanje sigurnosti baterijskog paketa

S obzirom da je kod baterijskog paketa riječ o visokonaponskom sustavu te litij-ionskim baterijskim ćelijama, bilo je potrebno uvesti čim više sigurnosnih sustava koji će maksimalno osigurati rad na sustavu ili pak zaštititi korisnika u slučaju nepredviđenih situacija.

8.3. Keying

Keying označava sustav međusobnog spajanja modula kablovima koji onemogućuje pogrešno spajanje istih kako bi se izbjegao rizik kratkog spoja. Na poklopcima modula su postavljene pregrade koje onemogućuju da se kablovi provuku do konektora koji nije namijenjen za njih.



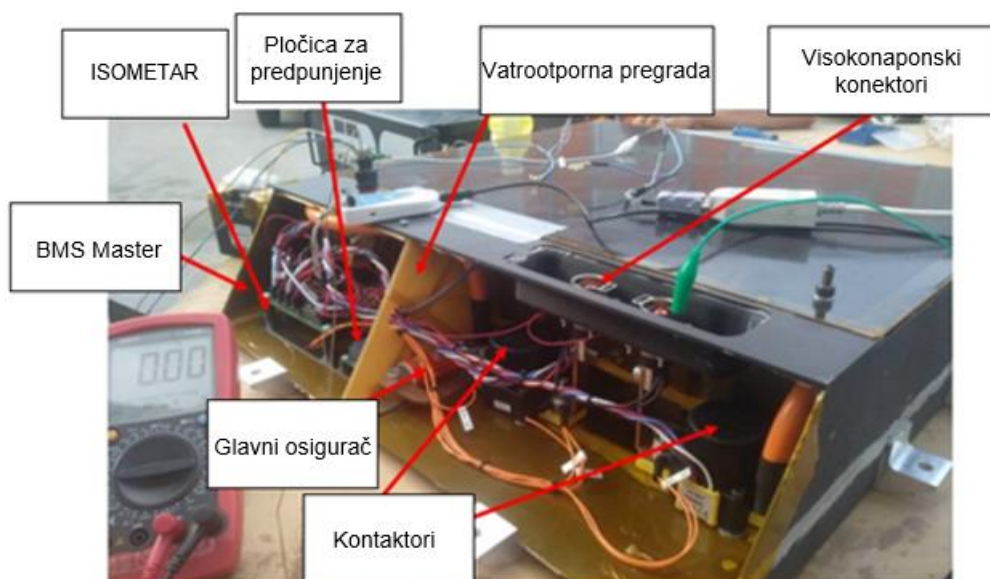
Slika 128: Prikaz pregrada na poklopcu modula

Uz navedene sigurnosne mjere, na kablove su dodani 3D printani dijelovi čija je uloga ojačanje te onemogućavanje deformacije i savijanja kablova, ali i onemogućavanje spajanja na pogrešan konektor.

8.3.1. Povećanje udjela vatrootpornih komponenti

S obzirom na to da je odabrano 3D printanje kao tehnologija izrade poklopaca modula, koristio se materijal *Ultem 1010* proizvođača *Stratasys* kojeg karakterizira vatrootpornost. Materijal je

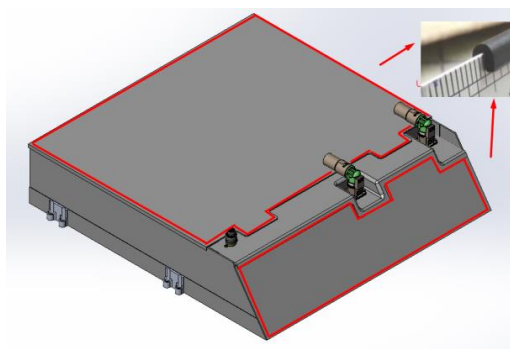
ocijenjen UL 94V-0 vatrootpornim standardom, što znači da gorenje materijala mora prestati nakon svega deset sekundi. Eventualne stvorene kapljice polimera se ne smiju zapaliti.



Slika 129: Prikaz ULTEM komponenti

8.4. Brtvljenje baterijskog paketa

Na baterijskom paketu su dodane brtve na prednjem i glavnom poklopcu koje osiguravaju baterijski paket od kapljica vode uslijed kišnih uvjeta. S obzirom na to da i brtva mora biti sukladna standardu UL 94V-0, odabran je materijal Bisco BF-200 proizvođača Rogers Corporation koji zadovoljava isti standard.



Slika 130: Prikaz brtvljenja

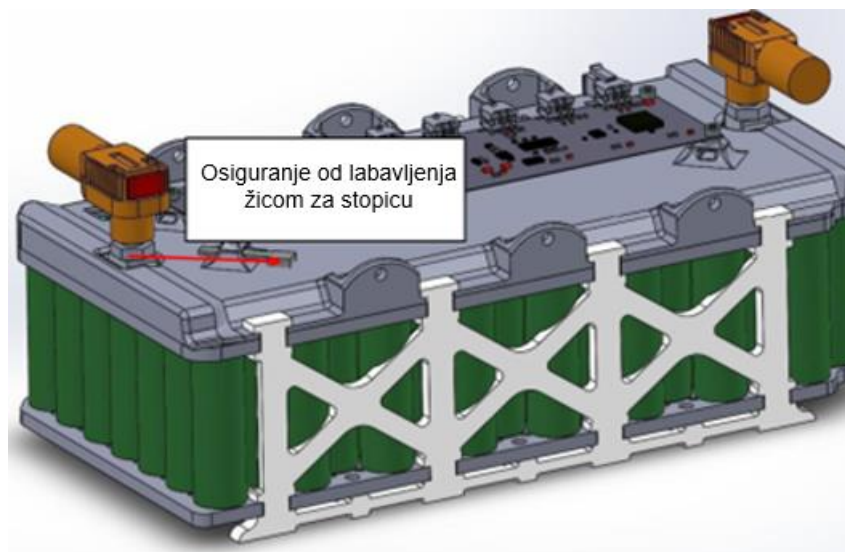
8.5. Poboljšano uzemljenje

Prema *Formula Student* pravilniku, svaka komponenta izrađena od vodljivog materijala mora biti uzemljena, stoga su sve komponente koje nisu bile direktno spojene na bakrenu mrežicu unutar sendvič konstrukcije kućišta uzemljene. Ranije to nije bio slučaj jer su komponente

