

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Vid **Andrašić**, Ivan **Bajić**, Marko **Briški**, Ilijana **Cvitanović**, Maurizio **Dellavia**, Ivan **Gašpar**, Renato **Grdanjski**, Viktor **Harapin**, Jelena **Križaić**, Evita **Leljak**, Anđa **Logara**, , Ines **Mijić**, Iva **Mraz**, Fran **Nola**, Patrik **Perišić**, Stela **Perković**, Marta **Petrovčić**, David **Plank**, Karlo **Pongrac**, Lovro **Puček**, Nikola **Radić**, Daniel Martoba **Sadowski**, Tomo **Smital**, Matej **Šalić**, Dino **Valetić**, Jan **Vulama**, Dario **Zahatek**, Bruno **Zanetti**

**PRVI HRVATSKI TRKAČI AUTOMOBIL NA VODIK – H2CRO**

Zagreb, 2025.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u Zavodu za energetska postrojenja, energetiku i okoliš, na Katedri za energetska postrojenja i energetiku, u Laboratoriju za energetska postrojenja, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Ankice Kovač i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2024./2025.

## POPIS I OBJAŠNJENJE KRATICA KORIŠTENIH U RADU

|                 |                                                                                                     |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AFC             | Alkalni gorivni članak ( <i>engl. Alkaline Fuel Cell</i> )                                          |
| CO <sub>2</sub> | Ugljikov dioksid                                                                                    |
| EV              | Električno vozilo                                                                                   |
| EMS             | Sustav upravljanja energijom vozila ( <i>engl. Energy Managment System</i> )                        |
| FC              | Gorivni članak ( <i>engl. Fuel Cell</i> )                                                           |
| FCEV            | Električno vozilo na pogon gorivnim člancima ( <i>engl. Fuel Cell Electric Vehicle</i> )            |
| PEMFC           | Gorivni članak s membranom propusnom za protone ( <i>engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> ) |
| TEN-T           | Transeuropska prometna mreža                                                                        |

## Sadržaj rada

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. UVOD .....</b>                                      | <b>5</b>  |
| <b>2. HIPOTEZA I OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA .....</b> | <b>6</b>  |
| 2.1 Hipoteza rada .....                                   | 6         |
| 2.2 Opći ciljevi rada .....                               | 6         |
| 2.3 Specifični ciljevi rada .....                         | 6         |
| <b>3. METODE I PLAN RADA .....</b>                        | <b>7</b>  |
| 3.1 Dimenzioniranje automobila .....                      | 7         |
| 3.1.1 CFD simulacija šasije .....                         | 8         |
| 3.1.2 Svežanj gorivnih članaka .....                      | 9         |
| 3.1.3 Spremnik vodika .....                               | 10        |
| 3.1.4 Ovjes .....                                         | 10        |
| 3.1.5 Gume, diskovi i kočnice .....                       | 11        |
| 3.1.6 Električni sustav vozila .....                      | 12        |
| 3.1.7 Grijanje, hlađenje i ventilacija .....              | 13        |
| 3.1.8 Dizajn interijera .....                             | 15        |
| 3.1.9 Sigurnost .....                                     | 15        |
| <b>4. REZULTATI .....</b>                                 | <b>17</b> |
| 4.1 Dimenzioniranje automobila .....                      | 17        |
| 4.1.1 CFD simulacija šasije .....                         | 19        |
| 4.1.2 Svežanj gorivnih članaka .....                      | 23        |
| 4.1.3 Spremnik vodika .....                               | 33        |
| 4.1.4 Gume, diskovi i kočnice .....                       | 35        |
| 4.1.5 Električni sustav vozila .....                      | 36        |
| 4.1.6 Grijanje, hlađenje i ventilacija .....              | 39        |
| 4.1.7 Dizajn interijera .....                             | 40        |
| 4.1.8 Sigurnost vozila .....                              | 41        |
| <b>5. RASPRAVA .....</b>                                  | <b>43</b> |
| <b>6. ZAKLJUČCI .....</b>                                 | <b>45</b> |
| <b>ZAHVALE .....</b>                                      | <b>46</b> |
| <b>POPIS LITERATURE .....</b>                             | <b>47</b> |
| <b>SAŽETAK .....</b>                                      | <b>49</b> |
| <b>SUMMARY .....</b>                                      | <b>50</b> |
| <b>KRATKI ŽIVOTOPISI AUTORA .....</b>                     | <b>51</b> |

## 1. UVOD

Porast globalne temperature, zagađenje zraka i onečišćenje okoliša zahtijevaju hitne i odlučne korake prema razvoju čistijih i održivijih energetske rješenja. U tom kontekstu, jedno od perspektivnijih rješenja je vodik kao pogonsko gorivo za vozila. Vodik se ističe kao čist nosilac energije jer njegovim korištenjem u gorivnim člancima nema emisije štetnih plinova jer uz električnu energiju kao glavni produkt, jedini nusprodukti su toplina i voda. Osim toga, vodik ima visoki energetski kapacitet po masi, što ga čini pogodnim za primjenu u prometu, osobito za duge relacije i veća vozila [1, 2, 3]. Veliki doprinos razvoju i popularizaciji vodikovih tehnologija daje akademska zajednica, a i sve veći broj studenata diljem svijeta aktivno se uključuje u istraživanje i razvoj vozila na pogon vodikom kroz različite studentske projekte. Mnogi od njih sudjeluju u međunarodnim natjecanjima u utrivanju vodikovih automobila. Neki od primjera takvih studentskih projekata koji su bili inspiracija za izradu koncepta prvog hrvatskog studentskog trkačkog automobila na vodik su:

- Eco-Runner Team Delft - Tehničko Sveučilište Delft, Nizozemska [4].
- Waste2Race - Sveučilište u Warwicku, Ujedinjeno Kraljevstvo [5].
- Técnico Fuel Cell - Instituto Superior Técnico, Portugal [6].

Eco-Runner Team Delft je multidisciplinarni studentski tim s Tehničkog Sveučilišta Delft. Njihov predzadnji model, Eco-Runner XIII, postavio je Guinnessov svjetski rekord prešavši 2488,5 km sa samo 950 grama vodika. Tim također radi na razvoju prvog automobila na vodik koji bi vozio prometnicama ravnopravno s drugim automobilima, **Eco-Runner XIV**. Njihov rad ne samo da potiče inovacije u području održive mobilnosti, već i inspirira druge studente da se uključe u razvoj tehnologija koje doprinose smanjenju emisija i očuvanju okoliša. Projekt **Waste2Race** od strane inženjera i studenata Sveučilišta u Warwicku iz Ujedinjenog Kraljevstva, uključuje razvoj trkačkog automobila na vodik koji koristi vodik proizveden iz otpadnih voda. Studenti su izgradili vozilo koristeći reciklirane materijale. Cilj im je postaviti brzinski rekord, demonstrirajući kako se otpad može pretvoriti u vrijedne resurse za održivu mobilnost. **Técnico Fuel Cell (TFC)** je studentski tim s Instituto Superior Técnico u Lisabonu koji je razvio prvi studentski automobil na vodik u Portugalu. Njihov prototip, težak 130 kg koristi PEM gorivne članke, a predstavljen je u ožujku 2024. godine. TFC planira sudjelovati na međunarodnim natjecanjima poput Shell Eco-marathon, promovirajući održivu mobilnost i inovacije u energetske tehnologijama. Jedan od glavnih ciljeva ovoga rada je u skoroj budućnosti sudjelovati na natjecanju **Shell Eco-marathon**, jer potiče inovacije u području energetske učinkovitosti i održivog transporta te daje bitne smjernice prema konkretnim tehnološkim rješenjima. Shell Eco-marathon je jedno od **najprestižnijih globalnih natjecanja za studente** u području energetske učinkovitosti različitih vozila. Cilj natjecanja je dizajnirati, konstruirati i voziti energetski najučinkovitije vozilo. Timovi se natječu u više energetske kategorija, uključujući i vozila pogonjena vodikovim gorivnim člancima. Posebna pažnja posvećena je sigurnosti, održivosti i inovacijama, a natjecanje se održava u različitim regijama diljem svijeta. Temeljne značajke automobila i smjernice za početak izrade koncepta u ovom radu su preuzete iz Shell Eco-marathon Rulebooka-a [7].

## 2. HIPOTEZA I OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

### 2.1 Hipoteza rada

1. Primjenom vodikovih gorivnih članaka u električnim vozilima moguće je postići ekološki prihvatljiv, energetski učinkovit i tehnički održiv pogon koji može predstavljati održivu alternativu konvencionalnim vozilima na fosilna goriva.

### 2.2 Opći ciljevi rada

1. Istražiti mogućnosti primjene vodikovih gorivnih članaka u električnim vozilima.
2. Projektirati koncept električnog vozila na pogon vodikom.
3. Procijeniti tehničku izvedivost i značajke vozila, te odrediti očekivanu autonomiju, snagu, učinkovitost i sigurnosne aspekte sustava.
4. Analizirati ekološke i energetske prednosti koje će osigurati doprinos smanjenju emisije štetnih plinova.
5. Predstaviti model rješenja, odnosno izraditi konceptualni model vozila radi praktične demonstracije.

### 2.3 Specifični ciljevi rada

1. Prikazati teorijsku osnovu rada vodikovih gorivnih članaka, te objasniti elektrokemijske procese, tipove gorivnih članaka i njihove značajke primjenjive u vozilima.
2. Odrediti energetske zahtjeve električnoga vozila, te izračunati potrebnu snagu i energiju za pogon vozila određene mase i namjene.
3. Dimenzionirati ključne komponente sustava što uključuje gorivne članke, spremnik za vodik, elektromotor i sustav za upravljanje energijom.
4. Razraditi koncept konstrukcijskog rješenja vozila uključujući raspored komponenata, sigurnosne elemente i ergonomiju.
5. Izraditi 3D model vozila kao praktičnu potvrdu tehničke izvedivosti ideje.
6. Izvršiti simulacije rada vozila, odnosno testirati značajke (domet, ubrzanje, potrošnja vodika) pomoću odgovarajućih softverskih alata.

### 3. METODE I PLAN RADA

**Metode** koje su se koristile u ovome radu su:

1. Metoda deskripcije pomoću koje su opisani temeljni pojmovi u sklopu ovoga rada.
2. Metoda modeliranja električnog automobila s pogonom na vodikove gorivne članke.

**Plan rada** prema kojemu je izrađen ovaj rad je kako slijedi:

1. Odabir teme

Ovaj rad izrađen je u okviru dva kolegija: Vodik i gorivni članci i Nove tehnologije u energetici, koji su kolegiji završne godine diplomskoga studija procesno-energetskoga smjera. Stoga je ideja bila odabrati temu koja bi uključivala primjenu gotovo svih stečenih znanja tijekom studija.

