

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Matko Skutari**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**PROJEKTIRANJE I IZRADA BATERIJSKOG  
PAKETA ZA BOLID FORMULE STUDENT**

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Student:

Matko Skutari

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr. sc. Željku Šitumu te FSB Racing Team-u na mogućnosti učenja i primjene znanja na realnom projektu.

Matko Skutari



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MATKO SKUTARI** Mat. br.: 0035196206

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE I IZRADA BATERIJSKOG PAKETA ZA BOLID FORMULE STUDENT**

Naslov rada na engleskom jeziku: **THE DESIGN AND MANUFACTURING OF A BATTERY PACK FOR A FORMULA STUDENT VEHICLE**

Opis zadatka:

Formula Student globalno je inženjersko natjecanje gdje studenti osmišljavaju, konstruiraju te izraduju trkaće vozilo s kojim nastupaju na brojnim natjecanjima širom svijeta. U 2017. godini, FSB Racing Team krenuo je u realizaciju električnog bolida. Bolid će sadržavati dva elektromotora, koji će zasebno pokretati stražnje kotače kombiniranom snagom od 80 kW. Spremnik energije za pokretanje elektromotora zamišljen je u obliku baterijskog paketa načinjenog od više međusobno povezanih litijskih ćelija. U ovom radu bit će opisan tijek razvoja tog baterijskog paketa, od izbora ćelija, osmišljavanja nosača ćelija, simulacija protoka zraka, pa samim time i hlađenja ćelija, do izračuna vrijednosti energije koja je potrebna za završetak utrke.

U radu je potrebno:

- numeričkim simulacijama odrediti potrebne količine energije dostatne za završetak utrke
- pokazati način izbora ćelije za baterijski paket korištenjem više kriterija
- simulirati protok zraka kroz baterijski paket korištenjem nekog od CFD alata
- izvršiti pravilan odabir ventilatora za hlađenje baterijskog paketa na temelju simulacija zagrijavanja
- konstruirati nosače ćelija, te glavno kućište za baterijski paket
- validirati nosivost kućišta baterijskog paketa korištenjem FEM analize.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1. UVOD.....	1
1.1. Formula Student .....	1
1.2. FSB Racing Team .....	2
1.3. Električni bolid.....	4
2. Vrednovanje.....	5
2.1. Vrednovanje drugih timova .....	5
2.2. Vrste ćelija .....	7
2.3. Pozicija baterijskog paketa.....	8
2.4. Potrebna energija.....	9
2.5. Struktura.....	9
3. Potrebna količina energije .....	12
3.1.1. CarMaker – Modeliranje bolida.....	12
3.1.2. Ovješena masa vozila.....	13
3.1.3. Neovješena masa vozila .....	13
3.1.4. Model gume .....	13
3.1.5. Pogon .....	14
3.1.6. Ovjes, upravljanje, kočnice .....	17
3.1.7. Modeliranje staze Formula Student Njemačka .....	17
3.1.8. Rezultati simulacija.....	18
4. Izbor ćelije .....	20
4.1. Popisivanje ćelija .....	20
4.1.1. Serijski spoj ćelija .....	22
4.1.2. Paralelni spoj ćelija .....	23
4.2. Karakteristike ćelija .....	23
4.3. Testiranje ćelija .....	29
5. Koncepti baterijskog paketa .....	36
5.1. Prva verzija paketa .....	36
5.2. Druga verzija paketa .....	38
5.3. Treća verzija paketa .....	39
5.4. Četvrta verzija paketa.....	41
5.5. Peta verzija paketa .....	42
5.6. Konačna verzija segmenta .....	45
6. Zračno hlađenje .....	46
6.1. Otpor strujanju zraka.....	47

---

6.2. CFD Simulacija segmenta.....	48
6.3. Rezultati simulacije.....	50
6.4. Izbor ventilatora .....	62
7. Hlađenje potapanjem ćelija.....	65
7.1.1. Dostupni fluidi .....	65
7.1.2. Odabir fluida .....	67
8. Modeliranje.....	71
8.1. Izbor konektora .....	73
8.2. FEM analiza .....	79
8.3. Testni segment .....	81
9. ZAKLJUČAK.....	83
LITERATURA.....	84
PRILOZI.....	85

## POPIS SLIKA

Slika 1. Natjecanja Formule Student u svijetu .....	2
Slika 2. UNI Delft baterijski paket .....	6
Slika 3. Uni Stuttgart baterijski paket .....	6
Slika 4. UNI Torino baterijski paket .....	7
Slika 5. Melasta ćelija      Slika 6. Sastav pouch ćelije.....	7
Slika 7. Sastav 18650 cilindrične ćelije      Slika 8. 18650 ćelija.....	8
Slika 9. Pozicija baterijskog paketa.....	8
Slika 10. Rezultati testiranja UNI Torina.....	10
Slika 11. Vrijednosti mase vozila.....	13
Slika 12. Vrijednosti neovješene mase vozila.....	13
Slika 13. CarMaker – Pogon sučelje .....	14
Slika 14. Alta Redshift SM .....	15
Slika 15. Momentna karakteristika motora .....	16
Slika 16. Dvostupanjski reduktor FSBRT06e bolida .....	16
Slika 17. Generirana staza – FS Njemačka .....	17
Slika 18. CarMaker simulacija .....	18
Slika 19. UNI Munich na FS Njemačka 2016.....	18
Slika 20. Ciklus snage i momenta .....	19
Slika 21. Osnovni pojmovi ćelije .....	20
Slika 22. Serijski spoj ćelija .....	22
Slika 23. Paralelni spoj ćelija .....	23
Slika 24. Mase baterijskih paketa.....	25
Slika 25. Volumen baterijskih paketa .....	25
Slika 26. Snage gubitaka baterijskih paketa.....	26
Slika 27. Cijene baterijskih paketa.....	26
Slika 28. Performanse ćelija za jednake kriterije .....	28
Slika 29. Performanse ćelija sa težinskim faktorima .....	29
Slika 30. Testiranje ćelija – Rimac Automobili .....	30
Slika 31. LG HG2 – Profil snage .....	31
Slika 32. Sony VTC6 – Profil snage .....	31
Slika 33. LG HG2 – Profil struje.....	32
Slika 34. Sony VTC6 – Profil struje .....	32
Slika 35. Mjerenje unutarnjeg otpora.....	33
Slika 36. Usporedba temperatura za HG2 i VTC6 ćelije .....	34
Slika 37. Usporedba kapaciteta .....	35
Slika 38. Prva verzija segmenta .....	36
Slika 39. Baterijski paket od prve verzije segmenata.....	37
Slika 40. Druga verzija baterijskog paketa - izometrija.....	38
Slika 41. Druga verzija baterijskog paketa - bokocrt .....	38
Slika 42. Treća verzija segmenta.....	39
Slika 43. Baterijski paket od treće verzije segmenata .....	40
Slika 44. Usporedba duljine različitih baterijskih paketa.....	40
Slika 45. Treća verzija segmenta.....	41
Slika 46. Četvrta verzija paketa sa vodenim hlađenjem.....	42
Slika 47. Peta verzija paketa sa horitonzalnim osima ćelija .....	43
Slika 48. Usporedba četvrte i pete verzije paketa .....	44
Slika 49. Peta verzija paketa sa vodenim hlađenjem .....	44
Slika 50. Konačna verzija segmenta .....	45

Slika 51. Mehanički nosač ćelija.....	45
Slika 52. Krivulja ventilatora i sustava .....	47
Slika 53. Prikaz rubnih uvjeta za simulaciju .....	48
Slika 54. Prikaz mreže.....	48
Slika 55. Detalj mreže .....	49
Slika 56. Rezultati – Tlakovi 1 .....	50
Slika 57. Rezultati – Brzine 1.....	51
Slika 58. Rezultati – Tlakovi 2.....	52
Slika 59. Rezultati – Brzine 2.....	53
Slika 60. Rezultati – Tlakovi 3.....	54
Slika 61. Rezultati – Brzine 3.....	55
Slika 62. Rezultati – Tlakovi 4.....	56
Slika 63. Rezultati – Brzine 4.....	57
Slika 64. Rezultati – Tlakovi 5.....	58
Slika 65. Rezultati – Brzine 5.....	59
Slika 66. Tlocrt – Tlak - Presjek ispod ćelija .....	60
Slika 67. Tlocrt – Tlak - Presjek na sredini ćelija .....	60
Slika 68. Tlak – Presjek iznad ćelija .....	61
Slika 69. Krivulja otpora baterijskog segmenta .....	62
Slika 70. Krivulja 4112 NHH ventilatora.....	62
Slika 71. Krivulja 4118 NH6 ventilatora .....	63
Slika 72. Masa rashladnih tekućina – bez isparavanja .....	68
Slika 73. Masa rashladnih tekućina – potpuno isparavanje .....	69
Slika 74. Masa Galdena HT55 – različita isparavanja .....	70
Slika 75. Baterijski paket – Konačni raspored segmenata .....	71
Slika 76. Detalj graničnika na nosaču .....	72
Slika 77. Spojnice gornjeg i donjeg nosača.....	72
Slika 78. Radlok konektori.....	73
Slika 80. Raspodjela struje na spojnica.....	74
Slika 81. Detalj proširene spojnice za konektor .....	75
Slika 82. Segment sa Radlok konektorom .....	76
Slika 83. Baterijski paket povezan Radlok konektorima .....	76
Slika 84. Detalj segmenta sa vlastitim konektorom .....	77
Slika 85. Konačna verzija segmenta .....	78
Slika 86. Mehanički nosač - naprezanja.....	79
Slika 87. Mehanički nosač – Naprezanja detalj .....	80
Slika 88. Mehanički nosač – Pomaci detalj.....	80
Slika 89. Izrađeni segment .....	81
Slika 90. Izrađeni segment - detalj .....	81
Slika 91. Konačni baterijski paket.....	82
Slika 92. FSBRT06e.....	82



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Raspodjela bodova na <i>Formula Student</i> natjecanjima [4].....	1
Tablica 2. Bolidi FSB Racing Team-a .....	3
Tablica 3. Vrednovanje drugih timova.....	5
Tablica 4. Ciljevi baterijskog paketa.....	11
Tablica 5. Sustavi u CarMakeru .....	12
Tablica 6. Karakteristike motora.....	15
Tablica 7. Karakteristike ćelija – prvi dio .....	21
Tablica 8. Karakteristike ćelija – drugi dio .....	22
Tablica 9. Karakteristike baterijskih paketa – prvi dio .....	24
Tablica 10. Karakteristike baterijskih paketa – drugi dio .....	24
Tablica 11. Performanse ćelija .....	27
Tablica 12. Tablica težinskih faktora .....	28
Tablica 13. Tablica usporedbe površina segmenata.....	39
Tablica 14. Usporedba težišta i inercija segmenata .....	43
Tablica 15. Tablica otpora baterijskog segmenta.....	61
Tablica 16. Karakteristike Galdena HT55.....	65
Tablica 17. Karakteristike Novec 7000.....	66
Tablica 18. Karakteristike Novec 7100.....	66
Tablica 19. Karakteristike FC-3284 .....	66
Tablica 20. Karakteristike FC-72 .....	67
Tablica 21. Tablica za odabir veličine konektora .....	74

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
I	A	Jakost struje
$I_{max}$	A	Vršna struja
m	kg	Masa
P	W	Snaga
M	Nm	Moment
n	1/min	Broj okretaja u minuti
$\rho_P$	W/kg	Gustoća snage
$\rho_E$	Wh/kg	Gustoća energije
SoC	%	Stanje napunjenosti ćelije
C	-	Koeficijent punjenja/praznjenja
$C_c$	Ah	Nominalni kapacitet ćelije
$R_{int}$	$\Omega$	Unutarnji otpor ćelije
d	mm	Promjer ćelije
l	mm	Duljina ćelije
V	$mm^3$	Volumen ćelije
$c_p$	J/kgK	Toplinski kapacitet
E	Wh	Energija
$n_{ser}$	-	Broj ćelija spojenih serijski
$n_{par}$	-	Broj ćelija spojenih paralelno
t	s	Vrijeme
T	°C	Temperatura
$E_{ukupno}$	Wh	Ukupna energija baterijskog paketa
A	$mm^2$	Površina
$I_{zz}$	$kgm^2$	Moment inercije oko z osi
$h_{cog}$	mm	Visina težišta bolida
$R_{paket}$	$\Omega$	Unutarnji otpor baterijskog paketa
$P_{zag}$	W	RMS snaga zagrijavanja ćelije
$I_{RMS}$	A	RMS Struja ćelije
$\dot{m}$	kg/s	Maseni protok zraka
$q_v$	$m^3/s$	Volumenski protok zraka
$\Delta p$	Pa	Pad tlaka
$E_{vent}$	Wh	Energija ventilatora
$P_{vent}$	W	Snaga ventilatora
$n_{vent}$	-	Broj ventilatora
$t_{utrke}$	h	Trajanje trke
$\alpha$	J/kg	Toplina isparavanja
$\rho$	$kg/m^3$	Gustoća

---

$m_f$	kg	Masa rashladne tekućine
$c_f$	J/kgK	Toplinski kapacitet rashladne tekućine
$m_b$	kg	Masa ćelija
$c_b$	J/kgK	Toplinski kapacitet ćelija
$x$	%	Postotak isparavanja rashladne tekućine
$T_0$	°C	Početna temperatura
$k$	A/mm <sup>2</sup>	Gustoća struje u vodiču
$g$	m/s <sup>2</sup>	Gravitacijsko ubrzanje

## SAŽETAK

Cilj ovog rada je istražiti tržište ćelija, sustavno ih usporediti i odabrati pravu ćeliju za primjenu u bolidu FSB Racing Teama - FSBRT06e. Pritom je bilo potrebno simulirati vožnju bolida po stazi korištenjem softvera za dinamiku vozila kako bismo dobili iznos potrebne energije za završetak trke i profil snage za testiranje ćelija. Nakon sužavanja odabira ćelija, preostale dvije ćelije su se intenzivno testirale kako bi se potvrdio odabir. Nakon što je izabrana ćelija, krenulo se u proračun hlađenja korištenjem ciklusa snage dobivenog iz simulacije. Razmatrane su dvije opcije: zračno hlađenje te hlađenje nevodljivom polimernom tekućinom. Za opciju zračnog hlađenja napravljena je CFD simulacija koja je bila potrebna za odabir odgovarajućeg ventilatora. Za hlađenje polimernom tekućinom evaluirane su karakteristike dostupnih tekućina, te je odabrana najbolja opcija. Također, modelirani su različiti koncepti baterijskog paketa, te je odabran najpovoljniji koji je dodatno razrađen. Modelirani su i validirani mehanički nosači, odabrani su pripadajući konektori, te je modelirano kućište. Istovremeno je izrađen testni baterijski segment čija je svrha dodatna provjera i testiranje prije izrade konačnog baterijskog paketa.

Ključne riječi: Formula Student, baterijski paket, baterijske ćelije, električno vozilo, FSB Racing Team

## **SUMMARY**

The aim of this paper is to explore the battery cell market, systematically compare them and select the right cell for use in the FSB Racing Team - FSBRT06e. It was necessary to simulate the car driving on a race track using the vehicle dynamics software to determine the amount of energy required to complete the race and the power profile for the cell testing. After narrowing the cell choice, the remaining two cells were intensively tested to confirm the selection. After the cell was selected, the cooling calculation began with the use of the power cycle obtained from the simulation. Two options have been considered: air cooling and liquid cooling. For the air cooling option CFD simulation is made to select the appropriate fan. Liquid liquid characteristics were estimated for the polymer liquid coolant and the best option was selected. Different concepts of battery packs have also been modeled, and the best choice was selected, and further developed. Formers which hold the cells were modeled, the connectors were selected and the casing for the whole battery pack was modeled. At the same time, a test battery segment was manufactured for the purpose of additional testing before the final battery was manufactured.

Key words: Formula Student, battery pack, battery cell, electric vehicle , FSB Racing Team

# 1. UVOD

## 1.1. Formula Student

Formula Student natjecanje, u organizaciji FSAE (*Formula Society of Automotive Engineers*), slovi za jedno od najprestižnijih inženjerskih natjecanja na svijetu gdje studenti osmišljaju, konstruiraju te izrađuju bolid jednosjed definiran prema vrlo strogom i precizno definiranom pravilniku. Za razliku od Formule 1 s ciljem pobjede u utrci te stavljanju fokusa na vozače, naglasak je stavljen na tehnička rješenja bolida. Na taj način promovira se i potiče inovativnost te razvoj sposobnosti studenata da teoriju naučenu na fakultetu primjenjuju u praksi. Prvo natjecanje je održano početkom 1980-ih godina u SAD-u te se kasnije proširilo po čitavom svijetu – tako se ono danas održava u preko 20 zemalja poput Engleske, Njemačke, Italije, Austrije, Mađarske, Španjolske, SAD-a, Japana i drugih. Samo ocjenjivanje sastoji se od statičkog i dinamičkog dijela – statički testovi su oni testovi u kojima performanse, brzina i izdržljivost bolida ne dolaze u prvi plan, već se u fokus stavlja njegova pozadina od logistike, organizacije, pripreme do marketinškog, proizvodnog, ekonomskog i poslovnog aspekta cijelog bolida i tima, a sastoje se od *Cost report-a*, *Design report-a* i *Business Plan* prezentacije. Dinamički testovi prikazuju stvarnu trkaću vrijednost i finalni test cijele konstrukcijske razrade bolida. Sastoje se od *Skid Pad-a*, utrke ubrzanja, *Autocross-a*, i utrke izdržljivosti. Kako bi tim uopće mogao pristupiti dinamičkim testovima, obavezan je proći tehnički pregled koji obavljaju stručnjaci iz iznimno kompetentnog sudačkog kadra. Oni uglavnom dolaze iz krugova Formule 1, WRC-a (*World Rally Championship*) ili DTM-a (*Deutsche Tourenwagen Masters*). Ocjenjivanje se provodi na sljedeći način:

**Tablica 1. Raspodjela bodova na Formula Student natjecanjima [4]**

Statički testovi	
Business Plan Prezentacija	75 bodova
Cost report	100 bodova
Design report	150 bodova
Dinamički testovi	
Skid Pad	75 bodova
Utrka ubrzanja	75 bodova
Autocross	100 bodova
Utrka izdržljivosti	325 bodova
Mjerenje učinkovitosti	100 bodova
<b>Sveukupno:</b>	<b>1000 bodova</b>



Slika 1. Natjecanja Formule Student u svijetu



















## 1.2. FSB Racing Team

FSB Racing Team prva je hrvatska momčad koja već 13 godina aktivno sudjeluje na prestižnim natjecanjima Formule Student. Tim broji 30-tak članova s nekoliko različitih sastavnica Sveučilišta u Zagrebu (FSB, FER, EFZG, PFZG). Projekt prati i podržava Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Do sada, tim je konstruirao pet benzinskih bolida s kojima je prisustvovao na FS natjecanjima, a to su redom: *Kuna* (2006. g.), *Ris* (2007. g.), *Likos* (2012. g.), *Arctos* (2013. g. i *ArctosR* 2014. g.), te *Strix* 2017. g [1]. Za nadolazeću 2018. godinu, tim planira konstruirati R-verziju *Strix*-a, a također je pokrenuta i razvojna faza prvog hrvatskog bolida na električni pogon, i to za 2019. sezonu natjecanja. Upravo je tema ovog završnog rada jedna od glavnih komponenti na bolidu: baterijski paket.

Kako bi čitatelj dobio koliko-toliko adekvatan osjećaj koliko je FSB Racing Team doista napredovao (rezultatima, ali i konstrukcijskom evolucijom) od svog nastanka, sljedeća tablica prikazuje bolide sa njihovim natjecateljskim plasmanima popraćene tehničkim specifikacijama.



Tablica 2. Bolidi FSB Racing Team-a

<p><i>Kuna, 2006.</i></p> 	<p>Motor: Yamaha R6            ECU: Autronic SMC            Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni            Šasija: Cijevna čelična            Oklop: Staklena vlakna            Masa bolida: 317 kg            Ubrzanje: 5 s            Maks. brzina: 160 km/h</p>	<p>35. od 72 tima</p>  
<p><i>Ris, 2007.</i></p> 	<p>Motor: Yamaha R6            ECU: Autronic SMC            Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni            Šasija: Cijevna (sprijeda čelik, Al straga)            Oklop: Staklena i ugljična vlakna            Masa bolida: 270 kg            Ubrzanje: 4,5 s            Maks. brzina: 160 km/h</p>	<p>48. od 84 tima</p>  
<p><i>Likos, 2012.</i></p> 	<p>Motor: Yamaha R6            ECU: VEMS            Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni            Šasija: Cijevna, dvostruka poprečna ramena            Oklop: Ugljična i aramidna vlakna            Masa bolida: 263 kg            Ubrzanje: 4,4 s            Maks. brzina: 160 km/h</p>	<p>24. od 103 tima</p>  
<p><i>Arctos, 2013.</i></p> 	<p>Motor: Yamaha R6            ECU: VEMS            Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni            Šasija: Cijevna, dvostruka poprečna ramena            Oklop: Ugljična vlakna            Masa bolida: 230 kg            Ubrzanje: 4,4 s            Maks. brzina: 144 km/h</p>	<p>56. od 75 timova</p>  
<p><i>ArctosR, 2014.</i></p> 	<p>Motor: Yamaha R6            ECU: VEMS            Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni            Šasija: Cijevna, dvostruka poprečna ramena            Oklop: Ugljična i aramidna vlakna            Masa bolida: 223 kg            Ubrzanje: 4,4 s            Maks. brzina: 125 km/h</p>	<p>10. od 97 timova</p>  
<p><i>Strix, 2017.</i></p> 	<p>Motor: Husqvarna TE610            ECU: VEMS            Mjenjač: 4 brzine, sekvencijalni            Šasija: Čelična, 25CrMo4            Oklop: Ugljična vlakna            Masa bolida: 215 kg            Ubrzanje: 5 s            Maks. brzina: 110 km/h</p>	<p>13. od 41 tima</p>  

### 1.3. Električni bolid

Kako u svijetu razvoj električnih vozila eksponencijalno napreduje, Formula Student predstavlja područje gdje se sve radikalnije ideje isprobavaju i testiraju. Važno je napomenuti da je Formula Student kao natjecanje gotovo isključivo financirana od strane auto industrije, jer im to predstavlja izvor vrhunskih inženjera koji sa fakulteta dolaze sa mnogo praktičnog iskustva te spremni za rad.

Električni bolidi u Formuli Student nisu novost. Natjecanje električnih bolida organizira se od 2011. godine. Trenutna statistika je da je oko 40% svih bolida na natjecanju pogonjeno električnim pogonom.

Iako je FSB Racing Team do sada bio vrlo uspješan na natjecanjima koristeći klasični motor s unutarnjim izgaranjem, posljedice globalnog zagrijavanja te sve veće količine stakleničkih plinova u atmosferi zahtijevaju razvoj tehnologija alternativnog pogona, u ovom slučaju električnog [2]. Zbog ovoga, potrebno je da današnji inženjeri koji imaju interes za radom u autoindustriji imaju potrebno znanje i iskustvo o razvoju te implementaciji električnih pogona. Za studente, najefikasniji način za naučiti što više o ovoj grani jest upravo Formula Student Electric. Motivirani navedenim, FSB Racing Team odlučio je da će 2019. godine na natjecanje ići sa električnim bolidom. Osmišljavanje pogona električnog bolida izuzetno je kompleksan zadatak, glavnim dijelom što je cijelo područje novo, te ne postoje usvojeni standardi, odnosno načini na koji se određeni zadatak radi.

Tema ovog rada je osmišljavanje te razrada visokonaponskog baterijskog paketa za električni bolid FSBRT06e. Visokonaponski baterijski paket sastoji se od baterijskih ćelija, osigurača, sustava za nadzor ćelija, DC DC pretvarača, nosača ćelija, kontaktora, sustava za hlađenje itd.

## 2. Vrednovanje

### 2.1. Vrednovanje drugih timova

Međutim, prije nego se krene u sam razvoj, potrebno je napraviti detaljno vrednovanje (benchmarking) drugih timova kako bi se mogli odrediti naši ciljevi za baterijski paket. U ciljeve baterijskog paketa spadaju: Potrebni kapacitet, vrsta ćelija, orijentacija ćelija, vrsta hlađenja, ukupna masa, maksimalna snaga.

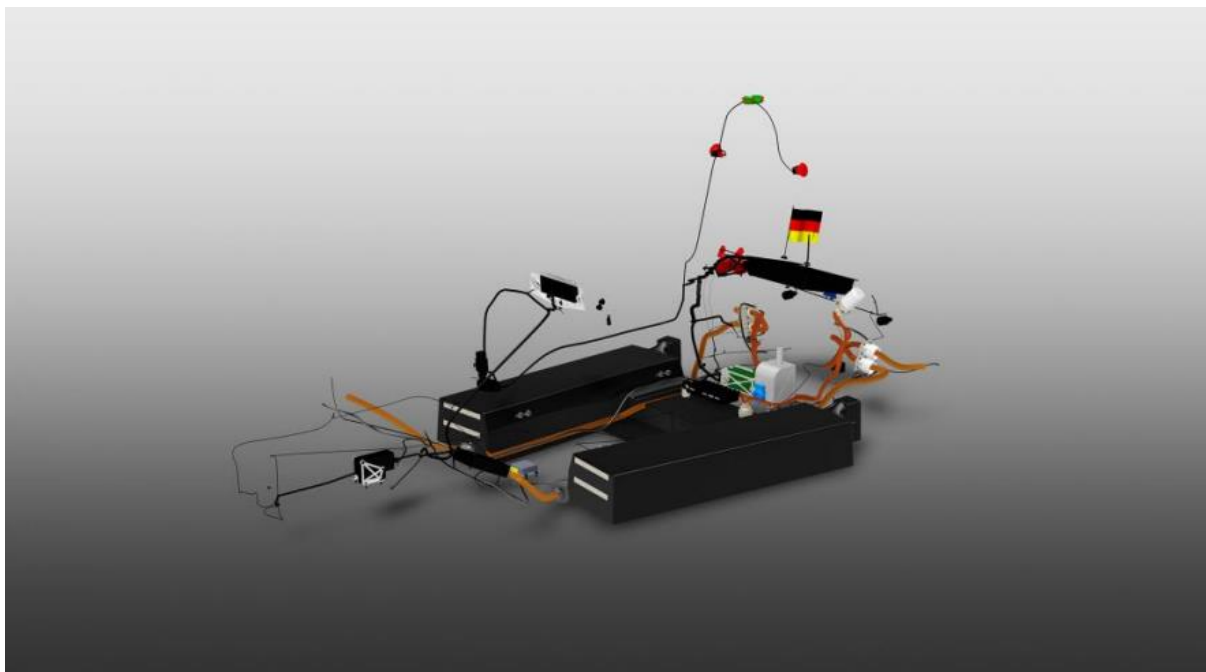
U nastavku su dane slike te tablica sa usporedbama vodećih Europskih timova u Formuli Student Electric.

**Tablica 3. Vrednovanje drugih timova**

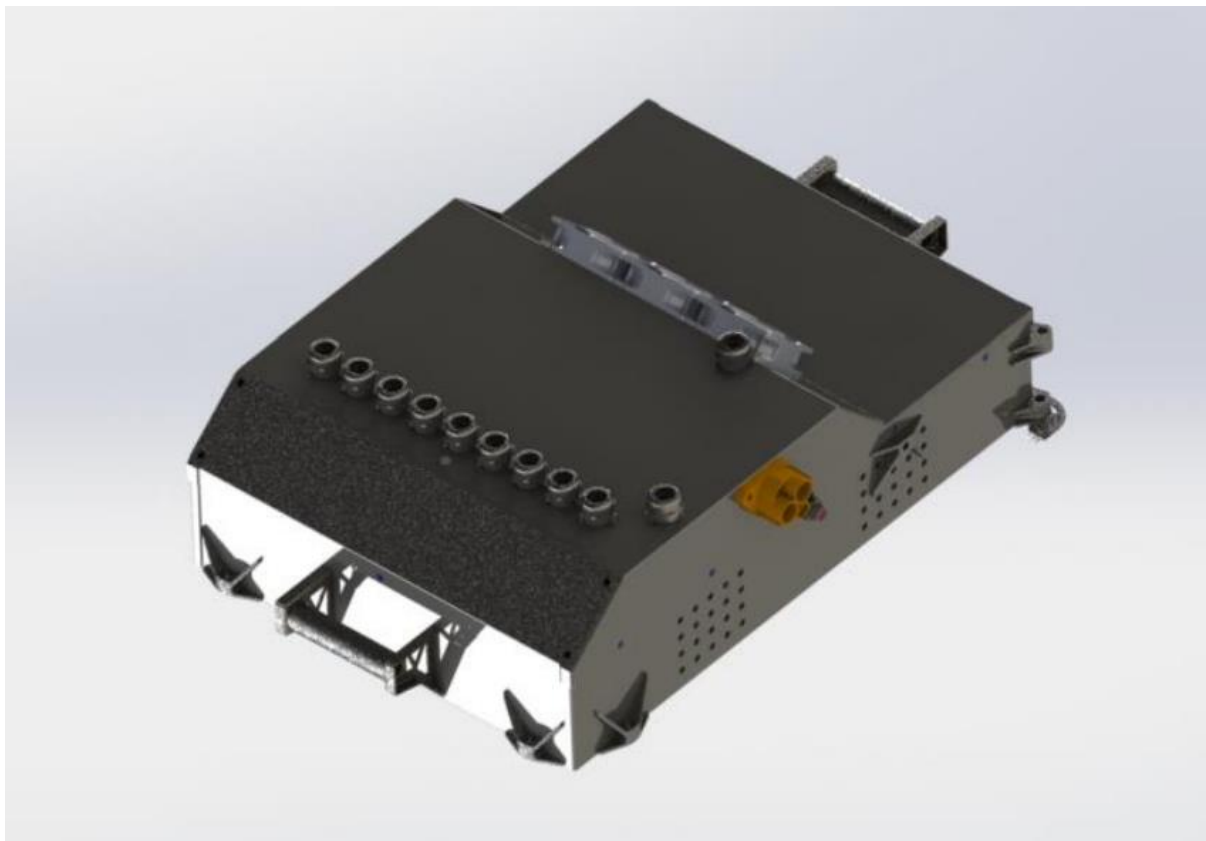
Sveučilište	Masa	Energija	Napon	Pozicija u bolidu	Pogon	Ćelije
Uni Delft	50 kg	6.66 kWh	600 V	Centralno, iza vozača, jedan komad	4WD	144 serijski, 3 paralelno, Melasta ćelije
Uni Stuttgart	55 kg	6,64 kWh	600 V	Pored vozača, 2 komada, 1 sa svake strane	4WD	144 serijski, 3 paralelno, Melasta ćelije
Uni Wisconsin	65 kg	6,48 kWh	108 V	Centralno, iza vozača, jedan komad	RWD	30 serijski, 24 paralelno, Samsung ćelije
Torino	60 kg	7 kWh	600 V	Centralno, iza vozača, jedan komad	RWD	144 serijski, 3 paralelno, Melasta ćelije



Slika 2. UNI Delft baterijski paket



Slika 3. Uni Stuttgart baterijski paket

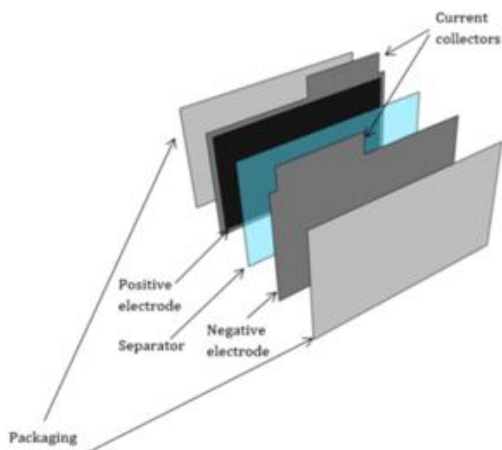


**Slika 4. UNI Torino baterijski paket**

Iz ovih usporedbi, može se izvući nekoliko korisnih smjernica.

## 2.2. Vrste ćelija

Postoje dvije glavne vrste ćelija koje se koriste: „Pouch“ ćelije prikazane na slikama 5 i 6.



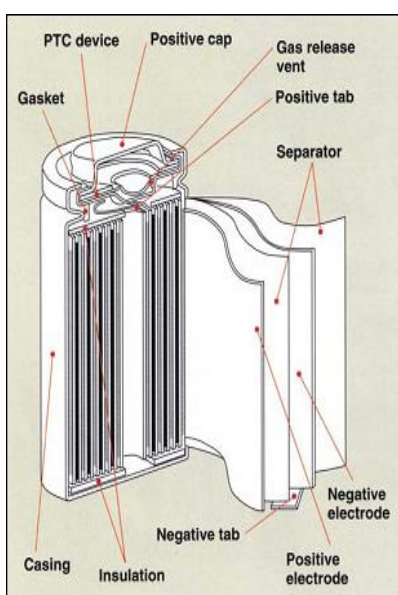
**Slika 5. Melasta ćelija**

**Slika 6. Sastav pouch ćelije**

Te cilindrične ćelije, nazivaju se 18650 (Ø18 mm promjer, 65 mm duljina). U pouch ćelijama elektrode leže paralelno jedna drugoj na istoj ravnini, tako tvoreći pravokutni oblik gdje su terminali na istom rubu ćelije. Pouch ćelije imaju „mekano“ kućište, te moraju biti pritisnute

silom izvana kako bi djelovale u svom idealnom rasponu performansi. Isto tako, mekano kućište predstavlja opasnost, jer je mnogo lakše penetrirati kroz ćeliju te izazvati kratki spoj koji može rezultirati naglim ispuštanjem energije – najčešće zapaljenjem.

Cilindrične ćelije imaju elektrode zamotane u aluminijski cilindar, te terminale na suprotnim krajevima ćelije. Aluminijski cilindar osigurava potreban pritisak na elektrode unutar ćelije, te samim time nema potrebe za vanjskim pritiskom za optimalne performanse. Istovremeno, zbog aluminijskog kućišta 18650 ćelije mnogo su robusnije i otpornije na vanjske udarce nego „pouch“ ćelije.

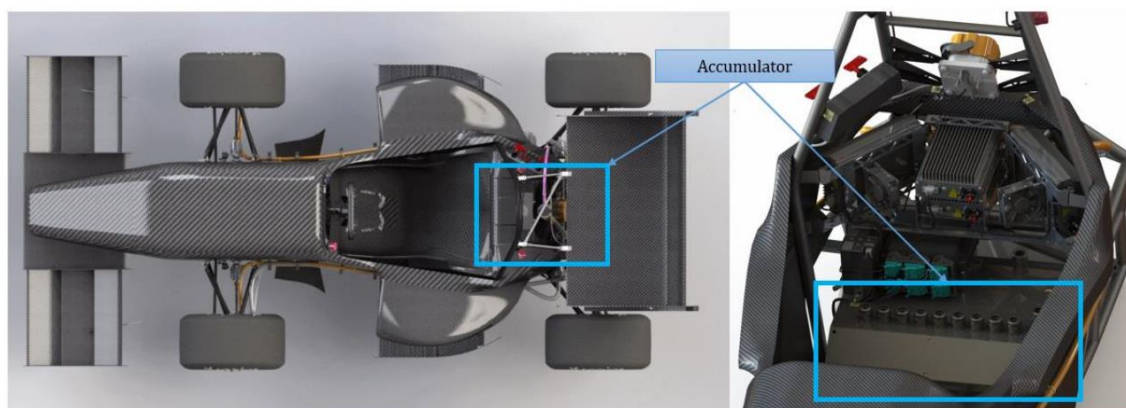


Slika 7. Sastav 18650 cilindrične ćelije

Slika 8. Cilindrična ćelija

### 2.3. Pozicija baterijskog paketa

Uglavnom većina timova ima baterijski paket na istoj lokaciji – centralno iza vozača, kao što je prikazano na slici 9.



Slika 9. Pozicija baterijskog paketa

Tek manji broj timova smješta baterijski paket u dva odvojena segmenta, pored vozača.

Druga opcija ima kao jedini benefit naspram prve bolji raspored masa, jer je baterijski paket pomaknut više prema prednjem kraju bolida. Međutim, mnogo je više nedostataka: Povećana masa zbog potrebe dvostrukih sustava za svaki segment baterije, npr. dvostruki broj kontaktora, kućišta, konektora, veća masa ožičenja. Također, ako gledamo polarni moment inercije oko vertikalne osi bolida u točki težišta bolida, za slučaj odvojenih baterijskih paketa, ta masa nalazi se na većem kraku nego što je to slučaj kod centralno smještene baterije iza vozača, što rezultira većim polarnim momentom, odnosno tromijim ponašanjem bolida.

#### 2.4. Potrebna energija

Potrebna količina energije koji timovi odabiru je oko 6.5 – 7 kWh za pouch ćelije, te oko 7 kWh za cilindrične ćelije. Razlika u energiji između tih dvaju različitih tipova ćelija je u načinu na koji proizvođači definiraju energiju ćelije. Za pouch ćelije, kapacitet se definira za 10C pražnjenje, dok se za cilindrične 18650 ćelije kapacitet definira na 1C pražnjenju. Zbog toga, iako 18650 ćelija po proizvođačevim podacima ima deklariranu energiju, to ne vrijedi ako se ćelija prazni brže od deklariranih 1C.

„C pražnjenje“ – pojam je koji se koristi za opisivanje brzine punjenja ili pražnjenja ćelije. Npr, ćelija može imati jednaku energiju od 10,8 Wh, te jednak nazivni napon od 3,6 V te kapacitet od 3 Ah. Ali ako imaju različit koeficijent C pražnjenja – prva ima 1C, a druga 10C, ne možemo istom strujom opteretiti tu ćeliju.

Za 1C ćeliju  $I_{max} = C * [Ah] = 1 * 3 = 3 A$

Za 10C ćeliju  $I_{max2} = C * [Ah] = 10 * 3 = 30 A$

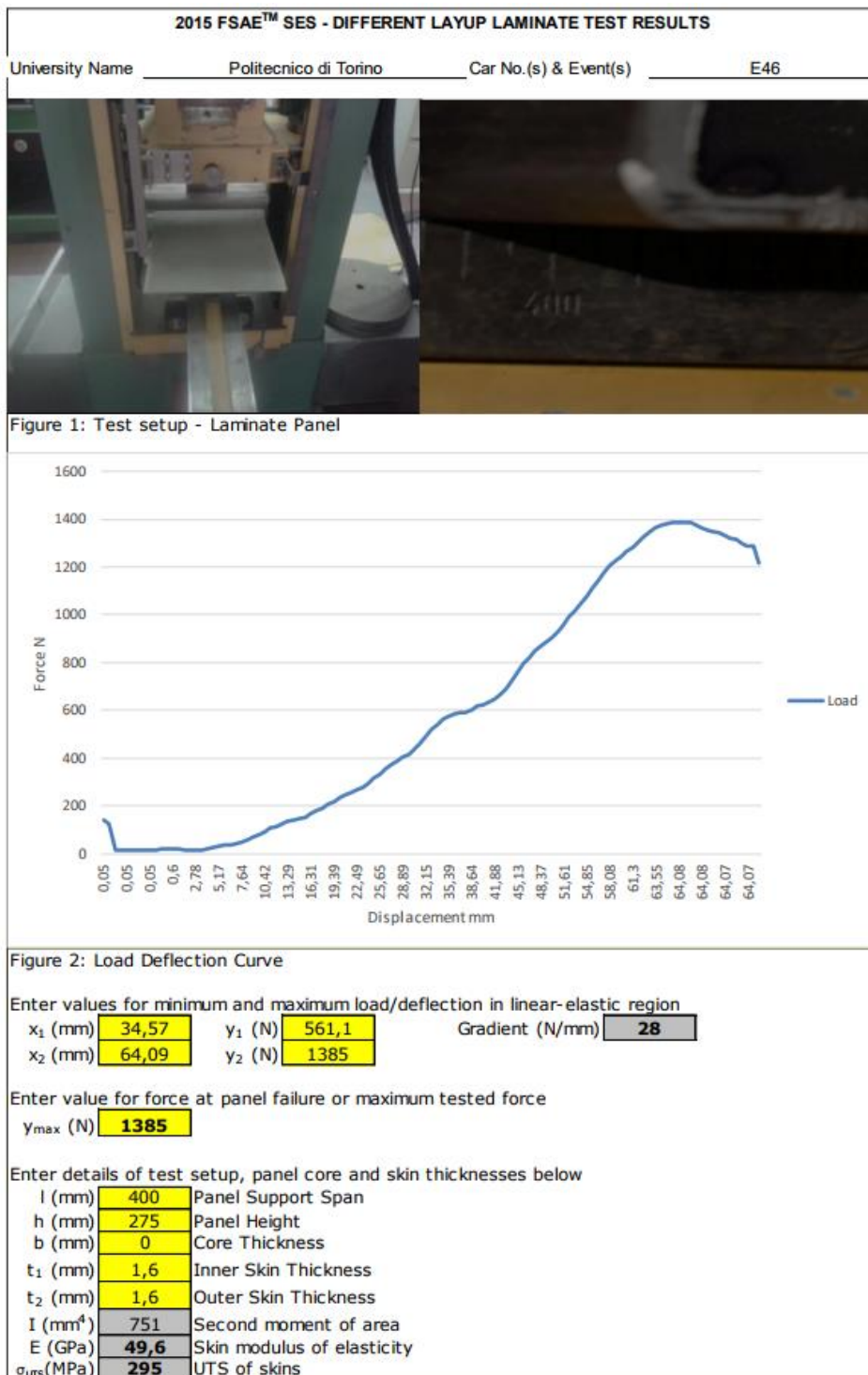
Generalno, pouch ćelije imaju veći koeficijent C nego cilindrične ćelije. Zbog toga ih se može prazniti sa većom strujom, te je to jedan od benefita ta ćelije. U nastavku će se detaljno prikazati proces dobivanja iznosa energije koji nam je potreban za završetak utrke.

#### 2.5. Struktura

Postoji niz pravila koji definiraju strukturu kućišta baterijskog paketa. Neka od glavnih su maksimalna masa koja se može nalaziti na dijelu kućišta, broj zidova, visina zidova. Također vrlo je bitan izbor materijala od kojeg se izrađuje kućište. Može se raditi od čelika ili aluminija, te je potrebno na sve vodljive površine stavljati dodatne slojeve izolacije [3]. Druga opcija je izrada kućišta od nevodljivih materijala, koji trebaju imati jednaku čvrstoću kao čelični ili aluminijski. Razmatrani timovi koriste kompozitne strukture na način da sa unutrašnje strane

imaju sloj stakloplastike, koja djeluje kao izolator, na koju su laminirana ugljična vlakna koja imaju odlična mehanička svojstva, ali su električni vodljivi. Ovakav kompromis daje idealnu kombinaciju da kućište zadovoljava uvjete električne ne-vodljivosti, i mehaničke čvrstoće. Svaki kompozitni uzorci moraju se testirati sa dva testa: Savijanje u tri točke, te test probijanja.

U nastavku je dana slika sa testiranja kompozitne ploče od FS tima iz Torina.



Slika 10. Rezultati testiranja UNI Torina



Koristeći sve navedene informacije izrađena je tablica sa glavnim ciljevima baterijskog paketa vlastitog bolida.

**Tablica 4. Ciljevi baterijskog paketa**

Funkcionalnost	Mehanička svojstva	Eletrična svojstva
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mogućnost vađenja baterijskog paketa kroz donji dio šasijske</li> <li>• Što niže težište</li> <li>• Jednodijelni baterijski paket</li> <li>• Integrirani sustav hlađenja baterijskog paketa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Masa ispod 50 kg</li> <li>• Kompozitno kućište baterijskog paketa</li> <li>• Što bolja iskoristivost dostupnih tehnologija povezivanja ćelija – microTIG</li> <li>• Izolacija između baterijskih segmenata sa UL94V-0 materijalom</li> <li>• Kućište mora zadovoljavati ekvivalent od 0,9 mm čelika</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iskoristivi kapacitet od 6 – 7 kWh</li> <li>• Maksimalna snaga 80 kW</li> <li>• Maksimalni napon do 600V</li> </ul>

### 3. Potrebna količina energije

Do potrebne količine energije došlo se korištenjem softvera za simulaciju dinamike vozila njemačke firme IPG naziva CarMaker. Simulacije dinamike vozila imaju ogromno područje primjene: ulazni podaci za razvoj ovjesa, pogona, baterijskog paketa, aerodinamike, sustava upravljanja itd. [5]

U nastavku opisivat će se korištenje CarMakera u svrhu dobivanja potrebnog kapaciteta baterije te će se pokazivanjem modeliranja vozila u CarMakeru u grubo pojasniti glavne komponente na bolidu.