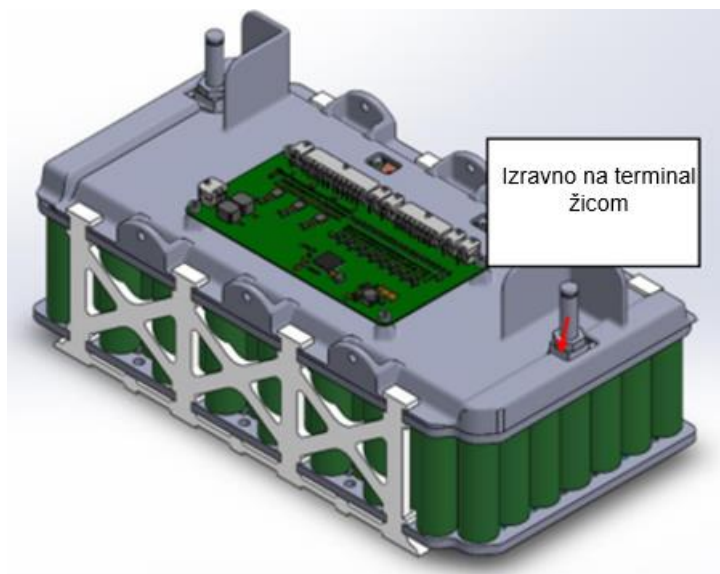
usađene u polimerno kućište, ali ih se iz sigurnosnih razloga ipak odlučilo uzemljiti, iako nemaju izravan kontakt s kućištem.

8.6. Osiguranje od odvrtnja i labavljenja konektora

Još jedna promjena uslijedila je i u načinu osiguranja protiv odvrtnja na *Radlok* pinovima. Na prethodnoj iteraciji baterijskog paketa u modulima, muški su konektori bili osigurani protiv odvrtnja na način da je na poklopac modula stavljena puškica te se žica provukla kroz nju i kroz muški konektor kako bi sve ostalo osigurano i u mjestu.



Slika 131: Stari način osiguranja od labavljenja



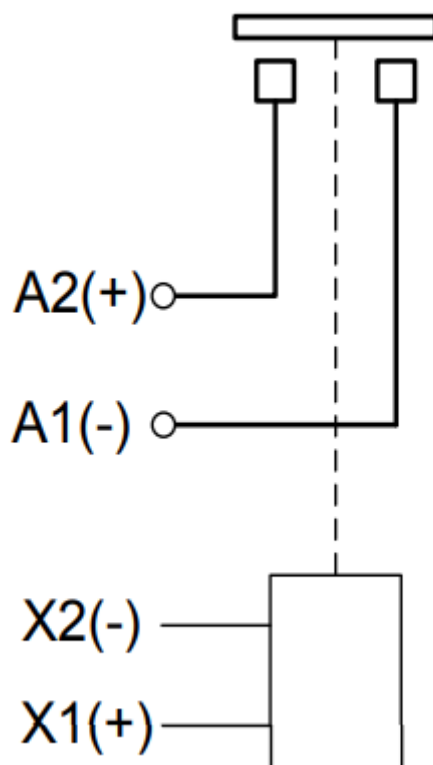
Slika 132: Novi način osiguranja od labavljenja

Kako bi se izbjeglo lijepljenje puškice na 3D printanu komponentu, način osiguranja je provlačenje žice kroz konektor te potom kroz terminal u koji je konektor uvijen.

8.7. Kontaktori za izolaciju baterijskog paketa

Kontaktori su tzv. "releji", odnosno elektromehaničke sklopke namijenjene zatvaranju i otvaranju strujnog kruga. Ideja na ovome projektu bila je niskim naponom od 12 V kontrolirati uključenje i isključenje strujnog kruga kojim prolazi velika struja. Pri tome na umu treba imati da kontaktor nakon isklapanja mora moći izdržati visoki napon, koji u ovome slučaju iznosi 400 V. U slučaju strujnog kruga ovog projekta, riječ je o električnom pogonu bolida, odnosno istosmjernoj struji koja izlazi iz baterije te prvo prolazi kroz kontaktore, zatim kroz konektore te debele kablove, a na koncu odlazi u invertere gdje se brzim preklapanjem pretvara u izmjeničnu stuju kojom se pogone elektromotori.

Na priloženoj slici nalazi se shematski prikaz kontaktora. Kada se na X1 spoji 12 V, a X2 se spoji na referentni potencijal 12-voltnog sustava, tada se zbog elektromagnetnog polja zavojnice provuče metalni dio koji se sklopi na A1 i A2 te je time strujni krug kroz A2 i A1 zatvoren.