2. Istraživanje

Nakon odabira teme uslijedile su razmjene mišljenja na temelju istraženih mogućih rješenja.

3. Postavljanje hipoteze

Na temelju istraživanja postavljena je hipoteza, te su definirani opći i specifični ciljevi.

4. Uspostava timova i podjela rada

Nakon postavljene hipoteze i definiranih općih i specifičnih ciljeva, grupa je podijeljena u male timove. Svakom timu dodijeljen je zadatak kao podcjelina jedinstvenoga energetskoga sustava električnoga automobila s pogonom na vodikove gorivne članke, nakon čega je uslijedilo detaljno istraživanje specifičnih sustava.

5. Praćenje napretka i pisanje rada

Na tjednoj bazi prezentirani su ostvareni rezultati, vođene su konstruktivne diskusije, predlagale su se izmjene i poboljšanja, nakon čega je uslijedilo pisanje rada i završno usuglašavanje finalne verzije rada.

#### 3.1 Dimenzioniranje automobila

Smjernice za dimenzioniranje automobila s pogonom na vodikove gorivne članke uzete su iz službenog pravilnika „Shell Eco marathon“ natjecanja [7]. To je natjecanje za sveučilišne timove koje se sastoji od dvije kategorije automobila: prototipnih i urbanih. Fokus ovoga rada je urbani automobil s pogonom na vodikove gorivne članke. Pravila natjecanja određuju ključne smjernice kao što su: 4 kotača koja moraju biti u konstantnom dodiru s podlogom, zabranjeni aerodinamički dodaci koji mijenjaju oblik s obzirom na brzinu vožnje, obavezan razmak prednjeg dijela auta i vozačevih stopala od 100 mm (sigurnosna mjera), mogućnost pozicioniranja svih sustava isključivo iza vozačevog kokpita, maksimalne i minimalne dimenzije automobila i mnoge druge. Dizajn karoserije započeo je razmatranjem dimenzija automobila: visina 1000 - 1300mm, širina 1200 – 1300 mm i duljina 2200 – 3500 mm, te aerodinamike odnosno utjecaja otpora zraka koji se povećava proporcionalno brzini vožnje. Nakon informiranja o bazičnim pojmovima vezanih za aerodinamiku započelo je istraživanje o primjeni toga znanja u automobilskoj industriji. Spojler, difuzor, usisi, bočni pragovi i mnogi drugi dijelovi automobila mogu se prilagoditi (a spojler i difuzor zato su i nastali) kako bi poboljšali aerodinamiku automobila ili generirali veću potisnu silu koja bi držala automobil priljubljenim uz tlo u zavojima i pri velikim brzinama. Također,

bitno je prilagoditi i kuteve prednjeg i stražnjeg stakla pošto oni direktno utječu na tip strujanja zraka preko automobila. Zatim je određeno nekoliko aspekata važnih za **modeliranje karoserije automobila**:

1. Prednji kraj automobila treba biti oblog oblika bez oštih kuteva i ravnih površina.
2. Stražnji kraj automobila izgledat će kao rep broda (tzv boat tail design).
3. Difuzor treba biti pod kutem od 5 do 12 stupnjeva i treba zauzimati otprilike trećinu duljine automobila.
4. Prednje staklo treba biti pod kutem od 60 do 65 stupnjeva kako bi se izbjeglo stvaranje turbulentnog strujanja (koje započinje na otprilike 80 stupnjeva) i postiglo dovoljno dobru vidljivost, dok stražnje staklo treba biti polegnutije i dulje kako bi se osiguralo bolje strujanje zraka.
5. Preko bubnja kotača mogu se postaviti plastike koje će pomoći nesmetanom strujanju zraka uz bok vozila dok će se hlađenje diskova pri kočenju riješiti rupama.

### 3.1.1 CFD simulacija šasije

Aerodinamika predstavlja ključan aspekt u razvoju energetski učinkovitih cestovnih vozila. Budući da se otpor zraka povećava s kvadratom brzine, njegov udio u ukupnoj potrošnji energije postaje dominantan već pri umjerenim brzinama. Zbog toga je optimizacija vanjske geometrije vozila, s ciljem smanjenja aerodinamičkog otpora, od presudne važnosti za postizanje bolje energetske učinkovitosti. Tijekom kretanja vozila, dolazi do narušavanja stacionarne mase zraka u njegovoj okolini, pri čemu nastaju različite aerodinamičke sile koje djeluju na tijelo vozila. Te sile obuhvaćaju:

- **Silu otpora zraka (drag)** koja djeluje suprotno smjeru gibanja vozila i direktno utječe na potrošnju energije.
- **Silu uzgona (lift)** koja djeluje okomito na smjer gibanja i može utjecati na stabilnost vozila.
- **Bočnu silu** koja postaje značajna pri djelovanju bočnog vjetra ili tijekom zakretanja vozila.

Aerodinamički otpor definira se pomoću koeficijenta otpora zraka  $C_d$ , koji predstavlja mjeru učinkovitosti geometrije vozila. Niže vrijednosti koeficijenta znače manji otpor i bolju učinkovitost. Kod koncepata razvijenih za natjecanja poput Shell Eco-Marathon, ciljane vrijednosti koeficijenta otpora su ispod 0,30, dok najnaprednija vozila postižu vrijednosti i ispod 0,15. Pored toga, vozilo podliježe i sili uzgona, čiji je učinak posebno važan kod niskih brzina i lakih vozila. U sloju zraka neposredno uz površinu vozila formira se tzv. granični sloj gdje viskozne sile trenja izazivaju značajne brzinske gradijente. Ove pojave rezultiraju viskoznim otporom. Zbog promjene geometrije karoserije može doći i do separacije toka (odvajanja strujanja zraka od površine) što stvara turbulentno područje niskoga tlaka iza vozila (budni tok). Taj fenomen dodatno povećava otpor, koji zajedno s viskoznim otporom, čini ukupni aerodinamički otpor. Za procjenu aerodinamičkih značajki vozila provedena je **numerička simulacija korištenjem računalnog alata SimScale** temeljenog na **metodi konačnih volumena (FVM)**. Geometrija vozila izrađena je u **CAD softveru SolidWorks**, a zatim izvezena u **.STEP formatu za CFD analizu**. Definirani **uvjeti simulacije** bili su sljedeći:

- Sredina: stacionarni zrak (gustoća 1,225 kg/m<sup>3</sup>).
- Ulazna brzina strujanja: 8 m/s.
- Granični uvjeti: velocity inlet (ulaz), pressure outlet (izlaz), no-slip wall (površina vozila), moving floor (simulacija kretanja podloge).
- Model turbulencije: k- $\omega$  SST, zbog dobre ravnoteže između točnosti i računalne učinkovitosti.
- Mreža: lokalno rafinirana oko karoserije i u području budnog toka.
- Kriterij konvergencije: rezidual ispod 1e-4 i stabilizacija sila.

Dobiveni rezultati pokazali su koeficijent otpora zraka  $C_d \approx 0,29$ , što predstavlja zadovoljavajuću vrijednost s obzirom na namjenu vozila. Također, koeficijent uzgona iznosio je  $C_L \approx 0,10$ , što je prihvatljivo za vozila niskih operativnih brzina. Vizualizacija linija strujanja i distribucije tlaka ukazala je na nekoliko područja s mogućnošću poboljšanja:

- Pojava separacije toka iza prednjih kotača.
- Visoki gradijent tlaka na stražnjem dijelu karoserije.
- Lokalna područja povećanog viskoznog otpora ispod donje površine vozila.

Ovi rezultati pružaju čvrstu osnovu za daljnju optimizaciju oblika karoserije kroz iterativni proces poboljšanja te predstavljaju smjernice za fizičku izradu prototipa.

### 3.1.2 Svežanj gorivnih članaka

Gorivni članci (*engl. Fuel Cells*) su elektrokemijski uređaji u kojima se elektrokemijskom reakcijom vodika iz spremnika i kisika iz zraka (ili spremnika) proizvodi električna energija kao glavni produkt, uz vodu i toplinu kao jedine nus produkte. Povezivanjem više gorivnih članaka u seriju dobiva se svežanj gorivnih članaka (*engl. Fuel Cell Stack*). Ovisno o tipu elektrolita, gorivni članci dijele se na one s tekućim elektrolitom (npr. alkalni gorivni članci) i na one s krutim elektrolitom (npr. gorivni članci s membranom propusnom za protone) [8]. Definiranje zahtjeva za gorivni članak (FC) temeljio se na pravilima natjecanja Eco-Shell Marathon [7] i postavljenim ciljevima energetske učinkovitosti. Na toj osnovi određene su ključne funkcionalne i tehničke značajke, odnosno osnovni parametri koje sustav mora zadovoljiti. Nakon toga krenulo se s odabirom odgovarajuće tehnologije gorivnoga članka. Od različitih tehnologija opisanih u literaturi odabrana je ona koja najbolje odgovara prethodno definiranim zahtjevima, što je u ovom slučaju PEM gorivni članak. Sljedeći korak je bio procjena potrebne snage za pogon vozila. U tu svrhu identificirane su glavne sile otpora, poput otpora kotrljanja i aerodinamičkog otpora, kao i gubici unutar sustava, oslanjajući se pritom na dostupnu literaturu i izvještaje drugih sudionika Eco-Shell natjecanja. Na temelju toga razvijene su jednadžbe za izračun snage potrebne za svladavanje otpora te za ubrzavanje mase vozila. Kako bi se dobila brza procjena, izrađeni su pojednostavljeni scenariji ubrzanja temeljeni na tipičnom ponašanju vozila, pri čemu se pretpostavilo konstantno ubrzanje umjesto izrade složenog dinamičkog modela. Potrebne vrijednosti brzine i ubrzanja procijenjene su na temelju uvida iz izvještaja prethodnih timova. Za potrebe proračuna svi parametri preuzeti su iz literature te su procijenjeni kako bi se odredila gornja granica potrebne snage. U fazi obrade podataka korišten je **program Digitzelt** za izdvajanje podataka o stazi i vremenu, dok je

**Excel** poslužio za dodatnu obradu i izračune snage. Na temelju dobivenih rezultata provedena je kritička evaluacija potrebnog izlaza snage gorivnoga članka. Potom su analizirana moguća rješenja i konfiguracije sustava gorivnih članaka te uspoređena s rješenjima drugih timova. U završnoj fazi identificirani su potencijalno komercijalno dostupni gorivni članci te je procijenjena njihova usklađenost s definiranim zahtjevima snage i tehničkim ograničenjima.