#### 3.1.1. CarMaker – Modeliranje bolida

Modeliranje bolida vrši se tako da se za svaki sustav bolida unose karakteristike te podaci koji opisuju taj sustav. Popis glavnih sustava u programskom okruženju CarMaker:

**Tablica 5. Sustavi u CarMakeru**

Eng. naziv	Hr interpretacija	Opis
Vehicle Body	Ovješena masa vozila	Definiranje masa i inercija za ovješeni dio vozila
Bodies	Neovješena masa vozila	Definiranje masa i inercija za neovješeni dio vozila
Suspensions	Ovjes	Definiranje parametara ovjesa
Steering	Upravljanje	Definiranje parametara upravljanja
Tires	Gume	Definiranje modela guma
Brake	Kočnice	Definiranje parametara kočionog sustava
Powertrain	Pogon	Definiranje pogona – benzinski ili električni
Aerodynamics	Aerodinamika	Definiranje parametara za aerodinamiku

### 3.1.2. Ovješena masa vozila

Ovješena masa je ona masa koja je ovješena preko sustava opruga. U to spada šasija, pogonski sustav, vozač, aerodinamika. Ciljana ovješena masa vozila je 180 kg. Ciljana ukupna masa bolida (neovješena+ovješena) iznosi 221 kg.

Momenti inercije te visina težišta pretpostavljeni su pozivajući se na prošli bolid FSB Racing Teama – Strix te su njihove vrijednosti također prikazane na slici 11.

	x [m]	y [m]	z [m]	Mass [kg]	Ixx [kgm <sup>2</sup> ]	Iyy [kgm <sup>2</sup> ]	Izz [kgm <sup>2</sup> ]
Vehicle Body	0.9	0	0.275	180	11.98	53.17	51.12
Vehicle Body B	2.15	0.0	0.58	650.5	180.0	900.0	900.0
Joint A - B	1.17	0	0.229				
Calculated vehicle overall mass [kg]				221.06			

Slika 11. Vrijednosti mase vozila

### 3.1.3. Neovješena masa vozila

U neovješenu masu spadaju nosači kotača, kotač, guma, kočnice te pola mase gornjih i donjih ramena ovjesa. CarMaker radi dodatnu distinkciju između rotacijskih neovješanih dijelova (Wheel) te ne-rotacijskih neovješanih dijelova (Wheel Carrier). Vrijednosti masa također su procjenjene sa bolida Strix te su prikazane na sljedećoj slici:

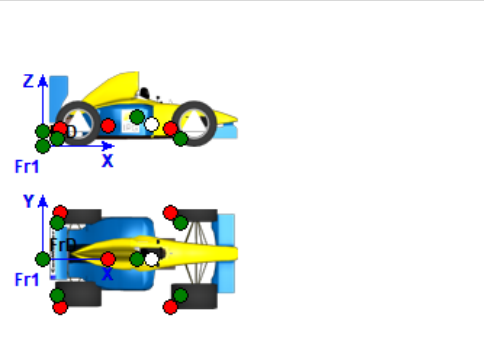
Body	x [m]	y [m]	z [m]	Mass [kg]	Ixx [kgm <sup>2</sup> ]	Iyy [kgm <sup>2</sup> ]	Izz [kgm <sup>2</sup> ]
Wheel Carrier FL	1.7625	0.65	0.2325	1.67	0.14	0.14	0.1
Wheel Carrier FR	1.7625	-0.65	0.2325	1.67	0.14	0.14	0.1
Wheel Carrier RL	0.2325	0.65	0.2325	1.44	0.03	0.02	0.03
Wheel Carrier RR	0.2325	-0.65	0.2325	1.44	0.03	0.02	0.03
Wheel FL	1.7625	0.65	0.2325	8.71	0.2	0.32	0.2
Wheel FR	1.7625	-0.65	0.2325	8.71	0.2	0.32	0.2
Wheel RL	0.2325	0.65	0.2325	8.71	0.22	0.32	0.22
Wheel RR	0.2325	-0.65	0.2325	8.71	0.22	0.32	0.22
Number of Trim Loads:		1		Mounting			
<input type="checkbox"/> Trim Load 1	1.5	0.0	0.3	75	25.33	52.19	51.97 Fr1A

Position	x [m]	y [m]	z [m]
Origin Fr1	0.0	0.0	0.0
Aero Marker	1.3	0.0	0.4
Hitch	0	0	0.2
Jack FL	0.2	0.5	0.1
Jack FR	0.2	-0.5	0.1
Jack RL	1.9	0.5	0.1
Jack RR	1.9	-0.5	0.1

- Origin Fr1
- Geometry Bodies
- Positions
- Geometry Trim Loads



Slika 12. Vrijednosti neovještene mase vozila

### 3.1.4. Model gume

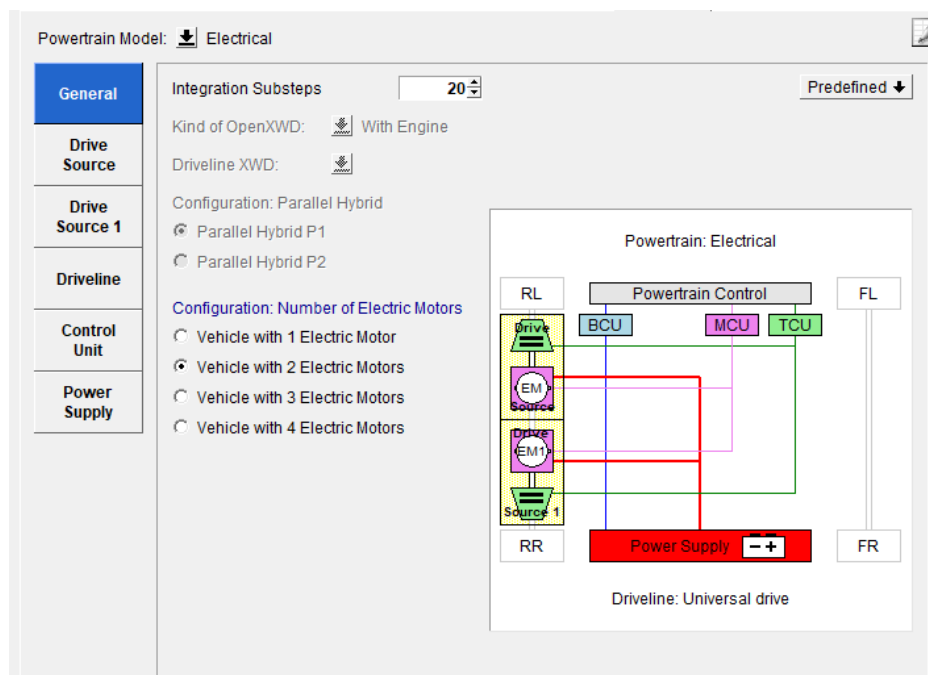
Model gume jedna je od najkritičnijih komponenti pri simuliranju dinamike vozila. U našem slučaju koristimo Hoosier 10x8 R25B gume na sva 4 kotača. To su gume za primjenu u utrkivanju, predviđene za promjer kotača 10", te širine 8". R25B označava smjesu gume, odnosno govori nam o njezinoj mekoći, radnoj temperaturi, te optimalnim uvjetima korištenja. Korišteni model gume je Pacejka 2002 Magic formula koji pokriva širok raspon simulacija:

- Skretanje konstantnom brzinom
- Mijenjanje trake
- Kočenje
- Ponašanje na površini različitog faktora trenja – nailazak na led
- ABS kočenje
- „Traction control“ sustav

Potpuni model gume sa preko 150 koeficijenata u obliku .tir datoteke nalazi se u prilogu. [5]

### 3.1.5. Pogon

CarMaker jedan je od vrlo rijetkih softvera koji izvorno podržava električni pogon. Ovom području posvetilo se najviše pažnje jer točno modeliranje sustava pogona nam direktno određuje točnost simulacije potrebne količine energije. Prikaz prvog sučelja pri modeliranju sustava pogona prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 13. CarMaker – Pogon sučelje

Odabrana je konfiguracija od 2 elektromotora, gdje svaki elektromotor pogoni jedan stražnji kotač.

Sljedeća stavka je modeliranje elektromotora. Prije samih karakteristika, potrebno je pojasniti korišteni elektromotor. Odabrani elektromotor razvila je tvrtka Alta Motors (California, USA) za svoju seriju motocikala.



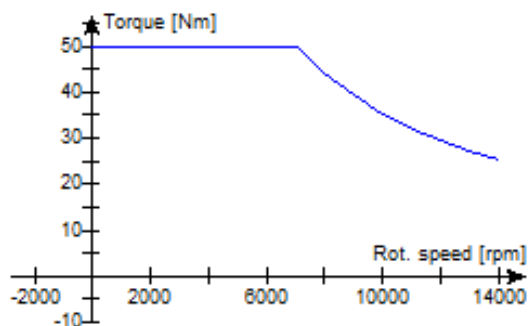
**Slika 14. Alta Redshift SM**

Motor je PMSM tipa, odnosno Permanent Magnet Synchronous Motor, što bi se prevelo na hrvatski: sinkroni motor s permanentnim magnetima. Motor je vodeno hlađen, vrlo male mase te vrlo velikog broja okretaja. Točne specifikacije [6] dane su u tablici 6.

**Tablica 6. Karakteristike motora**

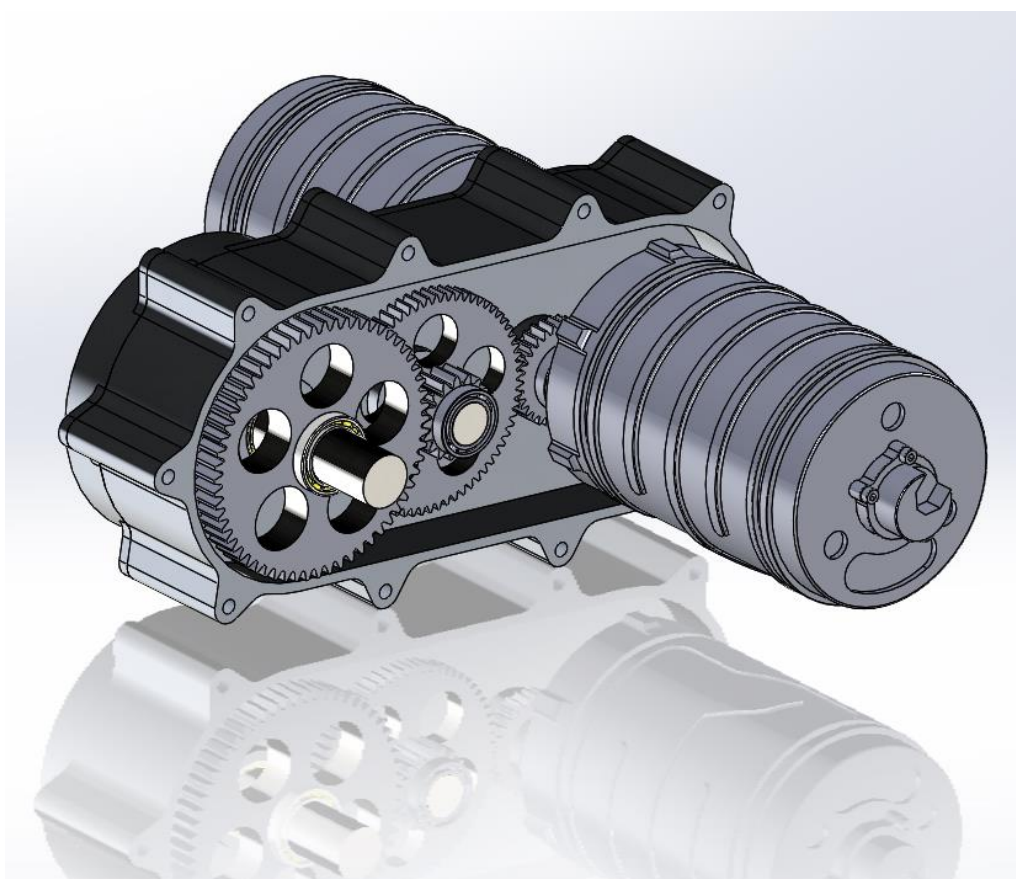
Proizvođač	Alta Motors
Vrsta motora	Sinkroni motor s permanentnim magnetima
Maksimalna trajna snaga	30 kW
Vršna snaga	40 kW
Ulazni napon	350 V
Nominalna struja	85 A
Maksimalni moment	50 Nm
Maksimalni broj okretaja	14 000
Vrsta hlađenja	Vodeno hlađenje
Masa motora	6,8 kg

Pripadna momentna krivulja dobivena od proizvođača prikazana je na sljedećoj slici:



**Slika 15. Momentna karakteristika motora**

Ova krivulja je ulazni podatak za elektromotor u sučelje CarMaker skupa sa pripadajućim prijenosnim omjerom reduktora koji iznosi 11.7. Taj prijenosni omjer definiran je potrebnom maksimalnom brzinom od 110 km/h. Prikaz sklopa reduktora i elektromotora prikazan je na slici 16.



**Slika 16. Dvostupanjski reduktor FSBRT06e bolida**

### 3.1.6. Ovjese, upravljanje, kočnice

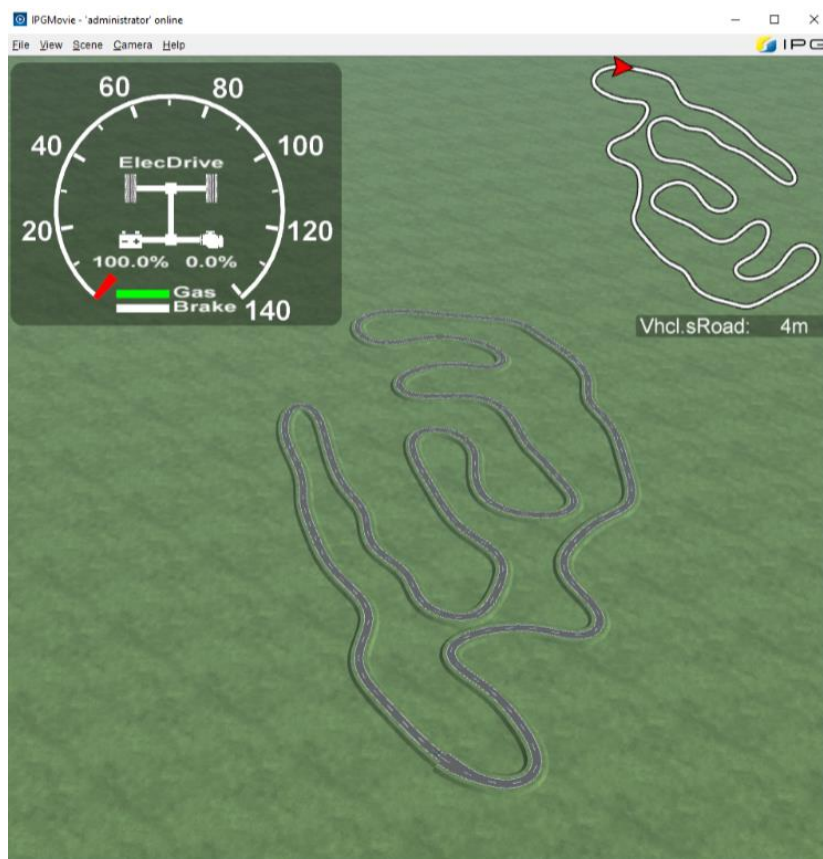
Ovi podsustavi ne predstavljaju veliku ulogu za razvoj baterijskog paketa, pa se njihovo modeliranje neće prikazati u ovom radu.

### 3.1.7. Modeliranje staze Formula Student Njemačka

Nakon uspješno modeliranog vozila, potrebno je izmodelirati stazu koja predstavlja stazu na kojoj će se zapravo bolid voziti. Od razmatranih staza u koje spadaju Formula Student Germany, Formula Student Austria, Formula Student UK – Silverstone, odabrana je staza sa natjecanja u Njemačkoj zbog najveće zahtjevnosti za bolid. Korištena su dva izvora za modeliranje:

1. Tlocrt staze iz priručnika natjecanja
2. GPS Podaci sa vožnje od NTNU Revolve tima iz Norveške

Prvi izvor pokazao se vrlo teško ostvarivim zbog male preciznosti i teškog skaliranja kako bi se dobila točna duljina staze. Drugi slučaj pokazao se puno boljim rješenjem, te su vrlo lako izvučene koordinate staze koje odgovaraju realnosti. Prikaz modelirane staze nalazi se na slici 17.

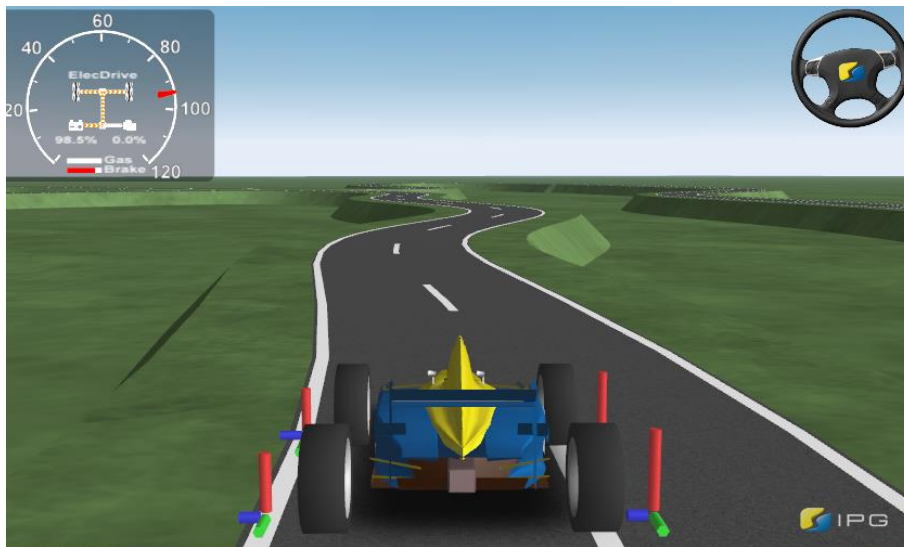


Slika 17. Generirana staza – FS Njemačka

### 3.1.8. Rezultati simulacija

Nakon izmodeliranog bolida te staze, simulacija je iterirana pritom mijenjajući agresivnost virtualnog vozača, sve dok se nije ostvarilo najbolje vrijeme za 1 krug. Nakon toga puštena je istovremeno simulacija u realnom vremenu, te video od bolida tima sa TU Munich, te se vidi da se međusobno simulacija i realna vožnja po stazi dobro prate. Zbog toga možemo reći da simulacija odlično opisuje realno ponašanje.

Usporedba se vidi na sljedećim slikama:



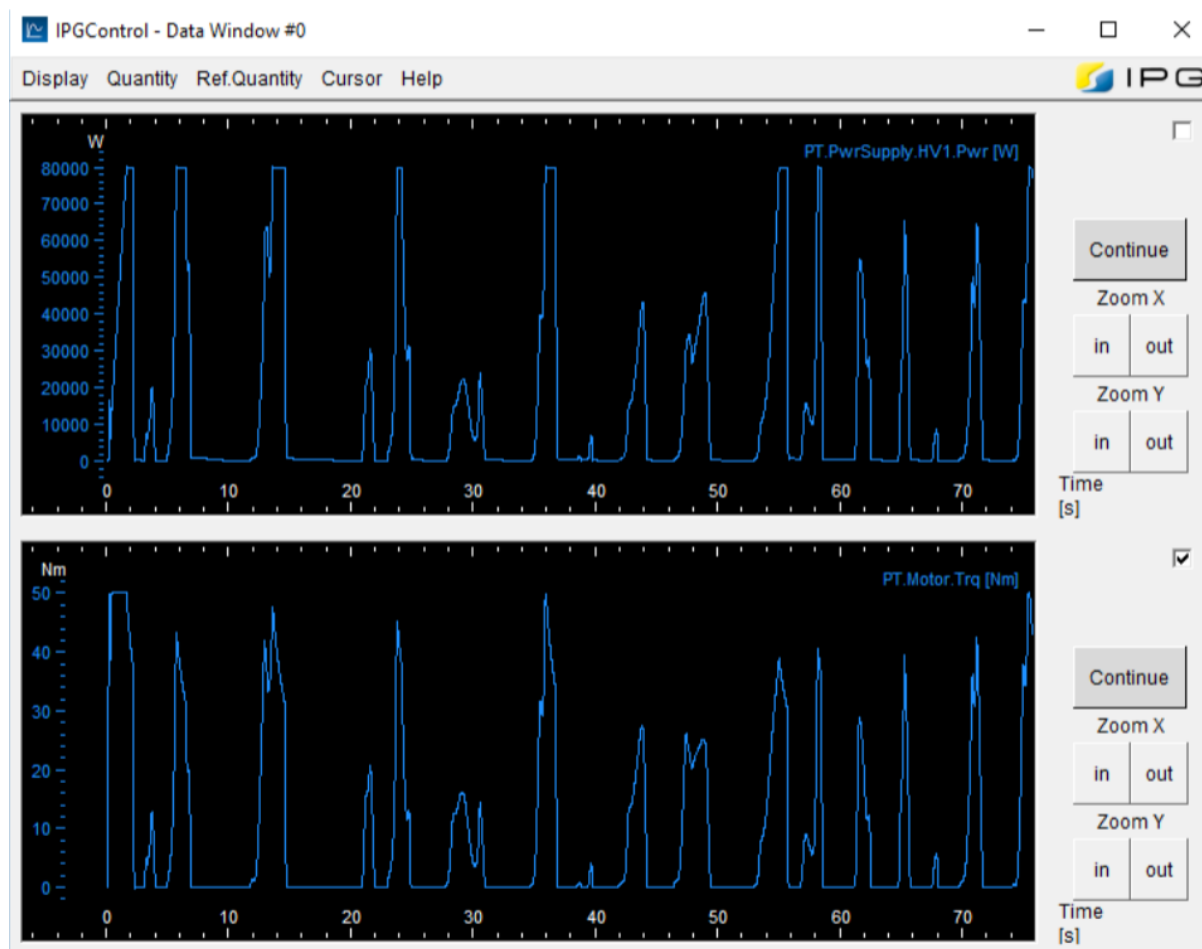
Slika 18. CarMaker simulacija



Slika 19. UNI Munich na FS Njemačka 2016

Za navedenu simulaciju izvučeni su grafovi snage te momenta motora koji su prikazani na slici 20.





Slika 20. Ciklus snage i momenta

Nakon toga rezultati su učitani u Matlab, te se prikazana snaga integrirala kako bi se dobio kapacitet. Dobiveni energija iznosi 6,8 kWh. Što je dobra polazna točka za odabir ćelije te njihove konfiguracije.

## 4. Izbor ćelije

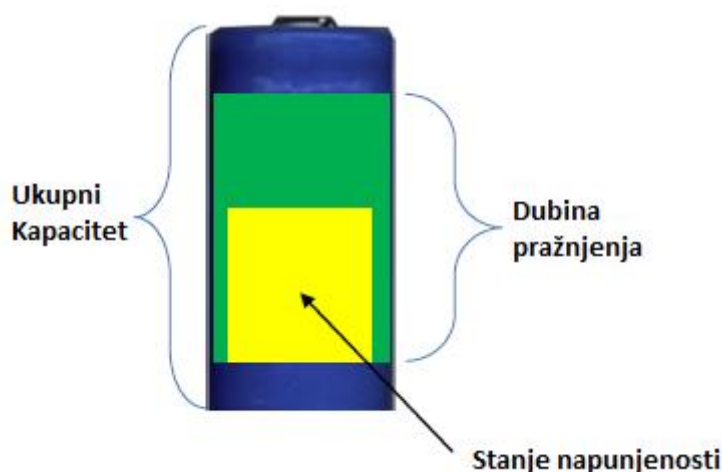
Temeljeno na vrednovanju drugih timova te simulacijama, dobivena je prilično dobra aproksimacija koliko nam je energije potrebno. Zaključeno je da zbog zahtjeva za masu, bolje je da odaberemo malo manje kapaciteta, pa zadnju trku vozimo s ograničenom snagom. Zbog toga, imamo manju masu, te na svim disciplinama osim utrke izdržljivosti, možemo ostvariti bolji rezultat, što je sa bodovne strane bolja opcija. Zbog toga, postavili smo cilj na 6.8 kWh iskoristive energije. Ovdje je iskoristive ključna riječ, jer to znači da će nominalni kapacitet biti veći od 6.8 kWh, međutim zbog velikog opterećenja ćelije na trci, iskoristivi kapacitet bit će nešto manji. Točan iskoristivi kapacitet izmjerit će se nakon što se prepostavi ćelija.

### 4.1. Popisivanje ćelija

Sa izborom ćelija krenuli smo tako da smo popisali sve ćelije koje su potencijalni kandidati te njihove najvažnije karakteristike.

Neke od glavnih termina i varijabli koji su bitni pri odabiru ćelije su: [7]

1. Gustoća snage [W/kg] – Odnos snage ćelije i njezine mase
2. Gustoća energije [Wh/kg] – Odnos između energije koju baterija sadrži i njezine mase ili volumena
3. State Of Charge – SoC – Stanje napunjenosti ćelije, izražava se u postotku 0% - 100 %



Slika 21. Osnovni pojmovi ćelije

Ćelije su podijeljene u dvije grupe – 18650 te pouch ćelije. Prvih 5 navedenih su 18650 ćelije, ostatak su pouchevi. Većina podataka izvučena je iz specifikacija proizvođača, te provjerena eksperimentalnim mjerenjima provjerenih izvora (NASA, NREL, batterybro, budgetlight).

Podaci koji nisu pisali u podatkovnom listu proizvođača, ili se nisu mogle pouzdano pronaći morali smo mjeriti. Tako smo za skoro sve ćelije mjerili unutarnji otpor u firmi Rimac Automobili koristeći njihovu opremu (Hioki BT4560 za mjerenje impedancije, iCharger 4010 duo za punjenje / pražnjenje ćelija). Mjerenja su rađena na približno sobnoj temperaturi (25 stupnjeva) te 50% SoC-a.

**Tablica 7. Karakteristike ćelija – prvi dio**

Ime ćelije	Nominalni napon [V]	Nominalni kapaciteti [mAh]	C kont.	C Vršno	Struja kont. [A]	Struja Vršno [A]	Masa [g]	Unutarnji otpor [mOhm]
Samsung 25R	3.6	2500	8	40	20	100	45.00	17.29
LG HE4	3.6	2500	8	12	20	30	47.00	20.00
LG HG2	3.6	3000	7	10	20	30	44.86	30.12
Sony VTC5	3.6	2600	8	12	20	30	44.30	18.00
Sony VTC6	3.6	3120	10	13	30	40	46.40	16.00
EPS 6300	3.7	6300	30	60	189	378	133.00	3.60
EPS 4500	3.7	4500	20	40	90	180	89.00	4.00
Grepow 5300	3.7	5300	20	25	104	130	110	3.86
Melasta 8000	3.7	8000	20	20	160	160	178	2.18
Meslata 6300	3.7	6300	15	15	94.5	94.5	127	2.97
Gens 5300	3.7	5300	20	25	104	130	110	2.41
Melasta SLPB885014 0	3.7	7150	10	10	71.5	71.5	140.00	2.50

Tablica 8. Karakteristike ćelija – drugi dio

Ime ćelije	Dimenzije [mm]			Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Topl. Kapacitet [J/kgK]	Cijena [€]	Gustoća energije [Wh/kg]	Gustoća snage [W/kg]
Samsung 25R	20.2	20.2	65	26523	950	2.65	200	1600
LG HE4	20.2	20.2	65	26523	950	2.67	191	1531
LG HG2	20.2	20.2	65	26523	950	4.05	240	1604
Sony VTC5	20.2	20.2	65	26523	950	3.59	211	1625
Sony VTC6	20.2	20.2	65	26523	950	5.19	242	2327
EPS 6300	8.6	45	148	57276	1011	23	175	5257
EPS 4500	7.1	44.5	129	40758	1011	12.5	187	3741
Grepow 5300	9	42	127.5	48195	1011	15	178	3498
Melasta 8000	8	64	156	79872	1011	33	166	3325.
Meslata 6300	10.6	42	127.5	56763	1011	25.82	183	2753
Gens 5300	9	42	127.5	48195	1011	16.66	178	3498
Melasta SLPB8850140	140.5	50.5	8.6	61019	1011	?	189	1890

Sa dostupnim podacima o svakoj ćeliji, potrebno je napraviti tablicu koja opisuje baterijske pakete sačinjene od tih ćelija. Ćelije se spajaju u serijsko-paralelnu kombinaciju kako bi se dobio željeni nominalni napon te kapacitet baterijskog paketa.

#### 4.1.1. Serijski spoj ćelija

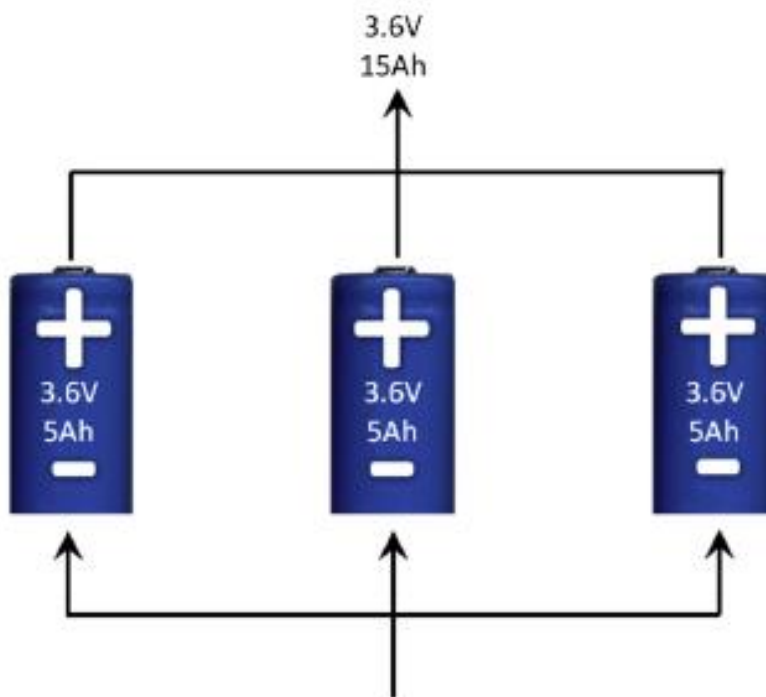
Serijski spoj najlakše je opisati kao „plus na minus, plus na minus“. Rezultira povećanjem napona. Odnosno napon serijski povezanih ćelija je suma napona individualnih ćelija. Kapacitet je isti kao kapacitet jedne ćelije.



Slika 22. Serijski spoj ćelija

#### 4.1.2. Paralelni spoj ćelija

Paralelni spoj ćelija najlakše je opisati kao „plus na plus, minus na minus“. Rezultira povećanjem kapaciteta dok napon ostaje isti. Kapacitet povezanih ćelija jednak je sumi kapaciteta individualnih ćelija.



Slika 23. Paralelni spoj ćelija

#### 4.2. Karakteristike ćelija

Tablica za baterijske pakete gdje su ćelije povezane u serijsko paralelnu kombinaciju dana je u nastavku. Za naš slučaj gdje je nominalni napon 350V, odabrana je kombinacija od 96 serijski spojenih ćelija, a broj ćelija spojenih u paralelu varirao je ovisno o ćeliji tako da se dobije kapacitet što bliži 6,8 kWh ili više. Također, iz unutarnjeg otpora i RMS vrijednosti struje, koja je dobivena iz CarMaker simulacije prikazane u prijašnjem poglavlju izračunala se prosječna snaga zagrijavanja ćelija.

Tablica 9. Karakteristike baterijskih paketa – prvi dio

Paket	Napon [V]	Kapacitet [Ah]	Energija [Wh]	Broj u seriji	Broj u paraleli	P kont [kW]	Masa [kg]	Volumen [dm <sup>3</sup> ]	Cijena [€]
Samsung 25R	345.6	20	6912	96	8	55296	34.56	20.3	2035.2
LG HE4	345.6	22.5	7776	96	9	62208	40.60	22.9	2306.8
LG HG2	345.6	21	7257	96	7	48384	30.14	17.8	2721.6
Sony VTC5	345.6	20.8	7188	96	8	55296	34.02	20.3	2757.1
Sony VTC6	345.6	21.84	7547	96	7	72576	31.18	17.8	3487.6
EPS 6300	355.2	18.9	6713	96	3	201398	38.30	16.4	6624
EPS 4500	355.2	22.5	7992	96	5	159840	42.72	19.5	6000
Grepow 5300	355.2	21.2	7530	96	4	147763	42.24	18.5	5760
Melasta 8000	355.2	24	8524	96	3	170496	51.26	23.0	9504
Meslata 6300	355.2	18.9	6713	96	3	100699	36.57	16.3	7436.1
Gens 5300	355.2	21.2	7530	96	4	147763	42.24	18.5	6397.4
Melasta SLPB885 0140	355.2	21.45	7619	96	3	76190	40.32	17.5	

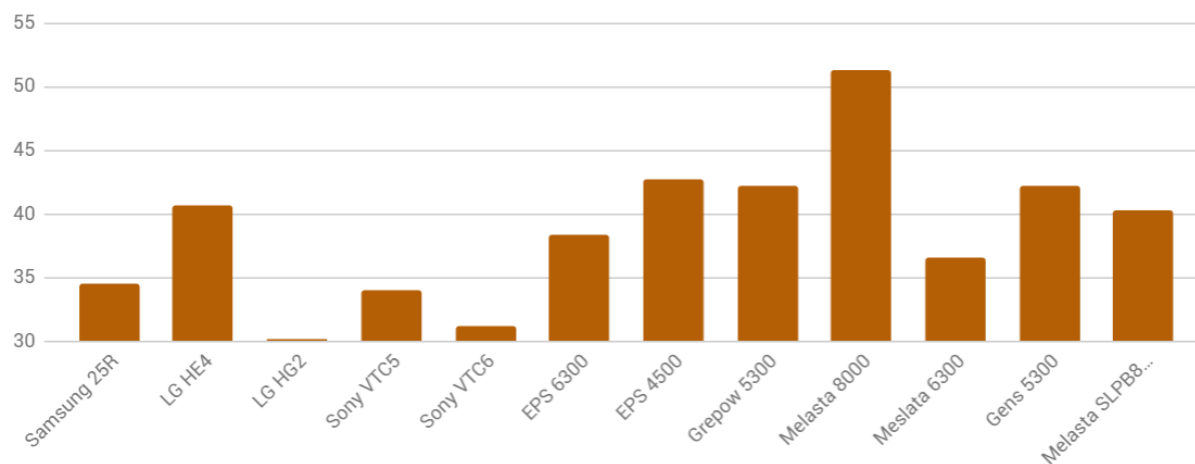
Tablica 10. Karakteristike baterijskih paketa – drugi dio

Paket	Unutarnji otpor paketa [mOhm]	RMS Struja paketa [A]	Snaga gubitaka paketa [W]	RMS Struja ćelije [A]	Snaga gubitaka ćelije [W]
Samsung 25R	207.53	72.00	1075.83	9.00	1.400814
LG HE4	213.33	72.00	1105.92	8.00	1.28
LG HG2	413.13	72.00	2141.66	10.29	3.186996245
Sony VTC5	216.00	72.00	1119.74	9.00	1.458
Sony VTC6	219.43	72.00	1137.52	10.29	1.692734694
EPS 6300	115.10	72.00	596.70	24.00	2.071872
EPS 4500	76.80	72.00	398.13	14.40	0.82944
Grepow 5300	92.64	72.00	480.25	18.00	1.25064
Melasta 8000	69.76	72.00	361.64	24.00	1.25568
Meslata 6300	95.04	72.00	492.69	24.00	1.71072
Gens 5300	57.84	72.00	299.84	18.00	0.78084
Melasta SLPB8850140	80.00	72.00	414.72	24.00	1.44

Ovakav brojčani prikaz, vrlo je nepregledan, i nije lako prepoznati koja ćelija je najbolja za naš slučaj. Zato smo odlučili postaviti 4 glavna kriterija po kojima ćemo izabrati ćelije. To su

### 1. Masa paketa

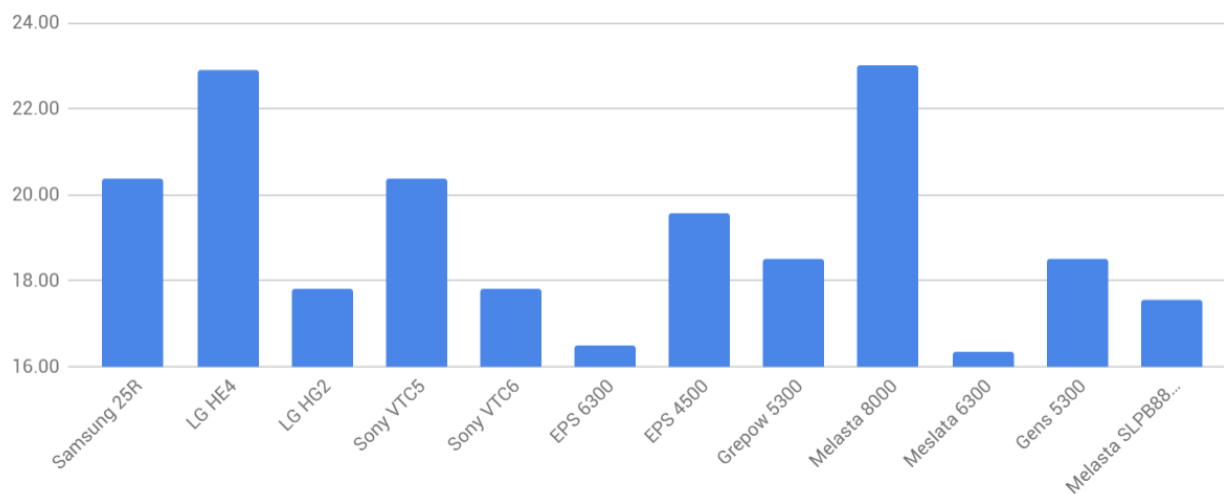
#### Masa paketa [kg]



Slika 24. Mase baterijskih paketa

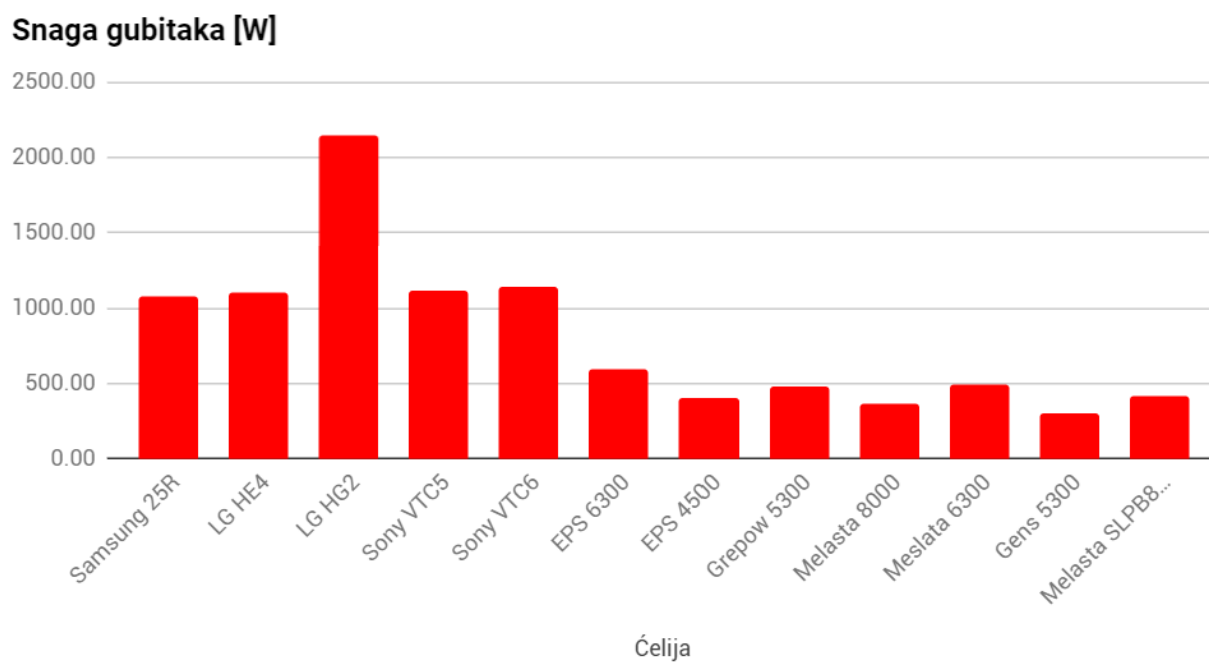
### 2. Volumen paketa

#### Volumen [l]



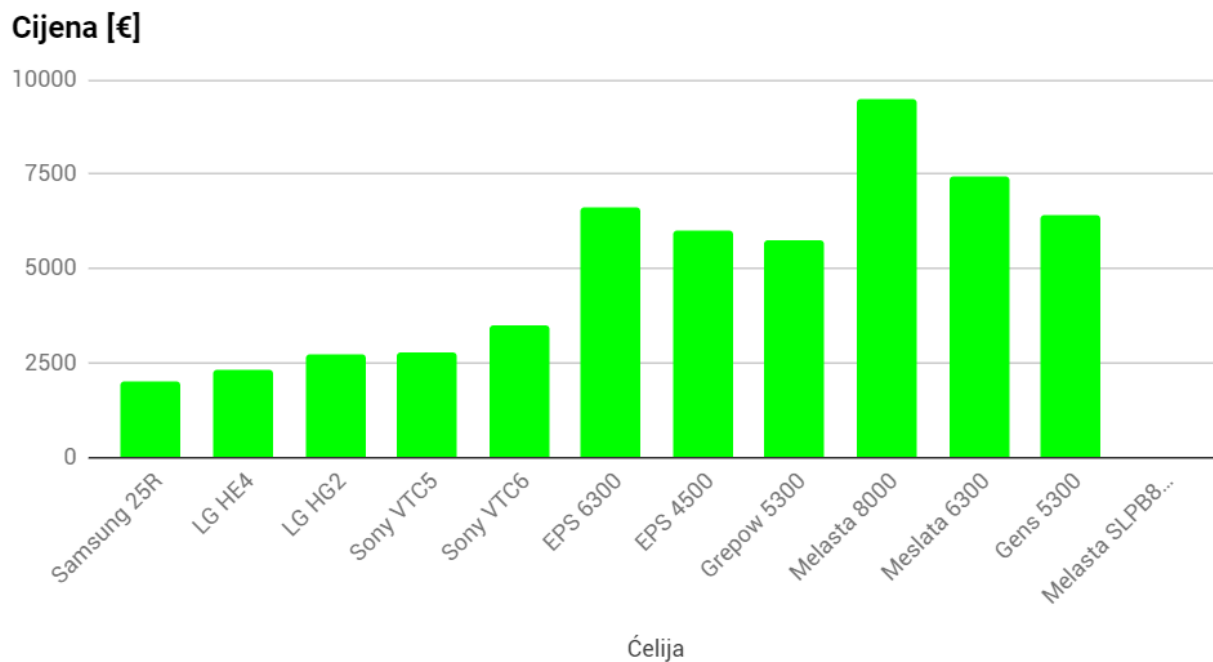
Slika 25. Volumen baterijskih paketa

## 3. Snaga gubitaka paketa



Slika 26. Snage gubitaka baterijskih paketa

## 4. Cijena



Slika 27. Cijene baterijskih paketa



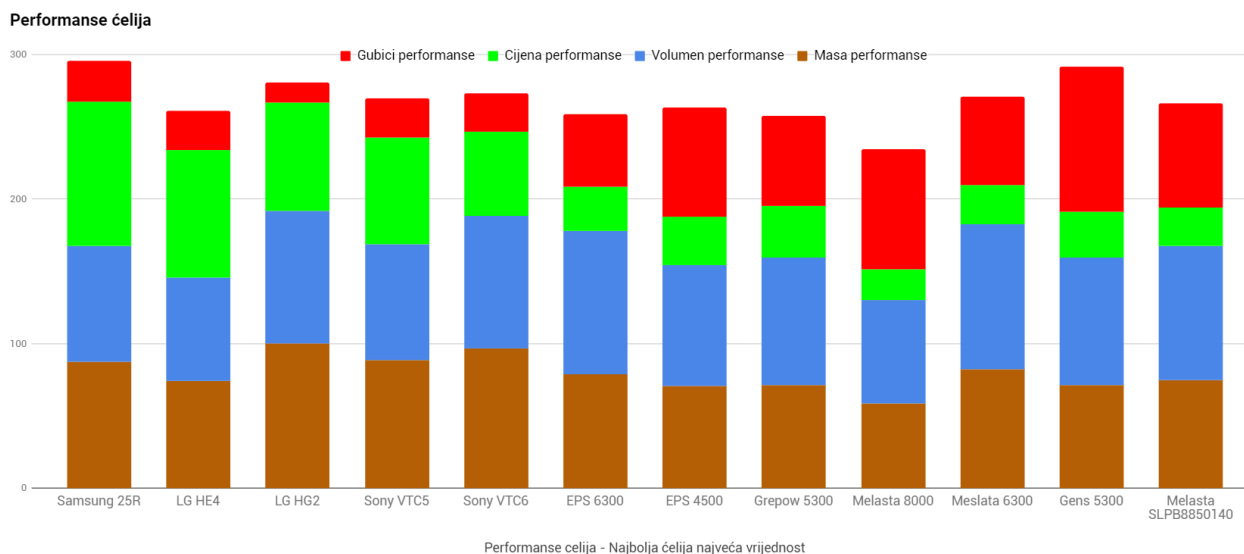
Na temelju ova četiri grafa, nije jednoznačno lako vidljivo koja ćelija predstavlja najbolji odabir. Primjer je LG HG2, iako ima najmanju masu, ima najveće zagrijavanje, te je onda teško točno procijeniti je li ova ćelija bolja ili lošija od neke druge. Zbog toga smo ćelije skalirali sa postotcima za svaki kriterij. Pa tako recimo LG HG2 ima vrijednost 100% za masu, dok sve druge ćelije imaju manju vrijednost – jer imaju veću masu, odnosno lošije su za kriterij mase.