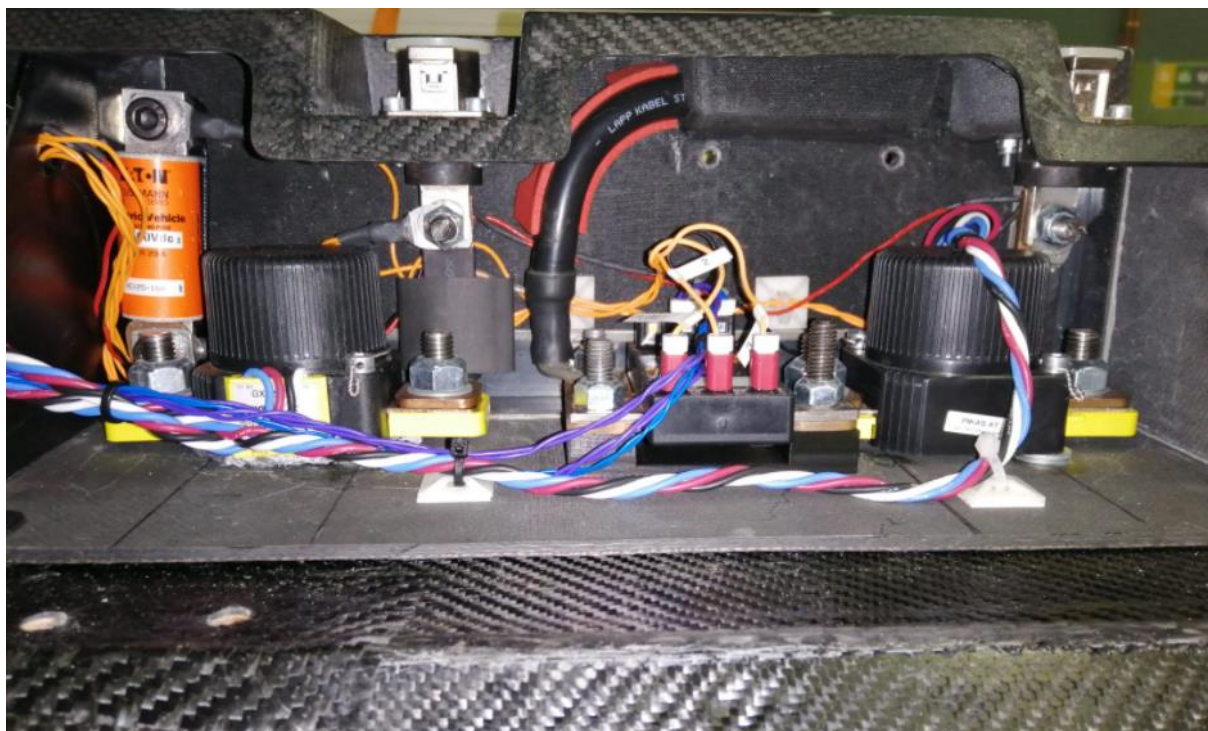


Slika 133: Shematski prikaz kontaktora

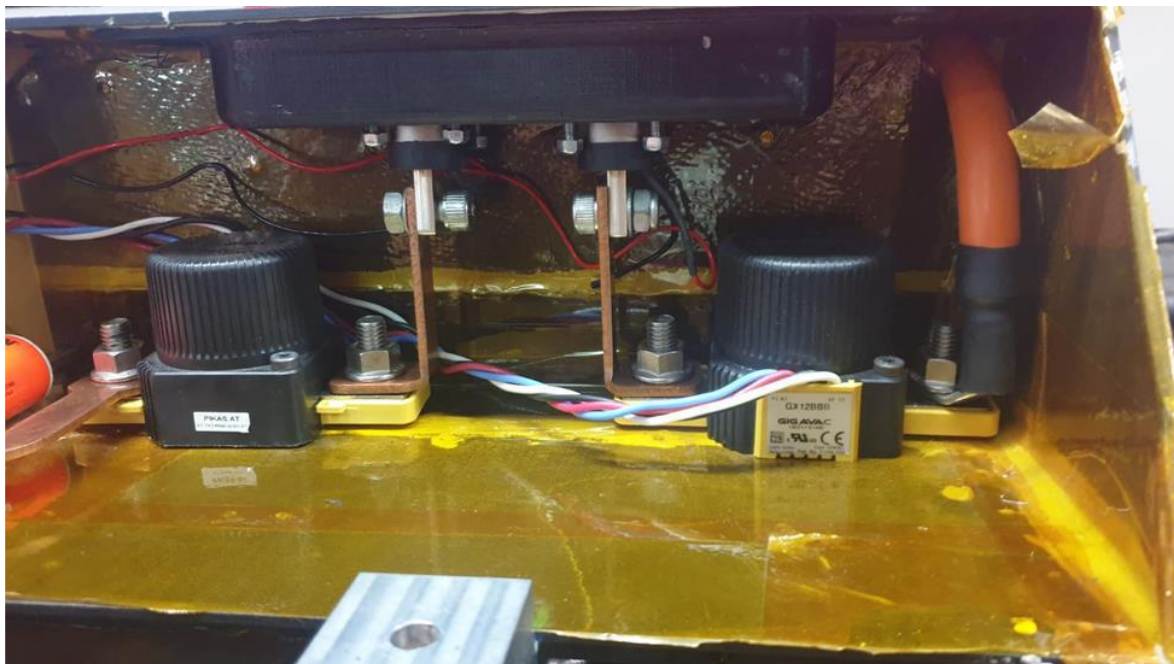
Pri tome je važno ispravno spojiti kontaktor, odnosno važno je da struja ulazi u A2, a izlazi iz A1. Kontaktor u tom slučaju može podnijeti iskrenje uslijed prekidanja strujnog kruga.

Zbog prevelike potrošnje kontaktora *GX12BBB* na bateriji bolida *Vulpes*, oni su zamijenjeni s *GX12SBB* kontaktorima koji posjeduju dvije zavojnice. Obje zavojnice povlače struju veće jakosti pri uključivanju, no potreban je protok struje samo na jednoj zavojnici kako bi kontaktor ostao sklopljen. Time se smanjuje struja koja teče kroz zavojnice i cijeli *shutdown* krug.

Shutdown krug serijski je spoj sklopki koji služi za napajanje kontaktora, odnosno za izolaciju i spajanje baterijskog paketa s ostatkom pogona. Sklopke koje čine *shutdown* krug kritične su sklopke koje se otvaraju ako se u bolidu pojavi greška u nekom od podsustava. Primjerice, u slučaju detektiranja greške s očitanjem senzora za položaj pedale gasa ili zakreta volana, otvara se *shutdown* krug te se time baterija izolira, odnosno vozilo gasi.



Slika 134: Gigavac GX12SBB kontaktori u bateriji FSB-RT06R



Slika 135: Gigavac GX12BBB kontaktori u bateriji FSB-RT06

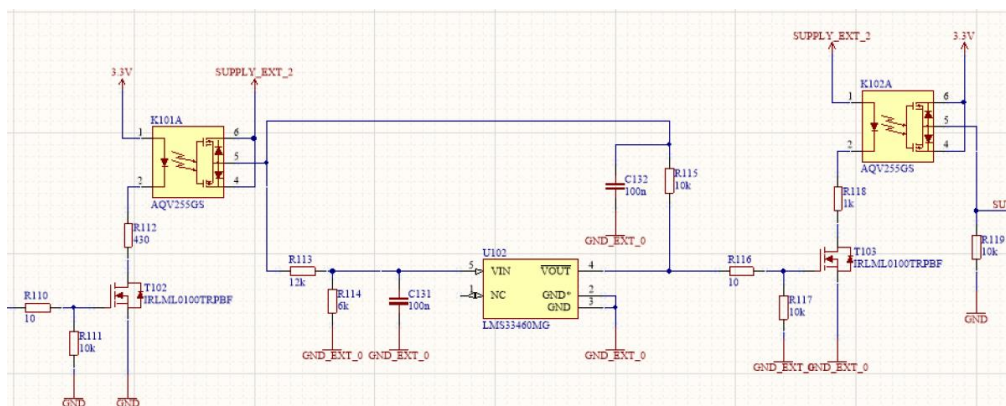
8.8. Promjene na *BMS Master*

Glavne zadaće *BMS Mastera* su:

- Komunikacija s *BMS Slave-ima* te obrada dobivenih podataka. Ukoliko *BMS Master* odluči da je poslana temperature previsoka ili je poslani napon prenizak, odnosno previsok, otvara kontakte te električki izolira baterijski paket od ostatka pogona, što rezultira gašenjem auta.
- Kontrolira redosljed sklapanja kontaktora. Postoje kontaktori za plus i minus terminal baterije, i jedan manji kontaktor koji služi za predpunjenje DC-link kondenzatora. *BMS Master* upravlja sekvencom njihova paljenja. Za početak pali minus, zatim predpunjenje (engl. *precharge*), te po punjenju DC-link kondenzatora na 95% napona baterije dolazi do zatvaranja plus i otvaranja kontaktora predpunjenja.
- Odlučuje kada je u tijeku predpunjenje DC-link kondenzatora, kada je bolid upaljen (kontaktori su sklopljeni) ili ugašen (kontaktori su otvoreni).
- Komunicira s upravljačkom jedinicom vozila (engl. *Vehicle Control Unit*) koja predstavlja najvažniji dio bolida. *BMS Master* s ostatkom auta komunicira putem CAN komunikacijskog protokola (engl. *Controller Area Network*), sa *Slaveovima* komunicira preko isoSPI komunikacijskog protokola (engl. *Isolated Communications Interface*). Ovakav način komunikacije je identičan bolidu *Vulpes*.