### 3.1.3 Spremnik vodika

Najrašireniji oblik pohrane vodika je komprimirani vodik ( $\text{CGH}_2$ ) pod tlakom od 350 ili 700 bara u kompozitnim spremnicima tipa III i IV, izrađenima od karbonskih vlakana s metalnim ili plastičnim oblogama [9]. Ova tehnologija omogućuje brzo punjenje i relativno jednostavnu integraciju. Ostale metode uključuju tekući vodik ( $\text{LH}_2$ ), koji zahtijeva ekstremno niske temperature ( $\sim 20 \text{ K}$ ) [10], metalne hidride koji kemijski vežu vodik, te napredne materijale poput karbonskih nanostrukture koji su još u fazi istraživanja [11]. Sigurnost pohrane vodika regulirana je standardima poput GTR 13 i ISO 19881, koji definiraju maksimalne stope propuštanja, otpornost spremnika na tlak i visoke temperature, kao i zaštitu od vodikove krstosti [12]. U kontekstu studentskih natjecanja poput Shell Eco-marathon [7], tehnički zahtjevi dodatno su precizirani. Sva vozila koja koriste vodik moraju imati jedan komprimirani spremnik odobren od strane organizatora. Spremnik mora biti sigurno pričvršćen i lako dostupan za inspekciju. Obvezna je ugradnja regulatora tlaka, sigurnosnog ventila, manometra te ventila za gašenje u slučaju nužde. Također, vozila moraju imati detektor vodika koji automatski prekida napajanje u slučaju curenja, dok karoserija mora osigurati prirodnu ventilaciju s minimalnim otvorima od  $500 \text{ mm}^2$  u prostoru vozača i tehničkom odjeljku. Potrošnja vodika mjeri se preciznim protokomjerom, koji mora biti kalibriran, fizički zaštićen i jasno vidljiv s vanjske strane vozila. Dopusšteno je korištenje superkondenzatora kao pomoćnih izvor energije, pod uvjetom da su električki izolirani i imaju definirane točke za mjerenje napona i energije [13]. Pohrana plinovitog vodika u **spremnici** tipa III osigurava ravnotežu između snage i težine što čini taj tip prikladnim za automobilsku industriju. Jedna od njegovih glavnih značajki je relativno lagana konstrukcija te dobra otpornost na koroziju i lom. To pridonosi izdržljivosti i dugovječnosti spremnika kao i manjoj vjerojatnosti za teže kvarove. Unutarnji sloj spremnika mora se sastojati od metalne obloge koja služi kao barijera za zadržavanje visokotlačnog plina. Na tu oblogu se dodaje kompozitna obloga izrađena od epoksidne smole ili staklenih vlakana osiguravajući relativno malu masu spremnika. Nadalje, bitno je odabrati i dobre ljepljive veze između metalne i kompozitne obloge za osiguranje nepropusnog sloja između njih. Svi tehnički i sigurnosni zahtjevi osiguravaju pouzdanu i kontroliranu primjenu vodika u eksperimentalnim vozilima te doprinose razvoju inovativnih rješenja u području energetske učinkovitosti i ekološki prihvatljivog prometa.

### 3.1.4 Ovjes

S obzirom na to da je glavni kriterij ocjenjivanja u prethodno opisanom ciljanom natjecanju energetska učinkovitost, svaki gram mase i svaki dodatni mehanički element mora se pažljivo procijeniti u odnosu na njegov doprinos ukupnim značajkama vozila. U sklopu ovoga rada, odlučeno je optimizirati konstrukciju vozila uklanjanjem suspenzijskog sustava, nakon što su razmotrene sve relevantne tehničke i natjecateljske okolnosti. U početnoj fazi razvoja vozila, razmatrana je mogućnost primjene

*trailing arm* suspenzije, odnosno sustava kod kojeg se kotač nalazi na kraju ručice pričvršćene za šasiju ispred kotača. Ovaj sustav omogućava gibanje kotača unatrag i unaprijed, smanjujući bočne pomake, te se često koristi na stražnjim osovima zbog jednostavne izvedbe i relativno male mase. Bio je privlačan izbor zbog svoje jednostavnosti, kompaktnosti i kompatibilnosti s laganim konceptom vozila [14]. Međutim, daljnjom tehničkom analizom i istraživanjem utvrđeno je da bi i takav tip suspenzije predstavljao nepotrebno dodatno opterećenje šasiji, što bi nepovoljno utjecalo na ukupnu masu vozila. Budući da je masa vozila izravno povezana s njegovom potrošnjom energije, svaki dodatni kilogram koji ne doprinosi funkcionalnosti predstavlja neželjeni gubitak u energetske učinkovitosti. U kontekstu natjecanja kao što je Shell Eco-marathon, gdje je ključni cilj prijeći što veću udaljenost uz minimalnu potrošnju energije, svaki gram ima značajnu ulogu. Dodatnu potvrdu ovoj odluci pruža uvid u rad studenata talijanskog sveučilišta Politecnico di Milano, School of Industrial and Information Engineering, u sklopu diplomskog rada iz strojarstva. U navedenom radu također je odlučeno ne koristiti suspenzijski sustav, s ciljem smanjenja mase i poboljšanja energetske učinkovitosti, što dodatno podupire ispravnost donesene tehničke odluke [15]. Dodatni argument za izostavljanje suspenzije proizlazi iz konfiguracije staze na kojoj se natjecanje održava. Staza je većinom ravna, s vrlo malo oštih zavoja i bez značajnih neravnina. Zbog toga nije bilo potrebe za sustavom koji bi inače imao funkciju ublažavanja udaraca i vibracija. Vozilo se također kreće pri relativno malim brzinama, čime dodatno opada potreba za aktivnom suspenzijom. Kako bi se osigurala potrebna mehanička otpornost u nedostatku suspenzije, odlučeno je dodatno ojačati konstrukciju šasije primjenom laganih, ali čvrstih materijala (kao što su aluminijske legure ili kompoziti). Time je šasija konstruirana tako da izdrži sva očekivana mehanička opterećenja i vibracije tijekom vožnje. Uz navedeno, preporučena je i primjena guma Michelin 95/80 R16, koje su specijalizirane za vozila u Shell Eco-marathon natjecanju. Riječ je o gumama s izuzetno niskim otporom kotrljanja koje pomažu u očuvanju energije tijekom kretanja vozila. Osim što su energetske učinkovite, ove gume omogućuju vozilu dovoljno stabilnosti čak i bez pomoći suspenzijskog sustava, što ih čini optimalnim izborom u danim uvjetima [16].

### 3.1.5 Gume, diskovi i kočnice

Prilikom odabira kočionog sustava, felgi i guma, naglasak je na sigurnosti, funkcionalnosti i poštivanju strogih tehničkih pravila. Ovdje se obrađuje konkretan plan odabira i integracije guma, felgi i kočnica za urbano vozilo, s obzirom na zadane specifikacije iz pravilnika Shell Eco-marathon 2025 [7]. Prva tehnička odluka u procesu razvoja vozila odnosi se na izbor guma i felgi. Pravilnik vrlo jasno definira minimalne zahtjeve koji uključuju širinu gume od najmanje 80 milimetara, minimalnu dubinu gaznog sloja od jednog milimetra i promjer felge između 14 i 18 inča. Također, sve gume na istoj osovini moraju biti identične kako bi se osigurala pravilna raspodjela sile i vozna stabilnost. U skladu s tim zahtjevima, kao optimalan izbor odabrane su Michelin gume dimenzija 95/80 R16. Ove gume imaju širinu od 95 mm, što pruža dovoljno kontakta s podlogom za sigurnu vožnju, dok profil 80 omogućava dovoljno amortizacije i udobnosti, što je poprilično bitno gledajući da vozilo nema ovjes. Promjer od 16 inča se nalazi unutar dozvoljenih granica i omogućuje korištenje standardnih laganih aluminijskih felgi, koje su važne za smanjenje ukupne mase vozila i smanjenje momenta inercije kotača. Uloga felgi u ovoj konfiguraciji nije samo nosiva jer one moraju omogućiti i čvrsto, precizno i lagano spajanje s gumama

te kočnicama. Idealno je koristiti felge izrađene od aluminijske legure zbog odličnog omjera čvrstoće i mase. Osim što smanjuju ukupnu masu vozila, ovakve felge poboljšavaju reaktivnost pri ubrzavanju i kočenju, što je posebno važno kod vozila male snage kakva se koriste u ovom natjecanju. Kočioni sustav vozila mora zadovoljiti vrlo stroge sigurnosne kriterije definirane člankom 51. službenog pravilnika [7]. Prema pravilima, vozilo mora biti opremljeno s četiri disk-kočnice, jednom na svakom kotaču, a površina svakog diska mora iznositi najmanje 2500 mm<sup>2</sup> uz minimalnu debljinu od 3 mm. Sustav mora biti hidraulički, što znači da se tlak stvara mehaničkim tlakom na glavnu kočionu pedal, odakle se hidrauličkom tekućinom tlak prenosi na čeljusti koje stežu diskove. Pritom nije dopušteno korištenje električnih ili žičanih sustava kao prijenosne veze između pedale i cilindra. Time se osigurava direktna, pouzdana i sigurnosno provjerena mehanička povezanost. Važna tehnička komponenta ovog sustava je glavni cilindar koji može biti jedan s dvije zasebne hidraulične grane (dual circuit) ili dva odvojena cilindra, čime se osigurava sigurnost u slučaju djelomičnog kvara. Prema pravilima, svaka osovina mora imati neovisnu kočnicu ili sustav mora biti povezan križno (prednji desni i stražnji lijevi kotač, te obrnuto), kako bi se omogućilo ravnomjerno zaustavljanje i održala stabilnost vozila tijekom kočenja. Balans između kočionih krugova je ključan za zaustavljanje vozila u ravnoj liniji, bez zanošenja. Dodatno, vozilo mora imati integriranu parkirnu kočnicu koja je mehanički odvojena od glavnog kočionog sustava. Parkirna kočnica mora biti postavljena tako da je dostupna vozaču u sjedećem položaju, s vezanim pojasom i mora biti sposobna zadržati vozilo na nagibu od 20%. To u praksi znači da se mora koristiti čvrsta i pouzdana mehanička blokada, najčešće ručna poluga s vlastitim sustavom za blokiranje stražnjih kotača. Važan dio projektiranja kočionog sustava je osiguravanje da sila kočenja bude proporcionalna masi i brzini vozila. Budući da Shell Eco-marathon vozila obično ne prelaze brzinu od 40 km/h, a maksimalna masa bez vozača je ograničena na 225 kg, hidraulički diskovi navedene minimalne površine i debljine su više nego dovoljni za učinkovito zaustavljanje. Osim što moraju omogućiti potpuno zaustavljanje na nagibu od 20%, kočnice moraju biti i dovoljno robusne za više uzastopnih kočenja bez značajnog smanjenja učinkovitosti, što se najčešće postiže dobrim hlađenjem diskova i optimizacijom koeficijenta trenja na kliznim površinama. U konačnici, gume, felge i kočnice moraju biti pažljivo usklađene jer čine integrirani dio dinamičkog ponašanja vozila.