Svaki kriterij ima jednu ćeliju koja ima vrijednost 100% koja predstavlja najbolje performanse za taj kriterij, a sve druge se skaliraju naspram nje. Na kraju se za svaku ćeliju zbroji njezin performans za svaki kriterij, te se dobije ukupni performans te ćelije. Ćelija sa najboljim performansom predstavlja najbolji izbor za navedena četiri kriterija. Tablica koja to pokazuje dana je u nastavku.

**Tablica 11. Performanse ćelija**

<i>Paket</i>	<i>Masa performanse</i>	<i>Volumen performanse</i>	<i>Cijena performanse</i>	<i>Gubici performanse</i>	<i>Ukupne Performanse</i>
<i>Samsung 25R</i>	87.22777778	80.25655479	100	27.8709379	295.3552705
<i>LG HE4</i>	74.23640662	71.33915981	88.22305452	27.1125	260.9111209
<i>LG HG2</i>	100	91.7217769	74.77954145	14.00046475	280.5017831
<i>Sony VTC5</i>	88.60609481	80.25655479	73.81615599	26.77777778	269.4565834
<i>Sony VTC6</i>	96.68103448	91.7217769	58.35397743	26.359375	273.1161638
<i>EPS 6300</i>	78.70175439	99.1043369	30.72463768	50.25020851	258.7809375
<i>EPS 4500</i>	70.56629213	83.56194128	33.92	75.3125	263.3607334
<i>Grepow 5300</i>	71.36818182	88.33333333	35.33333333	62.43523316	257.4700816
<i>Melasta 8000</i>	58.80524345	71.06745793	21.41414141	82.91284404	234.1996868
<i>Meslata 6300</i>	82.41994751	100	27.36896463	60.85858586	270.647498
<i>Gens 5300</i>	71.36818182	88.33333333	31.81272509	100	291.5142402
<i>Melasta SLPB8850140</i>	74.76666667	93.02489464	26.17283951	72.3	266.2644008

Grafički prikaz navedene tablice izgleda ovako:



Slika 28. Performanse ćelija za jednake kriterije

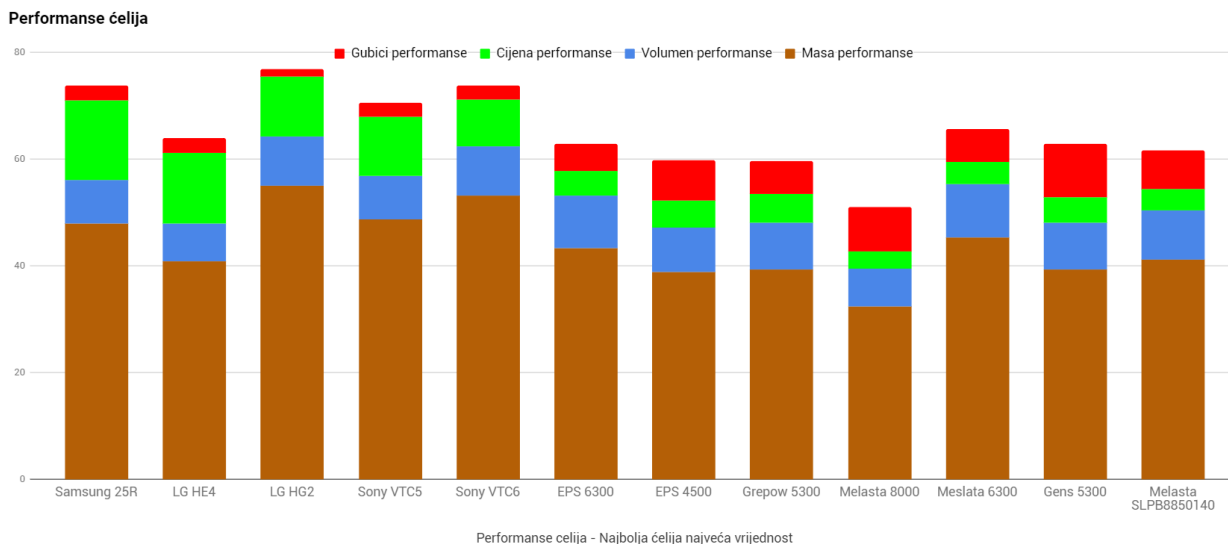
Međutim, ovaj graf je za pretpostavku da nam je svaki kriterij jednako bitan. Dakle u ovom slučaju nam je cijena jednako bitna kao i masa, volumen, snaga gubitaka. Što nije realno, tako da su uvedeni težinski faktori od 0-100 koji opisuju relativnu važnost jednog kriterija nad drugim.

Nakon više iteracija te internih evaluacija sa kolegama, zaključena je sljedeća tablica težinskih faktora:

**Tablica 12. Tablica težinskih faktora**

TEŽINSKI FAKTORI	MASA	VOLUMEN	CIJENA	GUBICI
	55	10	15	10

Za ovako postavljene težinske faktore, grafički prikaz performansi ćelija izgleda ovako:



**Slika 29. Performanse ćelija sa težinskim faktorima**

Krenuli smo s procesom eliminacije. Za početak cijeli desni kraj, odnosno pouch ćelije od EPS6300 pa nadalje je odbačen, jer su zbog velike cijene njihove performanse vrlo loše. Kada bismo zanemarili kriterij cijene, najvjerojatnije bi izbor pao na Melastu 6300 ili Gens 5300 ćeliju.

Gledajući ostatak ćelija, VTC5 nema smisla koristiti jer je već u razmatranju njezin unaprijeđeni nasljednik, VTC6. LG HE4 ima najlošije performanse, te se također izbacuje.

Nakon toga ostaje nam izbor od Samsung 25R, LG HG2 te Sony VTC6. Svaka od ovih ćelija mogla bi se koristiti, jer su po performansama navedenim od proizvođača vrlo slične. Samsung 25R je ćelija sa manjim kapacitetom nego preostale LG HG2 i Sony VTC6, što znači da bi broj ćelija za Samsung 25R bio veći za jednaku količinu energije. Iako su performanse vrlo slične, manji potrebni broj ćelija naveo nas je da odbacimo Samsung 25R.

To znači da su sada ostale Sony VTC6 i LG HG2. Bilo je potrebno provjeriti koja od tih ćelija ima realne bolje performanse. Podaci navedeni od proizvođača ne moraju nužno biti apsolutno točni, a kada uspoređujemo ovako male veličine, potrebno je testirati obje ćelije kako bismo mogli izvući konačan zaključak o izboru ćelije.

### 4.3. Testiranje ćelija

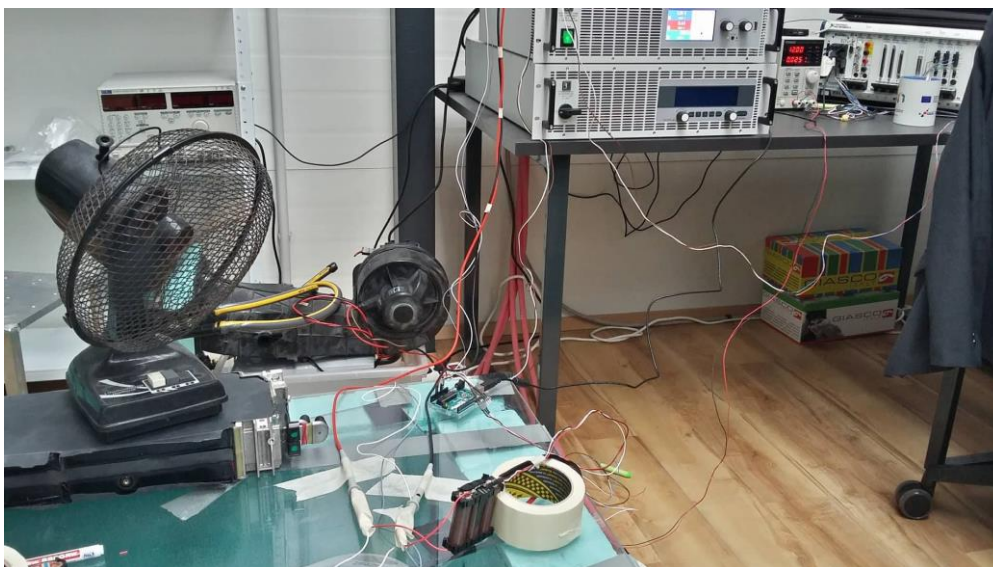
Cilj testiranja bio je doći do zaključka koja ćelija nam više odgovara. To konkretno znači vidjeti koja ćelija može dati više energije (ciljanih 6,8 kWh) te također koja ćelija se manje zagrijava. Testiranje se provodilo na 3 ćelije spojene paralelno. Ćelije se opteretilo ciklusom snage navedenim u prvom poglavlju skalirano na snagu za 3 ćelije. Ciklus je uzorkovan frekvencijom

od 10 Hz, a mjerenja su rađena frekvencijom 100 Hz. Prilikom testiranja mjerene su sljedeće veličine:

- Napon ćelije
- Struja kroz ćeliju
- Temperatura ćelije
- Unutarnji otpor ćelije

Također, posredno izračunate vrijednosti dobivene iz ovih varijabli potrebne za evaluaciju su

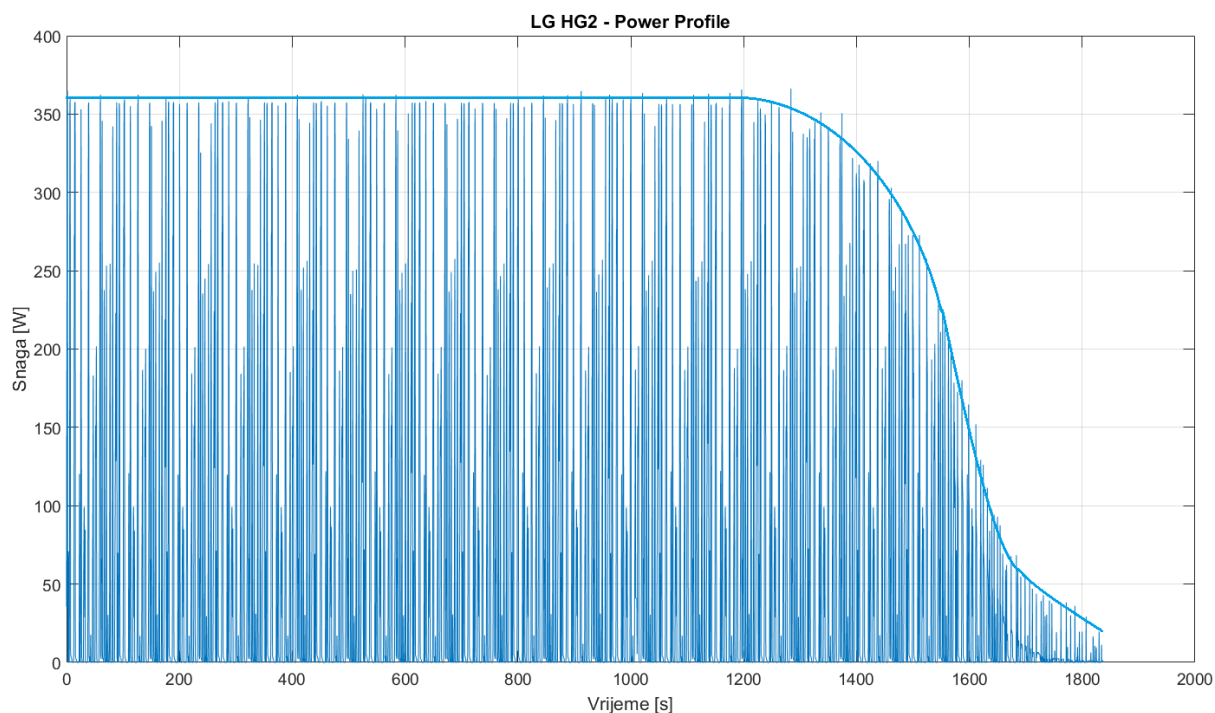
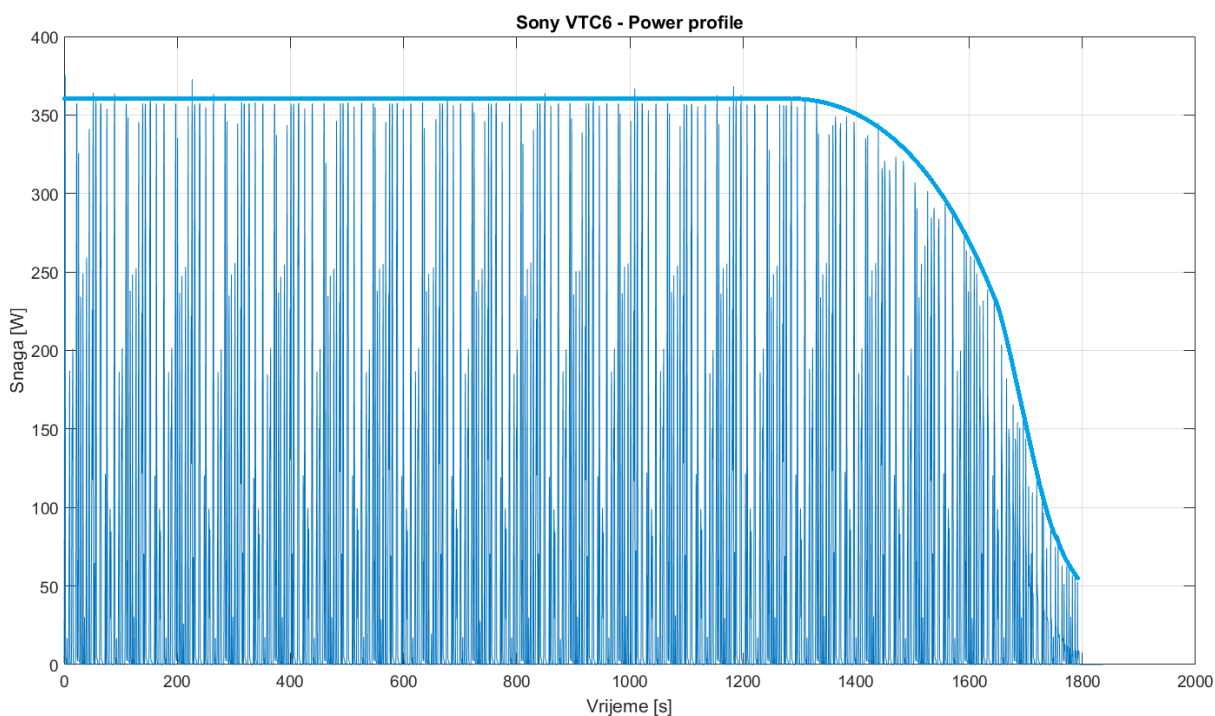
- Energija dobivena iz ćelije
- Kapacitet dobiven iz ćelije
- Snaga opterećenja ćelije



**Slika 30. Testiranje ćelija – Rimac Automobili**

Testiranje obje ćelije izvršeno je u približno jednakim uvjetima. Okolna temperatura je bila 25 stupnjeva, ćelije su napunjene na 4,2 V sa „cut-off“ strujom od 20 mA kako bi se maksimalno približili vrijednosti od 100% SoCa [8].

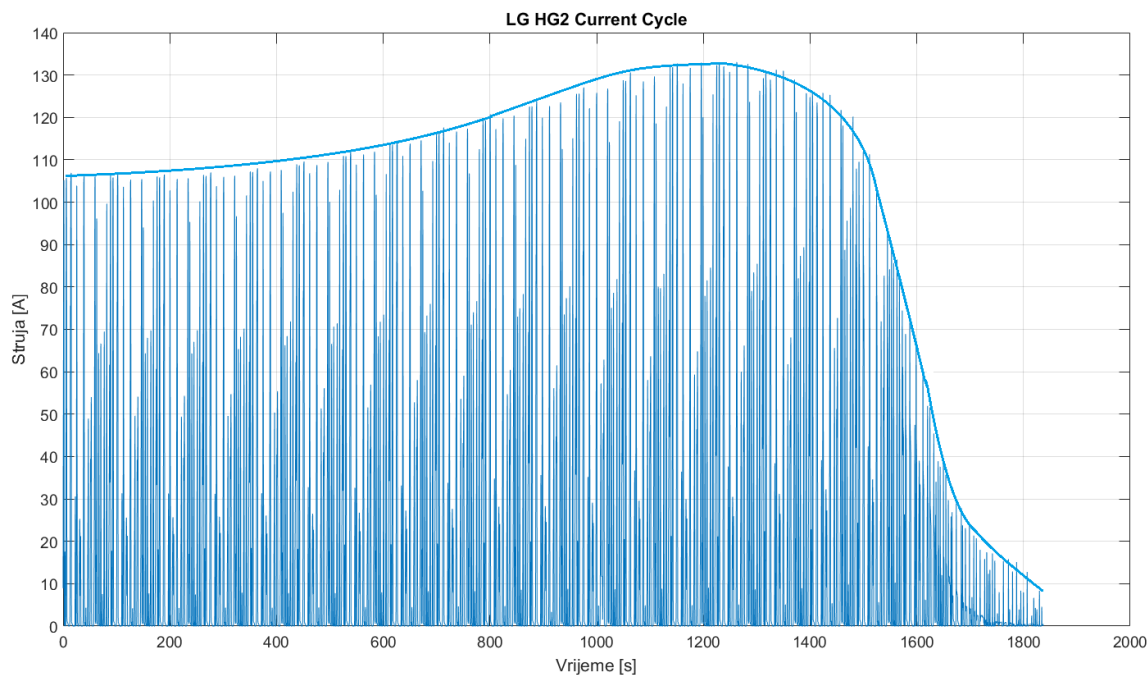
Rezultati testiranja dani su u nastavku, a prvo je prikazan profil snage. Snaga se mjerila tako da se množila trenutna mjerena vrijednost napona i struje.

**Slika 31. LG HG2 – Profil snage****Slika 32. Sony VTC6 – Profil snage**

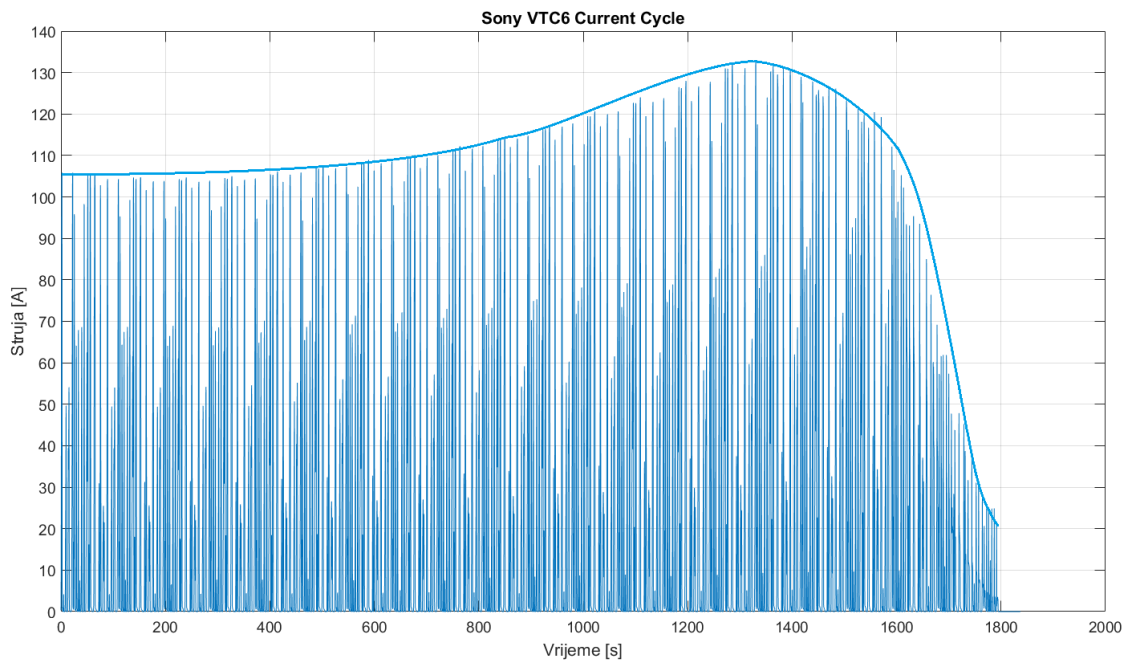
Samo iz ova dva grafa vidi se da se VTC6 ćelije mnogo bolje ponašaju u području ograničene vršne snage, odnosno u dijelu od 1600 s – 1800 s. Vidi se da naspram HG2 ćelija, VTC6 ćelije daju mnogo veću snagu na tom području. Recimo u 1700-toj sekundi, HG2 ćelije ima vršnu vrijednost snage od oko 50 W, dok VTC6 ćelije imaju 150 W.

Također, vidljivo je da područje ograničene snage kod HG2 ćelija počinje ranije nego što je to slučaj sa VTC6 - 1200-ta sekunda naspram 1350-te. Sve ovo znači da ćemo u realnosti duže moći opterećivati ćelije maksimalnom snagom, što je naravno prednost jer to rezultira boljim performansama bolida.

Slični se zaključci mogu izvući iz grafova struja prikazanim u nastavku:



**Slika 33. LG HG2 – Profil struje**

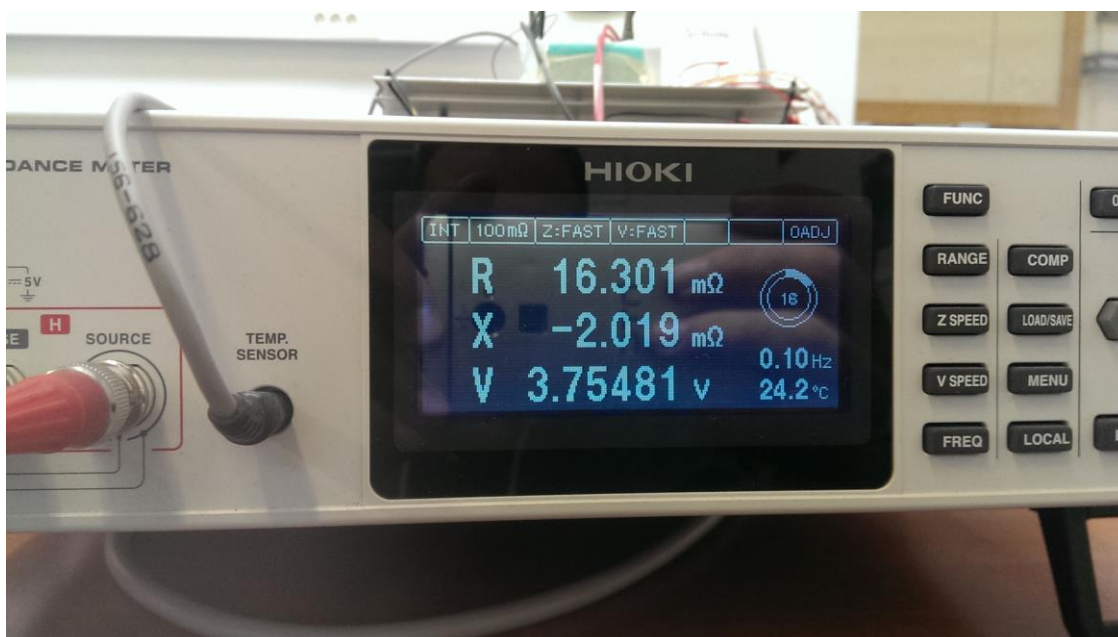


**Slika 34. Sony VTC6 – Profil struje**

Ovdje je bitno primjetiti period maksimalnih struja za svaku ćeliju. Za HG2 ćelije to vrijedi od 1100 s do 1300 s, što je ukupno 200 sekundi sa strujama većim od 130 A. Dok je za VTC6 ćelije, taj period duplo kraći (1300 -1400 s), odnosno 100 sekundi sa strujama većim od 130 A. Ovo direktno utječe na zagrijavanje ćelija, jer je zagrijavanje ćelija proporcionalno kvadratu struje kroz ćeliju te unutarnjem otporu ćelije.

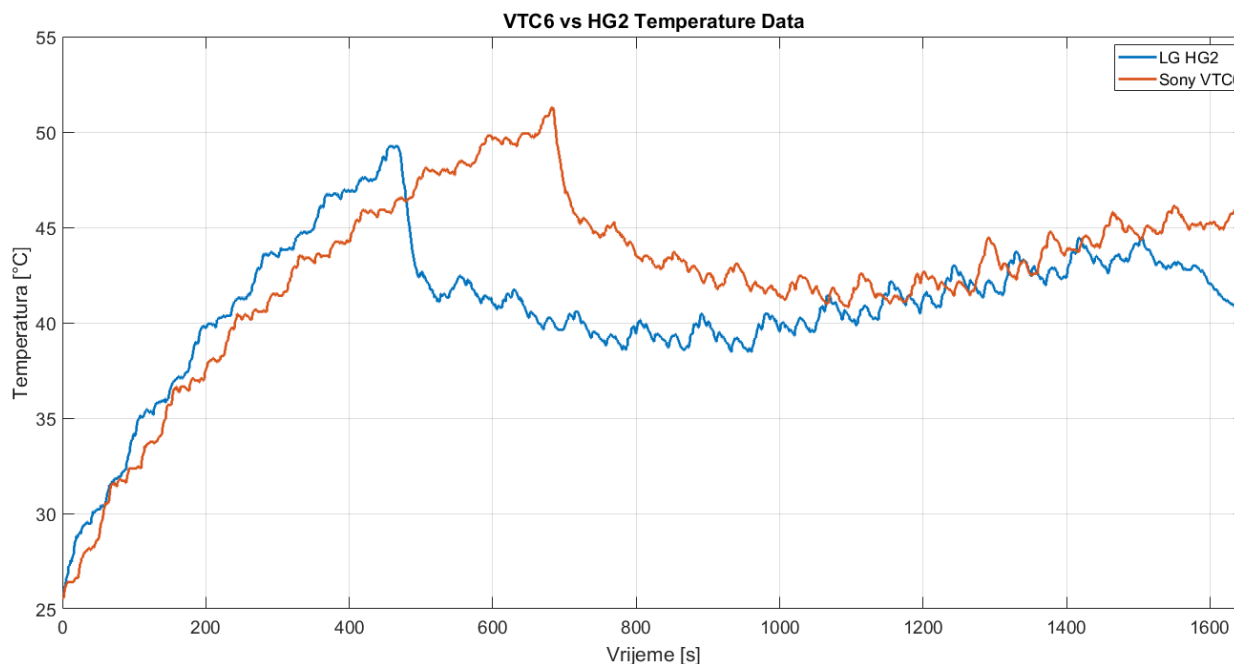
$$P = I^2 * R_{int} \quad (1)$$

Unutarnji otpor ćelije je vrlo kompleksna veličina koja ovisi o jako mnogo faktora – temperaturi, SoC-u, je li ćelija u režimu pražnjenja ili punjenja, zdravlje ćelije itd. Međutim za ovaj slučaj, smatrat ćemo ga konstatnim. A njegov iznos dobiven je tako da smo ćelije ispraznili na točno 50% SoCa te pustili da miruje par sati kako bi došlo do termalne ravnoteže. Korištenjem mjerača impedancije Hioki BT4560, na okolnoj temperaturi 24 °C te frekvenciji 0.1 Hz, izmjerena je vrijednost od 16.3 mΩ za Sony VTC6 ćeliju te 21.2 mΩ za LG HG2 ćeliju.



**Slika 35. Mjerenje unutarnjeg otpora**

Temperaturno ponašanje ćelija opterećenih ciklusom snage iz poglavlja 1 prikazano je na sljedećem grafu.

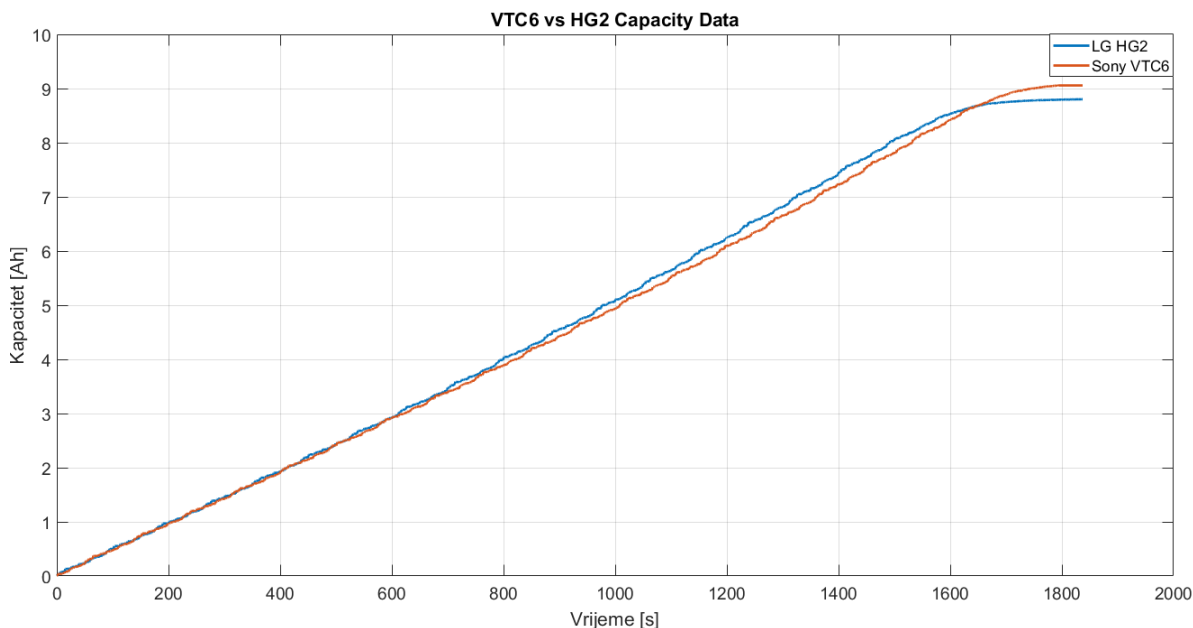


**Slika 36. Usporedba temperatura za HG2 i VTC6 ćelije**

Na približno 50 °C odlučili smo uključiti ventilator kako bismo ohladili ćelije da ne bi došlo do pregrijavanja. Iako ćelije mogu bez oštećenja raditi do 60 °C, mi smo odlučili ventilator uključiti ranije, jer smo već u prvom dijelu dobili dobru informaciju o zagrijavanju ćelija. Za ovaj test, primarni cilj nam je bio dobivanje kapaciteta, a ne temperaturno ponašanje. I pored toga, iz grafa se vrlo jasno vidi da se VTC6 ćelije manje zagrijavaju, što odgovara manjem izmjenenom unutarnjem otporu u odnosu na HG2 ćeliju.

Konačni zaključak o izboru ćelije može se donijeti na temelju dva sljedeća grafa. Prvi pokazuje izmjereni kapacitet obje ćelije. Zbog svih prethodno navedenih činjenica – kasniji ulazak u područje ograničene snage, manji unutarnji otpor, manje zagrijavanje – više se kapaciteta može izvući iz Sony VTC6 ćelije. Zanimljiv detalj na ovom grafu je činjenica da je krivulja HG2 ćelije u velikom dijelu iznad VTC6 ćelije. To je zato što HG2 ćelija ima veći pad napona, pa samim time za istu snagu terećenja ima veću struju, što za posljedicu daje veći kapacitet.





**Slika 37. Usporedba kapaciteta**

Iz Sony VTC6 ćelija izvučeno je 9.1 Ah, odnosno 3,03 Ah po ćeliji. Dok je iz HG2 ćelija izvučeno 8,7 Ah, odnosno 2.9 Ah ako gledamo jednu ćeliju. Ovo su rezultati promatrani na kraju testiranja, kada je snaga obje ćelije bila vrlo malena, pa samim time ovi rezultati nemaju previše važnosti jer u realnosti, na utrci ne želimo si dozvoliti da „pužemo“ do kraja trke, već moramo završiti trku sa razumnom snagom. U početku smo rekli da nam je cilj imati baterijski paket koji ima 6,8 kWh iskoristive energije.

$$E_{ukupno} = E_{ćelije} * n_{ser} * n_{par} \quad (2)$$

To znači da svaka ćelija mora imati 10,11 Wh, odnosno ako to podijelimo sa nazivnim naponom ćelija od 3,6 V dobivamo da svaka ćelija mora imati iskoristivi kapacitet od 2,81Ah. Ako se uzme u obzir da smo mi testirali 3 ćelije u paraleli, to znači ukupni kapacitet od 8,43Ah. Ako pogledamo gornji graf, vidimo da je 8,43 Ah za obje ćelije postignuto na oko 1600 sekundi. Sada se vratimo na grafove snaga na slici 32 i 33, iz kojih se vidi da na 1600-toj sekundi, HG2 ima max. snagu od 132 W a VTC6 275 W, što je više od duplo snage.

Svi ovi pokazatelji jasno ukazuju da je ispravan odabir ćelije upravo Sony VTC6 za korištenje u baterijskom paketu bolida FSBRT06e.

## 5. Koncepti baterijskog paketa

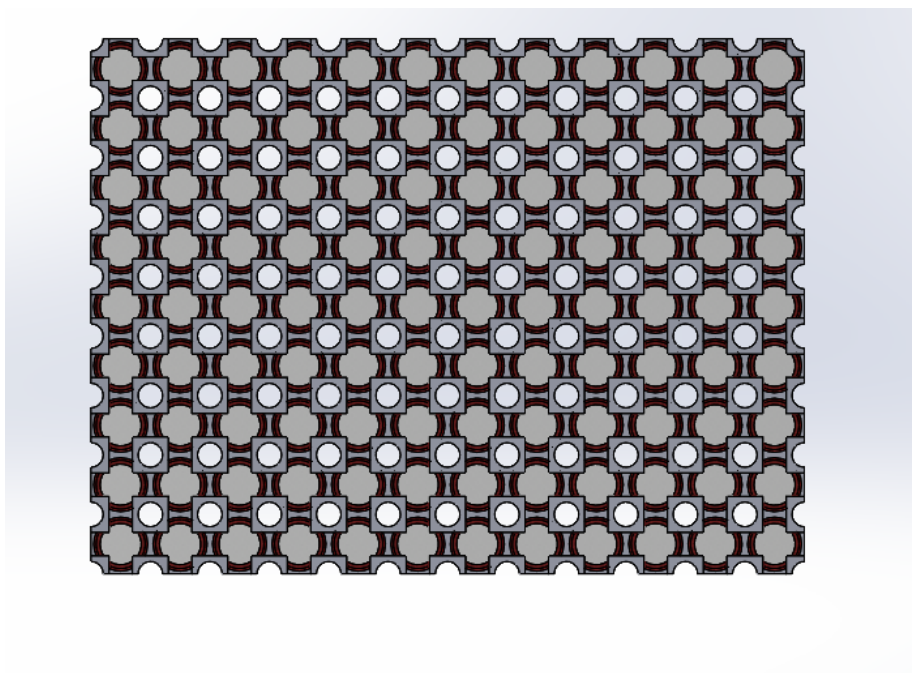
Ukupni baterijski paket koristeći Sony VTC6 ćelije sastoji se od 672 ćelije u 96s7p konfiguraciji, odnosno 96 ćelija u serijskom spoju, 7 u paralelnom. To daje nazivni napon od 350 V i nominalni kapacitet od 7,5 kWh (6,8 kWh iskoristivo).

Radi pravilnika, baterijski paket potrebno je razdvojiti na segmente od kojih ni jedan ne smije imati veći maksimalni napon od 120V, i sadržavati više od 1.667 kWh (kapacitet se računa sa maksimalnim naponom ćelije – 4.2V – Pravilnik). Također, maksimalna temperatura koju bilo koja od mjerenih ćelija smije postići je 60 °C.

U nastavku će se pokazati svi razvijeni koncepti, te konačni odabrani koncept baterijskog paketa.

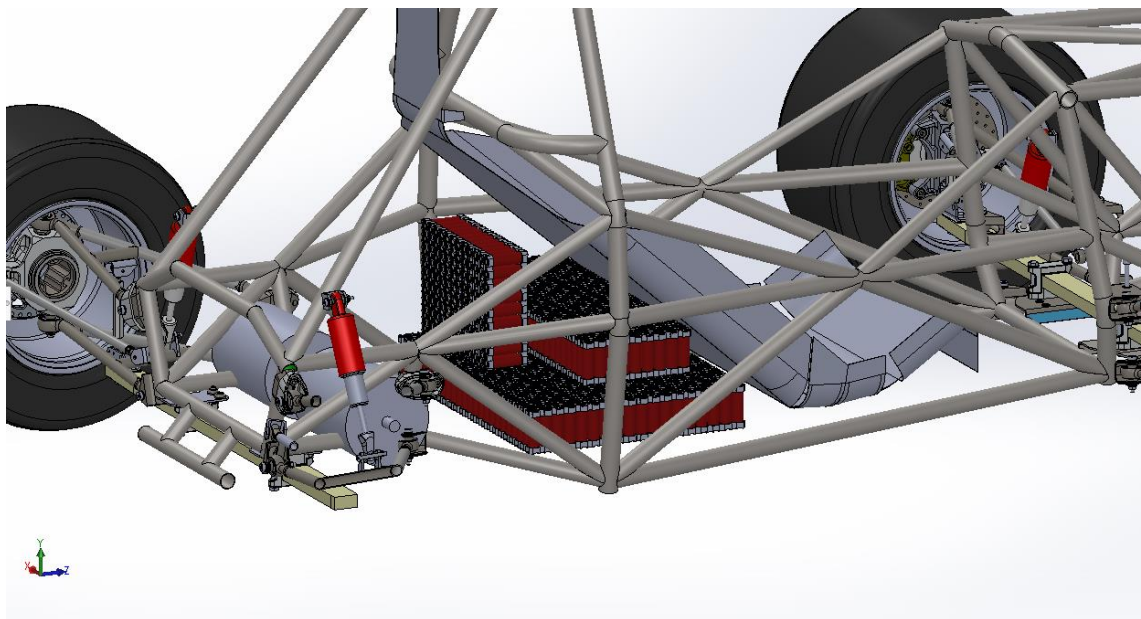
### 5.1. Prva verzija paketa

Početna konfiguracija bila je sa segmentom od 12s9p, što ukupno daje 7 segmenata. Razmak između osi ćelija postavljen je na 20,2 mm u horizontalnom ili vertikalnom smjeru radi boljeg hlađenja. Posljedica ovoga je veći volumen nego da su ćelije postavljene bliže jedna drugoj.



Slika 38. Prva verzija segmenta

Postavljanjem ovakvih segmenata, najbolje rješenje do kojeg se došlo prikazano je na slici 39:



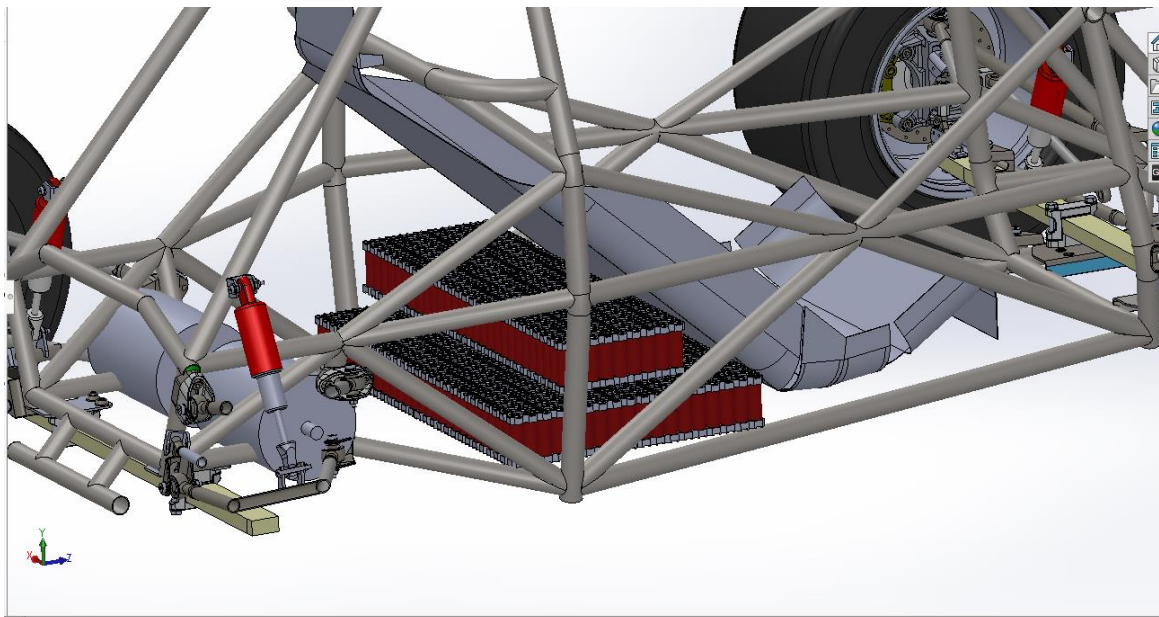
**Slika 39. Baterijski paket od prve verzije segmenata**

Vidi se da je ovo loše rješenje, ali se ujedno vidjelo i rješenje problema. Naime ovakav paket ne dolazi do ruba šasijske svojom širinom, pa se povećanjem segmenta potencijalno može riješiti problem na vrlo elegantan način.

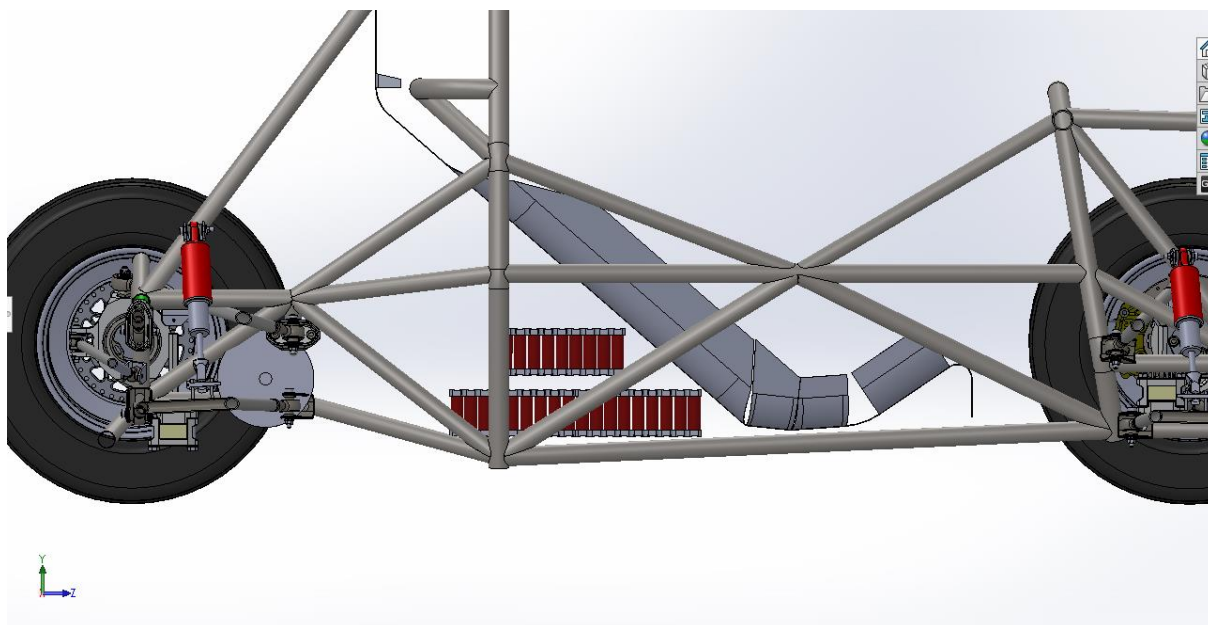
Potrebno je paziti da se povećanjem segmenta ne prijeđe granica od 1.667 kWh i 120V iz pravilnika.