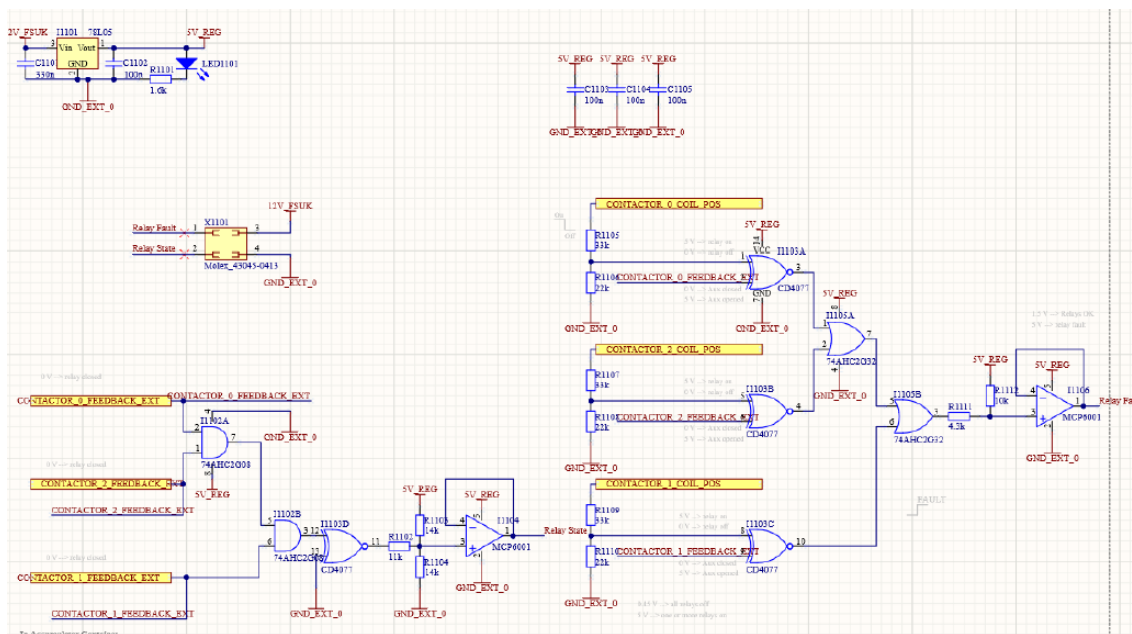
Uočeni su i riješeni određeni problemi primijećeni tokom rada bolida *Vulpes*.

Dodan je detektor podnapona koji očitava nisku logičku razinu u slučajevima kada je vrijednost napona niskonaponske baterije ispod 9 V. Ispod tog napona nije moguće pobuditi zavojnice koje sklapaju kontakte.

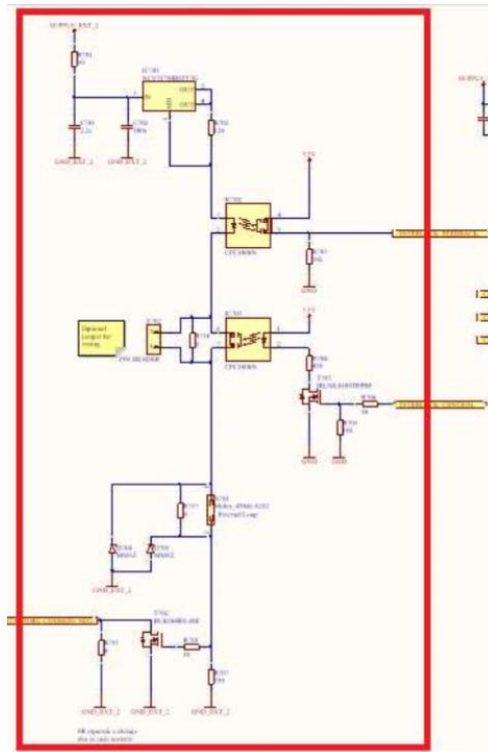


Slika 136: Krug za detekciju podnapona koji je dodan na BMS Master

Slika 136 prikazuje krug za detekciju podnapona koji je dodan na BMS Master. Slika 137 prikazuje novi krug za nadzor kontaktora kako bi se moglo nadgledati i usporediti zadano i trenutno stanje kontaktora bez potrebe očitavanja pomoću "open wirea".