### 3.1.6 Električni sustav vozila

Električni sustav vozila u okviru natjecanja Shell Eco-marathon (SEM) mora biti koncipiran u skladu s nizom precizno definiranih pravila, s naglaskom na sigurnost, izolaciju pogonskih i pomoćnih krugova te ograničenja kapaciteta i napona. U nastavku su prikazani ključni zahtjevi pravilnika [7] koji relevantni za električni sustav vozila u klasi Urban Concept s vodikovim pogonom.

1. **Baterija i BMS:** Mogu se koristiti samo litij-ionske baterije ( $\leq 1000$  Wh ukupnog kapaciteta). Svaka baterija mora imati uključen BMS koji omogućuje balansiranje i štiti od prenaponskog pražnjenja/prekoračenja struje. BMS mora automatski izolirati bateriju pri otkrivanju bilo kakve neočekivane vrijednosti (npr. prenapon ili prekoračenja struje). Ako se koriste litij – ionske baterije, mora biti smještena u metalno kućište ili u vatrootpornu vreću za punjenje, koja sprječava širenje eventualnog požara.

2. **Naponska ograničenja:** Maksimalni dopušteni napon u bilo kojem dijelu sustava mora iznositi 60 VDC. Pomoćna baterija ne smije se koristiti za pogon motora, ona služi isključivo za pomoćne sustave (ECO, osjetnike, ventilatore, itd.).
3. **Položaj i zaštita baterije:** Baterija mora biti montirana izvan vozačkog prostora, iza čvrste zaštitne pregrade (*bulkhead*). Nije dopušteno korištenje elastične trake za učvršćivanje baterije. Ona mora biti mehanički čvrsto fiksirana. Zabranjena je montaža baterije neposredno uz spremnik vodika.
4. **Sigurnosni elementi i prekidači:** Vozilo mora imati dva prekidača za isključivanje u slučaju nužde (E-stop), jedan unutar i jedan izvan vozila. Pritiskom na E-stop mora se istovremeno deaktivirati elektromotor i zatvoriti elektromagnetski ventil koji prekida dovod vodika. Potrebna je i dodatna sigurnosna komponenta koja prekida pogon ako vozač izgubi kontrolu.
5. **Osjetnici za detekciju vodika:** U prostoru svežnja gorivnih članaka obavezan je osjetnik za vodik, podešen da aktivira sigurnosne mjere pri detekciji donje eksplozivne vrijednosti. Aktivacija osjetnika mora automatski zatvoriti ventil za vodik i prekinuti napajanje motora.
6. **Električna zaštita:** Na svim pozitivnim vodovima mora biti postavljen osigurač dimenzioniran u skladu s maksimalnom strujom sustava. Komponente moraju biti električno izolirane od šasije vozila radi sprječavanja neželjenih uzemljenja. Sva ožičenja moraju biti jasno označena, čvrsto učvršćena i zaštićena od mehaničkih oštećenja ili vibracija.
7. **Dokumentacija:** Prilikom tehničke inspekcije tim mora predložiti:
  - Električnu shemu vozila (pogon i pomoćni krug).
  - Specifikacije baterije i BMS-a.
  - Lokacije osigurača, prekidača i sigurnosnih sklopova.

Dizajn počinje definiranjem svih električnih potrošača (pogon, gorivni članak, ventilatori, svjetla, ventilacija, osjetnici i sl.) prema očekivanom profilu vožnje. Na temelju procjene povlačenja struje i potrošnje energije određuje se potrebni kapacitet baterije (uz poštovanje gornje granice od 1000 Wh) i veličina žica. Paralelno se razmatraju sigurnosni zahtjevi poput uvođenja redundantnih signalnih puteva ili rezervnih uređaja (dva osjetnika vodika, dupli prekidači kod kritičnih linija). Za svaki potrošač biraju se odgovarajući moduli (baterije). Zaštitni element (osigurač) dimenzionira se prema maksimalnoj struji kruga. Odabiru se konektori i žice koji imaju potrebnu strujnu i naponsku izdržljivost i certificiranje za vozila (npr. IP-ocjena izolacije). Električni krugovi se dijele na pogonsku stranu (svežanj gorivnih članaka, pogonski motor) i pomoćnu (upravljanje, osjetnici, rasvjeta). Fizička razdvojenost može biti izvedena različitim bojama izolacije ili zasebnim razdjelnim blokovima. Time se smanjuje mogućnost preklopa kvara iz jednog kruga u drugi. Pomoćna baterija može pokretati sustav pokretanja i elektroniku gorivnoga članka, ali mora biti električki izolirana od izlaza iz gorivnoga članka tako da energija iz baterije ne utječe na pogon vozila. Kabeli od pomoćne baterije moraju biti jasno odvojeni od pogonskih krugova.

### 3.1.7 Grijanje, hlađenje i ventilacija

Sustav grijanja i hlađenja kod konvencionalnih motora danas je u potpunosti razvijen i relativno jednostavan, dok se s pojavom električnih vozila otvaraju nova pitanja i on dobiva ponovno na važnosti

za istraživanje i razvoj sustava i tehnologija. Glavna razlika tih dvaju sustava je da konvencionalni motori imaju na raspolaganju praktički neograničeni izvor topline (motor s unutarnjim izgaranjem) koji je također i vrlo pouzdan te se za hlađenje koristio klasičan rashladni krug s fokusom na "hladnjaku" u prednjem dijelu vozila. Rashladni krug sastoji se od minimalno četiri komponente, kompresora, kondenzatora ("hladnjaka"), ekspanzijskog ventila i isparivača [17]. Krug hlađenje je prema tome primarno i intenzivno hladio motor, odnosno vodu za hlađenje motora, a sekundarno kondicionirao zrak preko drugog isparivača u kabini. Električna vozila, bilo na baterije bilo na vodik, za razliku od konvencionalnih nemaju na raspolaganju takve toplinske izvore, no ipak postoji dio topline koji se razvija te ju je bitno odvesti kako bi sustavi radili optimalno, ali i kako bi im se sačuvao životni vijek. Zbog toga se često sustav grijanja i hlađenja kabinskog prostora povezuje, kao i ranije, sa sustavom hlađenja izvora/spremnika, odnosno postaje dio sustava upravljanja energijom vozila (*engl. Energy Management System - EMS*). Zbog samog natjecanja, sustav grijanja i hlađenja je ipak pojednostavljen, kako bi se smanjila kompleksnost sustava, ali i ukupna masa. Prema pravilima natjecanja, preporuka je dobro ventilirati vozilo, s obzirom da u ovoj kategoriji vozilo prelazi i do 1000 km te su mogući različiti vremenski uvjeti tijekom perioda vožnje. Osim same ventilacije poželjno je osigurati i hlađenje kabinskoga prostora [7]. Treba uzeti u obzir, da ventilacija prostora nije samo nužna zbog toplinske ugodnosti vozača, što je bitno zbog bolje koncentracije i postizanja ukupnih rezultata, već i zbog mogućnosti pojave zamagljenja i kondenzata na staklima čime se ugrožava sigurnost tijekom vožnje. Za proračun ventilacije nužna je procjena toplinskih dobitaka, odnosno topline koja se generira kroz oplošje ili unutar vozila kako bi ista mogla biti odvedena odgovarajućom ventilacijom prostora. U slučaju da dođe do curenja vodika unutar kabine, ventilacijski sustav omogućuje brzo i učinkovito raspršivanje vodika ispod granice zapaljivosti. Vodik je plin izuzetno male mase, pa se vrlo brzo širi kroz zrak i brzo se izdvaja iz prostora. Zbog toga je ventilacija kabine projektirana tako da svjež zrak ulazi s prednje strane vozila, prolazi kroz kabinu i izlazi kroz izlazne otvore na stražnjoj strani ili preko sustava klimatizacije. Ako detektori unutar kabine otkriju prisutnost vodika, automatski se aktivira pojačana ventilacija koja dodatno smanjuje rizik. Dakle, ključni cilj je osigurati brzu i učinkovitu izmjenu zraka kako bi se spriječilo nakupljanje vodika ili drugih plinova, ali i kondenzacija na staklima. U kabini automobila ventilacijski sustav mora osigurati dovoljan broj izmjena zraka u kratkom vremenskom razdoblju kako bi se spriječilo nakupljanje vodika i osigurala udobnost. Detektori vodika su ključni sigurnosni elementi. Njihova je uloga otkrivanje i mjerenje koncentracije vodika u zraku ili u zatvorenim sustavima, uz kontinuirano nadgledanje kritičnih dijelova sustava, poput spremnika vodika, cjevovoda, ventila i svežnja gorivnih članaka, te automatsko aktiviranje sigurnosnih mjera u slučaju curenja. Kako bi se zadovoljili svi traženi zahtjevi postavljeni na sustav grijanja, hlađenja i ventilacije, potrebno je postaviti temeljni proračun koji osigurava kvalitetnu ventilaciju za dovod svježeg zraka vozaču kako slijedi:

- Uvjet svježeg zraka temeljni je uvjet postavljanja proračuna ventilacije te ne smije biti zanemaren u niti jednoj kasnijoj bilanci.
- U uvjetima ekstremno niskih vanjskih temperatura ( $-10/+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), nužno je imati mogućnost smanjenja ventilacije na higijenski minimum, kako ne bi došlo do pothlađenja samog vozača tijekom duge vožnje, dok je tijekom najviših temperatura nužno osigurati što veći protok zraka

kako bi se odvelo što više topline, budući da temperatura kabinskog prostora može narasti i do 45 °C bez adekvatne ventilacije.

- Potrebno je provesti proračun i za sve druge temperature vanjskog okoliša (5-15 °C), kako bi se dobio bolji uvid u kritične točke moguće pojave zamagljenja i kondenzacije na vjetrobranskom staklu.
- Nakon dobivenih rezultata potrebnih protoka zraka za različite vanjske uvjete, potrebno je dimenzionirati otvore i njihov položaj na vozilu te nakon toga po potrebi odabrati i prikladan ventilator.
- Potrebno je osmisлити sigurnosne sustave koji bi osigurali da je koncentracija vodika u zraku unutar kabine unutar dopuštenih granica.
- Nakon provedenih prethodnih faza, potrebno je odlučiti mogu li se u svakom trenutku postići zadovoljavajući uvjeti ugodnosti i sigurnosti u kabini te je li potrebno uključiti pomoćne sustave grijanja ili hlađenja.