## 5.2. Druga verzija paketa

Odabran je 14s9p segment koji još uvijek zadovoljava oba uvjeta. Segment je modeliran na isti način, a slaganjem segmenata dobiva se sljedeći izgled:



Slika 40. Druga verzija baterijskog paketa - izometrija



Slika 41. Druga verzija baterijskog paketa - bokocrt

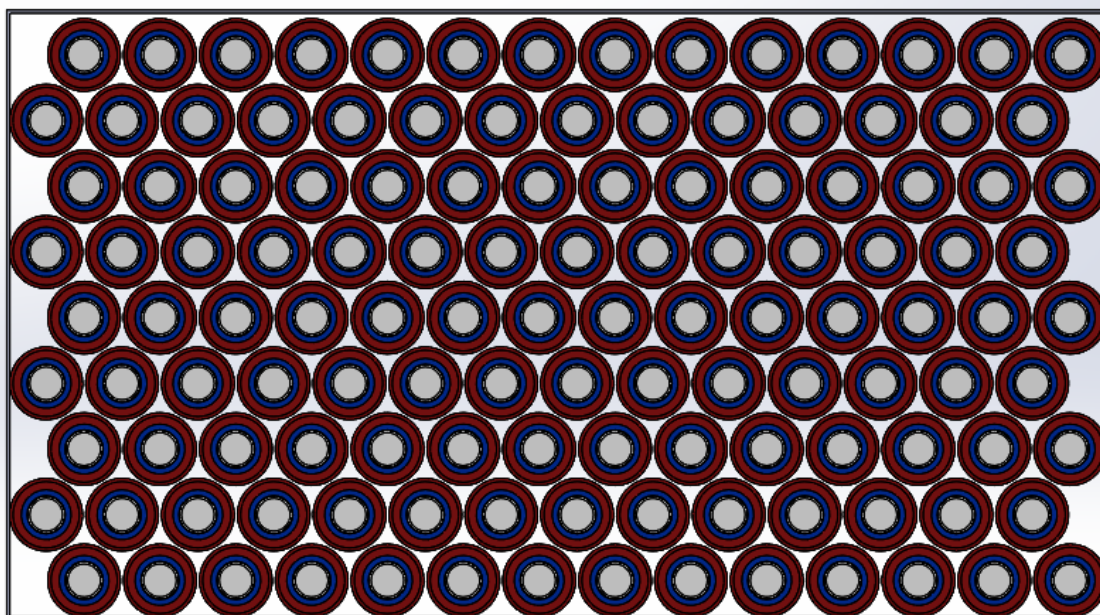
Iz ovakve konfiguracije vidi se da između baterijskog paketa i sjedala ostaje još prostora za periferne sustave koji ulaze u baterijski paket kao što su kontaktori, BMS, osigurači i slično. Nedostatak ovakvog pozicioniranja segmenata je lošije hlađenje gornjeg „kata“ segmenata ako

pretpostavimo aksijalno nastrujavanje zraka oko ćelija. Međutim, ovisno o konstrukcijskim rješenjima, ovo je potencijalno lako za riješiti. Ova verzija također uzima više volumena no što je potrebno, ako se problem hlađenja baterijskog paketa smatra lako rješivim.

### 5.3. Treća verzija paketa

Sljedeći pokušaj bio je pozicioniranje ćelija nesimetrično kako bi se bolje upotpunio volumen. Moguće su dvije opcije kada se na ovaj način smanjuje površina. Smanjenje duljine (smjer gdje je 14 ćelija) ili širine (smjer gdje je 9 ćelija). Ovdje se izabrala opcija smanjenja manje stranice (gdje je 9 ćelija), jer smanjenjem veće stranice ne bi dobili nikakvu prednost gledajući da baterijski paket već u prvom stanju stane u šasiju gledajući širinu kod vozača.

Smanjenjem manje stranice baterijski paket se uspio pomaknuti više prema sjedalu, odnosno prednjim kotačima, što je i cilj. Udaljenost između osi ćelija smanjena je na 19 mm.



Slika 42. Treća verzija segmenta

U nastavku je dana tablica u kojoj se uspoređuje površina druge i treće iteracije segmenta:

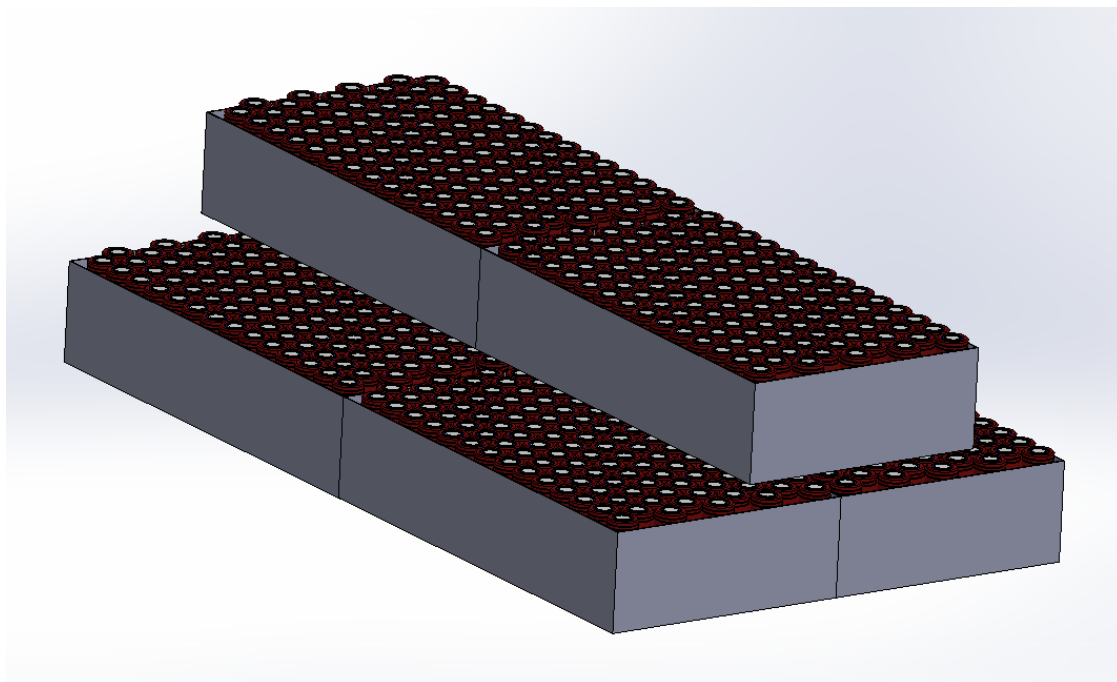
Tablica 13. Tablica usporedbe površina segmenata

Segment	X [mm]	Y [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]
1	282,8	181,8	51 413
2	276,3	152,75	42 204

Kao što se vidi, dulja stranica je ostala praktički nepromjenjena, a kraća se skratila za 29 mm.

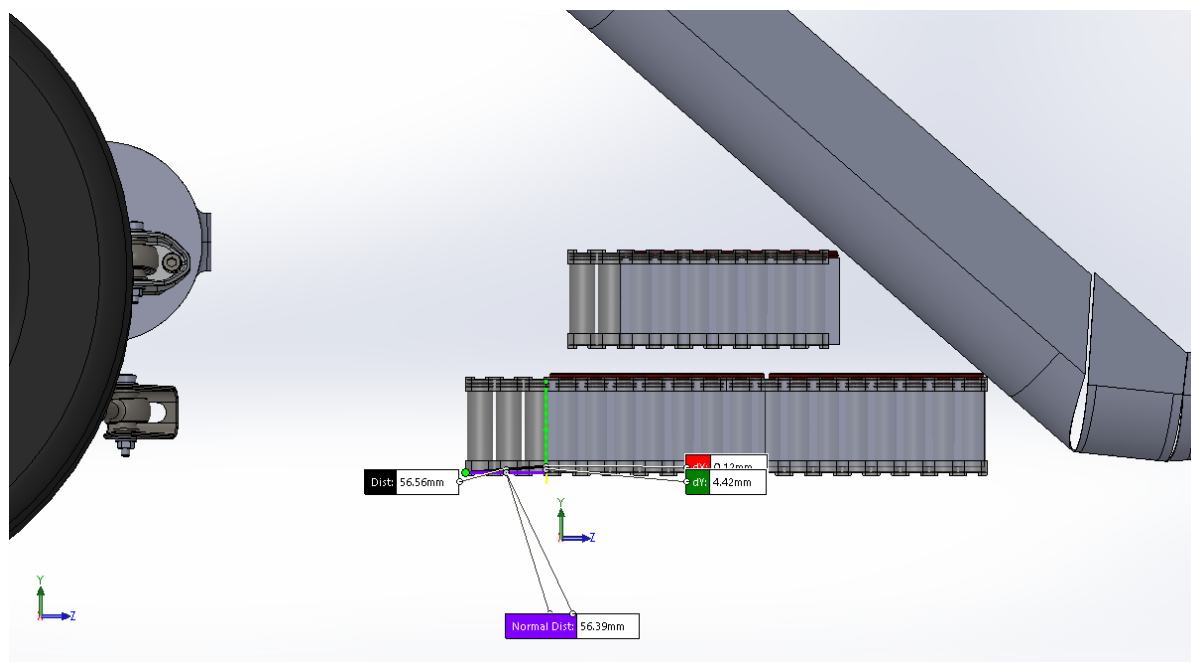
Gledano postotno, drugi segment ima 22% manju površinu.

Baterijski paket sastavljen od ovih kraćih segmenata izgleda ovako:



**Slika 43. Baterijski paket od treće verzije segmenata**

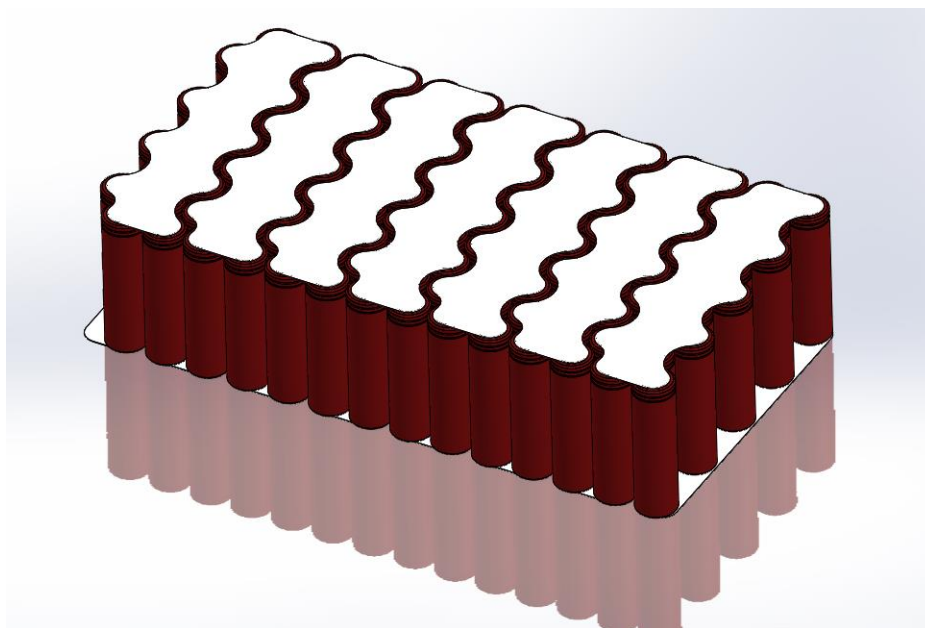
Kada usporedimo baterijske pakete sastavljene od drugog i trećeg segmenta, dolazimo do zaključka da je paket sa užim segmentima ukupno 57 mm bliže prednjem kraju bolida što pozitivno utječe na raspodjelu mase te moment inercije oko z osi.



**Slika 44. Usporedba duljine različitih baterijskih paketa**

Koristeći drugu opciju, gdje je razmak između osi ćelija 19 mm, a same ćelije su 18 mm, ne preostaje puno mjesta za mehanički nosač koji bi povezivao ćelije. Zato će se električno i mehaničko povezivanje pokušati ujediniti korištenjem bakrenih traka.

Dobra stvar kod ovako postavljenih segmenata je da im je broj redaka jednak broju ćelija u paraleli, a broj stupaca jednak je broju ćelija u seriji. Zbog ovoga povezivanje je najjednostavnije moguće, i prolazak struje je homogen po presjeku, što rezultira ujednačenim zagrijavanjem.



Slika 45. Treća verzija segmenta

Postavljeni razmak između poveznica iznosi 5 mm. Ukoliko se koristi ova opcija, treba biti jako oprezan pri spajanju kako ne bi došlo do kratkospajanja poveznica.

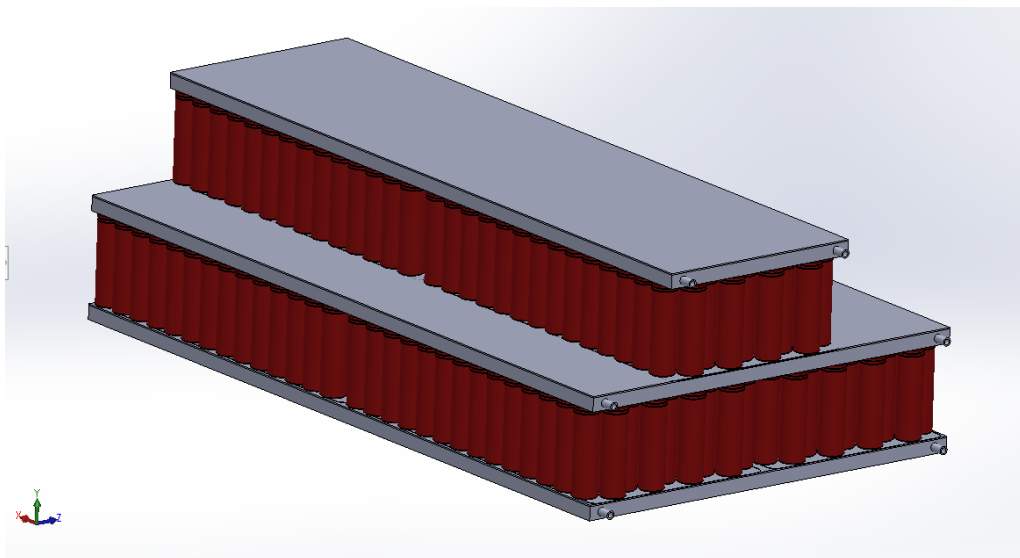
#### 5.4. Četvrta verzija paketa

Koristeći ovakve poveznice, prolaz zraka bitno je otežan, te je pitanje hoće li se moći dovoljno dobro hladiti ćelija. Međutim, s obzirom da su poveznice bakrene te imaju odličnu toplinsku vodljivost, moguće je preko njih hladiti baterijski paket.

U slučaju da hlađenje zrakom ne bude dovoljno, (što će se pokazati testiranjem) potrebno je preći na neku vrstu tekućeg hlađenja.

Preko svake hladene stranice baterijskog paketa postavio bi se termo vodljivi električni izolator (Chotherm), na koju bi se onda pozicionirao aluminijski hladnjak kroz koji bi se propuštala voda za bi odvođenje topline.

Takav baterijski paket koristeći segmente iz treće iteracije sa tri vodena hladnjaka prikazan je na slici 46.



**Slika 46. Četvrta verzija paketa sa vodenim hlađenjem**

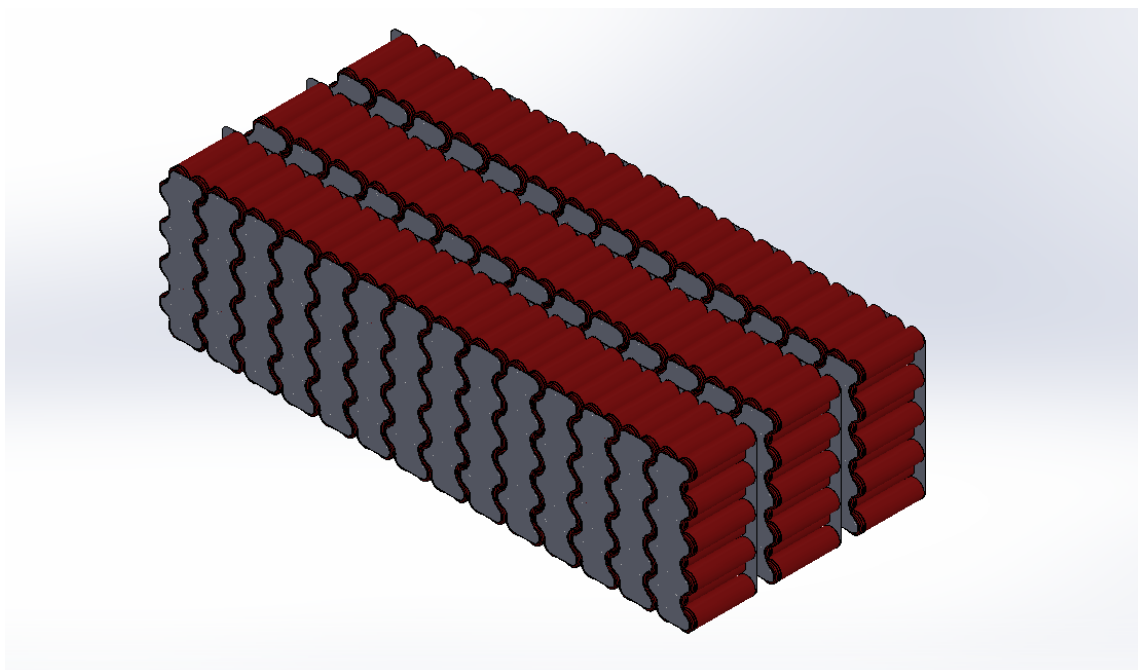
Visina cijelog hladnjaka je 10 mm, a za pretpostavku debljine stijenke od 1 mm, volumen većeg hladnjaka je 1.2 l, a manjeg 0,8 l. Što ukupno daje 4 l, odnosno 4 kg veću masu, ne računajući masu pumpe, cijevi te izmjenjivača topline. Ova opcija također omogućuje pred-hlađenje baterijskog paketa prije trke, što je sa zrakom puno teže za postići.

Postoji opcija i hibridnog hlađenja, gdje bi se koristio samo jedan veliki hladnjak, između gornjeg i donjeg paketa, gdje je najveća dodirna površina (hlađenje sa obje strane). Uz to koristili bi se i ventilatori za zračno hlađenje. U tom slučaju, uštedjelo bi se 2,8 kg u odnosu na prvu verziju. Međutim hlađenje ne bi bilo jednoliko kao u prvom slučaju, što bi moglo dovesti do problema.

### **5.5. Peta verzija paketa**

Do sada sve razmatrano bilo je za slučaj da je os ćelija vertikalna. Zadržavanjem istog segmenta (14s9p) i bakrenih poveznica, složena je konfiguracija baterijskog paketa kod kojeg je os ćelija horizontalna.





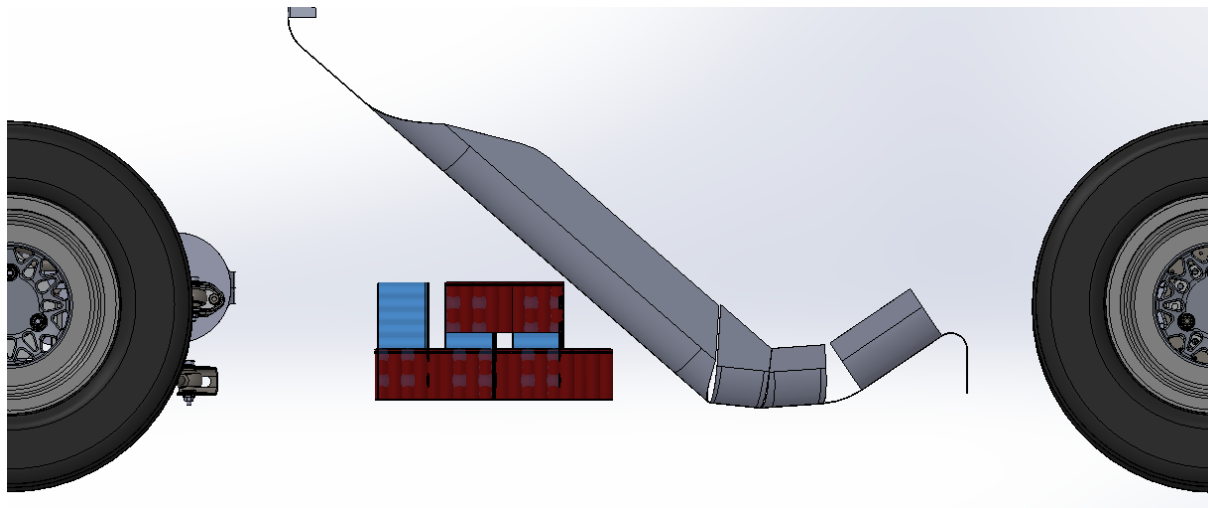
Slika 47. Peta verzija paketa sa horizontalnim osima ćelija

Ovakav baterijski paket ima više težište nego prošli, a i udaljeniji je od vozača.

Tablica 14. Usporedba težišta i inercija segmenata

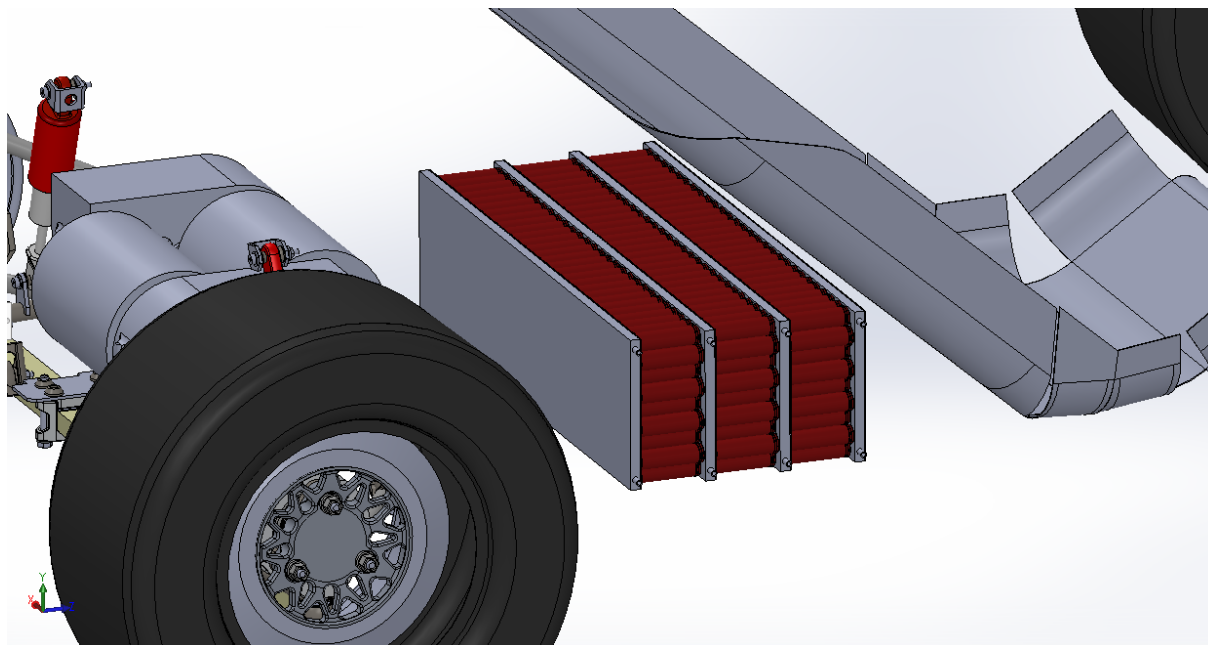
Os ćelija	Težište visina ( relativne koordinate) [mm]	Moment inercije oko vertikalne osi bolida [kg*m <sup>2</sup> ]
Verikalno	60,3	8,0963
Horizontalno	70,1	8,1581

Na slici 48 pokazana je usporedba dvaju paketa:



**Slika 48. Usporedba četvrte i pete verzije paketa**

Potencijalna prednost ovakvog paketa je više prostora za periferne komponente unutar baterijskog paketa između ćelija i sjedala. Isto tako, ova konfiguracija, ukoliko je vodeno hladjena, ima bolju iskoristivost površina koje se hlade, pa tako, za istu površinu ćelija koje se hlade, potrebno je 0,8 l, odnosno 1 kg manje tekućine nego za slučaj gdje su ćelije postavljene vertikalno.

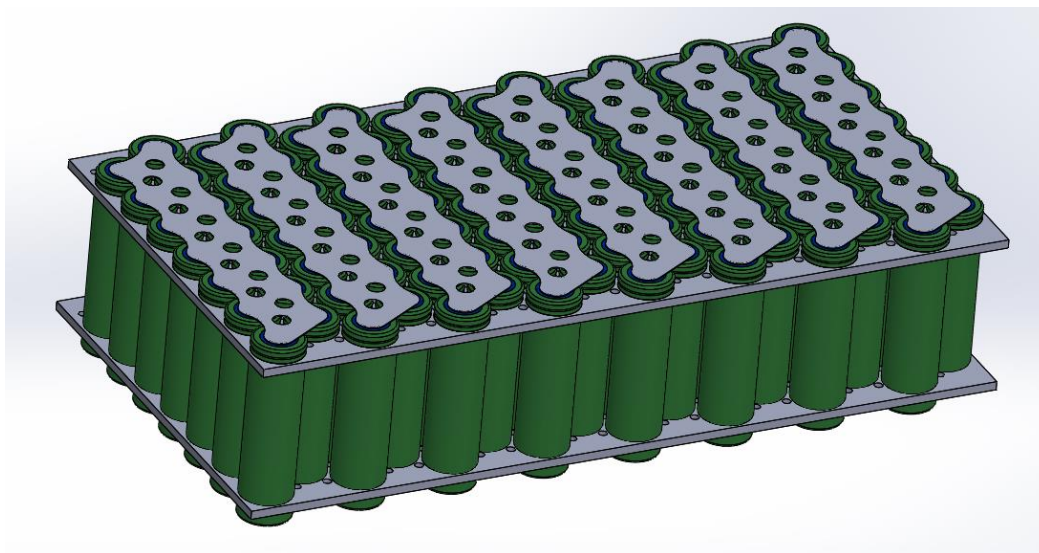


**Slika 49. Peta verzija paketa sa vodenim hlađenjem**

### 5.6. Konačna verzija segmenta

U ovom trenutku saznalo se da je došlo do promjene u nazivnom naponu invertera sa 300V na 350 V, pa je samim time nužno promijeniti baterijski paket, odnosno njegove segmente.

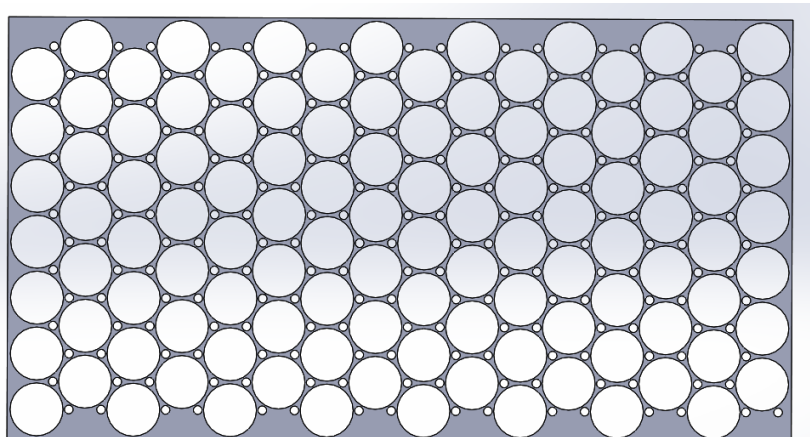
Nova konfiguracija segmenta koji zadovoljava ovaj nazivni napon je 16s 7p – odnosno 16 serijski spojenih ćelija, 7 paralelno te je prikazana na slici 50.



Slika 50. Konačna verzija segmenta

Također, odlučeno je dodati mehanički nosač zbog loše otpornosti zavora na ćelijama na vibracije koje se javljaju prilikom vožnje.

Ovaj segment procijenjen je najboljim, te se odlučilo ići dalje u proračun zagrijavanja za ovakav segment.



Slika 51. Mehanički nosač ćelija

## 6. Zračno hlađenje

Baterijski paket sa VTC6 ćelijama te zračnim hlađenjem ima najmanju masu od svih drugih opcija. Sve druge ćelije imaju veću masu, a vodeno hlađenje je inherentno masivnije od zračnog. Zbog toga, prioritet za testiranje je razviti testni baterijski segment koji je zračno hlađen, te ako se pokaže da se može hladiti zrakom, idemo u daljnji razvoj cijelog paketa sa zračnim hlađenjem. Ako hlađenje zrakom ne bude dostatno, prijeći će se na alternativnu metodu.

Za pretpostavku se uzima da sva toplina koju generira baterijski paket se prenosi na zrak koji struji oko ćelija, može se izračunati potreban protok zraka oko ćelije:

RMS snaga iz ciklusa snage u prvom poglavlju iznosi 21 kW, što na nominalnom naponu od 350 V daje RMS struju od 61 A.

Izmjereni unutarnji otpor VTC6 ćelije na 25 °C te 50% SoC iznosi 16.3 mΩ. Za konfiguraciju od 96s7p, unutarnji otpor paketa računa se na sljedeći način:

$$R_{paket} = R_{ćelije} * \frac{n_{ser}}{n_{par}} = 223,54 \text{ m}\Omega \quad (3)$$

To znači da RMS snaga koja zagrijava ćelije iznosi:

$$P_{zag} = I_{RMS}^2 * R_{paket} = 61^2 * \frac{223,54}{1000} = 831 \text{ W} \quad (4)$$

Radi sigurnosti, uzet ćemo vrijednost od 1200 W. Prosječna temperatura na dan natjecanja u Hockenheimu je 30 °C, te maksimalna dozvoljena temperatura ćelija je 60 °C, a u računu je radi sigurnosti uzeta vrijednost od 40 °C. Možda se čini da su ove vrijednosti preuveličane, ali pravilnikom je propisano da ako bilo koja od svih ćelija dođe do 60 °C, ekipa te bolid su diskvalificirani. A to je nešto što treba izbjeći pod svaku cijenu.

S obzirom da se u baterijskom paketu nalazi 6 segmenata, snaga zagrijavanja jednog segmenta je 6 puta manja nego cijelog paketa, odnosno iznosi 200 W. Postavljanjem prvog zakona termodinamike, maseni protok zraka potreban za hlađenje segmenta iznosi [9].

$$\dot{m} = \frac{P_{zagseg}}{c_p * (T_{izlaz} - T_{ulaz})} = \frac{200}{1000 * (40 - 30)} = 0.02 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (5)$$

Odnosno volumenski protok zraka na srednjoj temperaturi od 35 °C i atmosferskom tlaku

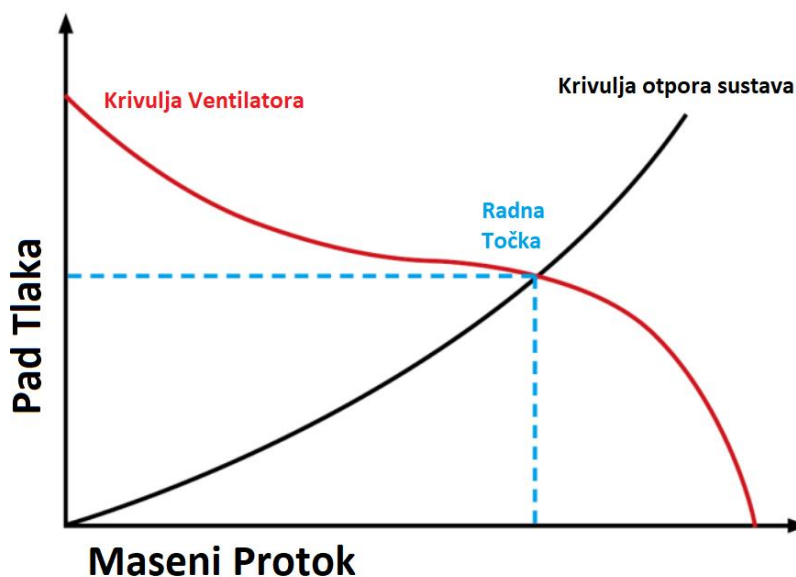
$$q_V = 0.02 * 1.127 = 0.02254 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (6)$$

## 6.1. Otpor strujanju zraka

U sustavu nastrujavanja zraka oko ćelija, ćelije te njihovi nosači te bakrene trake predstavljaju prepreku oko koje zrak mora proći. Zbog ovoga, javlja se otpor strujanju, odnosno razlika u tlaku ispred te iza ćelija. Ovaj pad tlaka nije konstantna vrijednost, već ovisi o protoku kroz ćelije. Ovisnost ove dvije veličine (pad tlaka i volumenski protok) potrebno je simulirati za širi pojas protoka [10].

Simulacije pada tlaka izvršene su korištenjem CFD alata Flow Simulation u programsku okruženju Solidworks. Za testni baterijski segment modelirano je kućište sa dva usisna otvora te dva otvora koja predstavljaju ventilatore. Promjer rupa za ventilatore je  $\varnothing 105$  mm što odgovara ventilatoru veličine 120x120 mm. Razmatrani su ventilatori firme „ebm-papst“, budući da kako oni proizvode ventilatore visokih performansi i učinkovitosti, činili su se kao najbolji izbor.

Ovime smo definirali dio parametara za izbor ventilatora – dva ventilatora po segmentu, te veličinu ventilatora (promjer). Za pravilan izbor ventilatora potrebno je poznavati krivulju pada tlaka u odnosu na maseni protok za sustav – u našem slučaju baterijski segment te krivulju samog ventilatora, odnosno informaciju koji protok može postići za nametnuti pad tlaka. Grafički opis navedenog najbolje je prikazan na slici 52.

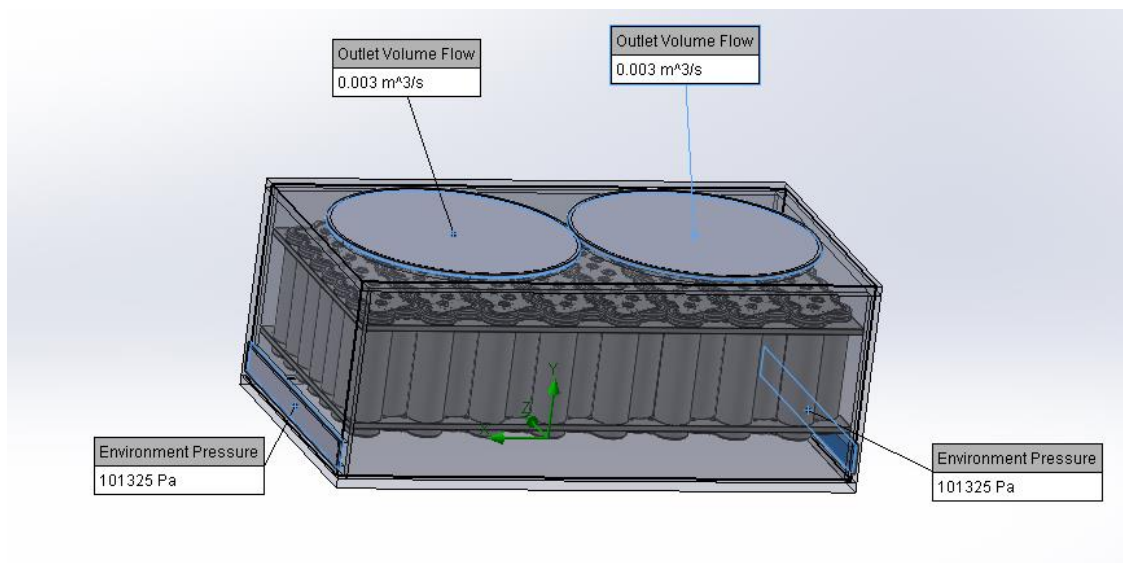


Slika 52. Krivulja ventilatora i sustava

## 6.2. CFD Simulacija segmenta

Kako bismo znali u kojoj radnoj točki će sustav funkcionirati, moramo preklopiti krivulju sustava i krivulju ventilatora kako bismo mogli očitati njihovo sjecište koje definira koji ćemo protok imati za naš sustav.

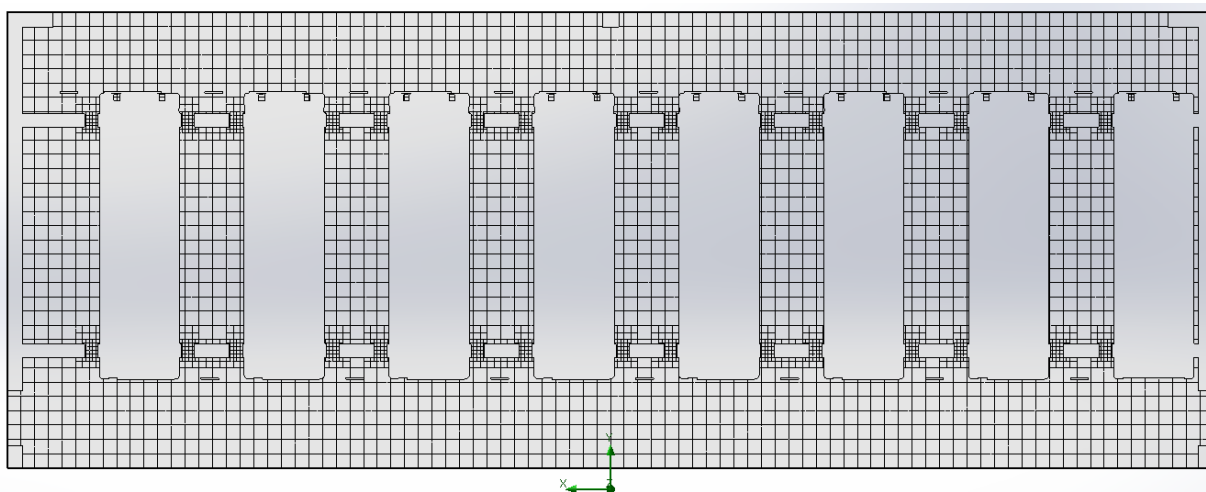
CFD simulacije izvodile su se sa rubnim uvjetima zadanim na 4 mjesta, i to 2 rubna uvjeta koja definiraju atmosferski tlak na ulazima zraka, te dva rubna uvjeta koja definiraju volumenski protok na mjestima gdje su pozicionirani ventilatori.



Slika 53. Prikaz rubnih uvjeta za simulaciju

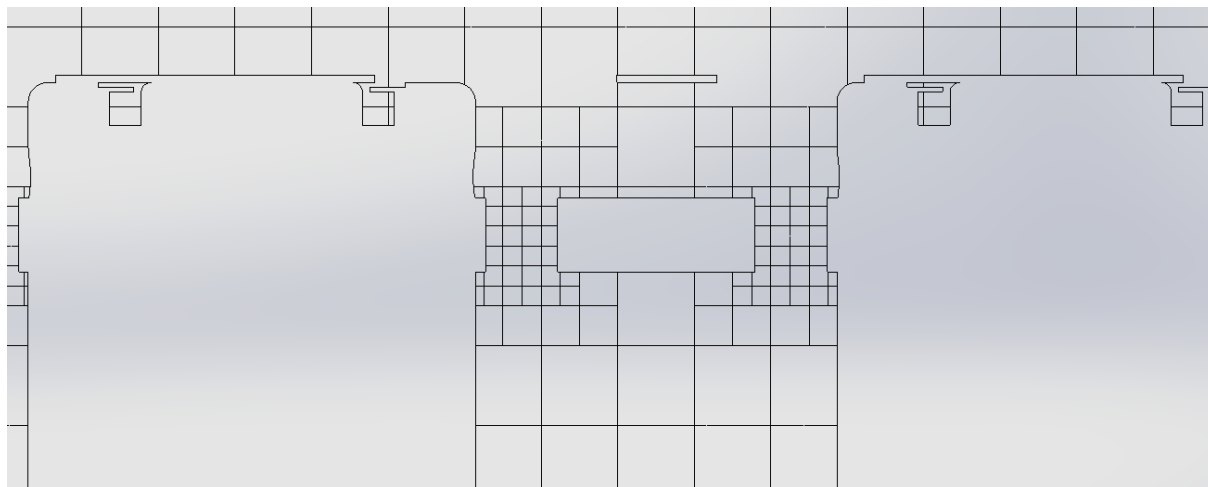
Započelo se sa vrlo malim protocima na kojima se razmatrao pad tlaka, te se postepeno povećavao protok kako bismo dobili krivulju sustava kao na slici 52.

Uvjet pouzdanim rezultatima je dobra mreža. Korištena mreža prikazana je na slici 54.



Slika 54. Prikaz mreže

Mreži je dodatno lokalno povećana gustoća na mjestima velikog gradijenta tlaka, kao što se to vidi na slici 55.



**Slika 55. Detalj mreže**

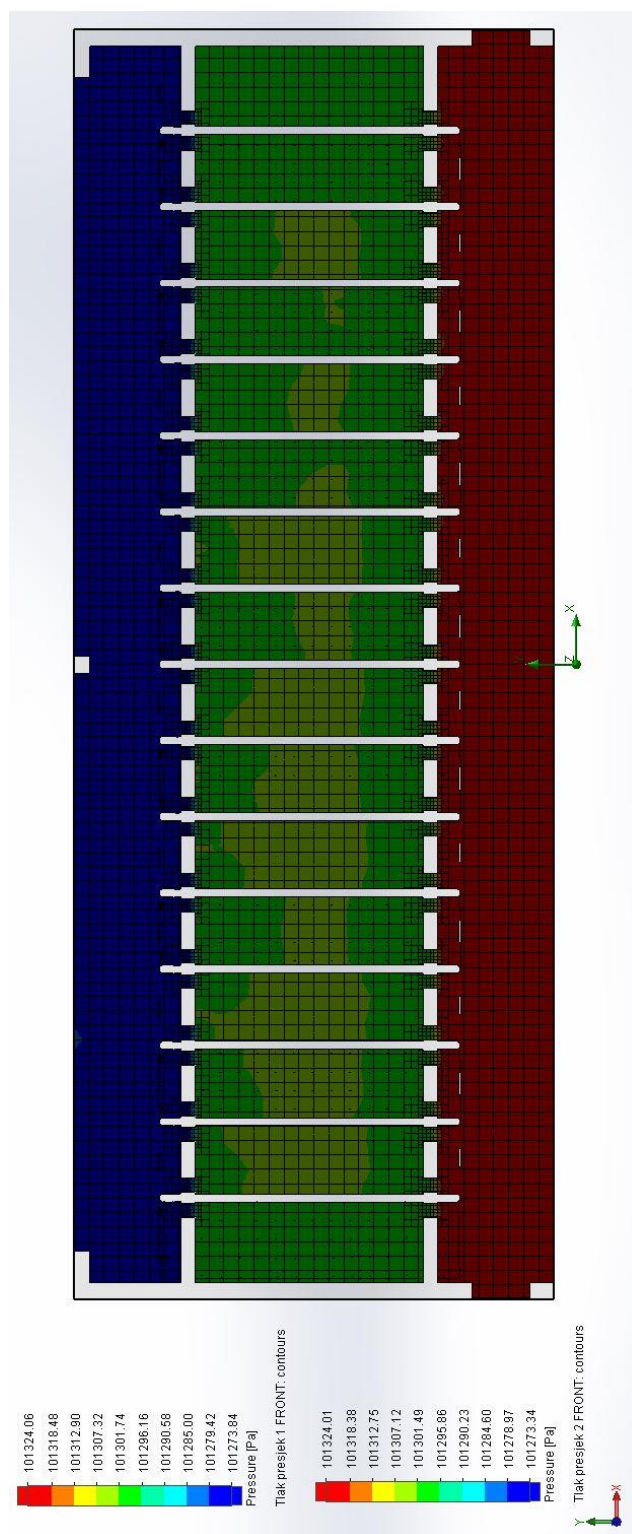
Kao provjera dovoljne gustoće, koristila se još gušća mreža, koja nije bitno utjecala na dobivene rezultate simulacije.

Rezultati simulacije prikazani su u nastavku. Prikazani su tlakovi i brzine a kontrola da su rezultati mjerodavni, prikazana je raspodjela tlaka iz tlocrta u 3 presjeka: iznad ćelija, na polovici visine ćelija, te ispod ćelija.