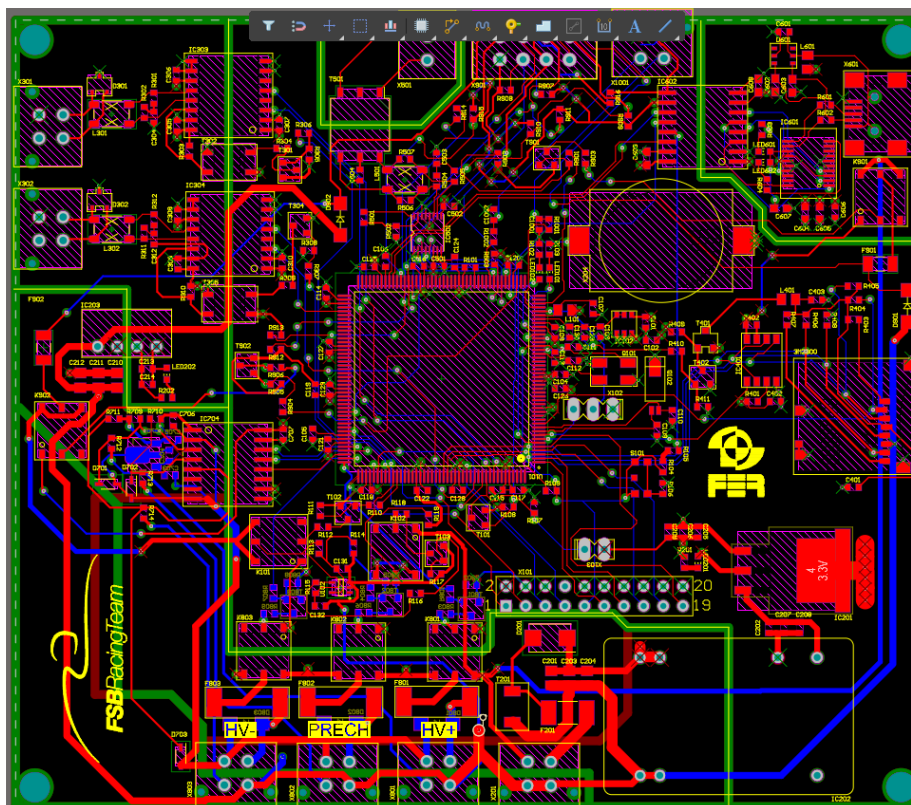
Slika 137: Krug za nadzor kontaktora



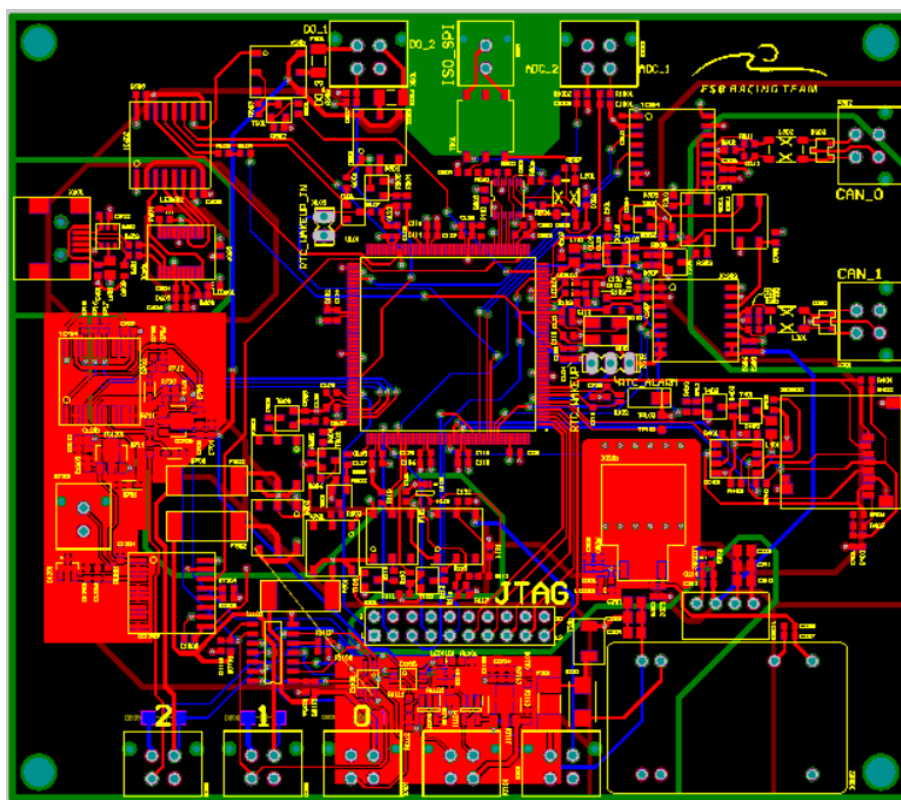
Slika 138: Interlock krug

Slika 138 prikazuje redundantan *interlock* krug koji je zbog redundantnosti izostavljen. Uz to, promijenjen je JTAG konektor te je sada stavljen standardni "pin header" čiji razmak između pinova iznosi 2.54 mm. Nakon stavljanja standardiziranog konektora znatno je olakšano reprogramiranje mikroprocesora na *BMS Masteru*.

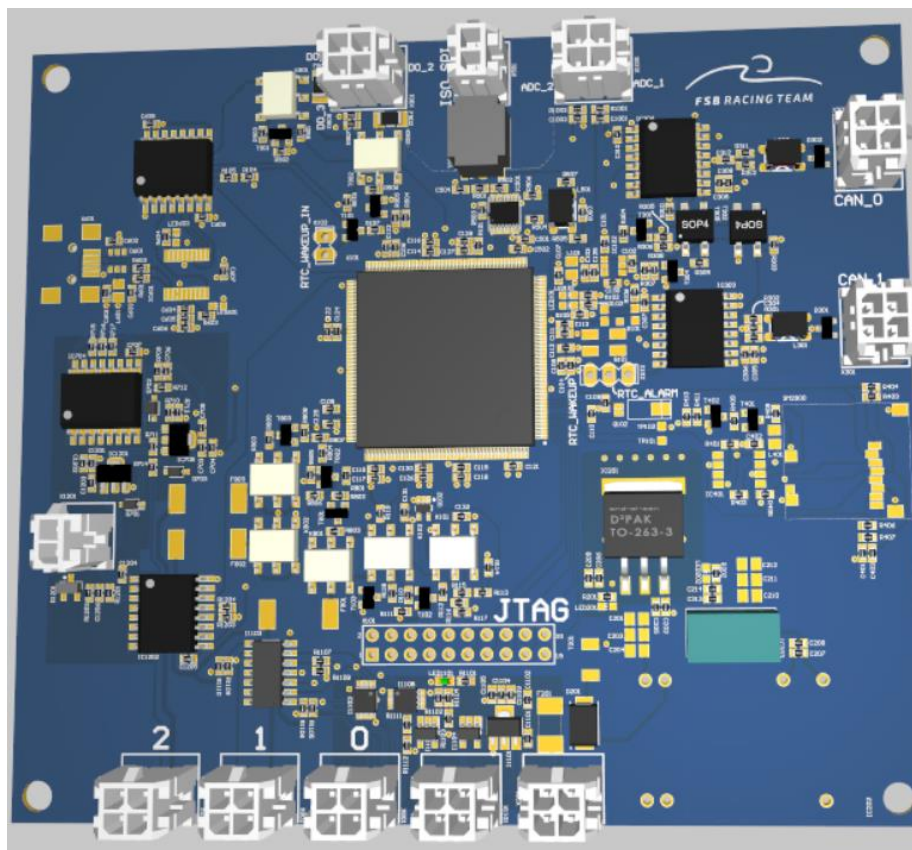
Osim toga uklonjena je i baterija koja je bila na samoj tiskanoj pločici jer nije bilo potrebe za njom, a umjesto nje stavljeni su regulatori napona.