### 3.1.8 Dizajn interijera

Odabir materijala za interijer fokusirao se na one koji se već koriste u proizvodnim ili konceptnim vozilima. Dizajn sjedala konceptualno je izrađen od kompozita od lanenih vlakana, tkanine od recikliranog PET-a (rPET), ugljično-neutralnog Alcantara® materijala. Raspored sjedenja osmišljen je prema ergonomskim načelima koja su uobičajena u sportskim vozilima, a oblik sjedala inspiriran je trkaćim sjedalima. Za informacijski sustav odabran je centralizirani, minimalistički zaslon osjetljiv na dodir koji bi radio na platformi otvorenog koda (poput Android Automotive OS) i prikazivao bi podatke u stvarnom vremenu o potrošnji vodika i statusu punjenja, uključujući i podatke o uštedi CO<sub>2</sub> u usporedbi s vozilima na fosilna goriva.

### 3.1.9 Sigurnost

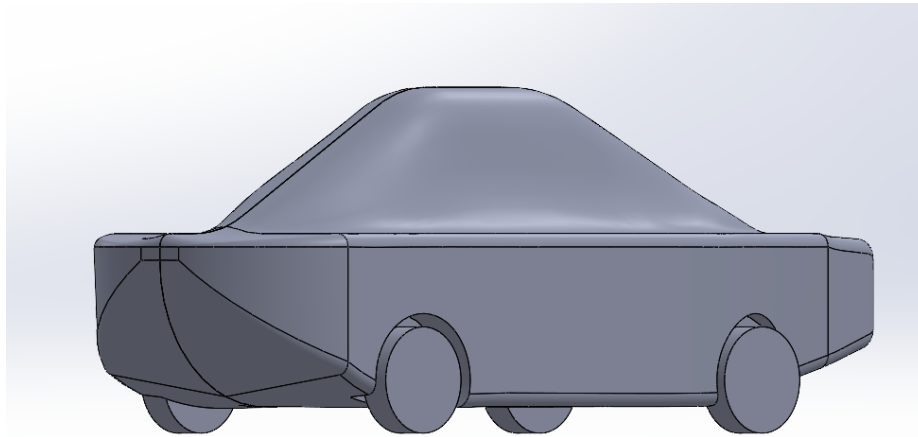
Poštujući zahtjeve sigurnosti ciljanog natjecanja, spremnici vodika moraju biti smješteni u posebno dizajniranom odjeljku vozila koji je fizički odvojen od vozačkog prostora i električnih komponenti. Ovaj prostor mora biti opremljen pasivnom ventilacijom s minimalnom površinom otvora od 5 cm<sup>2</sup> na vrhu energetskog i vozačkog odjeljka. Ventilacijski otvori osiguravaju da se vodik, koji je lakši od zraka, ne nakuplja u slučaju manjih curenja, već se prirodno raspršuje u okoliš. Za izradu odjeljka preporučuje se uporaba materijala poput ugljičnih vlakana ili epoksidnih smola kako bi se izbjeglo stvaranje iskri uslijed trenja. Tijekom noći, svi spremnici vodika moraju biti predani organizatorima natjecanja na čuvanje. Ova mjera sprječava rizik od neovlaštenog pristupa ili oštećenja tijekom perioda bez nadzora. Tijekom transporta, spremnici moraju imati zaštitni poklopac i biti zaštićeni od udaraca u odgovarajućim transportnim kutijama [7, 18]. Svi spojevi u vodikovom sustavu moraju biti izvedeni pomoću visokokvalitetnih nehrđajućih čeličnih spojnica s hermetičkim brtvama, prema standardima poput ISO 15869 [7, 19]. Zabranjena je uporaba PTFE trake na navojima zbog rizika od začepljenja mjerača protoka i mogućeg curenja. Nadalje, sigurnosni sustav mora sadržavati katalitički osjetnik za detekciju vodika postavljen u energetskom odjeljku i kalibriran na 25% donje eksplozivne granice (LEL) [7]. U

slučaju detekcije curenja, osjetnik automatski aktivira sigurnosni ventil i alarmira vozača. Prije svakog natjecanja potrebno je provesti test nepropusnosti sustava pod tlakom koristeći certificirane metode i opremu za detekciju curenja [19]. Punjenje spremnika vodika izvodi se isključivo dvostupanjskim regulatorom kako bi se izbjegao prekomjerni tlak u sustavu. Automatski sigurnosni ventil (solenoidni ventil) zaustavlja protok vodika u slučaju detekcije curenja ili aktivacije vanjskog prekidača. Ventil mora biti tipa 'normally closed', što znači da se u slučaju nestanka napajanja automatski zatvara, čime se dodatno povećava sigurnost. Vanjski prekidač za isključenje u slučaju nužde mora biti jasno označen i lako dostupan s vanjske strane vozila [7, 20]. Za električne sustave, predviđena je fizička izolacija, odnosno automatsko odvajanje strujnog kruga u slučaju kvara, kako bi se spriječio požar ili električni udar [7]. Svi električni vodovi moraju biti zaštićeni osiguračima i izolirani od metalnih dijelova vozila. Protupožarna pregrada između energetskog i vozačkog odjeljka mora biti izrađena od materijala koji može izdržati izloženost otvorenom plamenu najmanje 15 sekundi, čime se vozaču omogućuje sigurna evakuacija u slučaju požara [7, 21]. Cijevi i ventili moraju biti certificirani za rad pod tlakom većim od 1,5 bar, u skladu s relevantnim standardima (npr. ISO 15869) [7, 19]. Plastične push-fit spojnice dopuštene se isključivo u niskotlačnim dijelovima sustava. Tijekom rada s vodikom obavezno je korištenje zaštitnih naočala i kemijski otpornih rukavica [7, 18]. Svaki tim mora imati detektor curenja vodika i rezervne dijelove za hitne popravke, a svi članovi tima moraju biti upoznati s postupcima za brzu intervenciju u slučaju incidenta. Vozilo mora imati 5-točkasti sigurnosni pojas pričvršćen na okvir, a vozač mora moći napustiti vozilo u roku od 10 sekundi [7]. Prostor za vozača mora biti ergonomski dizajniran, a sve komponente koje bi mogle predstavljati opasnost u slučaju sudara moraju biti zaštićene ili izolirane.

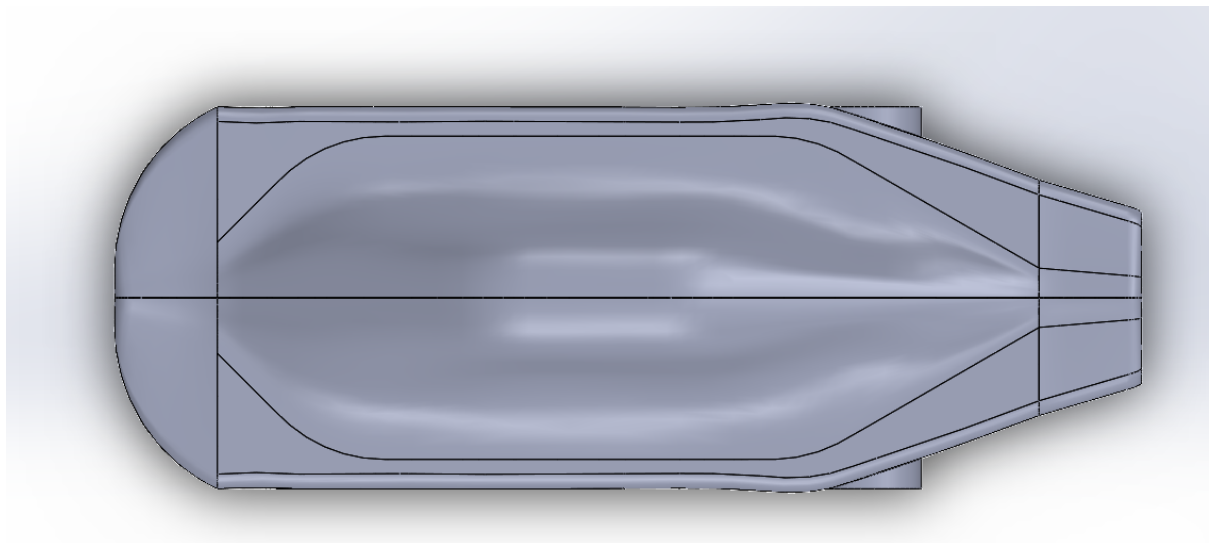
## 4. REZULTATI

### 4.1 Dimenzioniranje automobila

Na slikama 1 i 2 vidljivi su različiti pogledi na prvu iteraciju karoserije trkaćeg automobila s pogonom na vodikove gorivne članke.