### 6.3. Rezultati simulacije

Zadani protok:  $0.006 \frac{m^3}{s}$

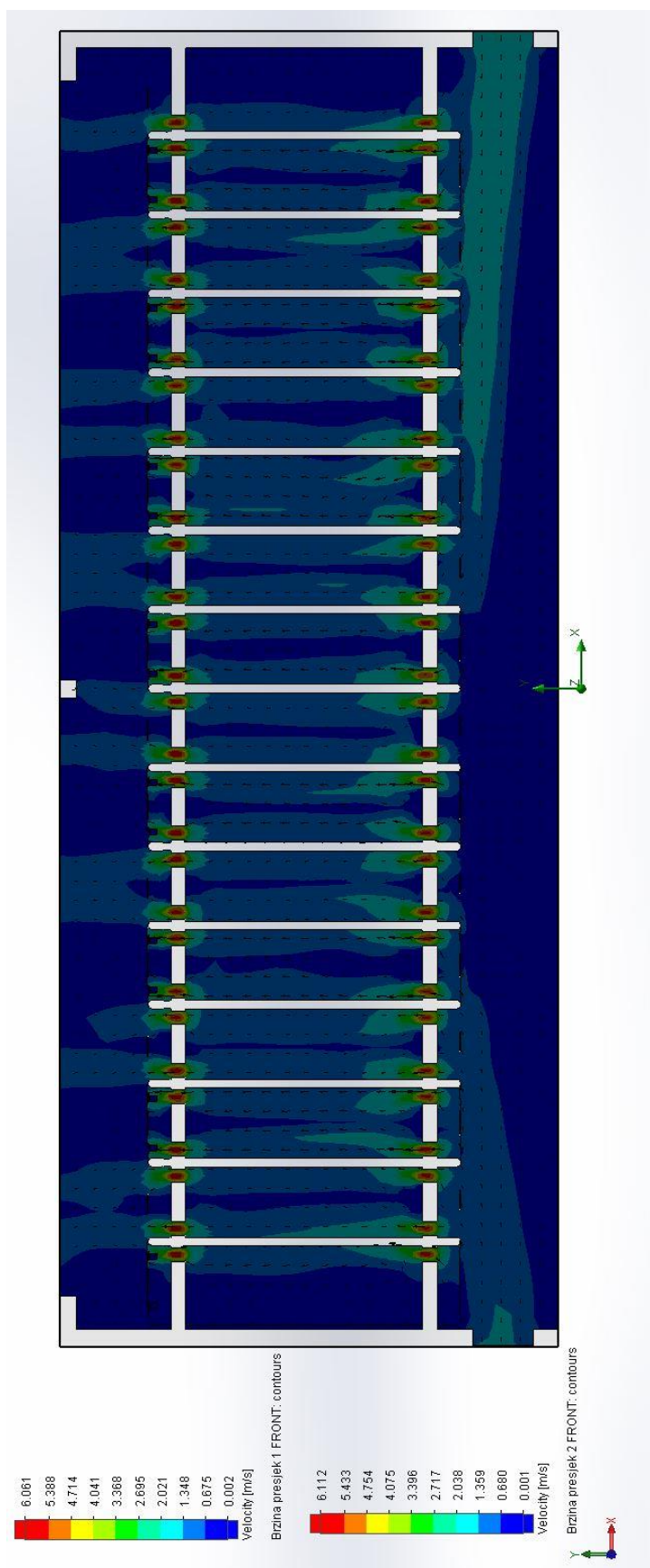
Nacrt - Tlakovi:



Slika 56. Rezultati – Tlakovi 1

Nacrt - Brzine:

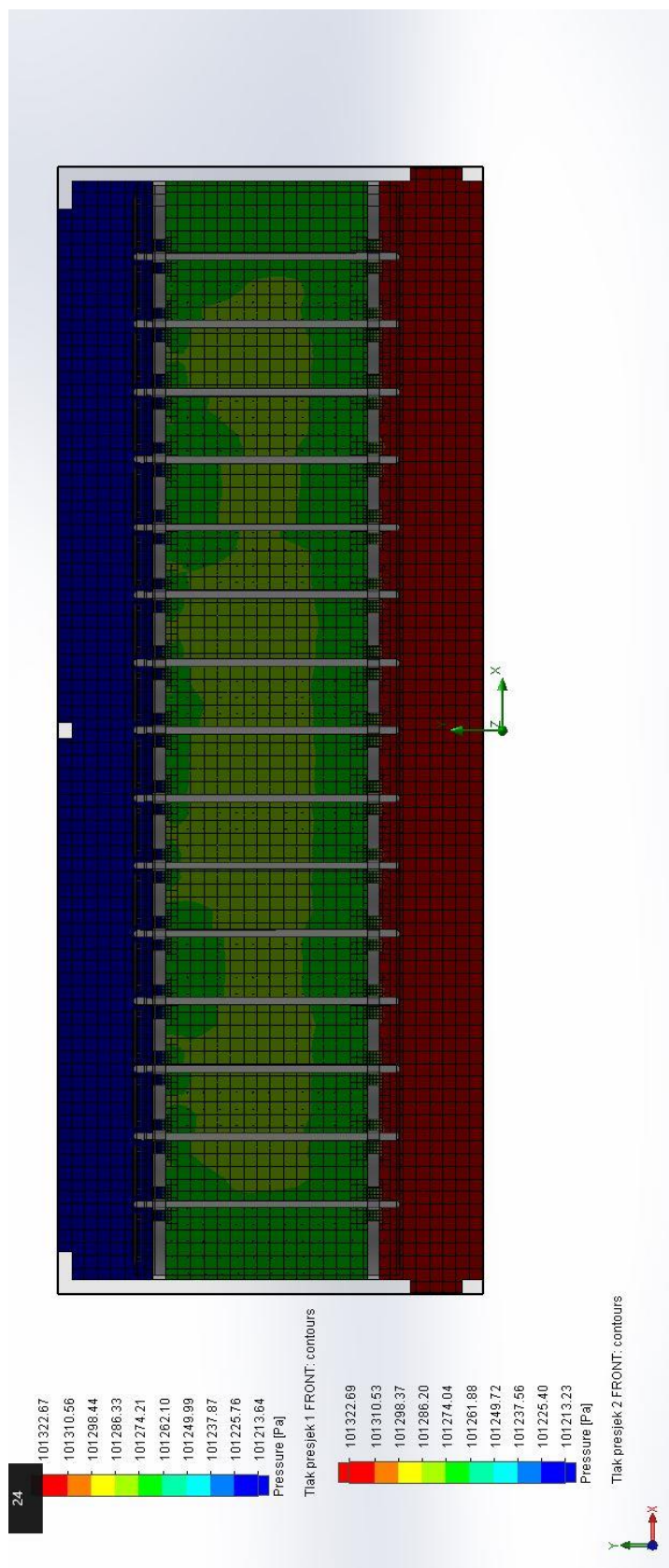




Slika 57. Rezultati – Brzine 1

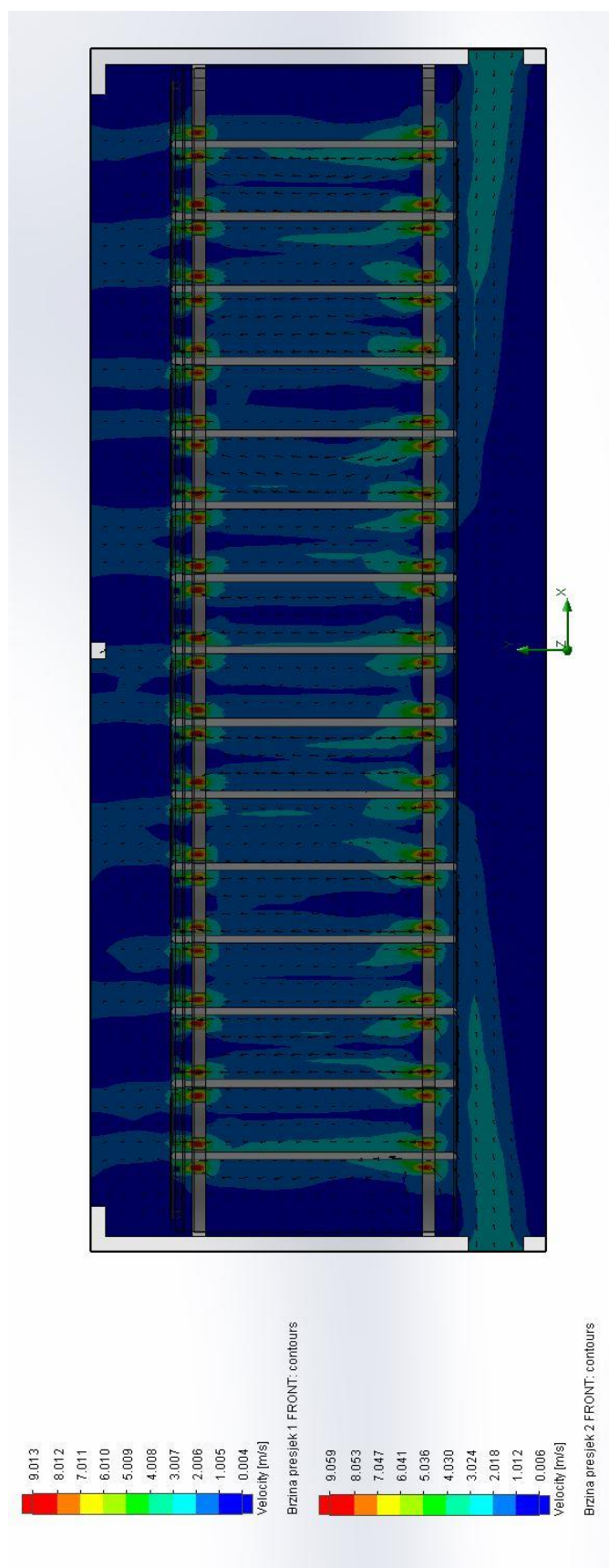
Zadani protok:  $0.009 \frac{m^3}{s}$

Nacrt – Tlakovi



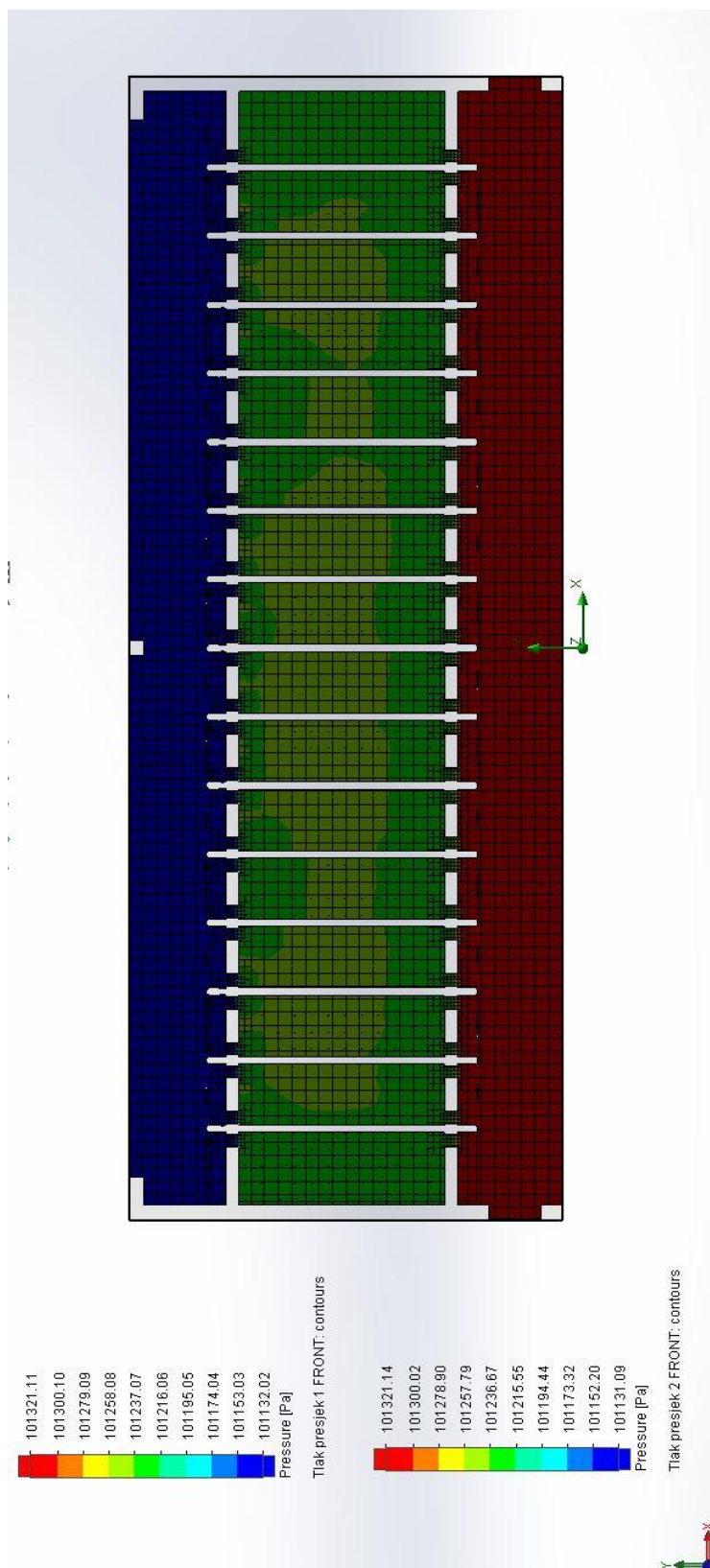
Slika 58. Rezultati – Tlakovi 2

## Nacrt – brzine



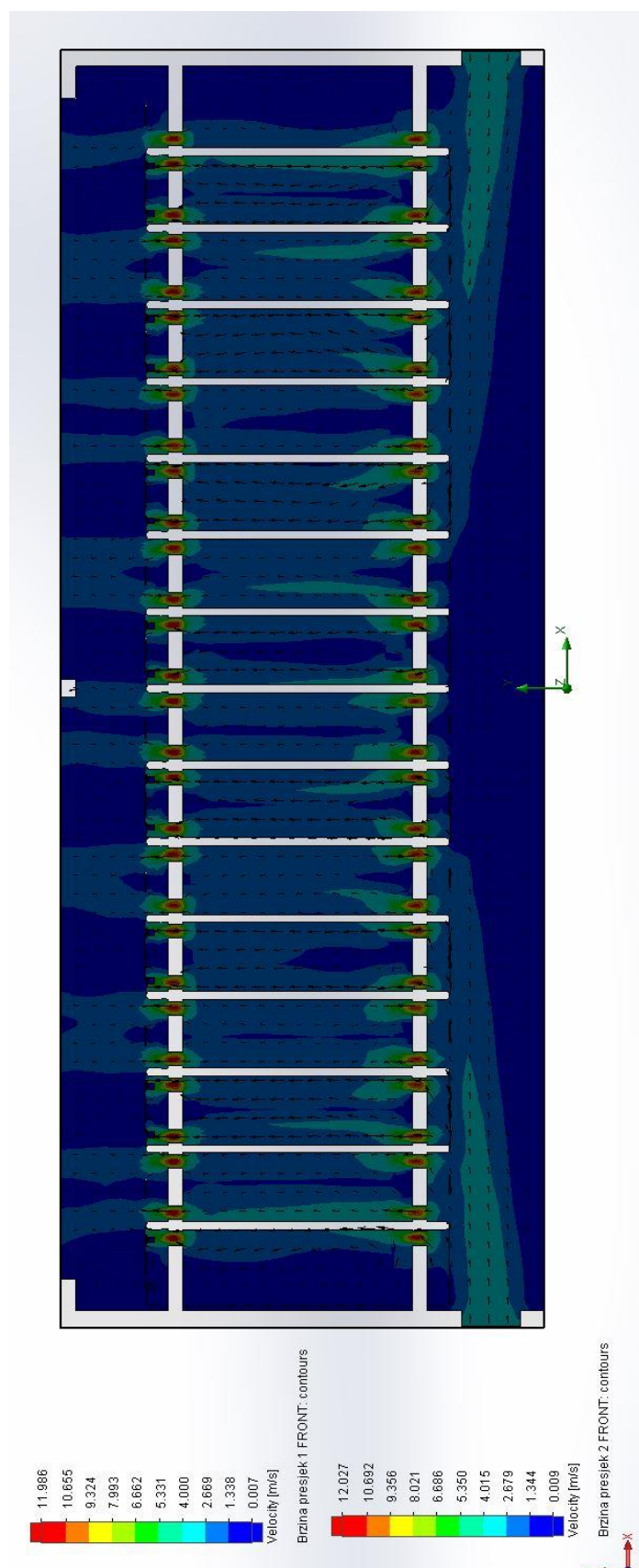
Slika 59. Rezultati – Brzine 2

Zadani protok:  $0.012 \frac{m^3}{s}$   
Nacrt – tlakovi



Slika 60. Rezultati – Tlakovi 3

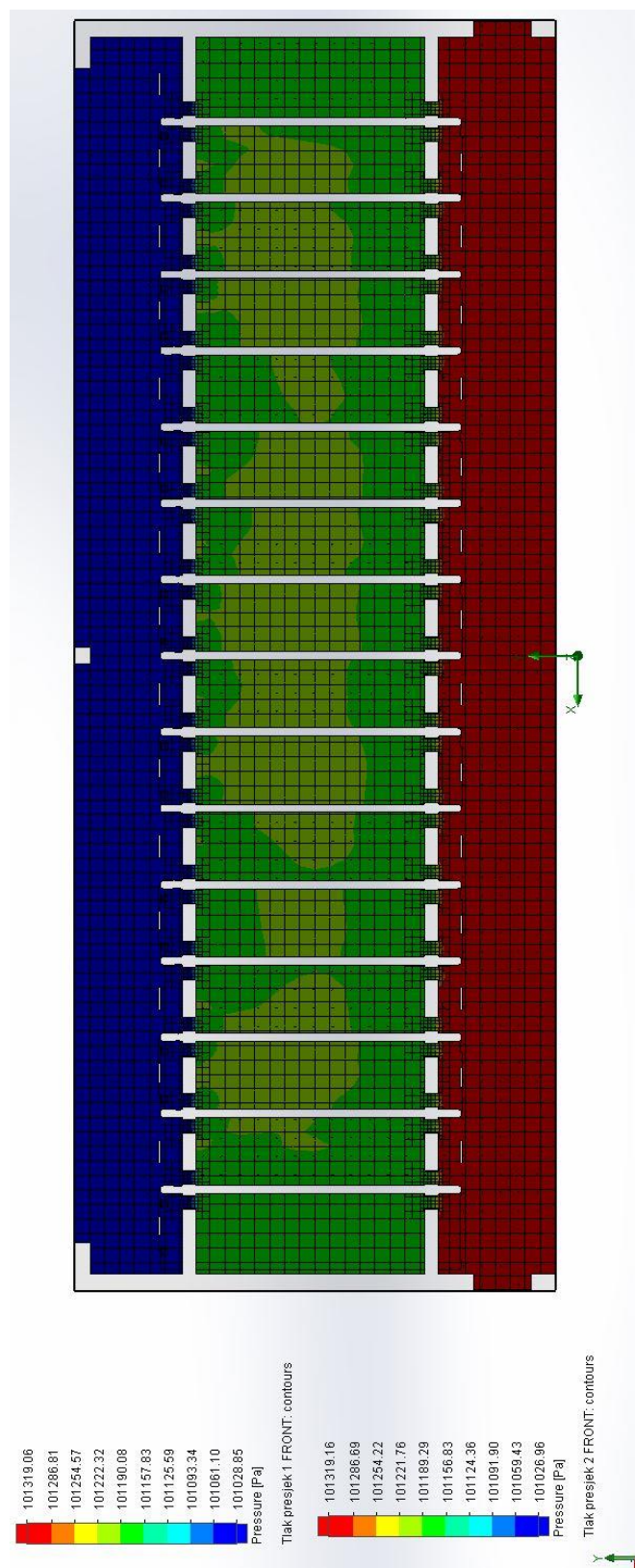
## Nacrt – brzine



Slika 61. Rezultati – Brzine 3

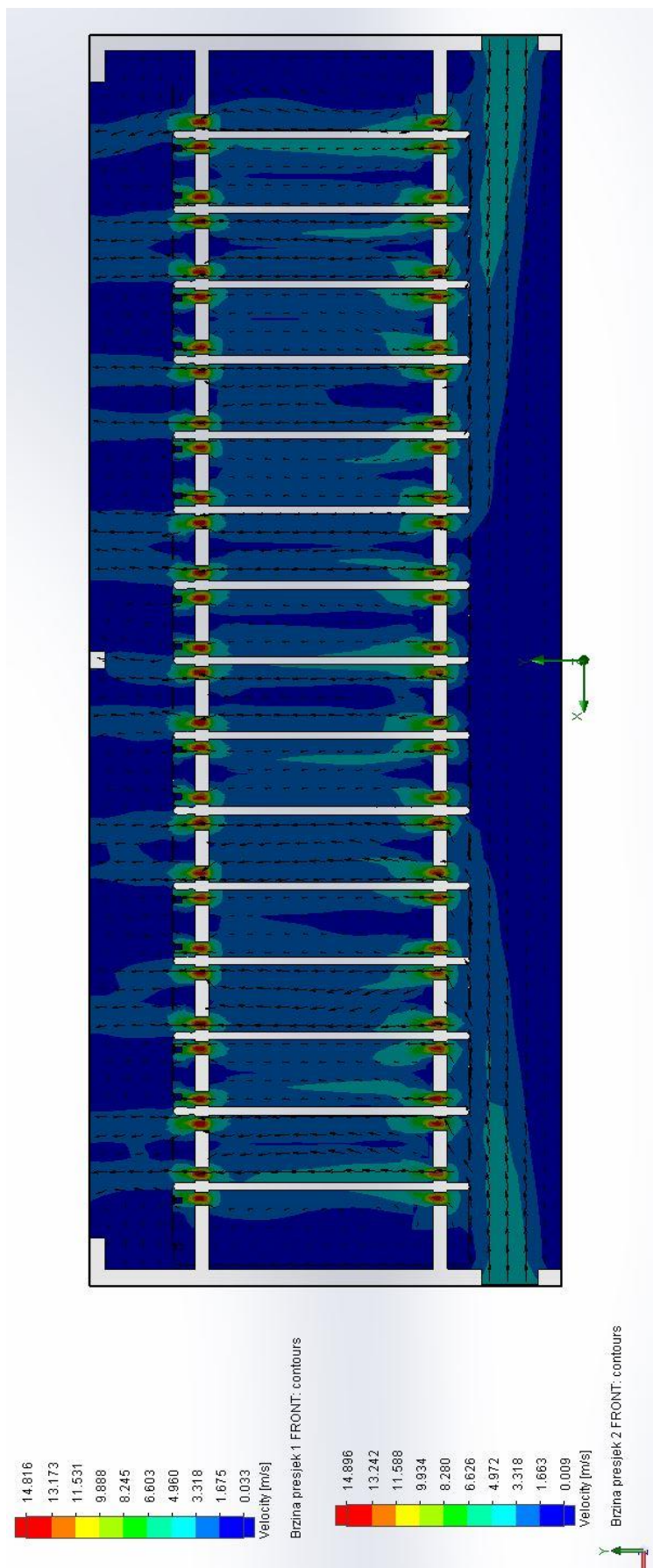
Zadani protok:  $0.015 \frac{m^3}{s}$

Nacrt – tlakovi



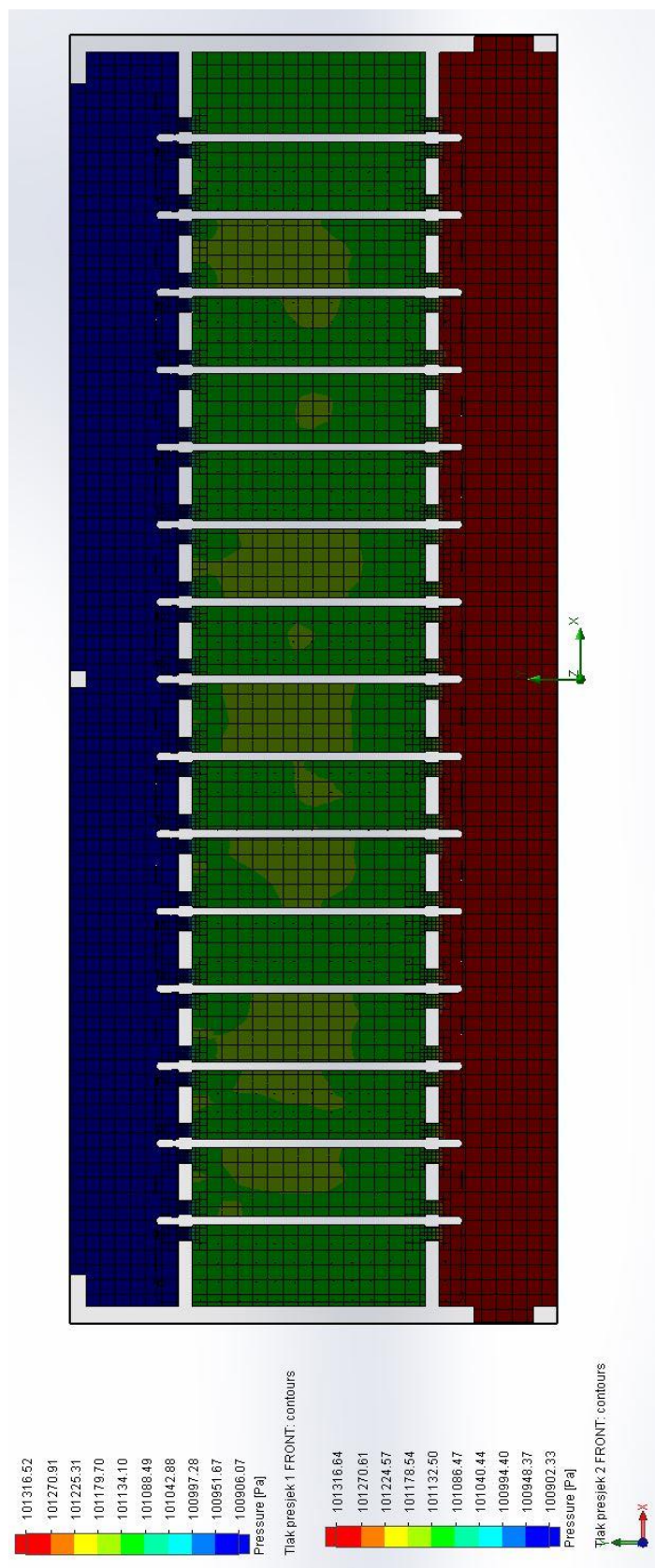
Slika 62. Rezultati – Tlakovi 4

Nacrt – brzine



Slika 63. Rezultati – Brzine 4

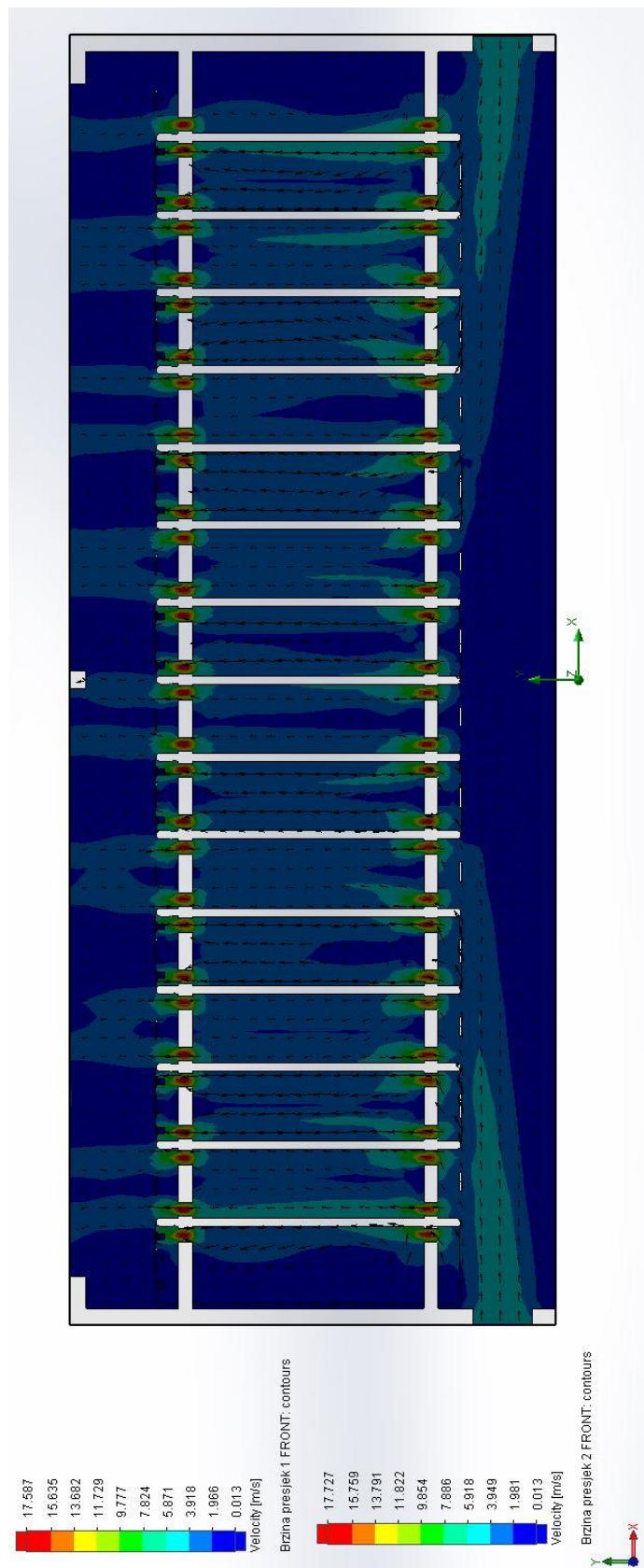
Zadani protok:  $0.018 \frac{m^3}{s}$   
Nacrt – tlakovi



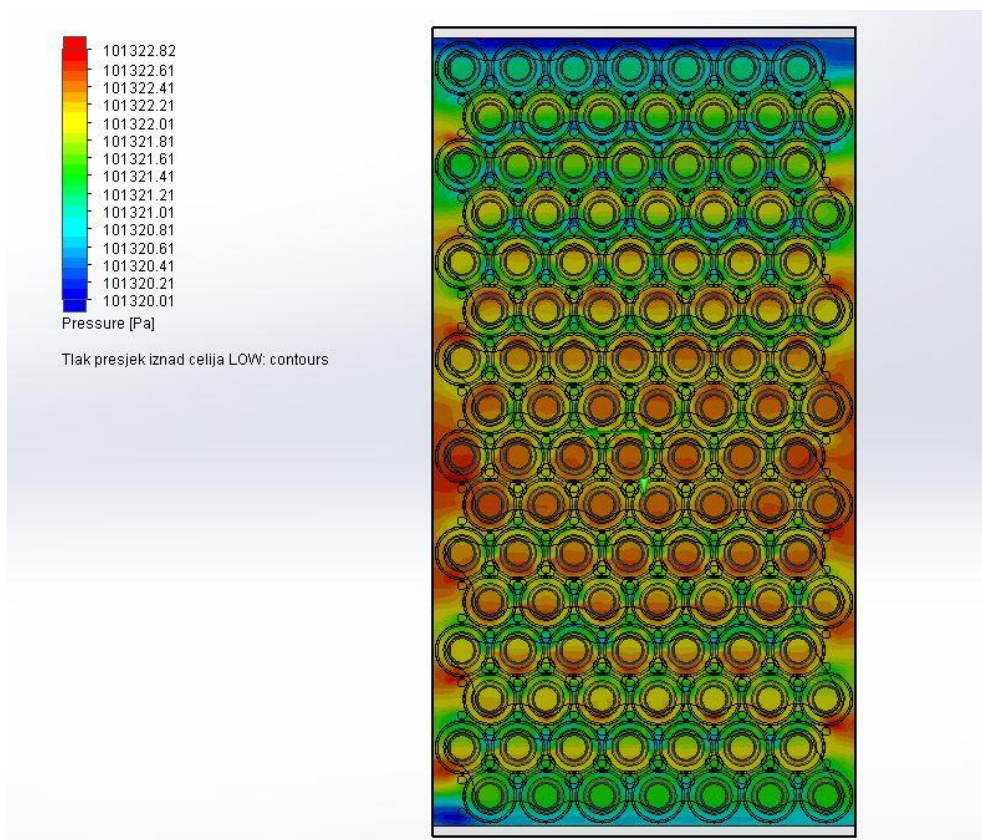
Slika 64. Rezultati – Tlakovi 5



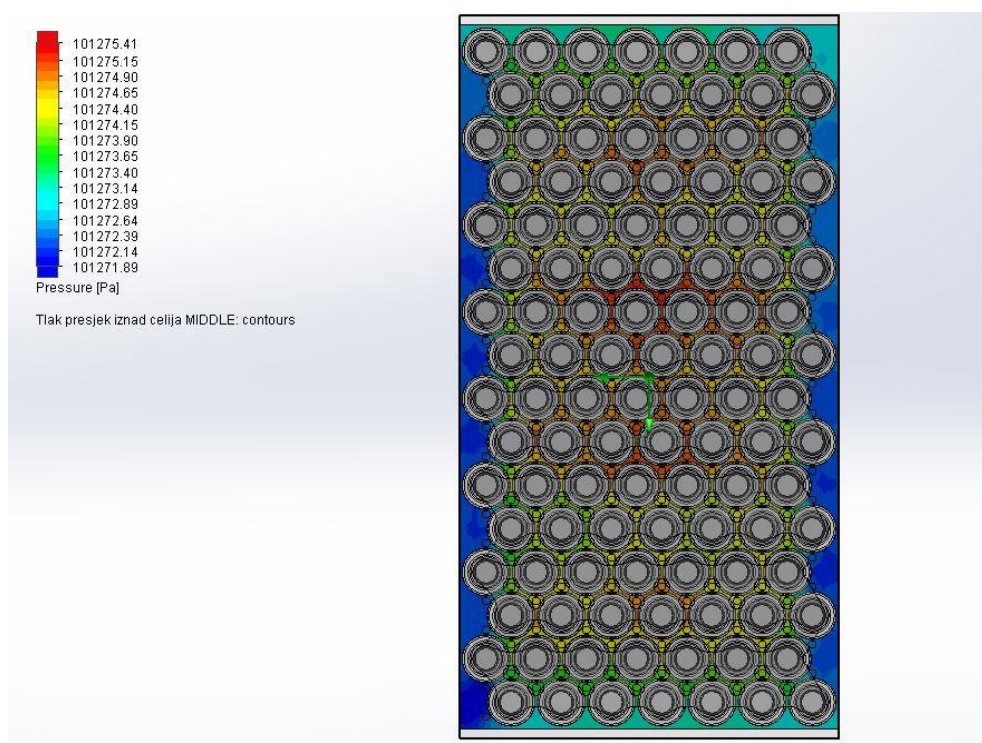
Nacrt – brzine



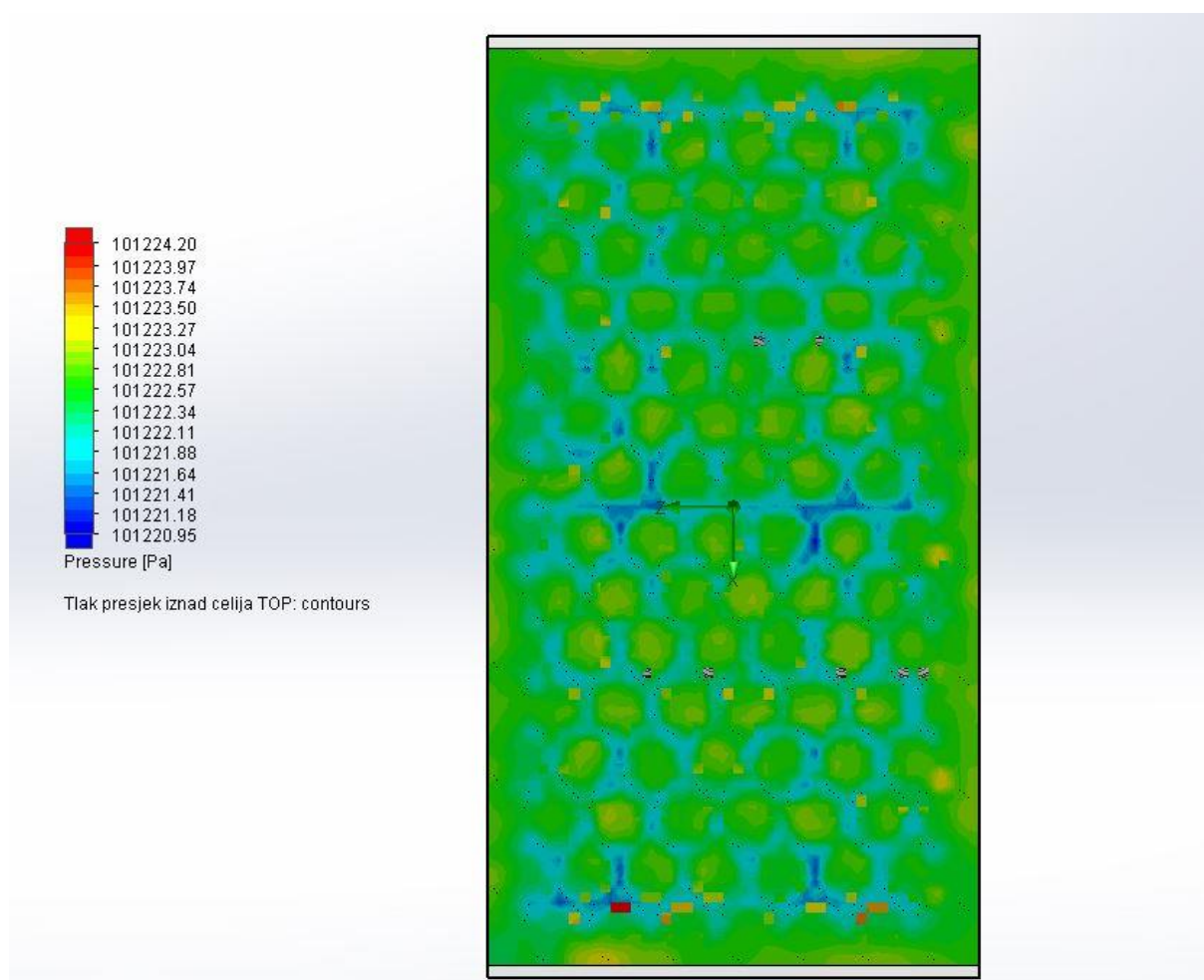
Slika 65. Rezultati – Brzine 5



Slika 66. Tlocrt – tlak - presjek ispod ćelija



Slika 67. Tlocrt – tlak - presjek na sredini ćelija



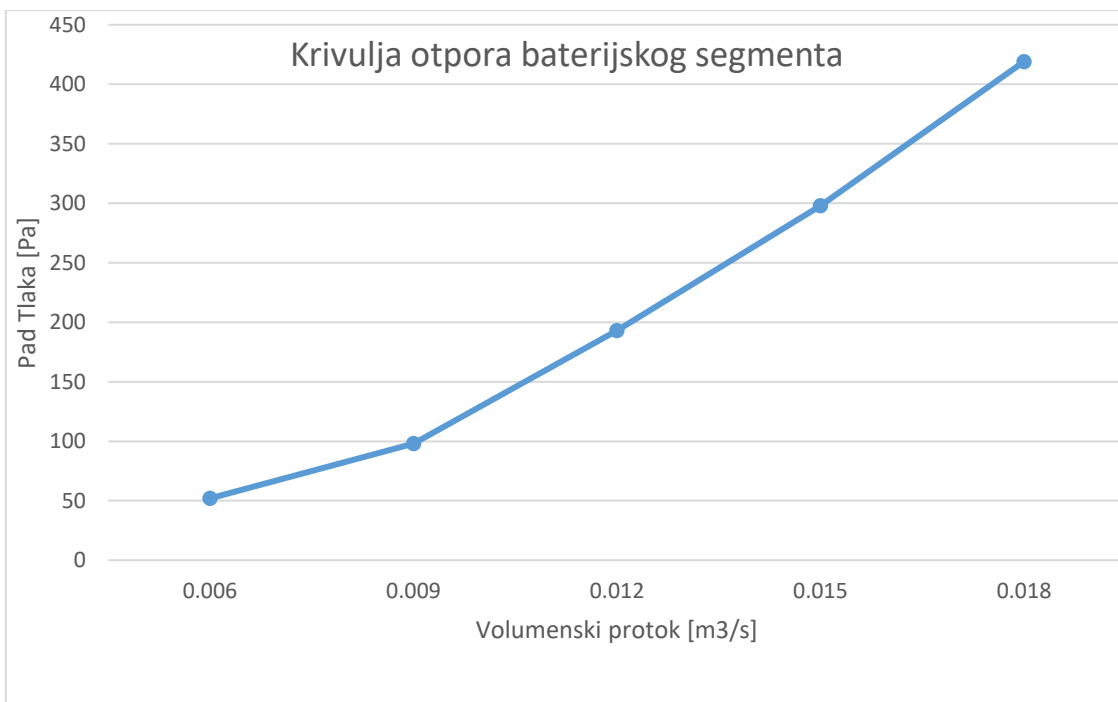
Slika 68. Tlocrt - tlak – presjek iznad ćelija

Iz zadnje tri slike vidi se da je tlak ravnomjerno raspoređen po kompletnoj površini baterijskog paketa, te se zbog toga promatrani presjeci mogu pouzdano koristiti kao pretpostavka tlakova i brzina za cijeli baterijski paket.

Također, ako pad tlaka vs. protok pokažemo tablično i grafički, to izgleda ovako:

Tablica 15. Tablica otpora baterijskog segmenta

Protok [m <sup>3</sup> /s]	Tlak1 [Pa]	Tlak2 [Pa]	Pad tlaka [Pa]
<b>0.006</b>	101325	101273	52
<b>0.009</b>	101325	101227	98
<b>0.012</b>	101325	101132	193
<b>0.015</b>	101325	101027	298
<b>0.018</b>	101325	100906	419

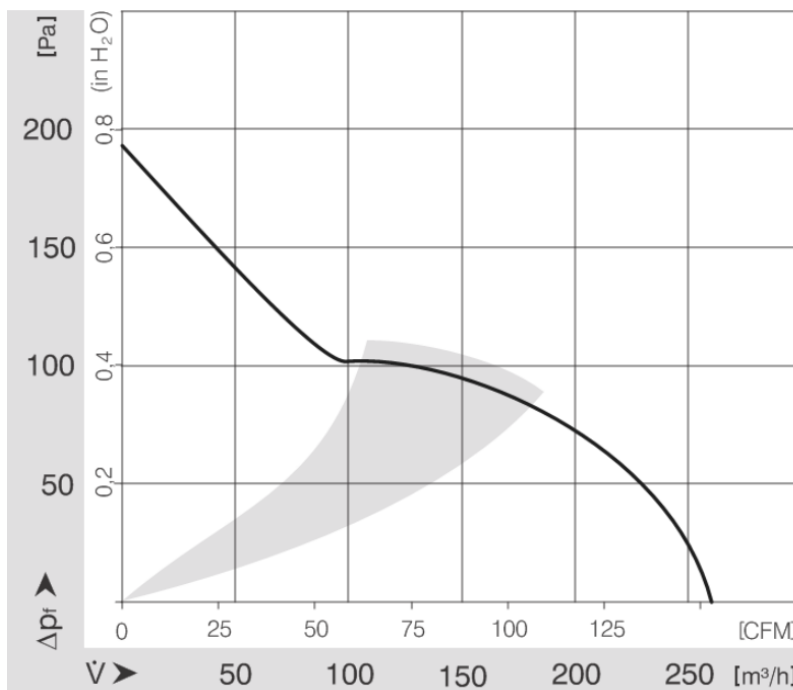


Slika 69. Krivulja otpora baterijskog segmenta

#### 6.4. Izbor ventilatora

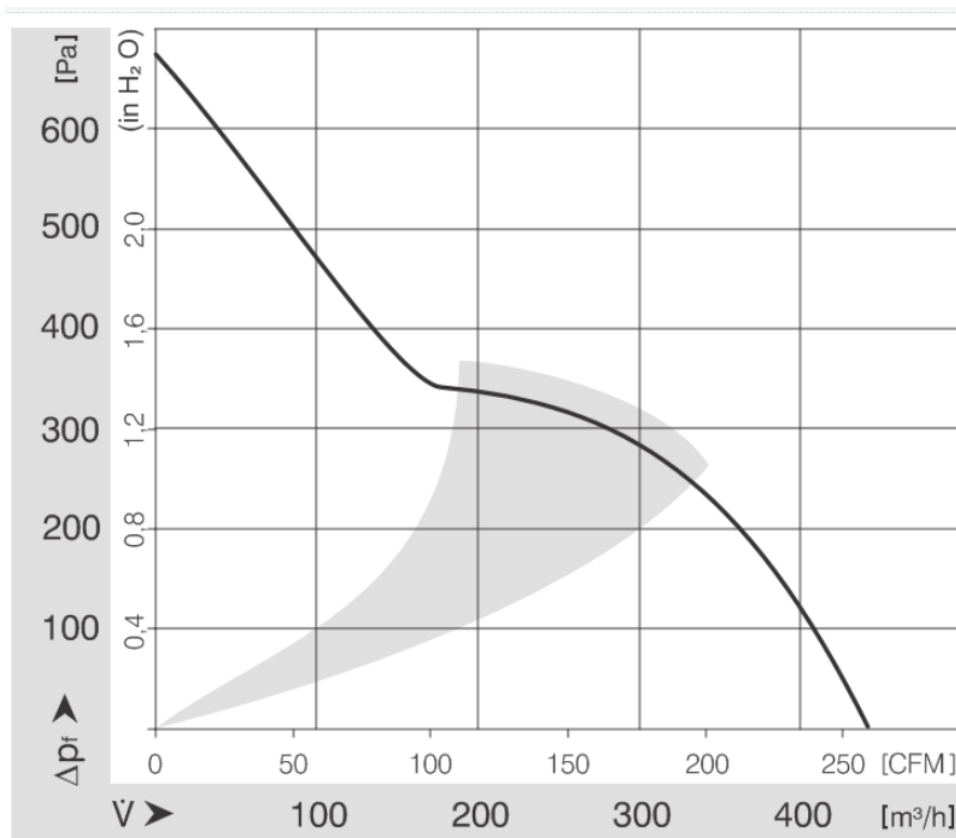
U ovom trenutku nije više imalo smisla ići sa daljnjim simulacijama. Izračunati ciljani protok od  $0.02254 \frac{m^3}{s}$  nije se još postigao, a pad tlaka veći je od 400 Pa.