Slika 139: BMS Master prije preinaka



Slika 140: BMS Master nakon preinaka



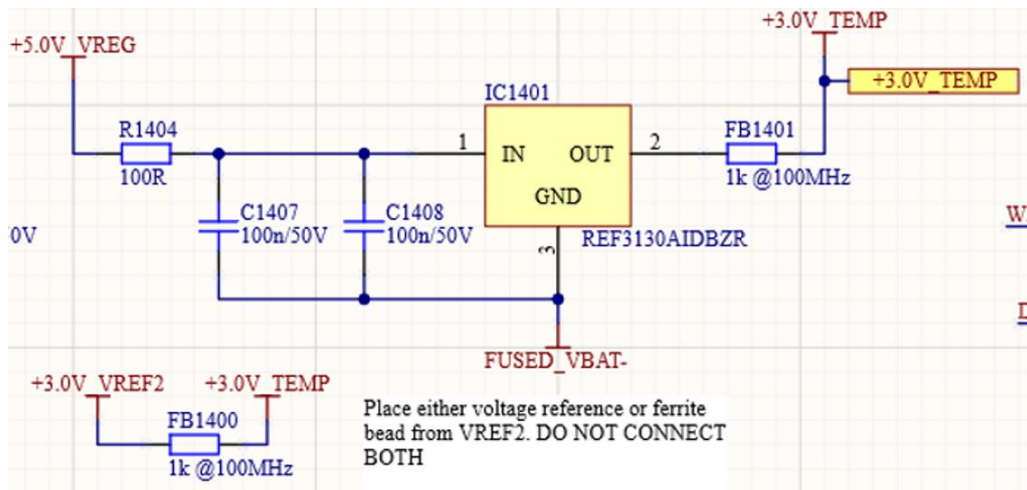
Slika 141: 3D prikaz BMS Mastera nakon preinaka

8.9. Promjene na BMS Slave

Glavne uloge BMS Slavea su:

- Komunikacija s BMS Masterom isoSPI komunikacijskim protokolom.
- Mjerenje napona i temperature ćelija u modulu.

Na bolidu *Vulpes*, BMS Slave je bio prva komponenta tog tipa vlastite izvedbe te su se, zbog kratkog vremena izrade, uočile pogreške. Kroz testiranja uočila su se poboljšanja postignuta promjenom PCB-a. Dodan je feritni prsten te regulator napona kao referenca napona. Prije ove promjene, temperaturni senzori su crpili snagu od 5W sa DC-DC pretvarača. Senzori su se napajali s 3 V umjesto 12 V, što dovodi do smanjenja potrošnje na 25 % dosadašnje. Osim toga, sada se može birati hoće li se temperaturni senzor spojiti na VREF_2, naponsku razinu od 3 V koja se koristi na ostatku logike, ili će se spojiti na poseban naponski regulator koji služi samo za temperaturne senzore. Zamisao je spojiti senzore na već postojeći 3 V te su ostavljene dvije mogućnosti kako bi se kroz provedbu različitih ispitivanja i testova moglo zaključiti koja je bolja.

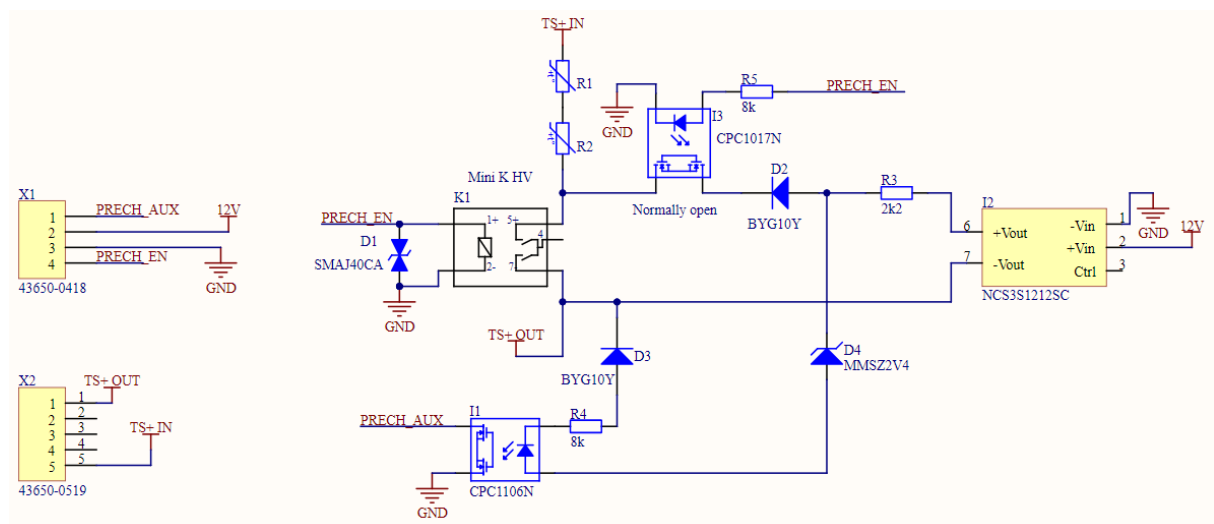


Slika 142: Dodatni naponski regulator za temperaturne senzore

Dodani su feritni prsteni kako bi se spriječio ulazak visokofrekvencijskih vođenih smetnji iz ostatka sustava u *BMS Master*. Kondenzatori na ulazima u naponske regulatore su povećani s 10 na 100 nF, što je usporilo čitanje rezultata sa 1 na 10 μ s. Dolazi do značajne promjene temperature unutar raspona minuta. Ostvarila se bolja filtracija bez narušenja točnosti očitavanja.

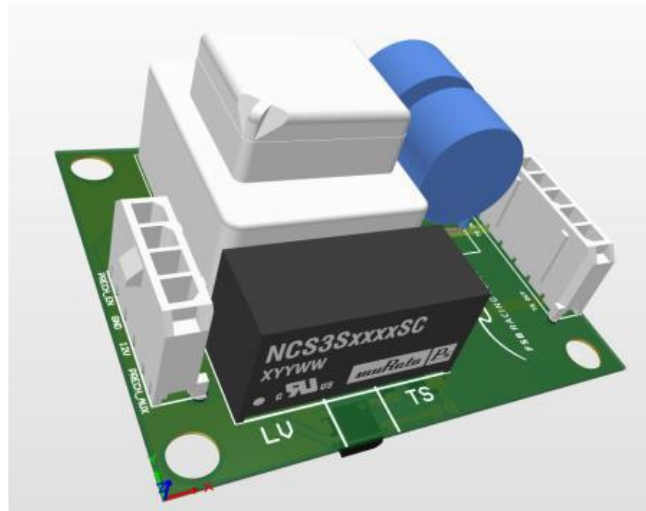
8.10. Pločica za predpunjenje

Pločica za predpunjenje (engl. *precharge PCB*) nabija DC-link kondenzatore, velike kondenzatore koji stabiliziraju napon na ulazima u izmjenjivače. Redizajnirana pločica je jednostavnija jer je detekcija grešaka kontaktora maknuta s *precharge PCB*-a na *BMS Master*. Osim toga, dodan je *optocoupler* koji služi zaštiti naponskog regulatora na tiskanoj pločici.



Slika 143: Shematski prikaz precharge PCB-a

Korišteni su PTC otpornici koji su dizajnirani da dobro rade u prijelaznim pojavama s kondenzatorima. Mini K HV kontaktor se uključuje i isključuje ovisno o *enable* naredbi primljenoj od *BMS Mastera*. *BMS Master* prima informacije o naponu u kondenzatorima od IVT senzora koji mjeri struju i napon na tri različita mjesta, uključujući kondenzatore. IVT MOD-300 je senzor koji mjeri struju koja izlazi iz baterijskog paketa. Osim struje, senzor mjeri napon prije i poslije kontaktora na način da zna napon baterijskog paketa i napon na DC-link kondenzatorima koji su spojeni poslije kontaktora.