**Slika 1.** Pogled 1



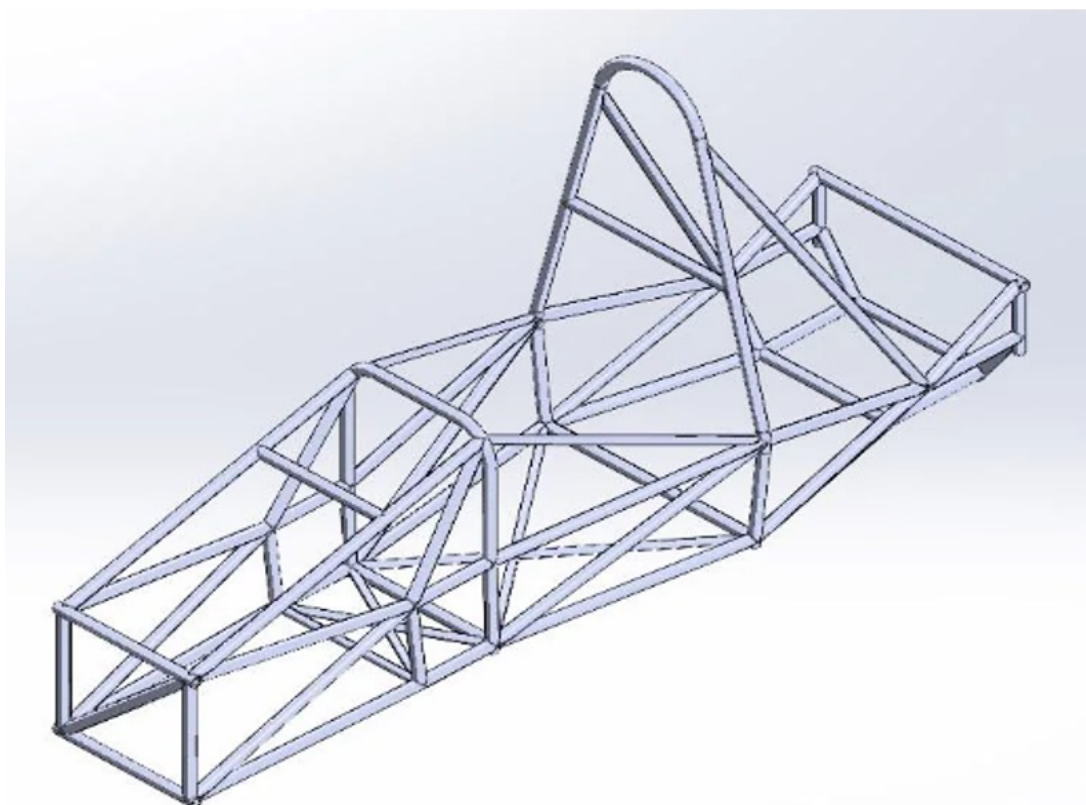
**Slika 2.** Pogled 2

Početno oblikovanje karoserije zadovoljilo je zadane početne uvjete, te predstavlja temelj za daljnji razvoj, te CFD simulaciju i određivanje približne količine prostora unutar karoserije za pozicioniranje svih podsustave automobila. Točnije, bitna je veličina prostora iza pozicije predviđene za sjedenje vozača jer je, prateći pravila i smjernice natjecanja [7], to prostor u koji je potrebno smjestiti sve podsustave (električni motor, svežanj gorivnih članaka, prijenos snage, sustav hlađenja i drugo). Opcije tipa šasije opcije „monocoque chassis“(slika 3) i „space frame chassis“ (slika 4).



**Slika 3.** Monokokna šasija

S obzirom da je za izrađivanje monokokne šasije potrebna skupa tehnologija i skup materijal (karbonska vlakna), u prvoj iteraciji konstruirat će se šasija s prostornim okvirom koja je masivnija, ali će uz korektno konstruiranje pružiti dovoljno strukturne čvrstoće.



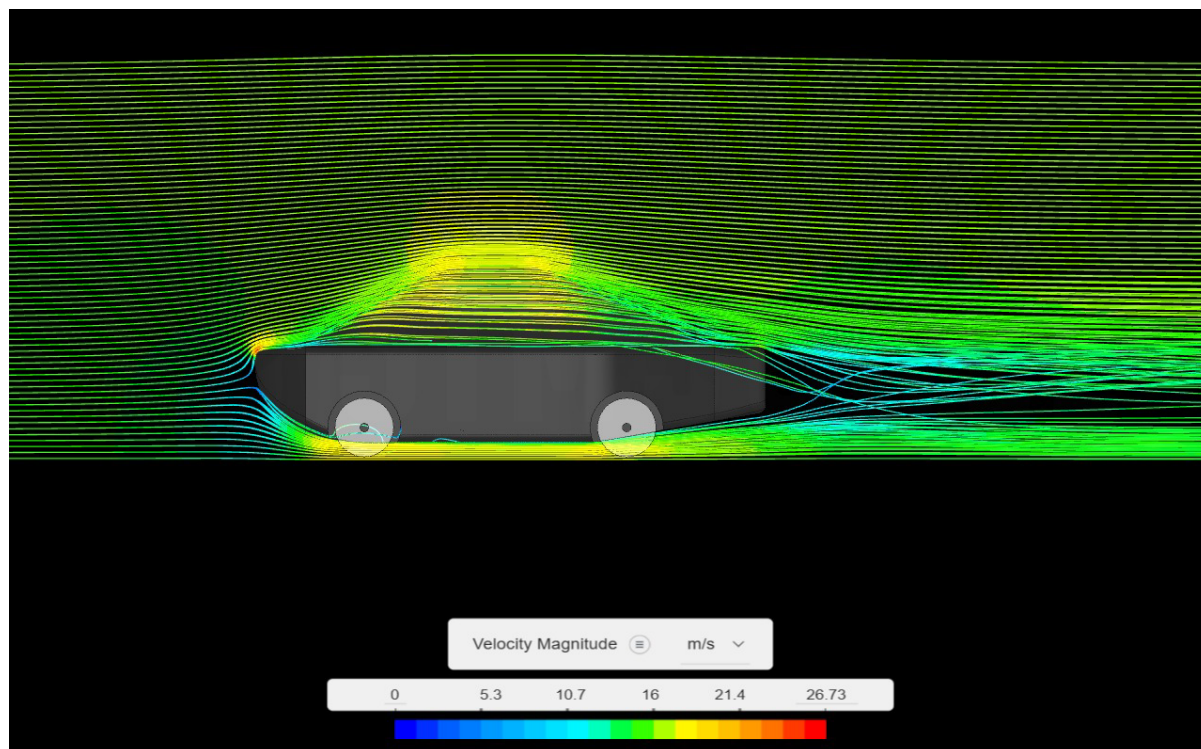
**Slika 4.** Šasija s prostornim okvirom

Proces konstruiranja šasije započet će nakon nekoliko iteracija aerodinamičke prilagodbe karoserije i provođenja CFD simulacija što će rezultirati konačnim oblikom karoserije na kojem će se odrediti optimalne lokacije pričvršćivanja karoserije na šasiju.

#### 4.1.1 CFD simulacija šasije

##### Analiza strujanja – strujnice i brzinsko polje

Na slici 5 vidljive su linije strujanja koje prikazuju kretanje zraka oko šasije automobila.

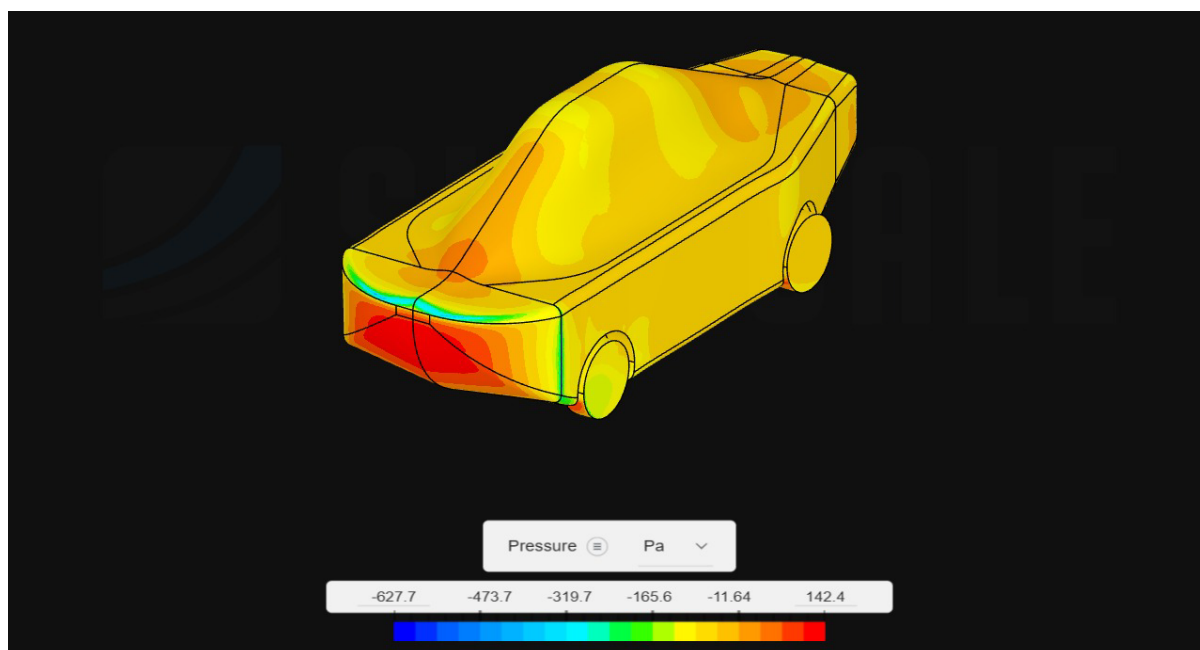


**Slika 5.** Kretanje zraka oko šasije automobila

Ova vizualizacija koristi spektar boja za prikaz iznosa **brzine zraka** u m/s, gdje plava boja označava niske brzine, a crvena najviše. Ispred vozila dolazi do stagnacije strujanja, gdje se brzina snižava gotovo na nulu, dok se iznad krova vozila strujanje ubrzava. To je **rezultat geometrije krova** koji stvara **Venturijev efekt**, smanjujući tlak iznad automobila, što potencijalno može stvoriti aerodinamički uzgon. Straga se javlja zračni vrtlog, područje niskih brzina i visokog otpora, što ukazuje na mogućnosti poboljšanja stražnje konture automobila radi smanjenja otpora (tzv. wake region).

##### Površinski tlak na vozilu

**Slika 6** pokazuje raspodjelu tlaka na površini automobila.

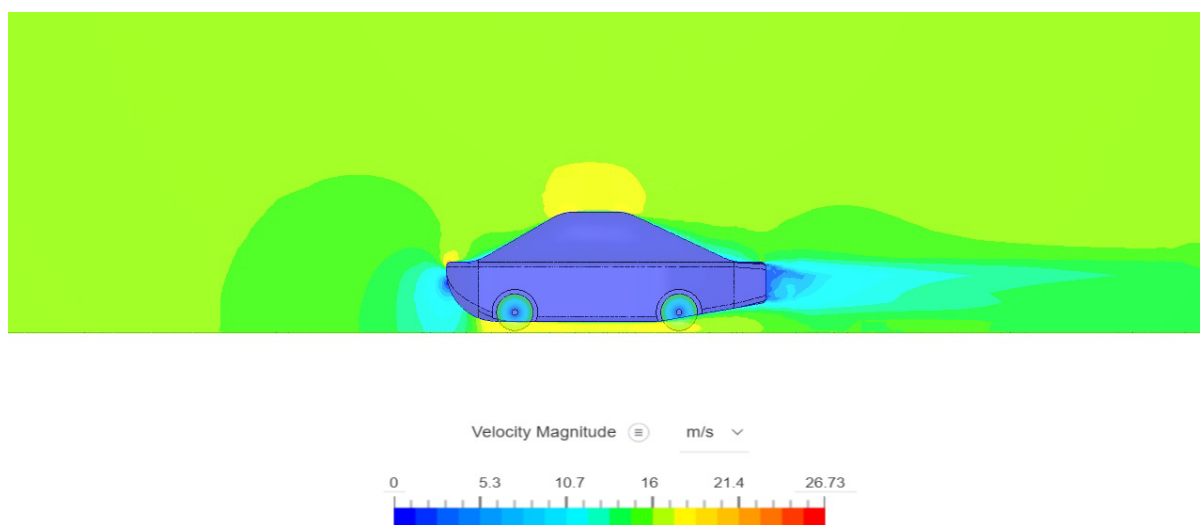


**Slika 6.** Raspodjela tlaka na površini automobila

Crvena i narančasta označavaju visoke tlakove, plava i zelena niske. Najveći tlak se nalazi na prednjoj površini automobila gdje dolazi do direktnog sudara zraka s automobilom, dok se na krovu i straga stvaraju područja podtlaka. Ovakva raspodjela tlaka uzrokuje ne samo otpor već i djelovanje sile koje mogu destabilizirati automobil pri većim brzinama. Poboljšanim dizajnom automobila moguće je optimizirati te tlakove kako bi se smanjile negativne aerodinamičke sile i poboljšala stabilnost i potrošnja energije.