Pogledom na ventilator „4112 NHH“ [11], čija krivulja ima sjedeći izgled:



Slika 70. Krivulja 4112 NHH ventilatora

Vidi se da za potrebnih  $0.02254 \frac{m^3}{s}$ , što odgovara  $81 \frac{m^3}{h}$ , pad tlaka koji ventilator može postići je 100 Pa što je 4 puta manje nego nama potrebnih 400 Pa. Samim time, dolazimo do zaključka da su ćelije preblizu za ovakvo hlađenje, te bi se morao koristiti vrlo ne-efikasan ventilator s velikom potrošnjom snage kako bi se dobio zadovoljavajući protok. Za primjer uzmimo „4118 NH6“ ventilator koji ima sljedeću karakteristiku.



Slika 71. Krivulja 4118 NH6 ventilatora

Vidi se da ovaj ventilator, za  $81 \frac{m^3}{h}$  može stvoriti više od 400 Pa razlike tlaka, te bi bio adekvatan. Međutim, gledajući kako ovaj ventilator ima snagu od 60 W, a nama je potrebno 12 komada, odnosno 2 po segmentu za ukupno 6 segmenata. To znači potrošnju snage od 720W, što je jako puno snage samo za rashlađivanje sustava.

Gledajući trajanje utrke od pola sata, energija koju bi ventilatori potrošili iznosi:

$$E_{vent} = P_{vent} * n_{vent} * t_{utrke} = 60 * 12 * 0,5 = 360 Wh \quad (7)$$

U prijašnjem poglavlju dobivena energija baterije iznosi 6,8 kWh. Ako bi stavili te dvije energije u omjer:

$$p_{en} = \frac{E_{vent}}{E_{bat}} = \frac{360}{6800} * 100 = 5,3 \% \quad (8)$$

Vidi se da bi ventilatori potrošili preko 5% energije od ukupnog baterijskog paketa, što je neprihvatljivo.

Dakle, zaključak je taj da iako je ova opcija tehnički moguća, te bi se ćelije mogle hladiti, nije opravdano da ventilatori koriste preko 5% energije, te se zato odlučilo tražiti drugo rješenje, koje ne iziskuje veliki utrošak energije za hlađenje.

## 7. Hlađenje potapanjem ćelija

Iako je ranije razmatrana mogućnost vodenog hlađenja pomoću hladnjaka, takav sustav sa svim svojim periferijama – pumpa, cijevi, filteri ima vrlo veliku masu, a i značajnu potrošnju energije.

Sustav potapanja ćelija je osmišljen tako da se ćelije „potope“ u tekućinu. Na taj način tekućina prenosi toplinu na sebe, odnosno služi kao toplinski spremnik. Tekućina mora biti nezapaljiva, neotrovnost, nevodljiva, ne smije uzrokovati korodiranje komponenti, te mora imati veliki specifični toplinski kapacitet kako bi preuzela što više topline. Također, cilj je da vrelište tekućine bude niže od maksimalne temperature do koje ćelija smije doći. Na taj način iskorištavamo i područje promjene faze iz tekućine u plin kao toplinski spremnik. Razlog tome je taj što se promjenom faze ne mijenja temperatura fluida. Ovakav sustav hlađenja je skuplji i kompleksniji u usporedbi sa zračnim hlađenjem, ali je znatno efikasniji u nekim drugim područjima. Negativne strane su to što je baterijski paket sklon curenju i veće su cijene instalacije i održavanja.

### 7.1.1. Dostupni fluidi

Pretraživanjem dostupnih proizvoda je nađeno nekoliko rješenja od firme Solvay i 3M.

Solvay ima liniju inertnih fluida visokih preformansi pod imenom Galden koji služe za prijenos topline i ostale high-tech aplikacije u elektronici. Od svih dostupnih, za naš slučaj je primjenjiv jedino Galden HT55. Od dostupnih podataka, najbitniji su sljedeći [12]:



**Tablica 16. Karakteristike Galdena HT55**

Galden HT55		
Temperatura isparavanja	[°C]	55
Specifični toplinski kapacitet	[J/(kgK)]	963
Gustoća	[kg/m <sup>3</sup> ]	1650
Toplina isparavanja	[kJ/kg]	92.1

Tvrtka 3M nudi dvije linije proizvoda. To su 3M Novec Engineered Fluids, od kojih su za naš slučaj primjenjivi sljedeći [13]:



**Tablica 17. Karakteristike Novec 7000**

<b>Novec 7000</b>		
Temperatura isparavanja	[°C]	34
Specifični toplinski kapacitet	[J/(kgK)]	1300
Gustoća	[kg/m <sup>3</sup> ]	1400
Toplina isparavanja	[kJ/kg]	142

**Tablica 18. Karakteristike Novec 7100**

<b>Novec 7100</b>		
Temperatura isparavanja	[°C]	61
Specifični toplinski kapacitet	[J/(kgK)]	1183
Gustoća	[kg/m <sup>3</sup> ]	1510
Toplina isparavanja	[kJ/kg]	112

Druga linija proizvoda je 3M Fluorinert Electronic Liquid, a za naš slučaj su primjenjivi sljedeći:

**Tablica 19. Karakteristike FC-3284**

<b>FC-3284</b>		
Temperatura isparavanja	[°C]	50
Specifični toplinski kapacitet	[J/(kgK)]	1100
Gustoća	[kg/m <sup>3</sup> ]	1710
Toplina isparavanja	[kJ/kg]	105



Tablica 20. Karakteristike FC-72

FC-72		
Temperatura isparavanja	[°C]	56
Specifični toplinski kapacitet	[J/(kgK)]	1100
Gustoća	[kg/m <sup>3</sup> ]	1680
Toplina isparavanja	[kJ/kg]	55

### 7.1.2. Odabir fluida

Kod odabira proizvoda cijena je jedna od ključnih značajki, ali pošto cijena nije dostupna bez kontaktiranja firmi, proračun će se bazirati čisto na kvaliteti, tj. na tome koliko je određeni fluid pogodan za našu primjenu.

Samo analiziranje podataka nije dovoljno, potrebni su i određeni podaci sa simulacija. Glavni kriterij za odabir će biti potrebna masa tekućine.

Zbog podizanja unutarnje energije baterije povećava se njena temperatura, a zbog razlike temperature između fluida i baterije dolazi do prijenosa topline s baterije na fluid. U proračunu će se zbog velikog prijelaza topline i “bućkanja” pretpostaviti da je temperatura baterija jednaka temperaturi fluida.

Termička jednadžba sustava onda glasi:

$$P_z \cdot dt = (m_f \cdot c_f + m_b \cdot c_b + m_k \cdot c_k) \cdot d\vartheta \quad (9)$$

Gdje se indeks f odnosi na fluid, indeks b na bateriju, a indeks k na kućište. Pošto su nam podaci o kućištu nepoznati, njih ćemo zanemariti. Tim pojednostavljenjem smo još uvijek na sigurnoj strani.

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{P_z}{(m_f \cdot c_f + m_b \cdot c_b)} \quad (10)$$

Integracijom se dobiva:

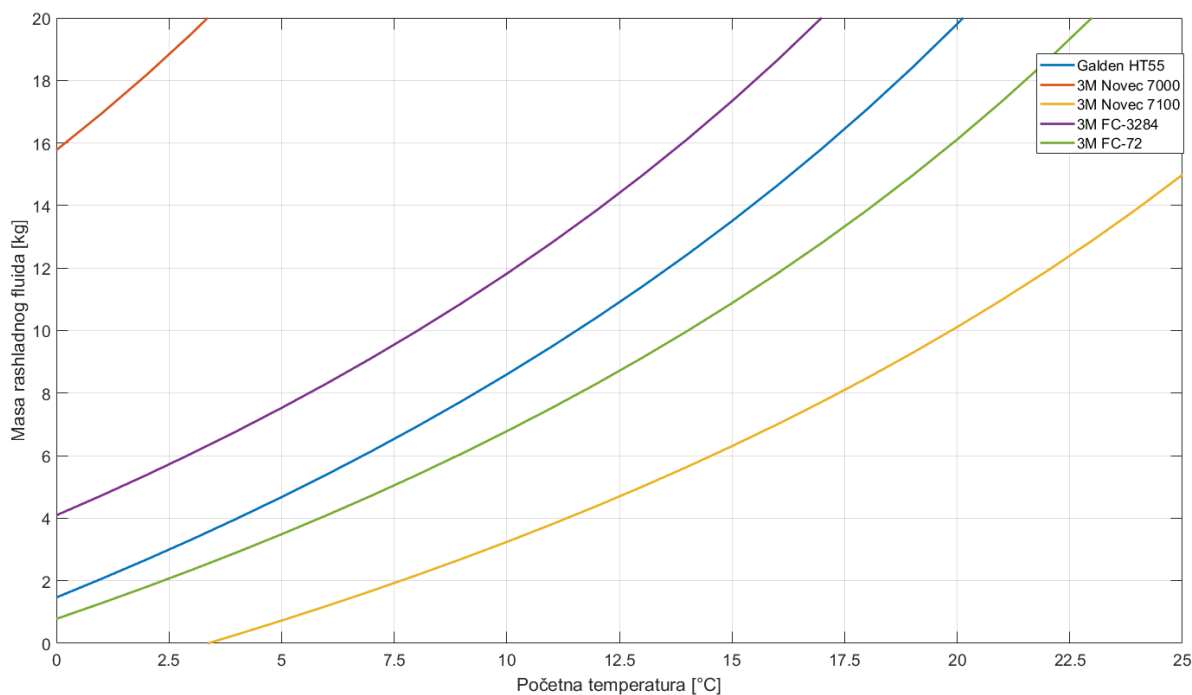
$$\vartheta = \frac{1}{(m_f \cdot c_f + m_b \cdot c_b)} \cdot \int P_z(t) \cdot dt + \vartheta_0 \quad (11)$$

Izlučivanjem mase fluida dobivamo:

$$m_f = \frac{\int P_z(t) \cdot dt}{c_f(\vartheta - \vartheta_0)} - m_b \cdot \frac{c_b}{c_f} \quad (12)$$

Koristeći simulaciju iz CarMakera prikazanu u trećem poglavlju, pokazalo se da toplina koju generira baterijski paket iznosi oko 1.7 MJ. Ukupno imamo 672 ćelije, od kojih svaka ima 48 g, tako da je ukupna masa ćelija 32,5 kg. Specifični toplinski tok ćelija prema [14] iznosi  $830 \frac{J}{kgK}$ .

Masa aluminijskog kućišta koje sudjeluje u izmjeni topline je oko 3 kg, te njegov specifični toplinski tok iznosi  $910 \frac{J}{kgK}$ . Graf pokazuje koliko je rashladne tekućine potrebno u ovisnosti o njihovoj početnoj temperaturi ako uopće ne dolazi do isparavanja.



**Slika 72. Masa rashladnih tekućina – bez isparavanja**

Međutim ovaj graf treba gledati s oprezom. Kada bi razina količina fluida bila premalena, moglo bi se dogoditi da neki dijelovi baterije nisu u nikakvom kontaktu s fluidom, a samim time ne bi dolazimo do prijenosa topline, što znači da bi lokalno neke ćelije mogle prekoračiti najveću dopuštenu temperaturu od 60 °C. Treba razmatrati područje iznad 3 kg fluida.

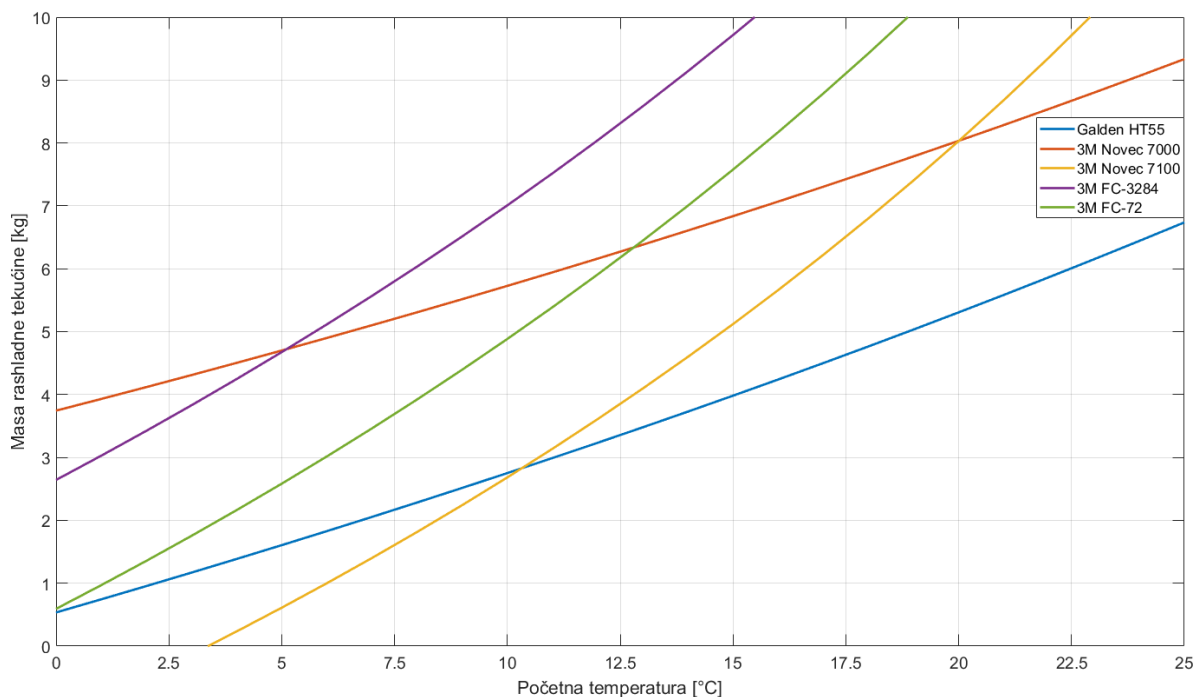
Isto tako vidi se kada ne bismo uopće hladili fluid, odnosno kada bi početna temperatura bila 20 stupnjeva, bile bi nam potrebne ogromne količine fluida, što nas navodi na zaključak da je hlađenje fluida obavezno ako ne dolazi do isparavanja.

Međutim, kada bi dolazilo do isparavanja, stvari bi izgledale bitno drukčije, zato što kroz isparavanje možemo prenijeti vrlo veliku toplinu.

Jednadžba mase mijenja se tako da se u obzir uzima postotak isparavanja na kraju trke  $x$ , a koeficijent alfa opisuje koliko energije po isparenom kilogramu tekućine se prenese.

$$m_f = \frac{\int P_z(t) \cdot dt - \Delta U_b - \Delta U_h}{x \cdot \alpha + c_f \cdot \Delta T} \quad (13)$$

Ako sada iscrtamo graf za različite fluide sa različitim početnim temperaturama te za vrijednost  $x=1$ , odnosno slučaj gdje sav fluid ispari do kraja trke dobivamo:



**Slika 73. Masa rashladnih tekućina – potpuno isparavanje**

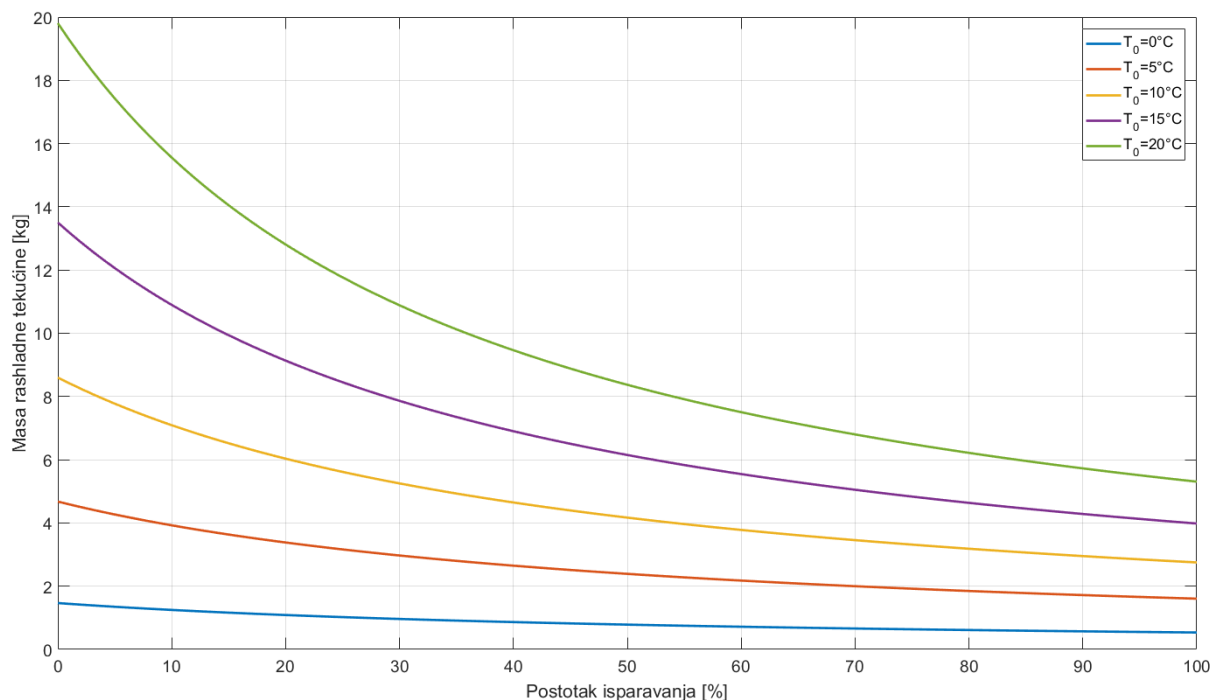
Vidimo da su za ovaj slučaj, kao što je i očekivano, količine fluida mnogo manje. Kako bismo se odlučili za konačni fluid, idemo procesom eliminacije. Na prvu može se pomisliti kako je Novec 7100 najbolji izbor, međutim njegova „osjetljivost“, odnosno veliki gradijent u odnosu na početnu temperaturu ne djeluje dobro sa aspekta robusnosti, a i njegova temperatura isparavanja je 61 °C, što je 1 stupanj više od dopuštenog. Upitno je kako bi suci reagirali, i bi li ovo bilo dopušteno. Najsigurnije rješenje je odbaciti ovaj fluid.

Također dva fluida koja se mogu odbaciti su najviša dva, odnosno Novec 7000 i FC-3284 zbog svoje velike mase.

Preostali su Galden HT55 te 3M FC-72. Kada usporedimo ta dva fluida, vidi se da su jednaki samo za početnu temperaturu 0 °C, te je nakon toga Galden u svakoj točki bolji jer je potrebna količina manja nego 3M FC-72.

Time smo završili s izborom, te definirali rashladnu tekućinu – Galden HT55.

Sa definiranom tekućinom, može se koristeći istu jednadžbu za masu fluida, grafički prikazati ovisnost mase fluida u odnosu na početnu temperaturu, ali i postotak isparavanja fluida.



**Slika 74. Masa Galdena HT55 – različita isparavanja**

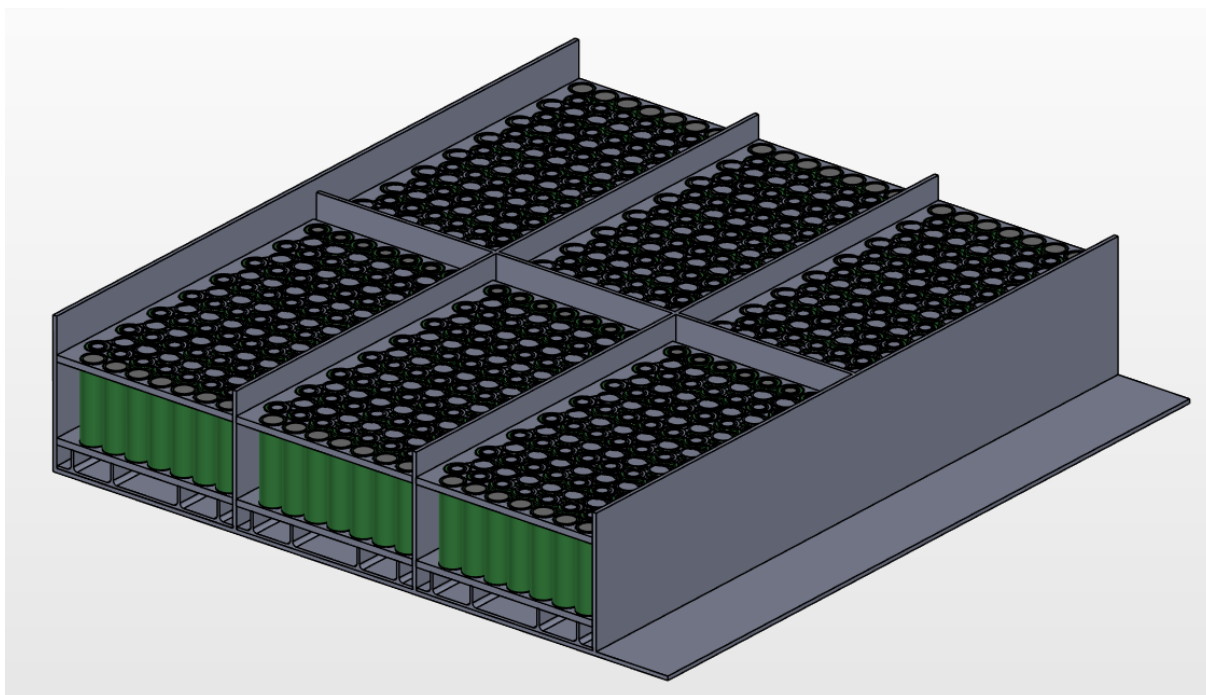
Iz ovoga se grafa vrlo lijepo vidi da ako možemo ohladiti fluid na 0 stupnjeva, nije nam bitno koliko fluida dolijemo, samo da bude dovoljno da bi se toplina kvalitetno prenosila na fluid. To znači sve iznad 2 kg.

Ako pak ne postoji mogućnost hlađenja fluida, onda također vidimo da nema previše smisla ići na postotak isparavanja veći od 60%, jer od tada pa nadalje gradijent krivulje mase fluida je vrlo mali, odnosno ne dobivamo veliku promjenu ako povećavamo postotak isparavanja.

Odlična stvar kod ovog pristupa je što mi ne moramo u ovom trenutku odlučiti količinu i početnu temperaturu Galdena, već se možemo prilagoditi na licu mjesta te uliti koliko god nam je potrebno na kojoj god temperaturi. Ovakav pristup je dobar zato što ne ovisimo o proračunima kako bi bili sigurni da će funkcionirati, već je moguće eksperimentalno utvrđivanje količine – testiranjem bolida.

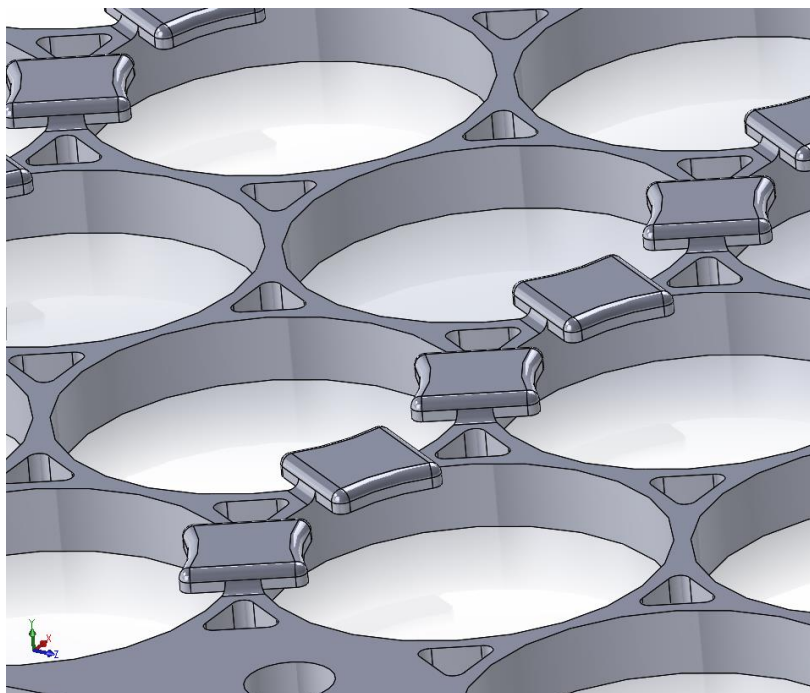
## 8. Modeliranje

Nakon što smo odabrali ćeliju te način hlađenja, ostalo je izmodelirati baterijski paket. Krenuli smo sa konceptom segmenta prikazanim na slici 50 gdje su svih 6 segmenata postavljene u istu ravninu. To je napravljeno zato što smo kao primarni cilj postavili nisko težište baterijskog paketa. Na ovaj način također smo riješili problem raspodjele rashladne tekućine ako bi baterijski paket bio takav da neki od segmenata stoje iznad drugih.



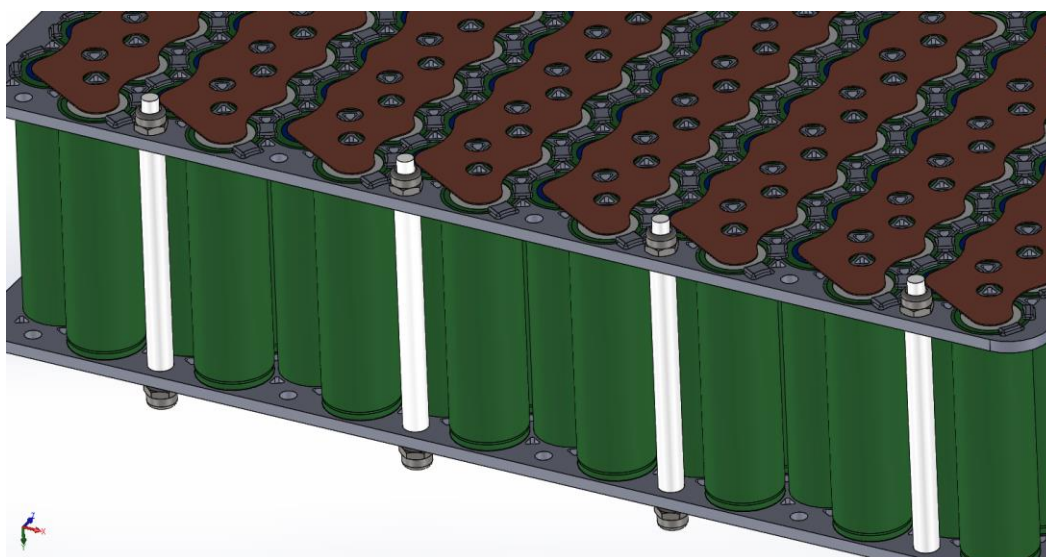
**Slika 75. Baterijski paket – Konačni raspored segmenata**

Od ove točke većinom su promjene rađene na segmentima. Izrada nosača ćelija predviđena je primjenom aditivnih tehnologija, točnije Polyjet tehnologije koristeći ABS materijal [15]. Ova tehnologija nam dopušta vrlo kompleksne oblike i izgled dijela koji se ne može dobiti niti jednom drugom tehnologijom. Tako su se na nosač dodale značajke koje onemogućuju aksijalno pomicanje ćelija. Time smo rasteretili bakrenu poveznicu od bilo kakvog mehaničkog opterećenja, već se svo mehaničko opterećenje prenosi preko nosača.



**Slika 76. Detalj graničnika na nosaču**

Nakon toga bilo je potrebno povezati gornji i donji nosač na način da se onemogući međusobni pomak između gornjeg i donjeg nosača. Time se znatno poboljšavaju mehanička svojstva cijelog sklopa. To se napravilo dodavanjem tankih cilindara koji su sa svake strane pritegnuti najlonskim maticama. Bitno je napomenuti da se u ovom sklopu maksimalno izbjegavalo korištenje bilo kakvog vodljivog materijala. Tako da su jedini vodljivi dijelovi oni koji provode električnu energiju kroz bateriju. Samim time, svi vijčani spojni dijelovi su polimerni.



**Slika 77. Spojnice gornjeg i donjeg nosača**

### 8.1. Izbor konektora

Sada imamo baterijski segment koji je mehanički stabilan, međutim nemamo način kako povezati međusobno segmente. Svaki segment ima nazivni napon od 57,6 V. Međusobnim serijskim povezivanjem svih 6 segmenata dobivamo nazivni napon od 350 V (345,6 V). Po pravilniku je definirano da ove poveznice moraju biti rastavljive bez upotrebe alata. Ovo je pravilo zbog sigurnosti, kako bi timovi kad god rade na bateriji mogli odspojiti segmente, samim time snižavajući radni napon od 350V na 57,6 V.

Prva verzija zamišljena je korištenjem Amphenol Radlok konektora. To su industrijski konektori specifično razvijeni za primjenu u autoindustriji, te su samim time vrlo otporni na vibracije [16]. Postoje tri vrste izvedbe ovog konektora, odnosno tri načina kako se spajati na muški konektor: pin, navoj te spojna ušica.



Slika 78. Radlok konektori

Na slici su prikazani navojni tip te spojna ušica. Nama je pri odabiru kriterij bio što manja visina, kako bi cijelokupni baterijski paket bio što niži.

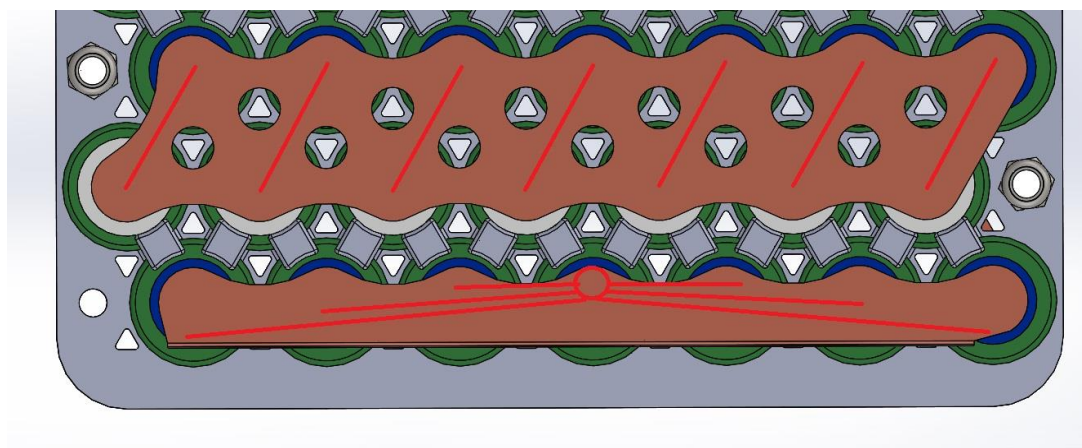
Po napatku proizvođača, za našu maksimalnu struju od oko 300A, odabran je konektor veličine 8 mm. Podaci u tablici dani su za srednju struju.

Tablica 21. Tablica za odabir veličine konektora

<b>RADLOK™ Recommended Cable Size &amp; Current</b>		
<b>RADSOK® Size (mm)</b>	<b>Recommended Cbl Size (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Current (A)</b>
3.6	10	70
5.7	16	90
	25	120
8.0	35	150
	50	200
10.0	50	200
	70	250
	95	300
10.3	95	350
12.0	120	400

Povezivanje segmenta sa konektorom pokazao se kao zahtjevan problem. Površina spojnice kroz koju prolazi struja je vrlo velika, a površina konektora preko kojeg se prenosi sva struja je vrlo malena. Loše rješenje bi bilo proširiti oko srednje ćelije te stvoriti mjesto za konektor.

Razlog se najbolje vidi na slici 80.



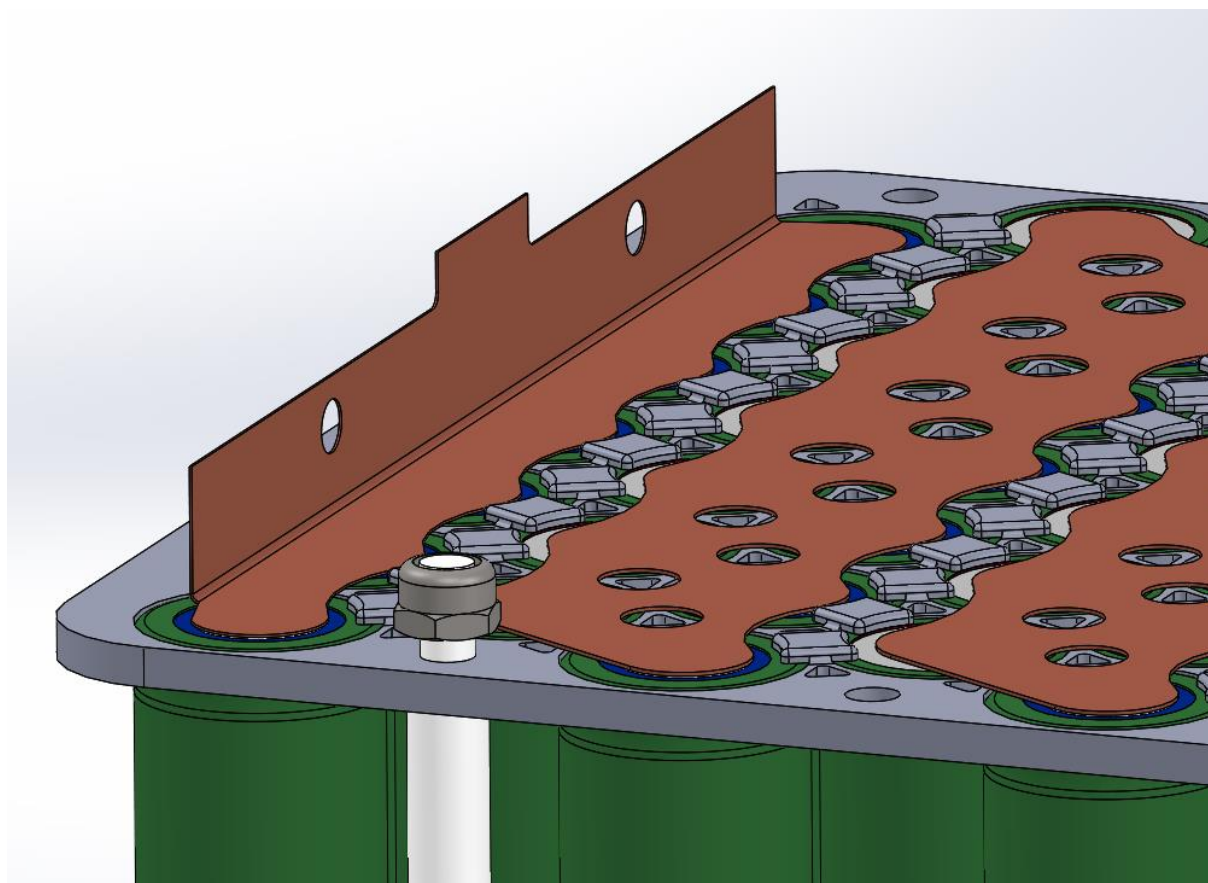
Slika 79. Raspodjela struje na spojnica

Na gornjoj spojnici, gdje struja teče iz ćelije u ćelije, vidi se da je pretpostavljeni tok struje široko raspodjeljen, odnosno gustoća struje po površini je malena.



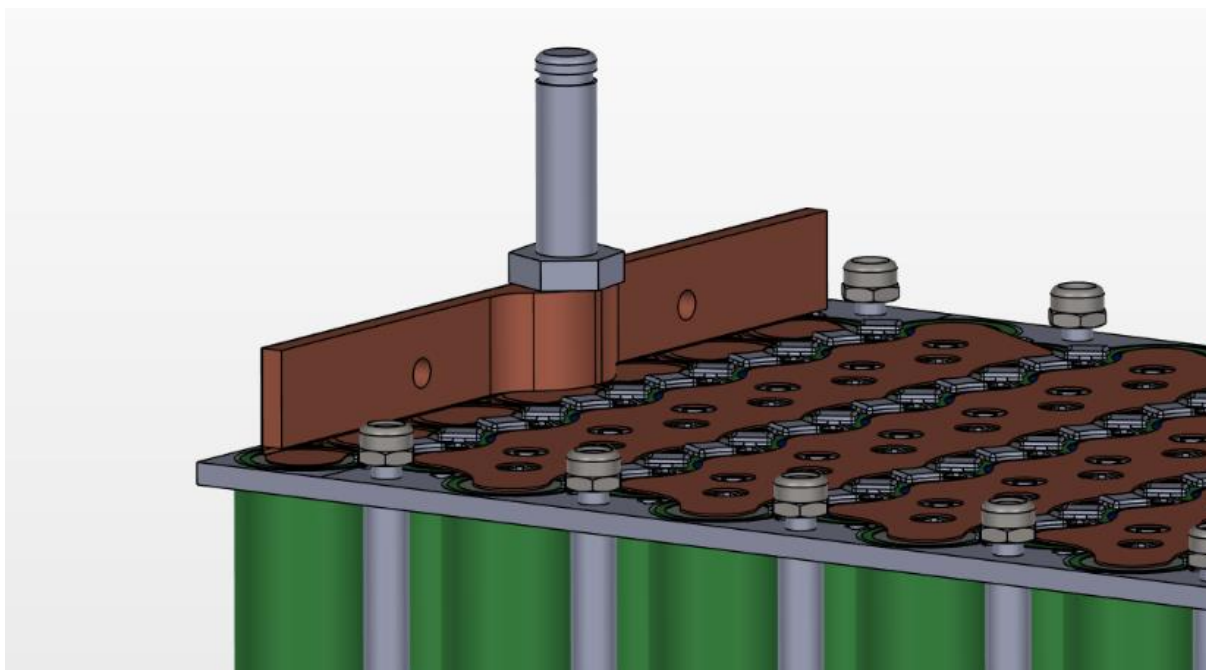
Na donjoj spojnici, kada bi se konektor povezivao samo preko srednje ćelije, vidi se da bi struja iz svih ćelija tekla do konektora istim putem, što znači veliku gustoću struje po površini, odnosno pregrijavanje i potencijalno taljenje spojnice. Zato je potrebno struju sažeti do konektora preko što veće površine.

To je napravljeno tako da se spojnica produžila i savinula, te time je ostvarena velika površina preko koje se struja prenosi iz ćelija.



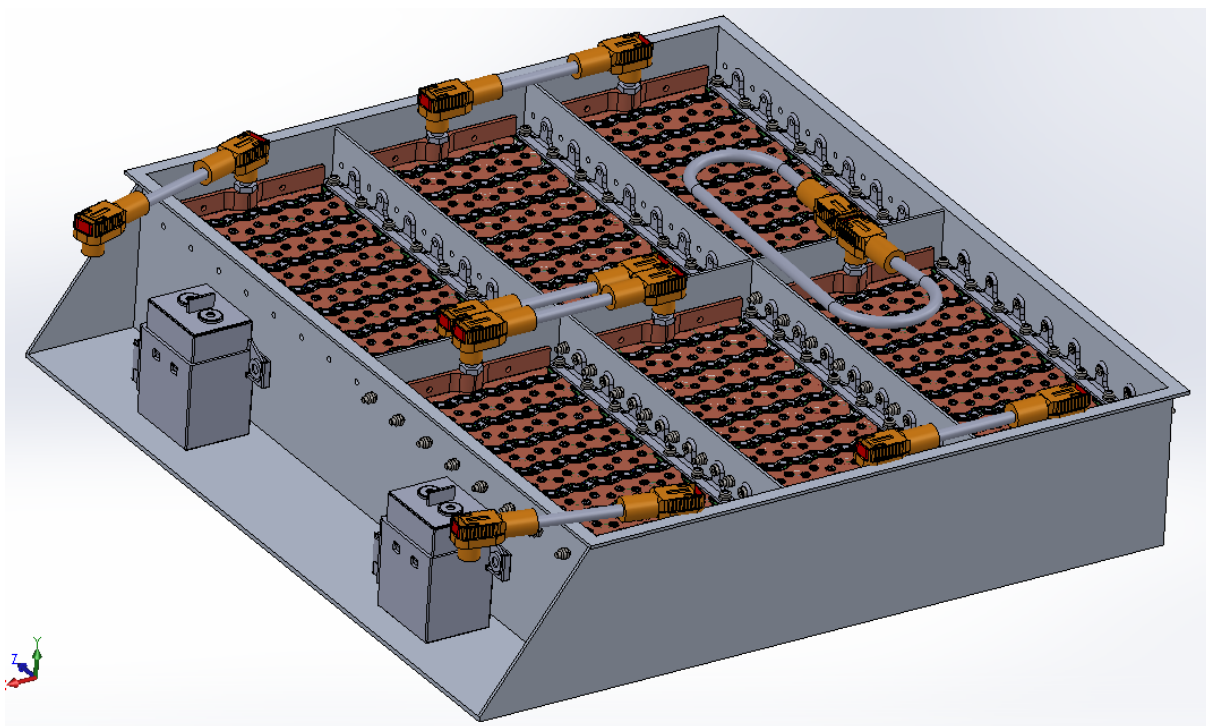
**Slika 80. Detalj proširene spojnice za konektor**

Kako bi se ta površina povezala konektorom, napravljena je poveznica koja povezuje bakrenu poveznicu na ćelijama sa Radlok konektorom.



**Slika 81. Segment sa Radlok konektorom**

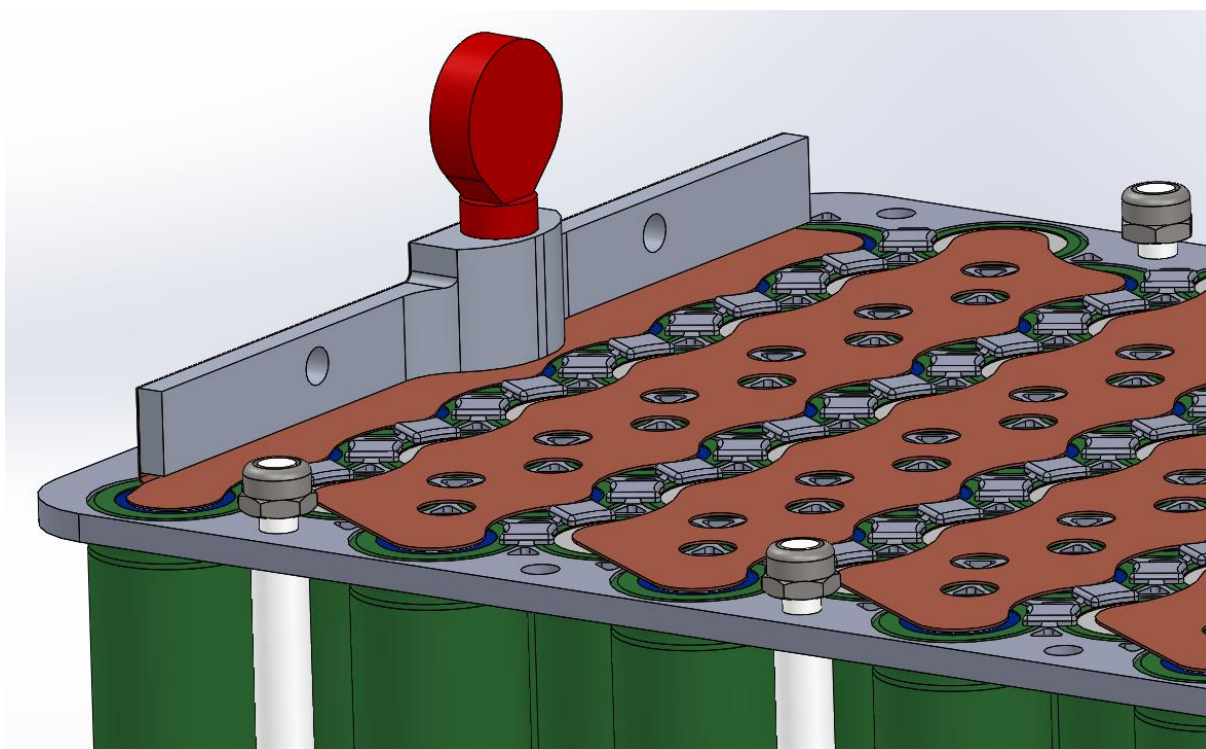
Baterijski paket povezan Radlok konektorima sada izgleda ovako:



**Slika 82. Baterijski paket povezan Radlok konektorima**

Međutim, zbog ovih konektora paket je postao vrlo visok, odnosno čak 45 mm je razlika između vrha paketa i vrha ćelija. Zbog toga smo odlučili odbaciti Radlok konektore, te smo krenuli u razvoj vlastitog rješenja.