Slika 144: 3D prikaz Precharge PCB-a

9. Zaključak

Unatoč činjenici da se nije razvijao potpuno novi bolid, nego unaprijeđivao postojeći, članovi FSB Racing Teama su i u ovaj projekt uložili nadljudske napore i veliku količinu radnih sati. Na osnovi iste šasije i komponenata električnog dijela pogonskog sustava je nastao značajno drugačiji bolid od svog prethodnika.

Sezona 2019./20. naglo je prekinuta pandemijom COVID-19, te su sva službena i neslužbena natjecanja otkazana u fizičkom obliku. Kao nadomjestak, službena su natjecanja organizirala *online* natjecanja, gdje se sudjelovalo isključivo u statičkim disciplinama, a katkad i u kvazi-dinamičkim disciplinama temeljenim na trkaćim simulatorima.

FSB Racing Team je nastupio na tri *online* natjecanja, *FS Switzerland*, *FS United Kingdom* te *FS Online* organiziran od strane *FS Netherlands* i *FS East*. *FS Switzerland* organizirao se prvi put 2020. godine, pa se na tom natjecanju nisu dodjeljivali plasmani, nego samo usmene povratne informacije sudaca nakon održanog *Engineering Design Eventa*. Na *FS United Kingdom* je postignuto 33. mjesto od 66 timova u statičkim i 7. mjesto od 34 tima u dinamičkim disciplinama, dok je na *FS Online* tim u ukupnom poretku postigao značajno bolje 6. mjesto od 21 tima, među kojima su se našli i neki vodeći svjetski timovi.

U sezoni 2020./21. *VulpesR* sklopljen je i testiranja na stazu započeta su u svibnju, čime se počelo raditi na dijagnosticiranju i otklanjanju problema s pouzdanošću bolida. Sklopljeni bolid težio je 204,5 kg, što je smanjenje mase za više od 10 % u odnosu na *Vulpesovih* 229 kg.



Slika 145. VulpesR na Formula 1 stazi Hungaroring, u sklopu natjecanja FS Easter

Na *online* natjecanju *FS Switzerland* održane su samo statičke discipline natjecanja, pri čemu su postignuti značajni plasmani u sve 3 discipline. Osvojeno je 3. mjesto u *Cost and Manufacturing* i *Business Plan Presentation* disciplinama te 5. mjesto u *Engineering Design* disciplini u konkurenciji od 17 timova, među kojima su bili i vodeći europski timovi.

FSB Racing Team nastupio je *VulpesR*-om na četiri Formula Student natjecanja; neslužbenim natjecanjima *FS Easter* (Slika 145) i *FS Alpe Adria*, i službenim natjecanjima *FS East* i *FS Netherlands*, te ponovno na *online* natjecanju *FS Switzerland*. Tim je redizajnirao bolidom postigao značajan napredak, uspješno prošavši iz prvog pokušaja sve dijelove tehničkih pregleda na natjecanjima *FS East* i *FS Alpe Adria*, te uspješno završivši sve dinamičke discipline na službenom natjecanju *FS East*, uključujući krunsku disciplinu *endurance*. Time je dokazana stabilnost platforme električnog bolida.



Slika 146. *VulpesR* u vožnji na natjecanju *FS Alpe Adria*

Najbolji rezultat sezone postignut je na neslužbenom natjecanju *FS Alpe Adria*, gdje su također među jakom konkurencijom osvojena druga mjesta u disciplinama *Cost and Manufacturing* i *Skidpad* (Slika 147), te 7. mjesto od 20 timova u ukupnom poretku. Vrijedi spomenuti da će natjecanje *FS Alpe Adria* naredne sezone postati službeno.



Slika 147. Proslava 2. mjesta u disciplini Cost and Manufacturing Event (lijevo) i Skidpad (desno) na natjecanju FS Alpe Adria 2021.

FSB Racing Team je na natjecanjima *FS East* i *FS Alpe Adria* prepoznat od strane sudaca i organizatora natjecanja kao tim koji ima mnogo potencijala i strmu uzlaznu putanju. Uz to, ovim projektom je tim stekao mnogo znanja i iskustva koje će pridonijeti budućim projektima.

VulpesR je ostao aktivan i nakon završetka sezone. Testiranja na stazi su nastavljena kako bi se steklo još više iskustva u podešavanju bolida te napravila razna ključna mjerenja za razvoj budućeg, novog električnog bolida. *VulpesR* postao je bolid kojim je odvožen najveći broj kilometara u povijesti FSB Racing Teama – točan podatak ne postoji, ali procjenjuje se da iznosi više 300 km. Svoj put nastavit će konverzijom u autonomni Formula Student bolid i natjecati se u Driverless Vehicle (DV) kategoriji pod imenom *VulpesD*.

10. Literatura

- [1] Formula Student Rules 2020 V1.0:
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf
- [2] <https://www.simscale.com/forum/t/center-of-pressure-does-not-exist-validating-aerodynamic-forces-through-a-line-of-action/88051>
- [3] Milliken, W. F.; Milliken, D. L. – Race Car Vehicle Dynamics, SAE, Warrendale, 1995.
- [4] Reimpell, J.; Stoll, H.; Betzler, J.W. – The Automotive Chassis: Engineering Principles, 2nd edition, Elsevier, Oxford, 2001.
- [5] Pacejka, H. B. – Tyre and Vehicle Dynamics, 2nd edition, Elsevier, Oxford, 2006.
- [6] Reza N. Jazar (auth.) - Vehicle Dynamics - Theory and Application (2017, Springer International Publishing)
- [7] Schramm, D.; Hiller, M. – Vehicle Dynamics – Modeling and Simulation (2014, Springer International Publishing)
- [8] TTC - Formula SAE Tire Test Consortium
- [9] <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/adams-car-for-fsae-main-directory-kb8020090>
- [10] <https://www.mscsoftware.com/formula-student>
- [11] https://help.mscsoftware.com/bundle/Adams_2020_Adams_Car_User_Guide/resource/Adams_2020_Adams_Car_User_Guide.pdf
- [12] <https://www.mathworks.com/matlabcentral/>
- [13] MSC Adams Car Guide, 2015
- [14] AVL VSM Manual, 2019.
- [15] Massimo Giuglianni – The Science of Vehicle Dynamics, 2nd edition, Springer, 2018.
- [16] <https://www.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/battery-models.html>
- [17] <https://www.electronicdesign.com/technologies/test-measurement/article/21128843/keysight-technologies-measuring-dcir-of-lithiumion-cells>
- [18] Ratković J. - Konstruiranje i proračun kompozitnih poluvratila za natjecateljsko vozilo FSB Racing Team-a (2020., FSB)
- [19] Oberšmit E. - Ozubljenja i zupčanici (1985., Sveučilište u Zagrebu)