### 2D Prikaz brzinskog polja

Na slici 7 prikazan je dvodimenzionalni presjek brzinskog polja kroz sredinu automobila. Jasno se vide promjene u brzini zraka u okolini automobila.



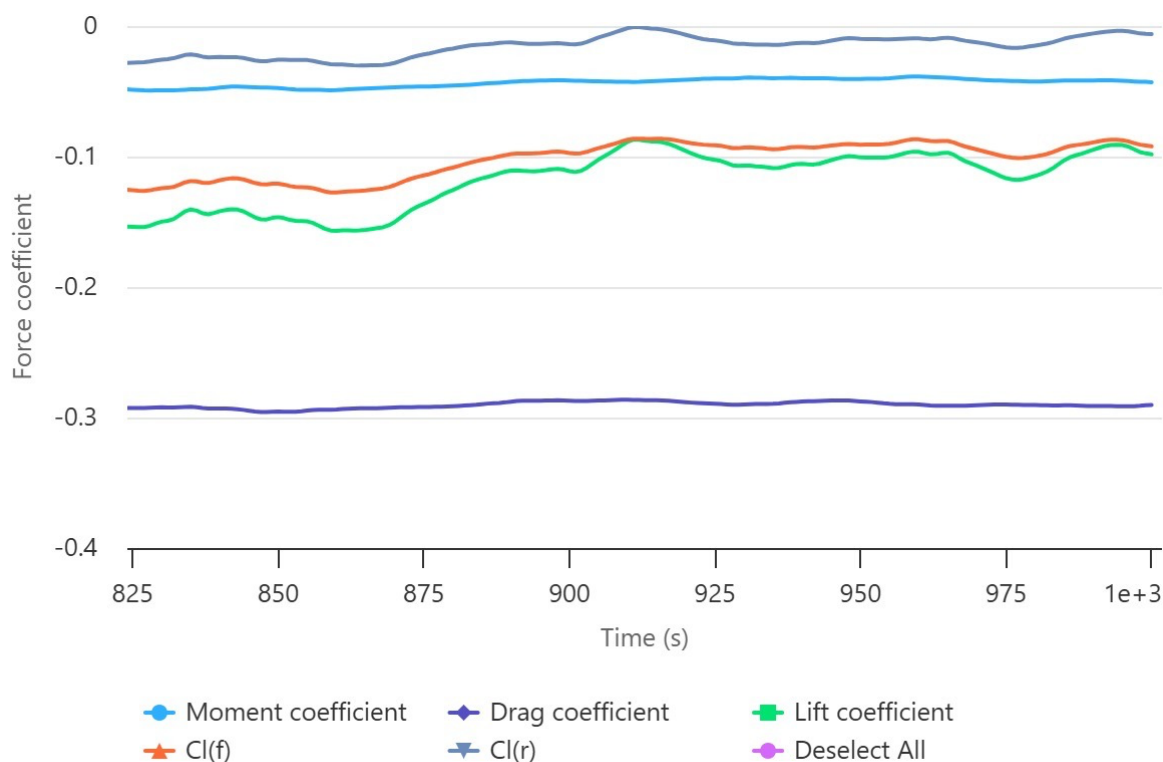
**Slika 7.** Dvodimenzionalni presjek brzinskog polja kroz sredinu automobila

Plave nijanse ispred i ispod vozila ukazuju na usporavanje zraka i stvaranje tlačnih zona, dok ubrzanje iznad krova potvrđuje prethodna opažanja. Posebno je izražena zona turbulencije iza automobila, što ukazuje na potrebu za boljim oblikovanjem stražnjeg dijela, npr. integriranjem difuzora ili zakošenjem stražnjeg kraja kako bi se smanjila zona niskog tlaka. Ova slika također potvrđuje da kotači i podvozje značajno utječu na aerodinamičke značajke što zahtijeva dodatnu analizu podnog strujanja.

### Analiza sila i koeficijenata sile

U nastavku su prikazani rezultati vremenskog razvoja aerodinamičkih sila i njihovih koeficijenata na površinu automobila.

a) Koeficijenti sila: Na slici 8 analiziraju se koeficijenti uzgona ( $C_l$ ), otpora ( $C_d$ ), momenta i dodatni parametri ( $C_l(f)$ ,  $C_l(r)$ ). Vrijednosti svih koeficijenata su negativne, što znači da sile djeluju u smjerovima suprotnima od pozitivno definirane osi.

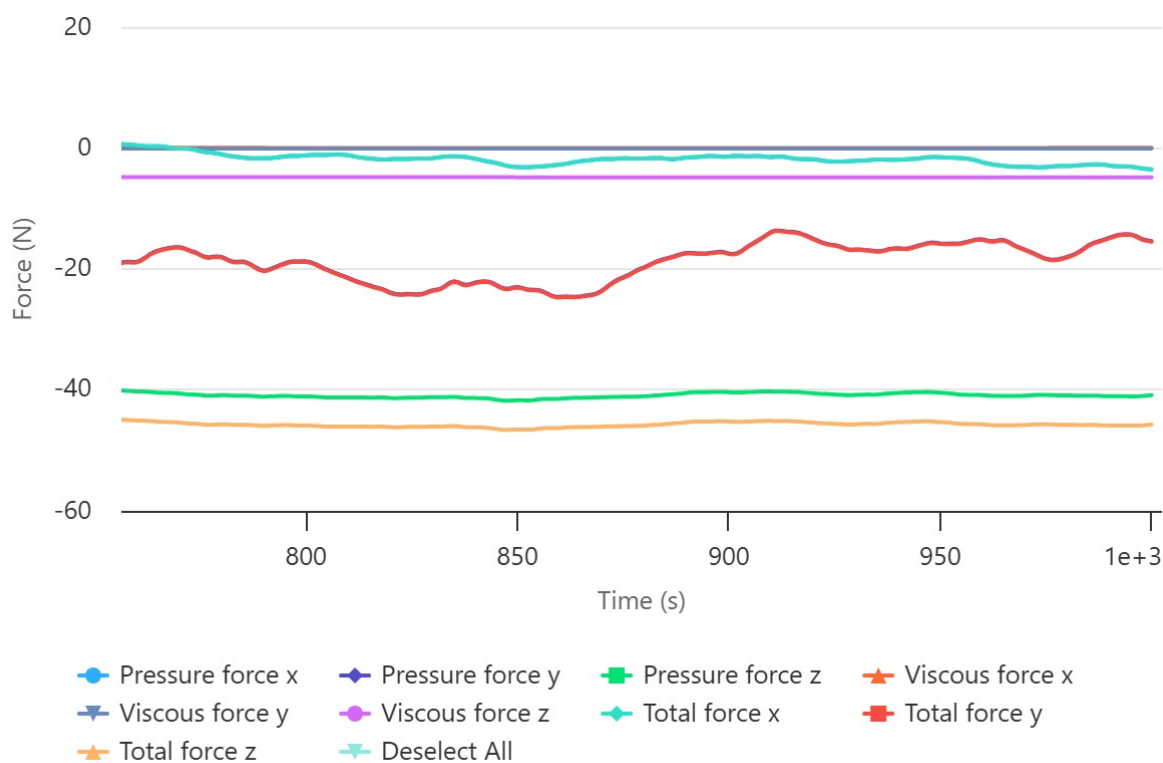


Highcharts.com

**Slika 8.** Analiza koeficijenata

Koeficijent otpora ( $C_d$ ), koji se u ovom grafu označava kao Drag coefficient, relativno je stabilan i iznosi oko -0,3, što ukazuje na značajan aerodinamički otpor. Koeficijent uzgona ( $C_l$ ) pokazuje promjene oko vrijednosti -0,1, što upućuje na prisutnost sile koja "pritišće" automobil prema tlu, a što je poželjna značajka za stabilnost pri većim brzinama. Vrijednosti  $C_{l(f)}$  i  $C_{l(r)}$  ukazuju na doprinos prednje i stražnje sekcije uzgonu što omogućuje detaljniju analizu raspodjele sila duž automobila.

b) Komponente sila: Slika 9 prikazuje apsolutne sile po osima (x, y, z) razložene na tlak i viskoznost.



Highcharts.com

**Slika 9.** Apsolutne sile po osima (x, y, z) razložene na tlak i viskoznost

Najizraženiji su sljedeći trendovi:

- **Total force y (crvena linija)** ima negativne vrijednosti oko -15 do -20 N, što odgovara rezultatnoj sili uzgona.
- **Total force z (narančasta linija)** i **Total force x (plavkasta linija)** održavaju stabilne negativne vrijednosti (do -50 N), što odgovara otporu zraka i djelovanju sile prema dolje.
- **Viskozne sile** su znatno manje od tlakova, što potvrđuje da dominantne aerodinamičke sile potječu iz raspodjele tlaka, a ne iz trenja.