Pravilnik definira da se strujni put između segmenata mora moći odvojiti bez upotrebe alata. Ali isto tako, sustav se ne smije moći olabaviti ili odspojiti zbog utjecaja vibracija, tako da je potrebna neka vrsta „zaključavanja“. Kod Radlok konektora, to je bio mehanizam opruge i polugice, koji ne bi dopuštao odspajanje bez da se polugica na konektoru pritisne. U našem slučaju, odlučili smo se na puno jednostavnije i robusnije rješenje. Koncept prijelaza struje sa spojnica ostao je isti, samo što se umjesto konektora, struja prenosi preko stopice i bakrene trake, a stezanje stopice se vrši ručno korištenjem krilnog vijka [17]. Osiguranje vijka od odvrtanja napraviti će se korištenjem sigurnosne žice.



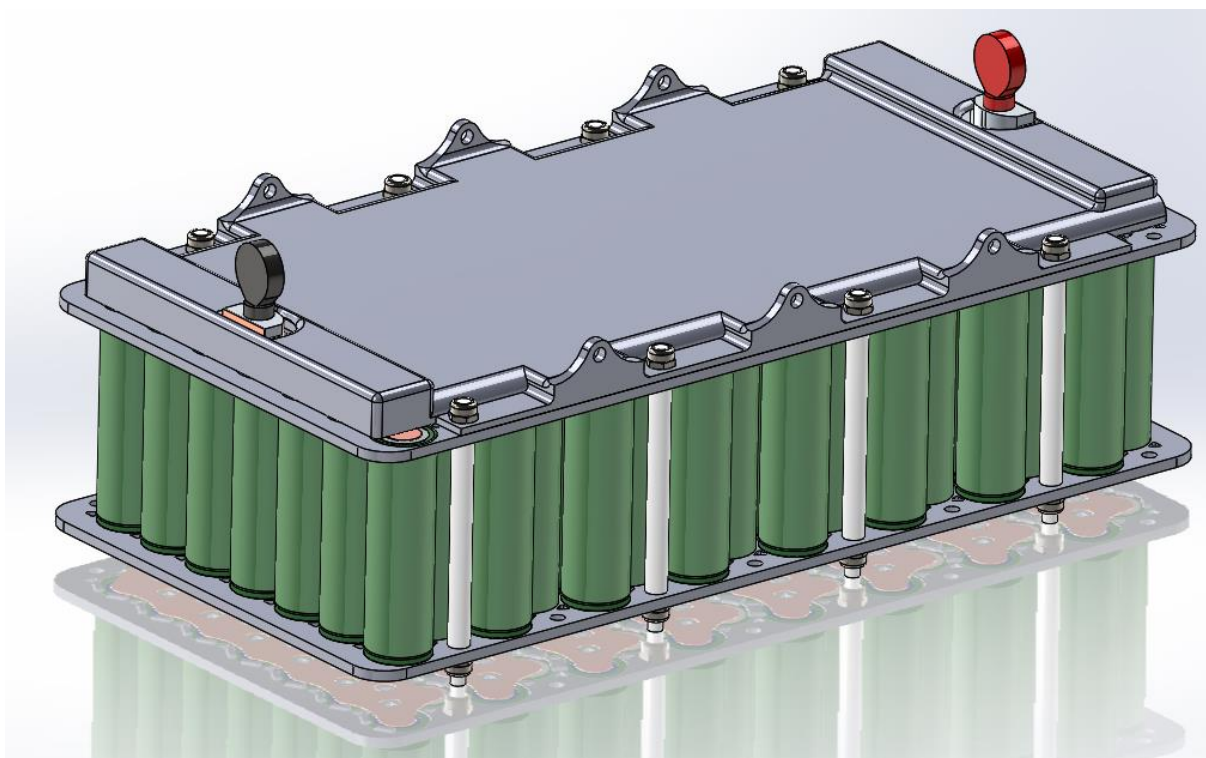
Slika 83. Detalj segmenta sa vlastitim konektorom

Površina na koju naliježe stopica, odnosno gdje se prenosi struja iznosi  $106 \text{ mm}^2$ . Preporučena vrijednost struje za bakrene vodiče je oko  $k = 4 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ . Za  $106 \text{ mm}^2$  kolika je površina stopice, možemo prenijeti:

$$I_{max} = A * k = 106 * 4 = 424 A \quad (14)$$

što je više nego naša maksimalna struja od 300 A.

Preostalo je povezati segmente sa kućištem baterijskog paketa. Segmenti se moraju relativno lako vaditi i stavljati u kućište korištenjem rastavljivih spojeva. Gledajući kako je kućištu vrlo teško pristupiti sa donje strane, ostaje nam samo gornji dio kućišta kako bi povezali segmente sa njim. Izmodeliran je poklopac segmenta, koji služi za povezivanje sa kućištem, ali i kao zaštita segmenta od potencijalnog upadanja sitnih predmeta među ćelije. Konačni izgled segmenta prikazan je na slici 85.



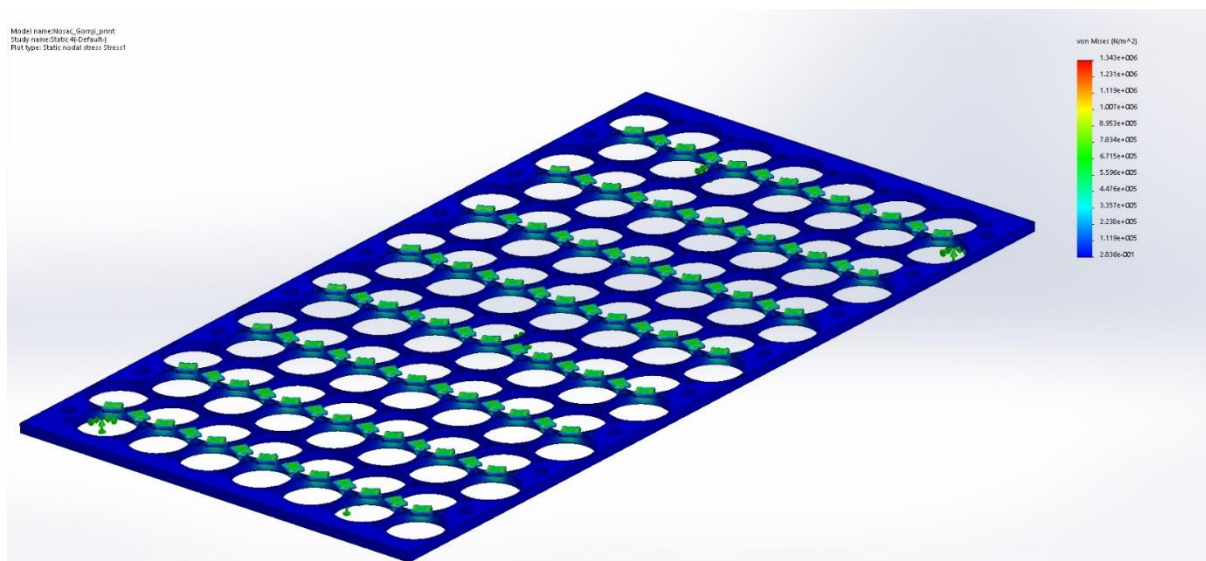
**Slika 84. Konačna verzija segmenta**

Segment se povezuje sa tri vijka sa svake strane za kućište. Time se sila prenosi na ukupno šest mjesta. Kao provjeru potrebno je izvršiti FEM analizu nosača ćelija. Analiza je rađena u programskom okruženju SolidWorks, materijal nosača postavljen je za ABS.

Sila kojom je opterećen svaki graničnik na nosaču iznosi 1 N. Taj iznos dobiven je sa masom ćelije koja iznosi 48 grama te maksimalnim ubrzanjem od 4g, odnosno 4 iznosa gravitacijskog ubrzanja. Iznos ubrzanja od 4g eksperimentalno je utvrđen testiranjem udara na bolidu FSBRT05 „Strix“. Gledajući kako je svaka ćelija ograničena sa dva graničnika, sila po svakom graničniku iznosi 1N.

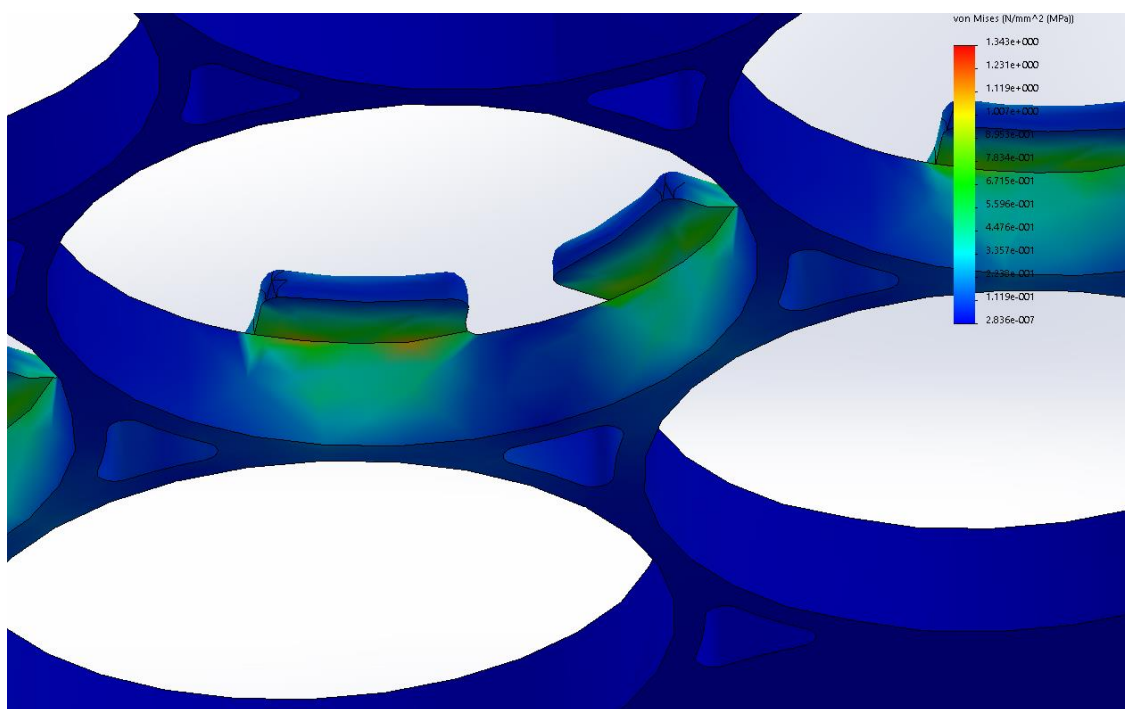
## 8.2. FEM analiza

Rezultati FEM analize prikazani su u nastavku:



Slika 85. Mehanički nosač - napreznja

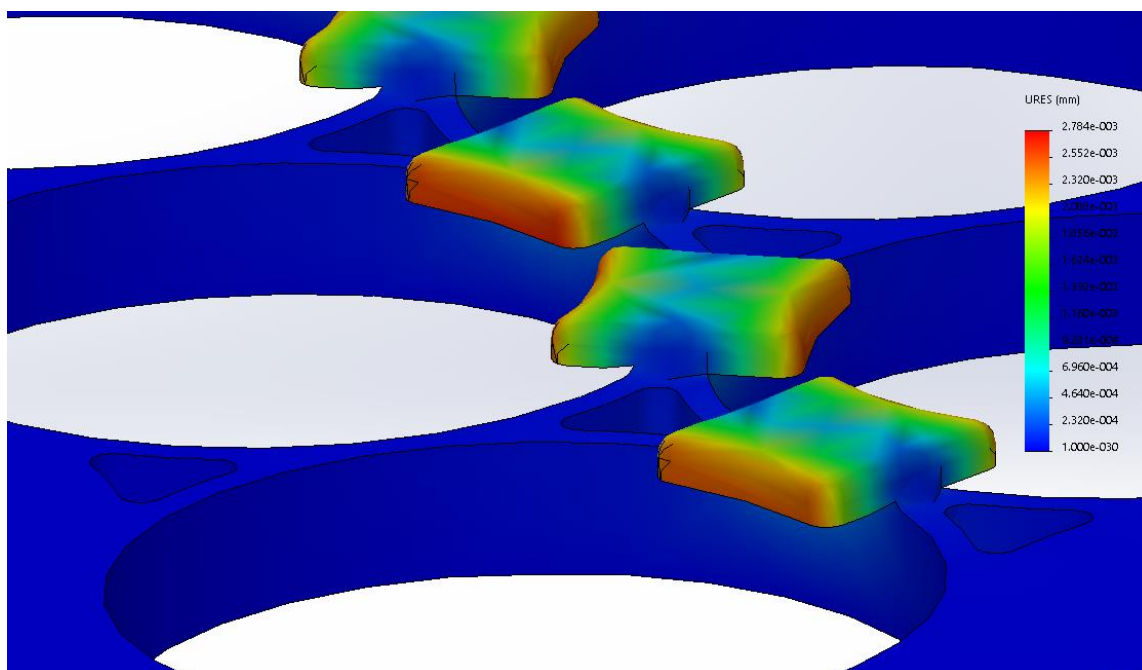
Kao što je i očekivano, maksimalno napreznje po Von Missesu javlja se na donjem rubu graničnika. Zbog oblika ćelije, dodavanje zaobljenja na tom mjestu kako bi se smanjio efekt zareznog djelovanja nije moguće.



Slika 86. Mehanički nosač – detalj napreznja

Maksimalni iznos napreznja iznosi  $1.3 \frac{N}{mm^2}$ , a dopušteno napreznje iznosi  $7 \frac{N}{mm^2}$ .

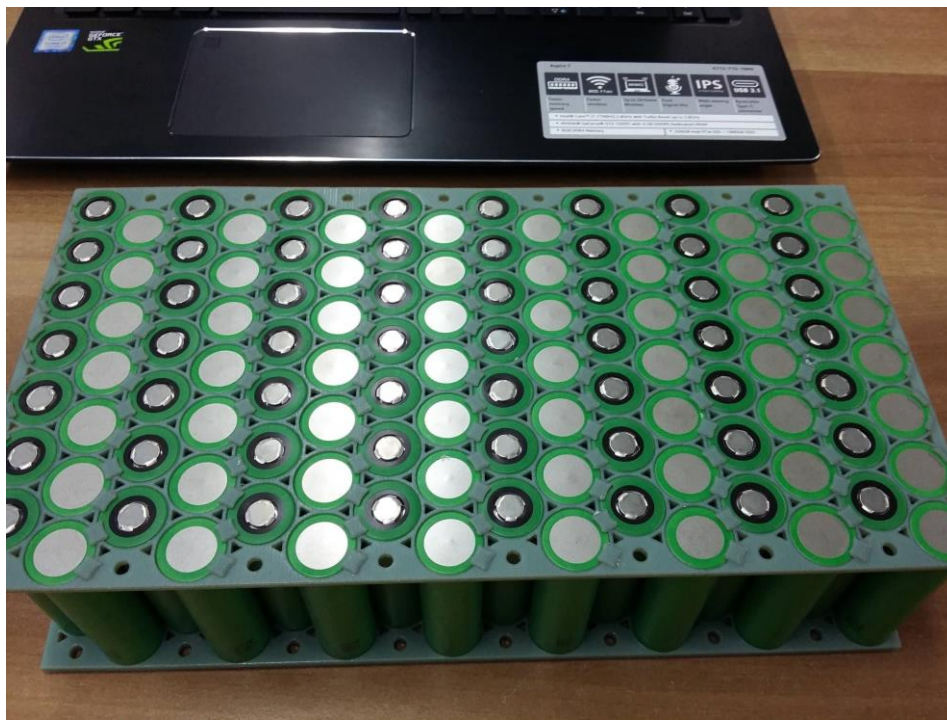
Maksimalni pomaci su na rubovima graničnika, te iznose 0,00028 mm.



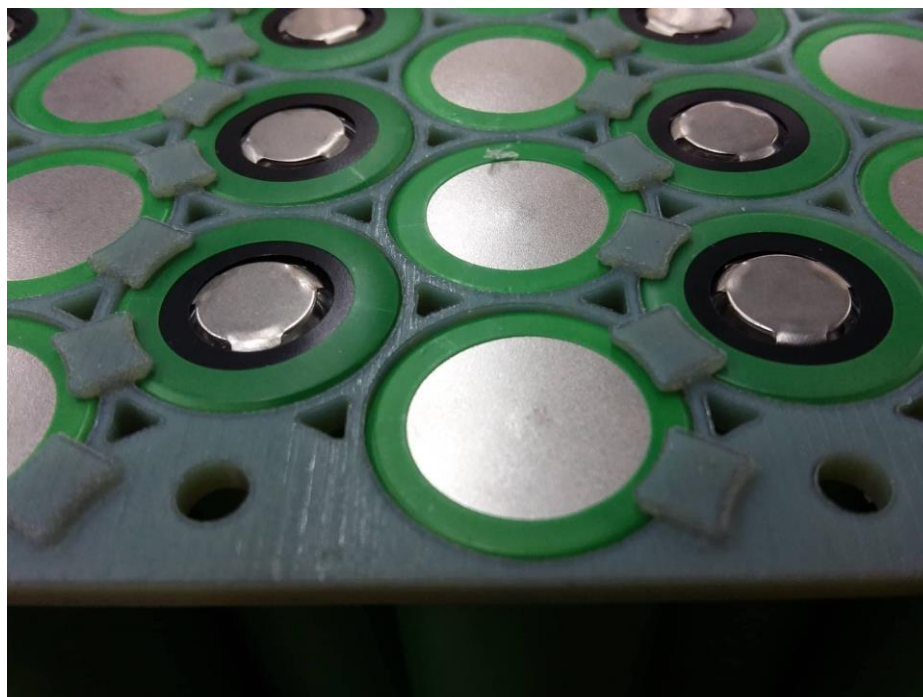
Slika 87. Mehanički nosač – detalj pomaka

### 8.3. Testni segment

Kako bismo validirali naše rezultate, odlučili smo izraditi i testirati jedan segment. Nosači su izrađeni na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, na Katedri za preradu polimera koristeći „Polyjet“ tehnologiju.



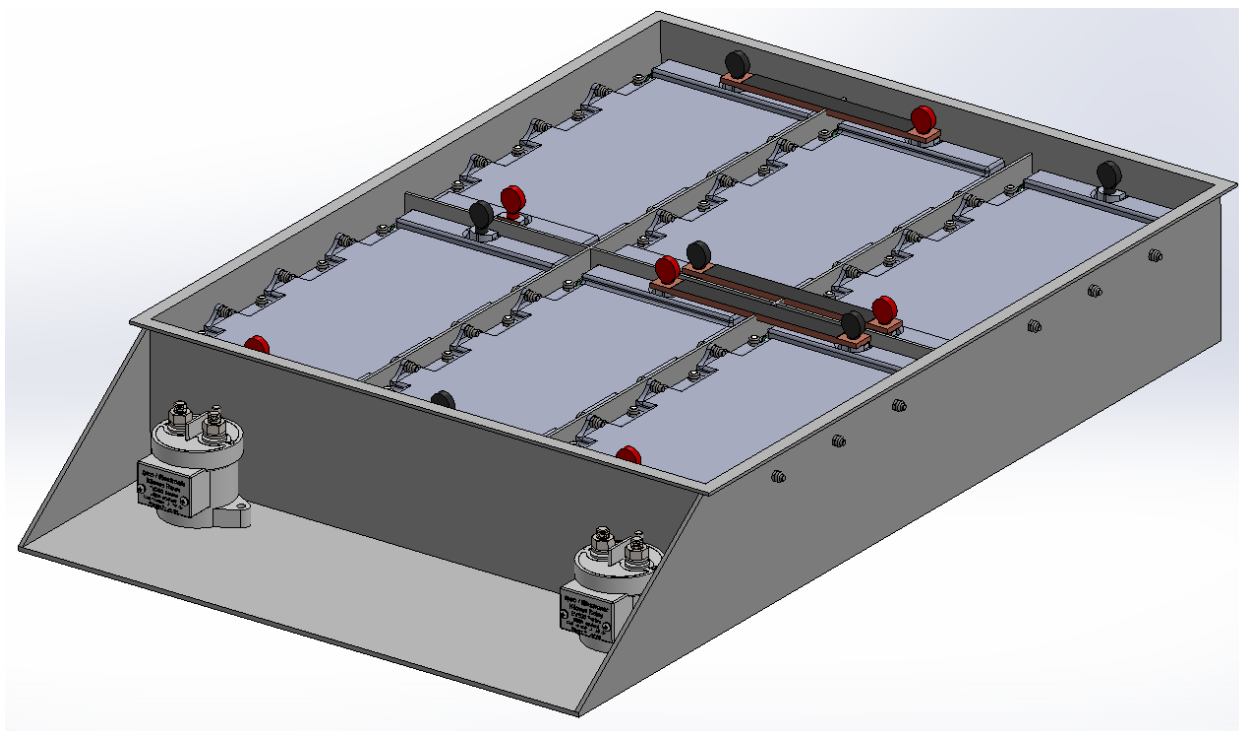
Slika 88. Izrađeni segment



Slika 89. Izrađeni segment - detalj

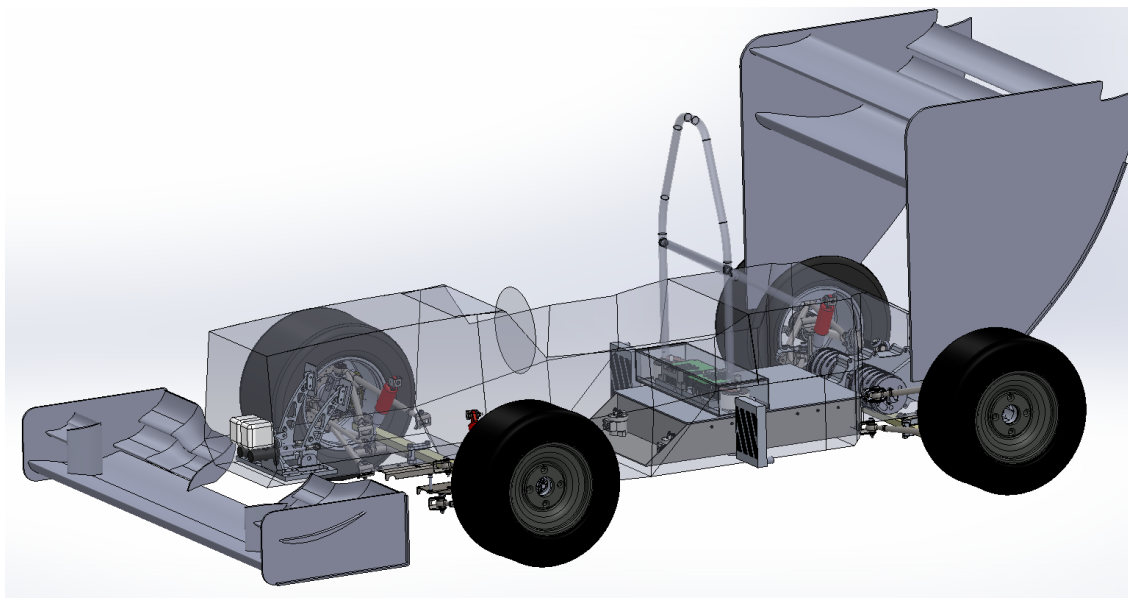
Kao što se vidi na slici, kvaliteta površine je odlična te smo vrlo zadovoljni konačnim rezultatom.

Cijeli baterijski paket, bez poklopca, prikazan je na slici 91.



**Slika 90. Konačni baterijski paket**

Baterijski paket pozicioniran u bolidu, skupa sa ostalim komponentama prikazan je na slici 92.



**Slika 91. FSBRT06e**



## 9. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad pokazan je izbor, validacija te modeliranje baterijskog paketa za električni bolid FSB Racing Teama. Svi dijelovi baterijskog paketa su testirani i provjereni u realnosti. U praksi se pokazuje da vrlo male razlike između podataka koje se odnose na određene značajke ćelija, a koje daju različiti proizvođači, mogu dati različito ponašanje ćelija prilikom testiranja. Konačnom analizom postavljenih ciljeva u procesu projektiranja baterijskog paketa pokazano je da su svi glavni zahtjevi uspješno zadovoljeni. Primarno, masa cijelokupnog baterijskog paketa uspješno je zadržana ispod 50 kg.

Baterijski paket u ovoj konfiguraciji ima 40 kg, bez rashladne tekućine. Sa dodanom rashladnom tekućinom baterijski paket teži maksimalno 45 kg što znači da nam je ostalo 5 kg za nepredviđene komponente.

Oblikom baterijskog paketa omogućeno je vađenje baterijskog paketa kroz donji dio bolida. U trenutnoj fazi preostalo je testirati izrađeni segment baterijskog paketa, s kojim ćemo finalizirati i zamrznuti konstrukcijsku fazu baterijskog paketa. ABS se pokazao kao odličan materijal za izradu nosača. Zanimljiv podatak je da čitav baterijski segment ima masu 5,53 kg, a masa ćelija u segmentu iznosi 5,2 kg. To znači da svi nosači, spojnice i konektori teže 330 g, odnosno samo 5,96% mase ukupnog segmenta. Ovo je direktna posljedica konstruiranja sa primarnim ciljem smanjenja mase.

## LITERATURA

- [1] Adamović, P. – Eksperimentalno ispitivanje umetka nosive konstrukcije bolida formule student uslijed različitih opterećenja, 2018.
- [2] West, L., Shepherd B., Karabon N., Howell J., Pyrtko M. - Design Report of the High Voltage Battery Pack for Formula SAE Electric – 2016.
- [3] Formula Student Rules 2017 - [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2017/rules/FS-Rules\\_2017\\_V1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2017/rules/FS-Rules_2017_V1.1.pdf), 1.12.2017.
- [4] IPG Automotive GmbH - User's Guide Version 6.0.3 CarMaker®, 2017.
- [5] Gabriele, S. - SD 2229-2230 - Vehicle Dynamics Project Course KTH Formula Student, 2016.
- [6] <https://www.altamotors.co/technology#the-motor>, 2018.
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Battery\\_pack](https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_pack), 2018.
- [8] ISO 12405-1 - Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 1: High-power applications, 2011.
- [9] Magnusson, A. – Modelling of battery cooling for Formula Student application, 2016.
- [10] Hang, Y. – Cooling and packaging of accumulators for Formula SAE electric car, 2016.
- [11] <http://img.ebmpapst.com/products/datasheets/DC-axial-fan-4112NH4-ENU.pdf>, 2018.
- [12] <https://www.solvay.com/en/markets-and-products/featured-products/Galden.html>, 2018.
- [13] <https://multimedia.3m.com/mws/media/65495O/3mtm-thermal-management-fluids.pdf>, 2018.
- [14] [http://www.inforlab-chimie.fr/doc/document\\_fichier\\_279.pdf](http://www.inforlab-chimie.fr/doc/document_fichier_279.pdf), 2018.
- [15] <http://www.stratasys.com/polyjet-technology>, 2018.
- [16] <http://www.amphenol.co.jp/military/catalog/RADLOK.pdf>, 2018.
- [17] Marino, J. - Electro-Thermal Behaviour of SLPB7785186 in real driving condition, 2017.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Hoosier R13x8" Pacejka 2002 model gume .tir datoteka
- III. Lista specifikacija Sony VTC6 ćelije
- IV. Lista specifikacija Amphenol Radlok konektora
- V. Proizvodni katalog Solvay Galden rashladnih tekućina

**Model Gume - .tir datoteka**

FileIdent = CarMaker-Tire-Hoosier

[MDI\_HEADER]

FILE\_TYPE = 'tir'

FILE\_VERSION = 3.0

FILE\_FORMAT = 'ASCII'

[UNITS]

LENGTH = 'meter'

FORCE = 'Newton'

ANGLE = 'radians'

MASS = 'kg'

TIME = 'second'

[MODEL]

PROPERTY\_FILE\_FORMAT = 'PAC2002'

USE\_MODE = 4 \$Tyre use switch (IUSED)

VXLOW = 1

LONGVL = 11.1760 \$Measurement speed

TYRESIDE = 'RIGHT' \$Mounted side of tyre at vehicle/test bench

[DIMENSION]

UNLOADED\_RADIUS = 0.2600 \$Free tyre radius

WIDTH = 0.2032 \$Nominal section width of the tyre

ASPECT\_RATIO = 0.5360 \$Nominal aspect ratio

RIM\_RADIUS = 0.1651 \$Nominal rim radius

RIM\_WIDTH = 0.1778 \$Rim width

[VERTICAL]

VERTICAL\_STIFFNESS = 125560.00 \$Tyre vertical stiffness

VERTICAL\_DAMPING = 62780.0 \$Tyre vertical damping

BREFF = 0.2600 \$Low load stiffness e.r.r.

DREFF = 0.2500 \$Peak value of e.r.r.

FREFF = 0.3000 \$High load stiffness e.r.r.

FNOMIN = 669.2012 \$Nominal wheel load

## [LONG\_SLIP\_RANGE]

KPUMIN = -0.5000 \$Minimum valid wheel slip

KPUMAX = 0.5000 \$Maximum valid wheel slip

## [SLIP\_ANGLE\_RANGE]

ALPMIN = -0.2094 \$Minimum valid slip angle

ALPMAX = 0.2094 \$Maximum valid slip angle

## [INCLINATION\_ANGLE\_RANGE]

CAMMIN = 0.0000 \$Minimum valid camber angle

CAMMAX = 0.0698 \$Maximum valid camber angle

## [VERTICAL\_FORCE\_RANGE]

FZMIN = 222.4 \$Minimum allowed wheel load

FZMAX = 1556.8 \$Maximum allowed wheel load

## [SCALING\_COEFFICIENTS]

LFZO = 1.0 \$Scale factor of nominal (rated) load

LCX = 1.0 \$Scale factor of Fx shape factor

LMUX = 1.0 \$Scale factor of Fx peak friction coefficient

LEX = 1.0 \$Scale factor of Fx curvature factor

LKX = 1.0 \$Scale factor of Fx slip stiffness

LHX = 1.0 \$Scale factor of Fx horizontal shift

LVX = 1.0 \$Scale factor of Fx vertical shift

LGAX = 1.0 \$Scale factor of camber for Fx

LCY = 1.0 \$Scale factor of Fy shape factor

LMUY = 1.0 \$Scale factor of Fy peak friction coefficient

LEY = 1.0 \$Scale factor of Fy curvature factor

LKY = 1.0 \$Scale factor of Fy cornering stiffness

LHY = 1.0 \$Scale factor of Fy horizontal shift

LVY = 1.0 \$Scale factor of Fy vertical shift

LGAY = 1.0 \$Scale factor of camber for Fy

LTR = 1.0 \$Scale factor of peak of pneumatic trail

LRES = 1.0 \$Scale factor for offset of residual torque

LGAZ = 1.0 \$Scale factor of camber for Mz

LXAL = 1.0 \$Scale factor of alpha influence on Fx  
LYKA = 1.0 \$Scale factor of alpha influence on Fx  
LVYKA = 1.0 \$Scale factor of kappa induced Fy  
LS = 1.0 \$Scale factor of moment arm of Fx  
LSGKP = 1.0 \$Scale factor of relaxation length of Fx  
LSGAL = 1.0 \$Scale factor of relaxation length of Fy  
LGYR = 1.0 \$Scale factor of gyroscopic torque  
LMX = 1.0 \$Scale factor of overturning couple  
LVMX = 1.0 \$Scale factor of Mx vertical shift  
LMY = 1.0 \$Scale factor of rolling resistance torque  
[LONGITUDINAL\_COEFFICIENTS]  
PCX1 = 1.87417810E+00 \$Shape factor Cfx for longitudinal force  
PDX1 = -2.83459410E+00 \$Longitudinal friction Mux at Fznom  
PDX2 = 2.68825660E-01 \$Variation of friction Mux with load  
PDX3 = 9.87244960E+00 \$Variation of friction Mux with camber  
PEX1 = 1.33225250E+00 \$Longitudinal curvature Efx at Fznom  
PEX2 = 1.33878610E-17 \$Variation of curvature Efx with load  
PEX3 = 1.81439280E-16 \$Variation of curvature Efx with load squared  
PEX4 = 1.30285680E-02 \$Factor in curvature Efx while driving  
PKX1 = 6.78181700E+01 \$Longitudinal slip stiffness Kfx/Fz at Fznom  
PKX2 = 4.23233800E+01 \$Variation of slip stiffness Kfx/Fz with load  
PKX3 = -6.85107350E-01 \$Exponent in slip stiffness Kfx/Fz with load  
PHX1 = 1.07048890E-02 \$Horizontal shift Shx at Fznom  
PHX2 = 1.67008160E-02 \$Variation of shift Shx with load  
PVX1 = -7.75781650E-03 \$Vertical shift Svz/Fz at Fznom  
PVX2 = -8.75401100E-02 \$Variation of shift Svz/Fz with load  
RBX1 = 1.93087730E+02 \$Slope factor for combined slip Fx reduction  
RBX2 = -3.57870880E-01 \$Variation of slope Fx reduction with kappa  
RCX1 = 1.00831520E+00 \$Shape factor for combined slip Fx reduction  
REX1 = 9.14925210E-01 \$Curvature factor of combined Fx  
REX2 = -5.51281420E-02 \$Curvature factor of combined Fx with load

RHX1 = -3.02816410E-02 \$Shift factor for combined slip Fx reduction  
PTX1 = 0.00000000E+00 \$Relaxation length SigKap0/Fz at Fznom  
PTX2 = 0.00000000E+00 \$Variation of SigKap0/Fz with load  
PTX3 = 0.00000000E+00 \$Variation of SigKap0/Fz with exponent of load  
[OVERTURNING\_COEFFICIENTS]  
QSX1 = 1.40475570E-02 \$Lateral force induced overturning moment  
QSX2 = 1.23054140E+00 \$Camber induced overturning couple  
QSX3 = 3.21432520E-02 \$Fy induced overturning couple  
[LATERAL\_COEFFICIENTS]  
PCY1 = 2.89230720E+00 \$Shape factor Cfy for lateral forces  
PDY1 = -2.92099830E+00 \$Lateral friction Muy  
PDY2 = 2.20320150E-01 \$Variation of friction Muy with load  
PDY3 = 1.01253610E+01 \$Variation of friction Muy with squared camber  
PEY1 = 1.39811930E+00 \$Lateral curvature Efy at Fznom  
PEY2 = 1.19459110E-02 \$Variation of curvature Efy with load  
PEY3 = 5.92939710E-03 \$Zero order camber dependency of curvature Efy  
PEY4 = 3.56077750E-02 \$Variation of curvature Efy with camber  
PKY1 = -0.90338130E+02 \$Maximum value of stiffness Kfy/Fznom  
PKY2 = 3.52130440E+00 \$Load at which Kfy reaches maximum value  
PKY3 = 1.37408430E+00 \$Variation of Kfy/Fznom with camber  
PHY1 = 1.43744290E-03 \$Horizontal shift Shy at Fznom  
PHY2 = 4.15485790E-03 \$Variation of shift Shy with load  
PHY3 = 1.26643950E-01 \$Variation of shift Shy with camber  
PVY1 = 2.41989300E-02 \$Vertical shift in Svy/Fz at Fznom  
PVY2 = 3.31589210E-02 \$Variation of shift Svy/Fz with load  
PVY3 = 6.12136560E-01 \$Variation of shift Svy/Fz with camber  
PVY4 = -3.69030740E-01 \$Variation of shift Svy/Fz with camber and load  
RBY1 = 2.04279860E+01 \$Slope factor for combined Fy reduction  
RBY2 = 2.29188290E-02 \$Variation of slope Fy reduction with alpha  
RBY3 = -6.80270040E+00 \$Shift term for alpha in slope Fy reduction  
RCY1 = 9.76902570E-01 \$Shape factor for combined Fy reduction

REY1 = 6.75114880E-01 \$Curvature factor of combined Fy  
 REY2 = -1.50475420E-02 \$Curvature factor of combined Fy with load  
 RHY1 = 5.18683810E-03 \$Shift factor for combined Fy reduction  
 RHY2 = -5.49278100E-03 \$Shift factor for combined Fy reduction with load  
 RVY1 = 5.75101290E-02 \$Kappa induced side force Svyk/Muy\*Fz at Fznom  
 RVY2 = 5.37155510E-02 \$Variation of Svyk/Muy\*Fz with load  
 RVY3 = -4.02384460E-01 \$Variation of Svyk/Muy\*Fz with camber  
 RVY4 = 2.42379650E+00 \$Variation of Svyk/Muy\*Fz with alpha  
 RVY5 = 2.07031050E+00 \$Variation of Svyk/Muy\*Fz with kappa  
 RVY6 = -1.51597510E+01 \$Variation of Svyk/Muy\*Fz with atan (kappa)  
 PTY1 = 0.00000000E+00 \$Peak value of relaxation length SigAlp0/R0  
 PTY2 = 0.00000000E+00 \$Value of Fz/Fznom where SigAlp0 is extreme  
 [ROLLING\_COEFFICIENTS]  
 QSY1 = 0.00000000E+00 \$Rolling resistance torque coefficient  
 QSY2 = 0.00000000E+00 \$Rolling resistance torque depending on Fx  
 QSY3 = 0.00000000E+00 \$Rolling resistance torque depending on speed  
 [ALIGNING\_COEFFICIENTS]  
 QBZ1 = 8.36048800E+00 \$Trail slope factor for trail Bpt at Fznom  
 QBZ2 = 1.36679690E-04 \$Variation of slope Bpt with load  
 QBZ3 = 5.15503560E-05 \$Variation of slope Bpt with load squared  
 QBZ4 = 3.59561250E-01 \$Variation of slope Bpt with camber  
 QBZ5 = -1.13364050E+00 \$Variation of slope Bpt with absolute camber  
 QBZ9 = -1.13346500E-02 \$Slope factor Br of residual torque Mzr  
 QBZ10 = -3.17152470E-04 \$Slope factor Br of residual torque Mzr  
 QCZ1 = 1.13762020E+00 \$Shape factor Cpt for pneumatic trail  
 QDZ1 = 8.31568750E-02 \$Peak trail Dpt = Dpt\*(Fz/Fznom\*R0)  
 QDZ2 = -1.05520910E-02 \$Variation of peak Dpt with load  
 QDZ3 = -4.88307580E-01 \$Variation of peak Dpt with camber  
 QDZ4 = 8.53177860E-02 \$Variation of peak Dpt with camber squared  
 QDZ6 = -4.66122500E-02 \$Peak residual torque Dmr = Dmr/(Fz\*R0)  
 QDZ7 = -2.94498590E-02 \$Variation of peak factor Dmr with load



QDZ8 = -6.78668840E-02 \$Variation of peak factor Dmr with camber  
QDZ9 = 5.37425940E-02 \$Variation of peak factor Dmr with camber and load  
QEZ1 = -4.35513180E+00 \$Trail curvature Ept at Fznom  
QEZ2 = -4.99091280E+00 \$Variation of curvature Ept with load  
QEZ3 = 3.75455520E+00 \$Variation of curvature Ept with load squared  
QEZ4 = -5.19690920E-01 \$Variation of curvature Ept with sign of Alpha-t  
QEZ5 = 5.35235420E+00 \$Variation of Ept with camber and sign Alpha-t  
QHZ1 = -6.69635430E-03 \$Trail horizontal shift Sht at Fznom  
QHZ2 = -6.17384200E-03 \$Variation of shift Sht with load  
QHZ3 = -2.71576860E-02 \$Variation of shift Sht with camber  
QHZ4 = 1.32021250E-02 \$Variation of shift Sht with camber and load  
SSZ1 = 0.00000 \$Nominal value of s/R0: effect of Fx on Mz  
SSZ2 = 0.00000 \$Variation of distance s/R0 with Fy/Fznom  
SSZ3 = 0.00000 \$Variation of distance s/R0 with camber  
SSZ4 = 0.00000 \$Variation of distance s/R0 with load and camber  
QTZ1 = 0 \$Gyration torque constant  
MBELT = 0 \$Belt mass of the wheel

# Lithium Ion Rechargeable Battery

## Technical Information

Revision 0.2  
30th Jun 2015

<b>Model Number</b>	<b>US18650VTC6</b>
<b>Cell Type</b>	<b>Cylindrical</b>
<b>Cell Name</b>	<b>US18650VTC6</b>
<b>Sony Code</b>	<b>49939240</b>

**Sony Energy Devices Corporation**  
**Device Solutions Business Group / Sony Corporation**

## 1. General

### 1.1 Name and Code

1.1.1 Model Number : US18650VTC6  
1.1.2 Cell Name : US18650VTC6  
1.1.3 Sony Code : 49939240

### 1.2 Cell Shape and Weight

1.2.1 Cell Shape : Cylindrical  
1.2.2 Size (with plastic tube) : Diameter 18.50mm max  
Length 65.20mm max  
1.2.3 Weight : 46.6g Average

### 1.3 Safety Regulation

: Sony acquired UL1642.  
: Sony acquired IEC62133 2nd edition.  
: Sony acquired Korean regulation.  
: Sony acquired Taiwan Commodity  
Inspection Act(CNS 15364)

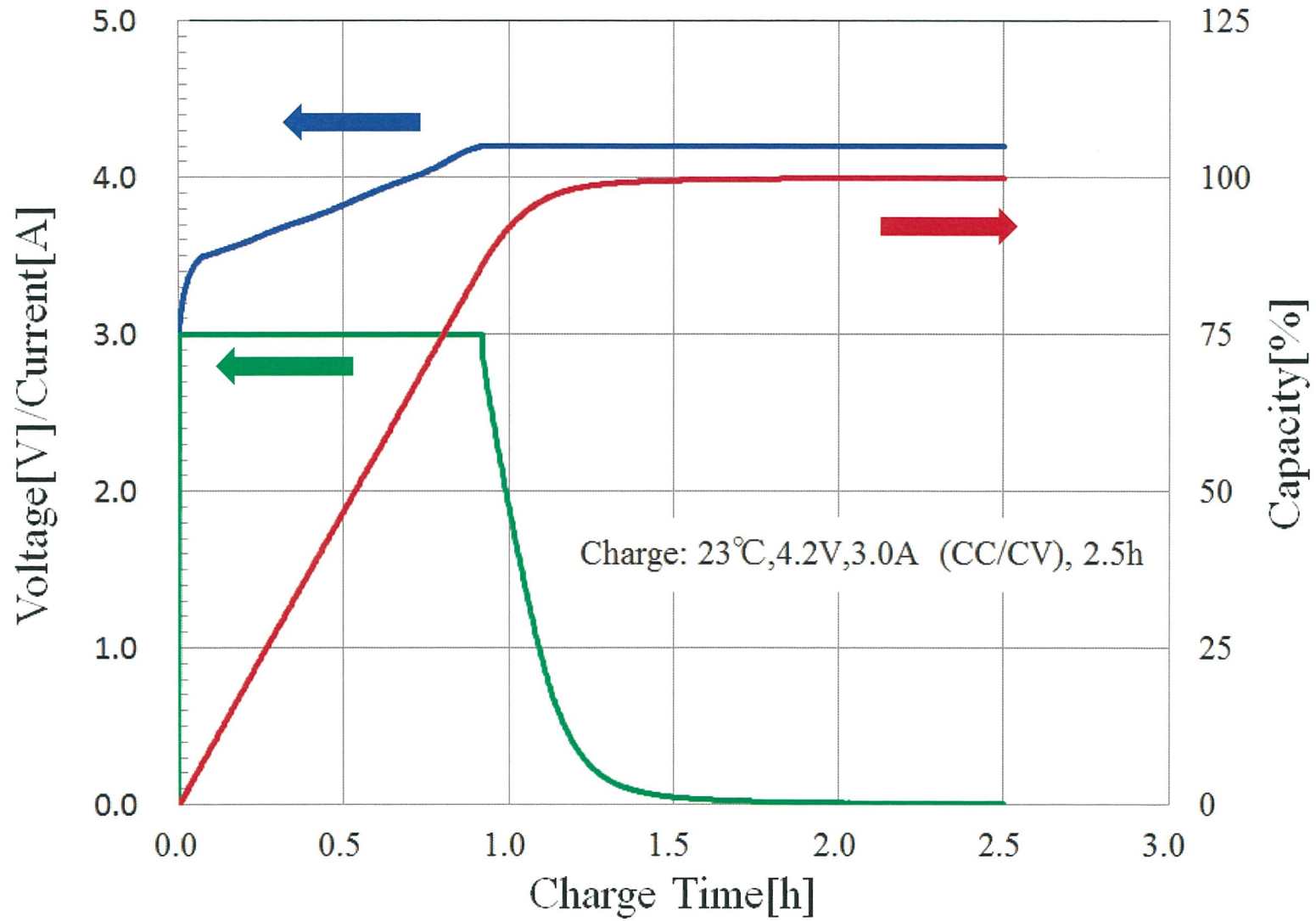
## 2. Performance

Nominal Capacity at 0.2ItA	3120mAh 11.23Wh	discharge 2.0V cut off at 23°C
Rated Capacity at 0.2ItA	3000mAh 10.8Wh	discharge 2.0V cut off at 23°C
Capacity at 1ItA (typ.)	2850mAh 10.12Wh	discharge 2.5V cut off at 23°C
Capacity at 10A (typ.)	2700mAh 9.18Wh	discharge 2.5V cut off at 23°C
Nominal Voltage	3.6V	
Internal Impedance	13mΩ Typ.	measured by AC1kHz
Cycle Performance	53% Min. of Initial capacity at 300 cycles	10A discharge