- [20] <https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Sony%20US18650VTC6%203000mAh%20%28Green%29%20UK.html>
- [21] <https://cognitio-elektronika.hr/wp-content/uploads/2018/11/MC-40-leaflet.pdf>
- [22] http://www.tim-kabel.hr/images/stories/LappKabel/OLFLEX.pdf?fbclid=IwAR2cSYSQ5ibnhsZUU_WCEa2XvSmgeLxJO_z70X_1M5whhOh9HnBPWkDvwCQ

11. Sažetak

FSB Racing Team studentski je projekt koji od 2003. godine djeluje pod udrugom HSA-SF (Hrvatska studentska asocijacija strojarških fakulteta). U proteklih devetnaest godina tim je porastao od tek nekolicine članova s Fakulteta strojarstva i brodogradnje do osamdesetak članova s većine sastavnica Sveučilišta u Zagrebu.

Studenti u sklopu ovog multidisciplinarnog projekta uz financijsku i materijalnu podršku sponzora potpuno samostalno koncipiraju, razvijaju i izrađuju trkaće bolide za međunarodna Formula Student natjecanja te se na njima natječu s brojnim timovima u Europi i svijetu kroz statičke i dinamičke discipline koje u jednakoj mjeri testiraju inženjerska rješenja tima i performanse bolida na stazi u tri kategorije: CV za bolide s motorom na unutarnje izgaranje, EV za bolide s električnim pogonom, i DV za autonomne bolide.

Tema ovog rada je bolid FSB-RT06R *VulpesR*, vozilo koje predstavlja evoluciju i redizajn prvog električnog bolida tima, FSB-RT06E *Vulpes*. *Vulpes* je već sam po sebi predstavljao velik iskorak tima te je stoga odabran za razvoj usavršene verzije, čiju osnovu čini prva hrvatska *monocoque* šasija proizvedena od polimera ojačanog ugljičnim vlaknima (engl. *CFRP*).

Prikazan je proces optimiranja i rekonstrukcije većine komponenata i značajan napredak u odnosu na *Vulpes* u brojnim aspektima. *VulpesR* je sudjelovao na brojnim natjecanjima u sezoni 2021./22., pritom postižući zavidne rezultate, osvajajući nagrade u statičkim disciplinama i uspješno prolazeći tehnički pregled i dinamičke discipline na više *FS* natjecanja.

12. Abstract

The FSB Racing Team, a student project of the Croatian Student Association of Engineering Faculties, was founded in 2003 by students at the University of Zagreb's Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. In the past nineteen years, the project has grown from a few members to a multidisciplinary team with 80 members from all of the University's faculties.

As part of the team, students independently, with the material and financial support of industry sponsors, design and manufacture single-seater race cars and compete against European and world opposition at *Formula Student* competitions. These competitions test the engineering design and business acumen of the team in equal measure to the car's performance and are divided into three classes: CV for ICE vehicles, EV for vehicles with an electric powertrain, and DV for autonomous/driverless vehicles.

This paper presents the development of *VulpesR*, the team's ninth vehicle overall and its second electric vehicle. *VulpesR* is an evolved redesign of *Vulpes*, the team's first electric vehicle. *Vulpes* presented a huge leap for the team in terms of complexity, featuring Croatia's first *monocoque* CFRP chassis on a Formula Student vehicle; thus, the team opted to redesign, optimize, and extract the latent potential from *Vulpes* before developing a new electric vehicle.

The paper presents the process of redesigning and optimizing the vast majority of *Vulpes*'s components. This led to strong performance improvements across the board, which led *VulpesR* to collect two prizes and successfully complete both scrutineering and all dynamic disciplines at multiple *FS* competitions in the 2021./22. season.

13. Popis autora rada

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Davide Primc, Darian Milohanić, Veron Hrvojić, Stefano Jukopila, Mateo Šego, Karlo Krklec, Marko Matišić, Domagoj Marinović, Niko Bonković, Marko Domjanović, Tin Novosel, Filip Kolarić, Mate Bašić, Fran Kelava, Petra Ivezić, Martin Jurman, Ivan Radoš, Manuel Krajcar, Benjamin Horvat

Fakultet elektrotehnike i računarstva

Magdalena Jurčević, Ivor Stojevski, Marko Mikša, Ivan Ćosić, Pjero Javorčić, Stjepan Borak, Nikola Mandić, Laura Majer, Bruno Grujić, Karlo Valentin Cihlar

Prirodoslovno-matematički fakultet

Klara Pešić

Fakultet hrvatskih studija

Rebeka Radovanović

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

Inga Geršak

Filozofski fakultet

Adriana Đugum, Alfonso Muñoz Sahr

Arhitektonski fakultet

Marija Lešković, Petar Hajdinjak

14. Zahvale

FSB Racing Team zahvaljuje članovima i bivšim članovima koji su pomogli pri realizaciji projekta *VulpesR*:

Mislav Bošnjak, Denis Meštrović, Daniel Krivačić, Marin Vilović, Zvonimir Ercegovac, Arian Suša, Luka Milek, Matko Skutari, Matija Levatić, Matija Juraić, Dominik Šarić, Matija Ritoša, Ivan Škrtić, Marta Kubala, Marin Jakovčev, Ivan Škvorc, Paolo Berljavac, Leon Malnar, Mislav Hihlik, Marin Pavlaković, Igor Vodopija, Petar Makarun, Jakov Ratković, Edi Crnić, Davor Vrbos, Jakov Ratković, Raimond Ruben Tomić, Mario Volarić, Ivan Mikulić, Marko Matišić, Antonio Miočić, Bruno Dobrić, Krunoslav Haramina, Tino Černi, Niko Trumbić, Domagoj Groznica, Tomislav Kolarić, Ivan Tomić, Krunoslav Klarić, Alan Malnar, Matko Pečanić, Josip Roban, Ivor Šlibar, Josip Zrilić, Domagoj Alagušić, Bruno Mraz, Borna Savović, Domagoj Tkalčević, Dominik Juričan, Ivan Oremović, Toma Budanko, Mihael Mikulec, Nikola Rakić, Tomislav Ćosić, Tino Černi, Tomislava Sesar, Filip Koraca, Raimond Ruben Tomić, Marija Rešetar, Josip Zrilić, Ana Gršković, Karlo Bednaž, Luka Vukota, Matko Barbić, Petar Županić, Josip Andrešić, Romano Zobić, Dominik Vitez, Leon Babić, Karlo Duvnjak, Toni Karačić.