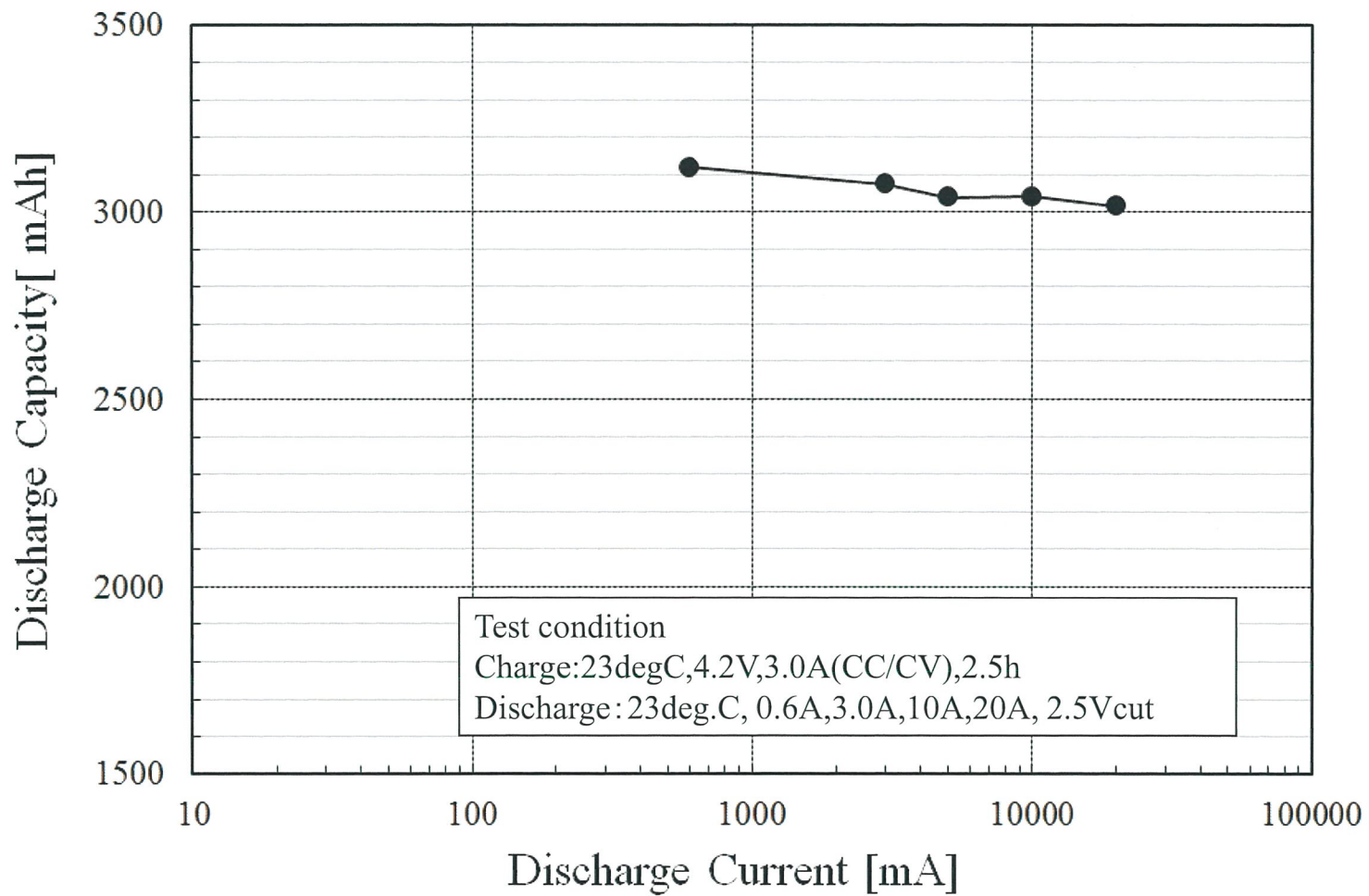
### \* Standard Charge Condition

Charge Method : constant current constant voltage  
Charge Up Voltage : 4.2± 0.05V  
Charge Current : 3.0A  
Charge Time : 2.5h  
Ambient Temperature : 23°C

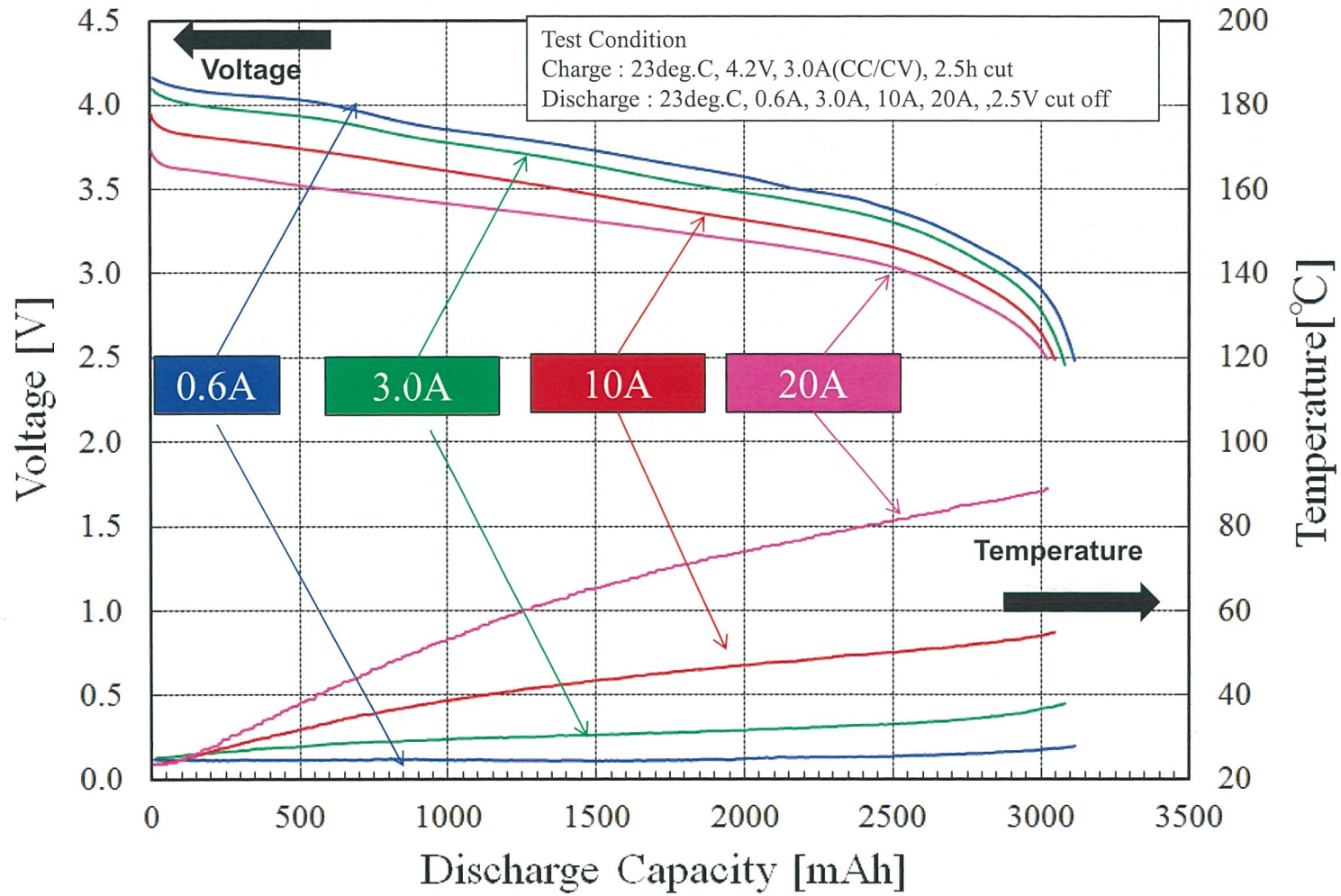
### Charge Characteristics (US18650VTC6)



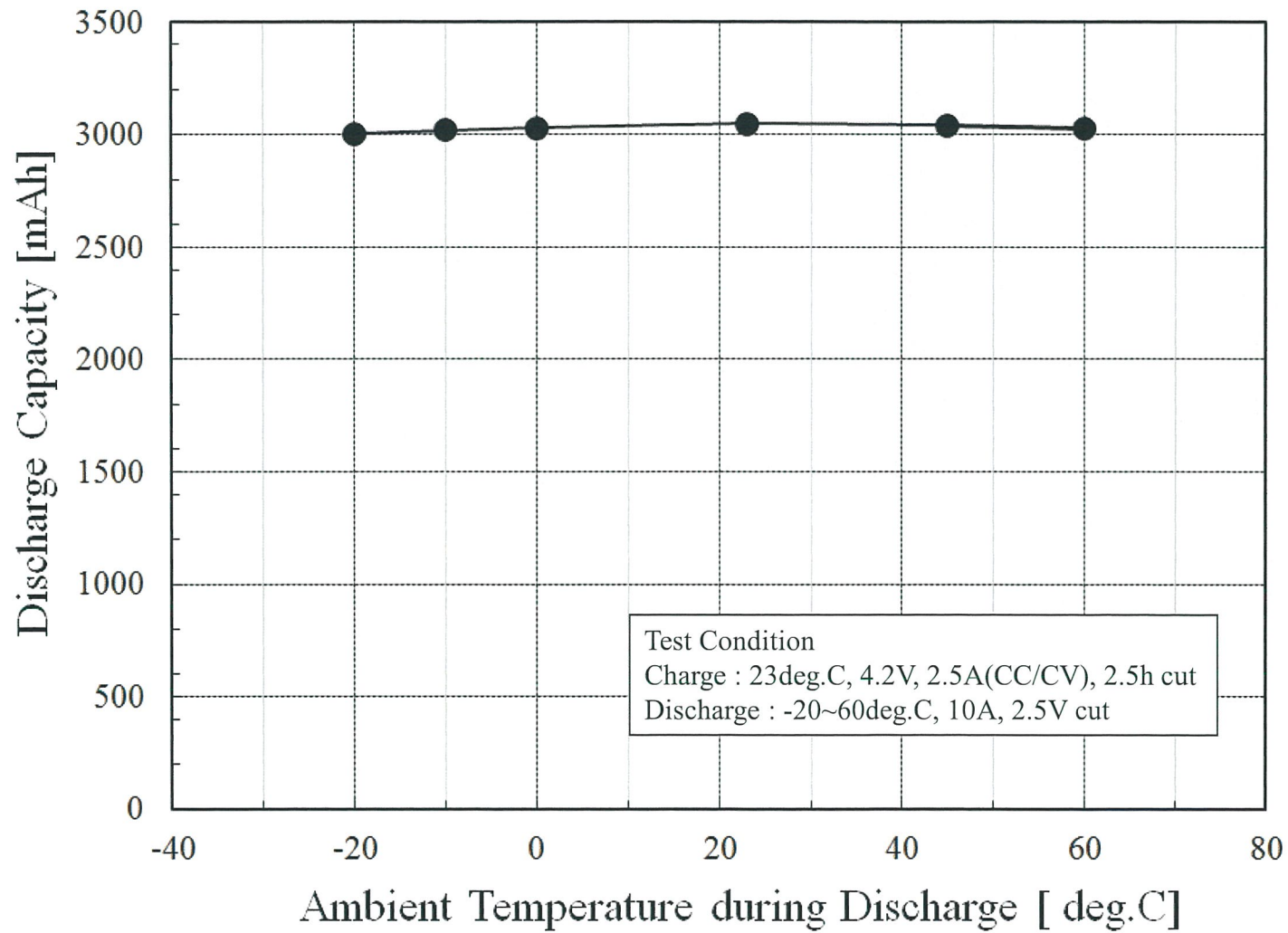
## Discharge Load Characteristics (US18650VTC6)



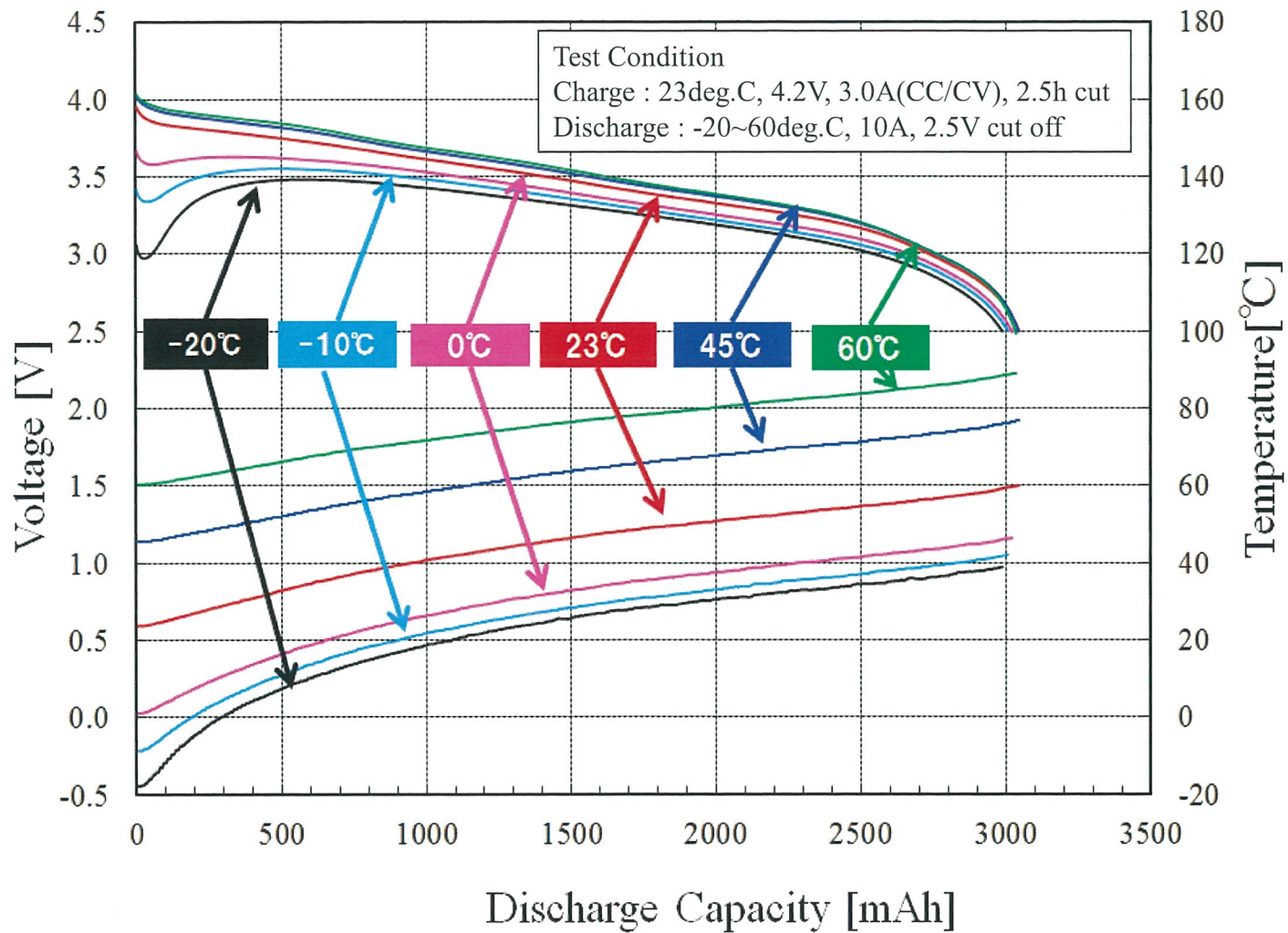
## Discharge Load Characteristics (US18650VTC6)



## Temperature Dependence of Discharge Capacity (US18650VTC6)

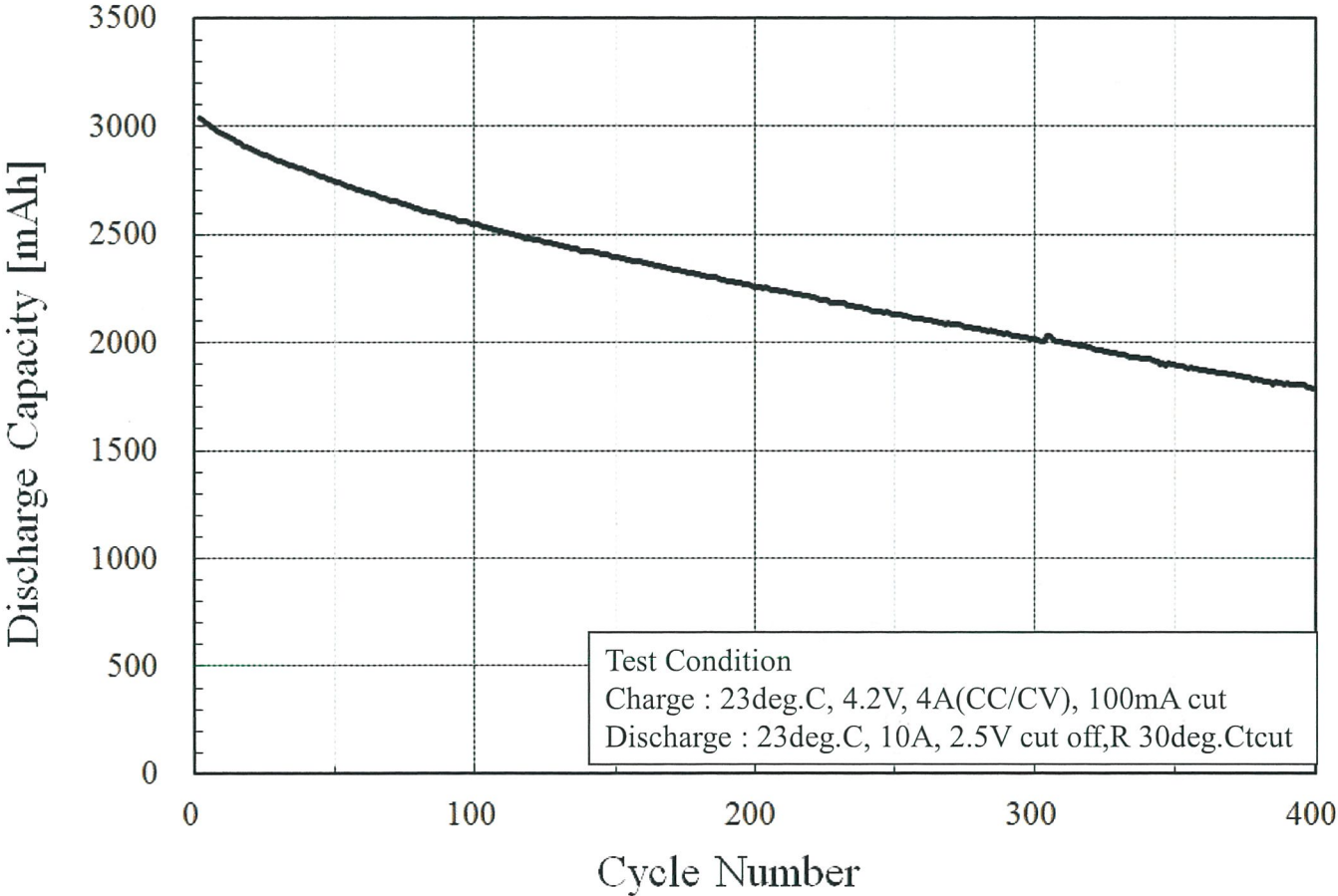


## Temperature Dependence of Discharge Curves (US18650VTC6)

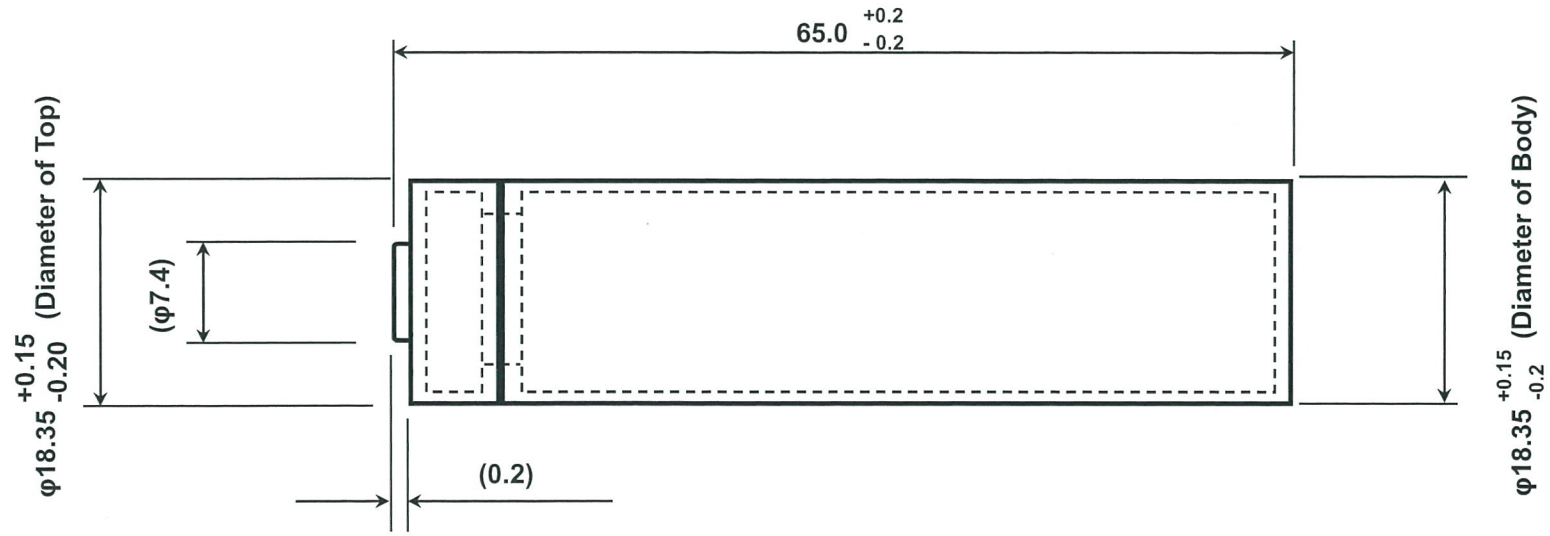


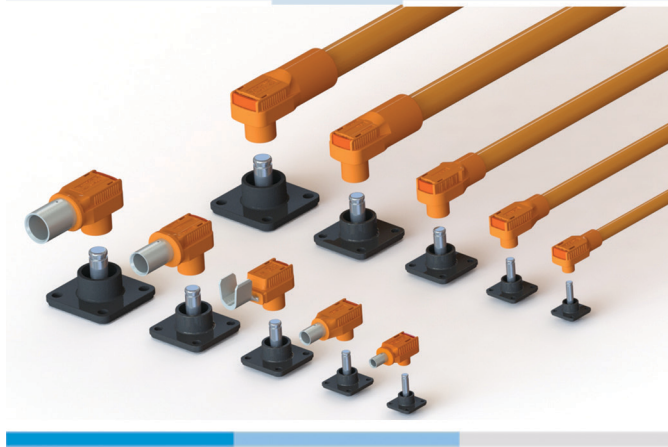
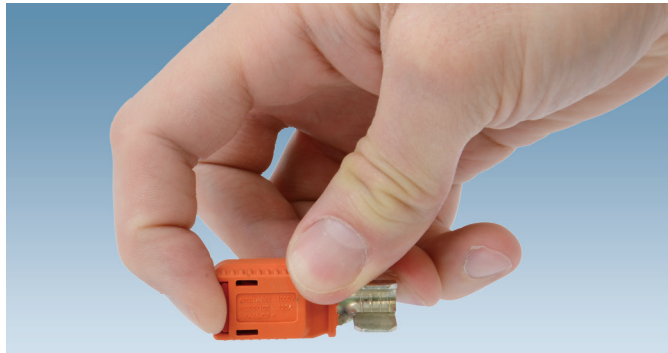


**Cycle Life Performance (US18650VTC6)**  
**10A discharge**



## Dimension with Plastic Tube: US18650VTC6





## RADLOK™

Utilizing Amphenol's latest R4 RADSOK® Technology, our RADLOK™ product line was designed to be compact and robust.

Power Interconnect products in today's market often require additional mounting hardware (e.g. washers, clamps, bolts, nuts, etc.) making them prone to costly labor expenses for installation and routine maintenance.

Paired with Amphenol's RADLOK™ PIN, the single finger operation lock feature allows end users to connect any power distribution/storage system in a quick and secure manner.

The RADLOK™ product line is the answer to industries where a custom, reliable, easy to install, rugged, and cost effective solution is required.

### Features:

- Voltage Rating: 1000V
- Current Rating: 70A - 400A
- Tool-Free Mechanical Locking
- High cycle durability (500 mating cycles)
- RoHS compliant
- Available in Black, Red, Orange (custom colors available upon request)



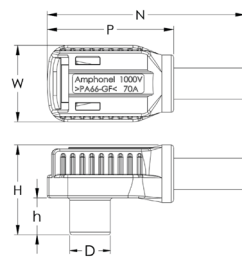
# Dimensions

## RADLOK™ Connector (Tubular Version)

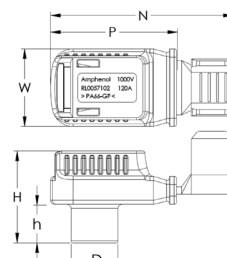
RADLOK™ Size (mm)	W	N	H	h	D	P
3.6	15.5	38.0	18.3	7.3	8.1	27.0
5.7	18.5	47.7	22.9	9.4	11.2	33.0
8.0	21.6	56.0	27.7	11.8	14.6	38.8
10.0	26.0	61.0	35.3	15.9	17.5	37.0
10.3	26.0	61.0	35.3	15.9	17.5	37.0
12.0	28.5	70.5	35.9	15.0	20.0	44.5

## RADLOK™ Connector (Stamped Version)

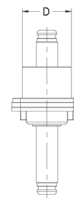
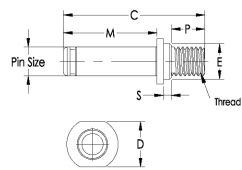
RADLOK™ Size (mm)	W	N	H	h	D	P
5.7	18.5	46.0	21.9	9.2	11.2	30.0
8.0	21.7	54.4	27.7	12.5	14.6	34.3
10.0	25.7	65.0	33.3	16.1	17.5	35.7



Tubular Lug Version



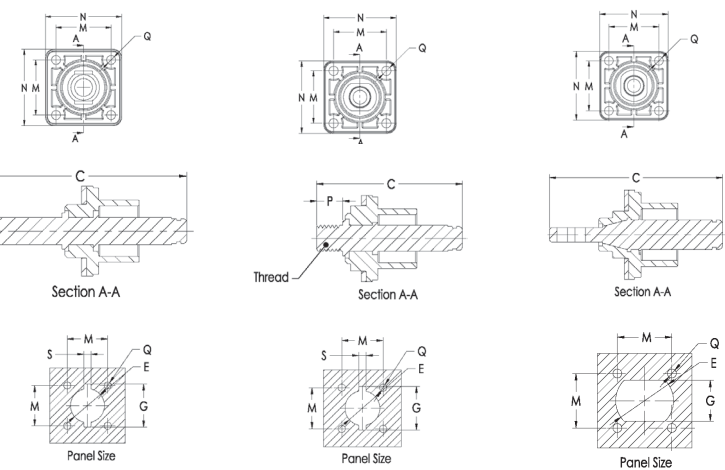
Stamped Lug Version



DC Voltage Rating	1000V
DC Current Rating	70A - 400A
Flammability Rating	UL94 V0
Operating Temperature Range	-40° C to 125° C
Mating Cycles	500



Pin Type	Pin End	RADLOK™ Pin Size (mm)	Current (A)	RADLOK™ Dimensions (mm)											
				C	D	E	G	L	M	N	P	Q	S	W	Thread
Pin	N/A	3.6	70	25.2	5.3	Ø 4.8			17.4	5	1.5	M 3 x 0.5-6g			
		5.7	120	33.9	7.8	Ø 7.0			21.1	10	1.5	M 6 x 1.0-6g			
		8	200	40.2	12.8	Ø 10.0			26.4	10	2.2	M 8 x 1.25-6g			
		10	300	47.4	12.8	Ø 12.0	N/A	N/A	32.2	N/A	10	3.2	M 10 x 1.5-6g		
		10.3	350	47.4	12.8	Ø 12.0			32.2		10	3.2	M 10 x 1.5-6g		
		12	400	47.9	15.8	Ø 14.5			32.9		10	2.8	M 12 x 1.75-6g		
Feed Thru	Thread	3.6	70	32.5	13.1	Ø 13.7	19.2		16	24.5	5	M3		M 3 x 0.5-6g	
		5.7	120	42.1	16.2	Ø 16.2	21.7		18	27	10			M 6 x 1.0-6g	
		8	200	48.4	19.6	Ø 18.2	23.7		21	30	10			M 8 x 1.25-6g	
		10	300	62	23.0	Ø 20.2	25.7	N/A	24	33	16	M4	4.2	N/A	M 8 x 1.25-6g
		10.3	350	62	23.0	Ø 20.2	25.7		24	33	16				M 10 x 1.5-6g
		12	400	65	25.5	Ø 22.2	27.7		26	36	16				M 10 x 1.5-6g
Feed Thru	Lug	3.6	70	42.9	13.1	Ø 19.6	11.6	6	16	24.5	16.5	M3		4.2	M 3 x 0.5-6g
		5.7	120	51.1	16.2	Ø 21.6	13.6	8	18	27	18.5			6.3	M 6 x 1.0-6g
		8	200	62.4	19.6	Ø 23.6	15.6	10.5	21	30	22			8.5	M 8 x 1.25-6g
		10	300	71.2	23.0	Ø 25.6	17.6	12.5	24	33	24	M4	N/A	10.5	N/A
		10.3	350	71.2	23.0	Ø 25.6	17.6	12.5	24	33	24			10.5	M 10 x 1.5-6g
		12	400	76	25.5	Ø 27.6	19.6	14.5	26	36	26			13	M 12 x 1.75-6g
Pin	Pin	3.6	70	42.8	13.1	Ø 13.7	19.2		16	24.5					
		5.7	120	51.2	16.2	Ø 16.2	21.7		18	27					
		8	200	64	19.6	Ø 18.2	23.7	N/A	21	30					
		10	300	78.5	23.0	Ø 20.2	25.7		24	33					
		10.3	350	78.5	23.0	Ø 20.2	25.7		24	33					
		12	400	80.2	25.5	Ø 22.2	27.7		26	36					



# How to Order

Product Type	Termination Type	RADSOK® **	(mm)	Lug Type	Cable Size (mm²) **	Current (A)	Length (mm)	Conn. Color	Stud Size	Pin End	Plating Type	Modification
RL	CABLE ASSEMBLY	1 RDLK + RDLK	036	3.6	N/A	10	70	*	ORANGE	N/A	N/A	N/A
		2 RDLK + POW LUG	057	5.7		16/25	90/120			M/E + STUD SIZE		
		3 RDLK + POW LUG 45°	080	8.0		35/50	150/200			M/E + STUD SIZE		
		4 RDLK + LUG TRMNL	100	10.0		50/70/95	200/250/300			M/E + STUD SIZE		
		5 RDLK + RING TRMNL	103	10.3						M/E + STUD SIZE		
		6 RDLK + BLUNT CUT	103	10.3		95	350			N/A		
		7 RDLK + STRIPPED	120	12.0		120	400			STRIPPED LENGTH (mm)		
	CONNECTOR	0 RDLK CONNECTOR			1 TUBULAR							
PIN	9 RDLK PIN			2 STAMPED								
										10 THREAD	1 Silver	* / F1
										20 LUG	2 Tin	* / F1
										30 PIN-PIN	3 Nickel	* / F1

**NOTE:**

- For all applications, care must be taken to ensure that RADLOK™ connection is protected from the transmittal of any mechanical loads induced by, but not limited to, vibration, bending, the mass of the cable, or shock loading. The cable/wiring should be secured as close to the RADLOK™ as possible. Custom mounting options and recommendations are available upon request.
- "Stud Size", M for Metric unit & E for Imperial unit. For example, M8 means Stud Size is 8mm; E3/4 means the Stud Size is 3/4 inch.

Examples:

- 10-10mm Orange RADLOK™ connector to 3/8" stud hole Lug Terminal, 10ft long 70mm² cable assembly would have part number, **RL4-100-70L3048E3/8**
- 8.0mm Black RADLOK™ connector with Tubular 50mm² cable crimp would have part number, **RL0-080-1-50BK**
- Silver plated 12.0mm RADLOK™ Feed Thru Pin would have part number, **RL9-120-101F1**

\* (Leave blank for default connector color or default pin without modification)  
 \*\* (10mm² cable is recommended for 3.6mm RADSOK®; 16mm²/25mm² cable is recommended for 5.7mm RADSOK®, ...etc)

For further information on your individual application requirements, contact: Amphenol Corporation

North America:  
 Amphenol Industrial Operations  
 180 N. Freeport Drive, Plant 4  
 Nogales, AZ 85621  
 Tel: (520) 285-5130  
 Fax: (520) 285-5134

Email: [tech@amphenol-ai.com](mailto:tech@amphenol-ai.com)

Europe:  
 Amphenol Industrial Operations Europe  
 Via Barbaiana 5  
 1-20020 Lainate (MI) Italy  
 Tel: +39 02 93254.204  
 Fax: +39 02 93254.444

Email: [info@amphenol-ai.com](mailto:info@amphenol-ai.com)

Middle East:  
 Amphenol Middle East Enterprises FZE  
 Office C-37 PO Box 21107  
 Ajman Free Zone, UAE  
 Tel: +9 716-7422494  
 Fax: +9 716-7422941

Email: [jhussain@amphenol-industrial.com](mailto:jhussain@amphenol-industrial.com)

Asia:  
 Amphenol Technology Shenzhen Ltd  
 Block 5 Fuan 2nd Industrial Park  
 Dayang Rd, Fuyong Baoan  
 Baoan, Shenzhen, China 518103  
 Tel: +86 755 2881 8389  
 Fax: +86 755 2991 8310  
 Email: [enquiry@amphenol-ai.com](mailto:enquiry@amphenol-ai.com)



Galden®



**SOLVAY**

asking more from chemistry®

# Galden® HT PFPE

Heat Transfer Fluids

**SPECIALTY  
POLYMERS**

# Galden® HT PFPE

## Heat Transfer Fluids

Solvay Specialty Polymers offers a safe Heat Transfer (HT) media for demanding applications, including:

- Semiconductor
- Chemical
- Pharmaceutical
- Vapor phase heating
- Transformer and super computer cooling
- Recirculating chillers
- Nuclear

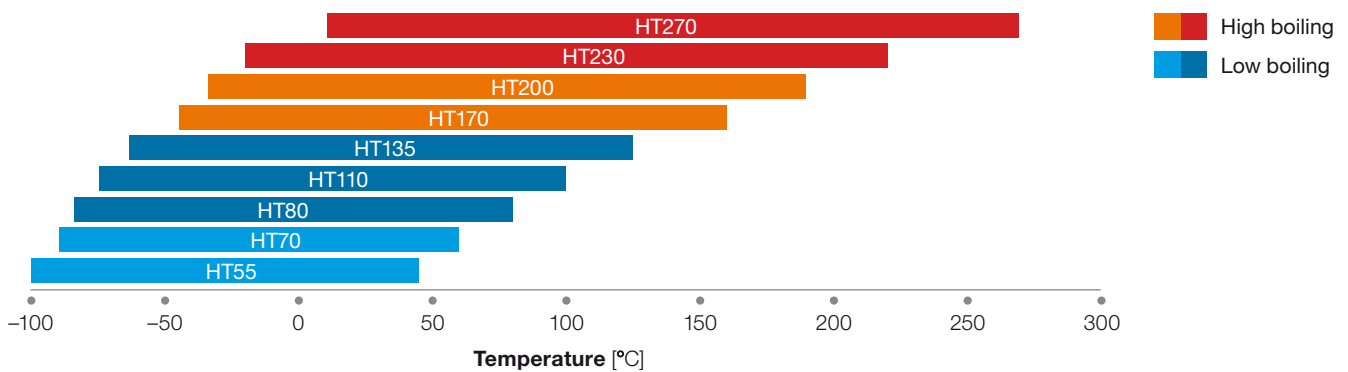
Galden® HT PFPE are inert, dielectric and high-performance heat transfer fluids with boiling points ranging from 55°C to 270°C. This range is broader than other fluorinated heat transfer fluids and enables PFPE to be used at end-use temperatures up to 290°C.

### Features

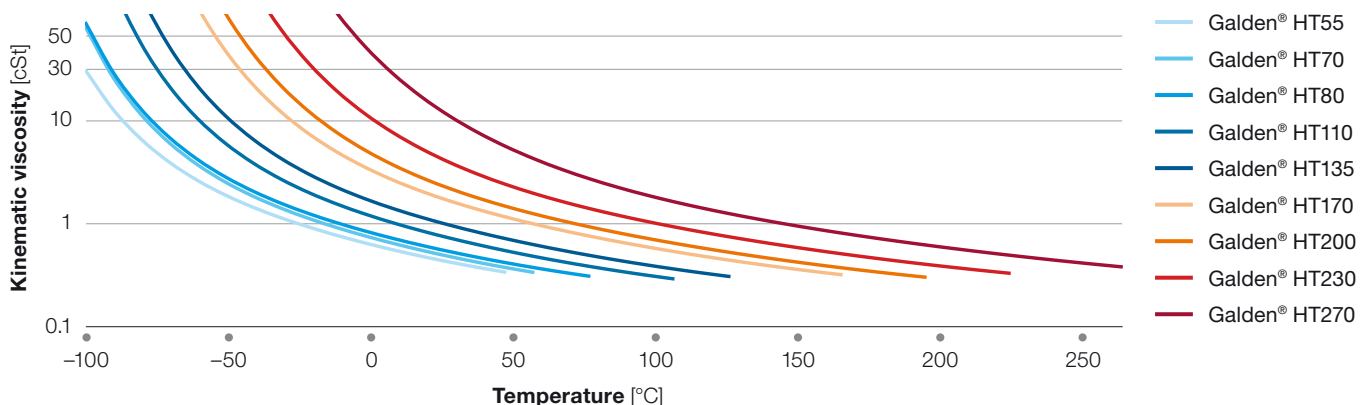
### Benefits

Excellent thermal and chemical stability	No corrosion or reaction with construction materials
Good compatibility with materials	No formation or decomposition residues No circulating pump seizure due to fluid degradation or corrosion
Good heat transfer performance	Good temperature control
Grades with wide range of boiling point	Wide choice of grades to optimize performance
High boiling point with low pour point and low viscosity	High boiling grades reduce evaporation losses without affecting performance
Low evaporation losses	Low costs of ownership
No flash or fire points No explosion hazards No toxicity No auto-ignition point	Safe to use at high temperature Enhanced safety

### Suggested operating temperature range



### Kinematic viscosity vs. temperature



Properties	Units	Low Boiling					High Boiling			
		HT55	HT70	HT80	HT110	HT135	HT170	HT200	HT230	HT270
Boiling point	°C	55	70	80	110	135	170	200	230	270
Pour point	°C	<-125	<-110	-110	-100	-100	-97	-85	-77	-66
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.65	1.68	1.69	1.71	1.72	1.77	1.79	1.82	1.85
Kinematic viscosity	cSt	0.45	0.50	0.57	0.77	1.00	1.80	2.40	4.40	14.00
Vapor pressure	torr	225	141	105	17	5.8	0.8	0.2	0.03	<10-2
Specific heat	cal/g·°C	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Heat of vaporization at boiling point	cal/g	22	17	17	17	16	16	15	15	15
Refractive index	-	1.280	1.280	1.280	1.280	1.280	1.280	1.281	1.283	1.283
Coefficient of thermal expansion	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ·°C	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011
Surface tension	dyne/cm	14	14	16	16	17	18	19	19	20
Thermal conductivity	W/m·K	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
Dielectric strength	kV (2.54 mm gap)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Dielectric constant	-	1.86	1.86	1.89	1.92	1.92	1.94	1.94	1.94	1.94
Volume resistivity	Ohm·cm	1·10 <sup>12</sup>	1·10 <sup>15</sup>	1.5·10 <sup>15</sup>	1.5·10 <sup>15</sup>	1.5·10 <sup>15</sup>	1.5·10 <sup>15</sup>	6·10 <sup>15</sup>	6·10 <sup>15</sup>	6·10 <sup>15</sup>
Average molecular weight	amu	340	410	430	580	610	760	870	1,020	1,550
Dissipation factor (1 KHz)	-	2·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>
Solubility of water	ppm(wt)	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Solubility of air	cm <sup>3</sup> gas/ 100 cm <sup>3</sup> liquid	26	26	26	26	26	26	26	26	26

All values determined at 25 °C unless otherwise specified

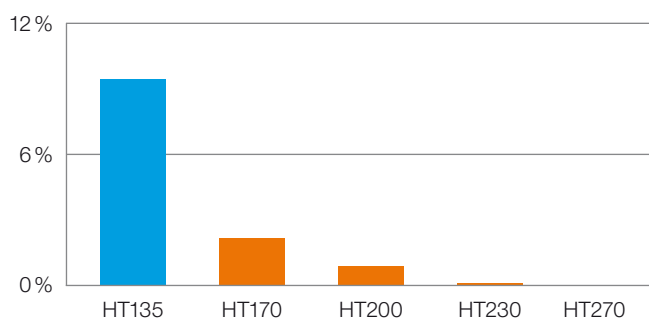
## Galden® High Boiling (HB)

Galden® HT High Boiling is a line of dielectric fluids with boiling points ranging from 170 °C to 270 °C. These high performance fluids are a family of heat transfer fluids engineered for high temperature applications. Thanks to their high boiling point, they offer a significantly lower evaporation rate than that of low boiling point fluids.

Galden® HB fluids can also be used at moderate temperatures to replace fluids with higher evaporation rates, thereby reducing evaporation losses.

### Evaporative loss comparison

According test method JIS C2101 (after 8 hrs at 40 °C)



## Compatibility

Galden® HT PFPE fluids are compatible with the following materials:

Metals	Plastics	Elastomers
AISI 316, Copper, Brass, Iron, Nickel, Aluminum, Stainless steel, Bronze	PE low density, Polypropylene, Polycarbonate, ABS copolymer, Polyphenyloxyde, PET, POM, PTFE, PVC, PMMA	Butyl rubber, NBR, EPDM, Natural rubber, Silicone rubber, Fluorosilicone

### Seals and gaskets compatibility

More than 99 % of plasticizers used in the polymer industry are hydrocarbon-based compounds. Galden® HT PFPE fluids do not contain hydrogen in their chemical structure, so no affinity with hydrocarbon-based compounds is present.

## Safety

Galden® HT PFPE fluids offer favorable environmental and worker safety properties: no toxicity, non-flammability, Zero Ozone Depletion Potential (ODP).

The chemical inertness and non-corrosivity of Galden® HT PFPE fluids make them safe for workers to handle.



## Specialty Polymers

### Worldwide Headquarters

**SpecialtyPolymers.EMEA@solvay.com**

Viale Lombardia, 20  
20021 Bollate (MI), Italy

### Americas Headquarters

**SpecialtyPolymers.Americas@solvay.com**

4500 McGinnis Ferry Road  
Alpharetta, GA 30005, USA

### Asia Headquarters

**SpecialtyPolymers.Asia@solvay.com**

No.3966 Jindu Road  
Shanghai, China 201108

[www.solvay.com](http://www.solvay.com)

Safety Data Sheets (SDS) are available by emailing us or contacting your sales representative. Always consult the appropriate SDS before using any of our products.

Neither Solvay Specialty Polymers nor any of its affiliates makes any warranty, express or implied, including merchantability or fitness for use, or accepts any liability in connection with this product, related information or its use. Some applications of which Solvay's products may be proposed to be used are regulated or restricted by applicable laws and regulations or by national or international standards and in some cases by Solvay's recommendation, including applications of food/feed, water treatment, medical, pharmaceuticals, and personal care. Only products designated as part of the Solviva® family of biomaterials may be considered as candidates for use in implantable medical devices. The user alone must finally determine suitability of any information or products for any contemplated use in compliance with applicable law, the manner of use and whether any patents are infringed. The information and the products are for use by technically skilled persons at their own discretion and risk and does not relate to the use of this product in combination with any other substance or any other process. This is not a license under any patent or other proprietary right.

All trademarks and registered trademarks are property of the companies that comprise the Solvay Group or their respective owners.  
© 2014, Solvay Specialty Polymers. All rights reserved. R 09/2014 | Version 2.2 Brochure design by ahlersheinel.com