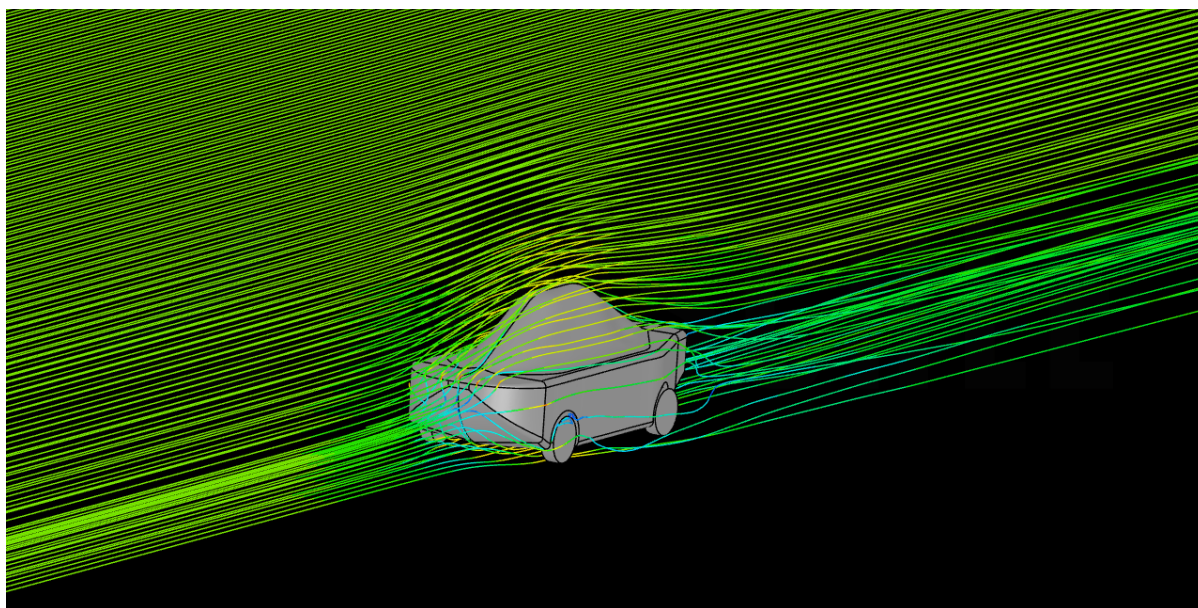
Dobiveni rezultati ukazuju na to da automobil pokazuje pozitivne aerodinamičke značajke kako slijedi:

- **Koeficijent otpora ( $C_d \approx 0,3$ )** je umjeren, ali postoji prostor za smanjenje kroz optimizaciju stražnjeg kraja i podvozja. Smanjenjem  $C_d$  može se povećati energetska učinkovitost automobila.
- **Negativan koeficijent uzgona ( $C_l \approx -0,1$ )** ukazuje na stvaranje sile prema tlu, što je ključno za stabilnost pri većim brzinama, a smanjuje rizik od podizanja automobila.

Ovi pokazatelji potvrđuju da automobil ima dobru baznu aerodinamiku, a dodatna optimizacija može donijeti konkretna poboljšanja u značajkama i sigurnosti.

#### Dodatna vizualizacija strujanja – 3D perspektiva

Na slici 10 prikazano je strujanje zraka u trodimenzionalnom prostoru oko automobila, gdje se jasno vide linije toka koje omotavaju automobil u koso zadnjem pogledu.



**Slika 10.** strujanje zraka u trodimenzionalnom prostoru oko automobila

Linije su obojene u skladu s brzinom strujanja i to od zelenih nijansi (niža brzina) do žutih (viša brzina), što omogućuje dodatni uvid u razvoj sloja strujanja i ponašanje zraka oko zadnje konture automobila.

Ovaj prikaz dodatno potvrđuje:

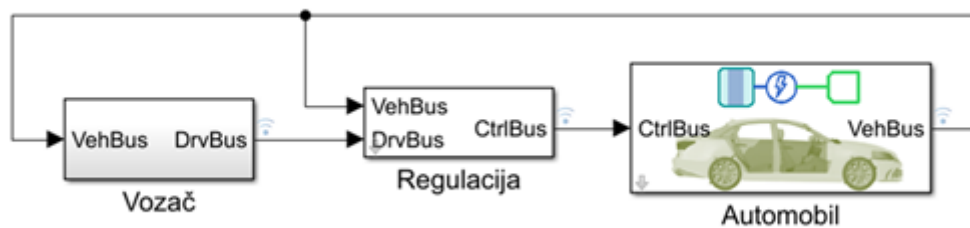
1. Postojanje stagnacijske točke na prednjem dijelu.
2. Ubrzanje strujanja iznad automobila (Venturijev efekt), te
3. Intenzivno vrtloženje iza automobila (wake zona), koje značajno doprinosi otporu.

#### 4.1.2 Svežanj gorivnih članaka

Za konstruiranje trkaćeg automobila na pogon vodikom s ciljem sudjelovanja na natjecanju, prema pravilniku [7] postoje određeni zahtjevi kako slijedi:

- Najveća dopuštena brzina kretanja automobila iznosi 40 km/h.
- Prosječna brzina kretanja automobila ne smije biti manja od 25 km/h.
- Nakon punog kruga vozač mora u potpunosti zaustaviti automobil na za to predviđenom mjestu.

U ranoj je fazi razvoja automobila u ovom radu odlučeno da će se koristiti hub motori. Glavni razlog je taj što ovi motori ne zahtijevaju korištenje reduktora, čime se uvelike pojednostavljuje konstrukcija pogonskoga sustava. Druga odluka je bila da se koriste PEM gorivni članci nazivne snage od 1 kW. Ova odluka donesena je nakon pregleda dostupne literature pri čemu je eksperimentalno i analitički pokazano da je snaga od 1 kW dovoljna da se odvozi cijela utrka [22]. U programskom paketu MATLAB/Simulink implementiran je model automobila kako je prikazano na slici 11.

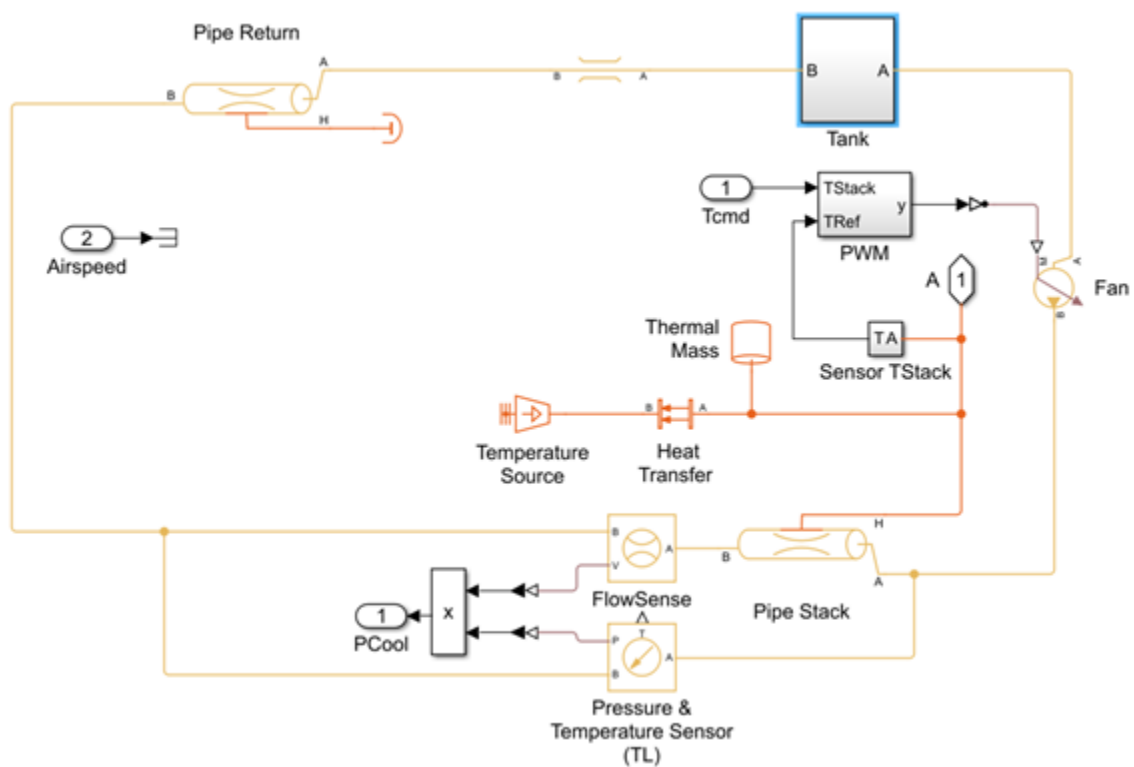


**Slika 11.** Simulink model automobila na pogon vodikom

Model se sastoji od podsustava koji uključuje regulaciju, automobil i vozača. U nastavku će se ukratko objasniti svaki podsustav.

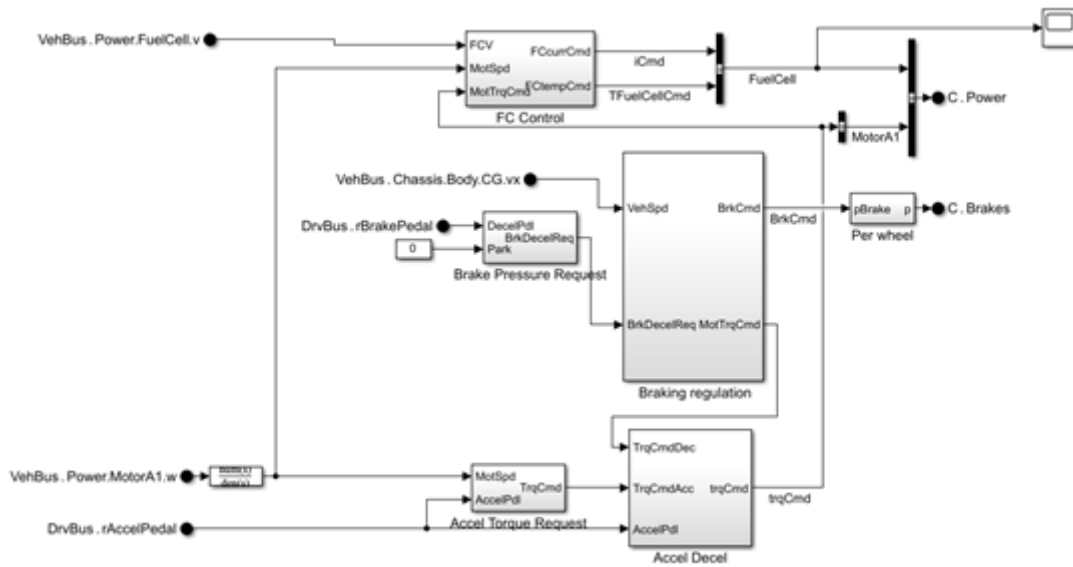
### Regulacija

Zadaća ovog podsustava je regulirati tlak u kočnicama i temperature kritičnih dijelova automobila kao što su npr. gorivni članci i DC/DC pretvarač.



**Slika 12.** Simulink model regulacije temperature svežnja gorivnih članaka

Blok „Airspeed“ predstavlja brzinu strujanja zraka kroz hladnjak. Za ventilator („Fan“) napravljen je blok za regulaciju pomoću PWM (engl. *Pulse Width Method*) metode.

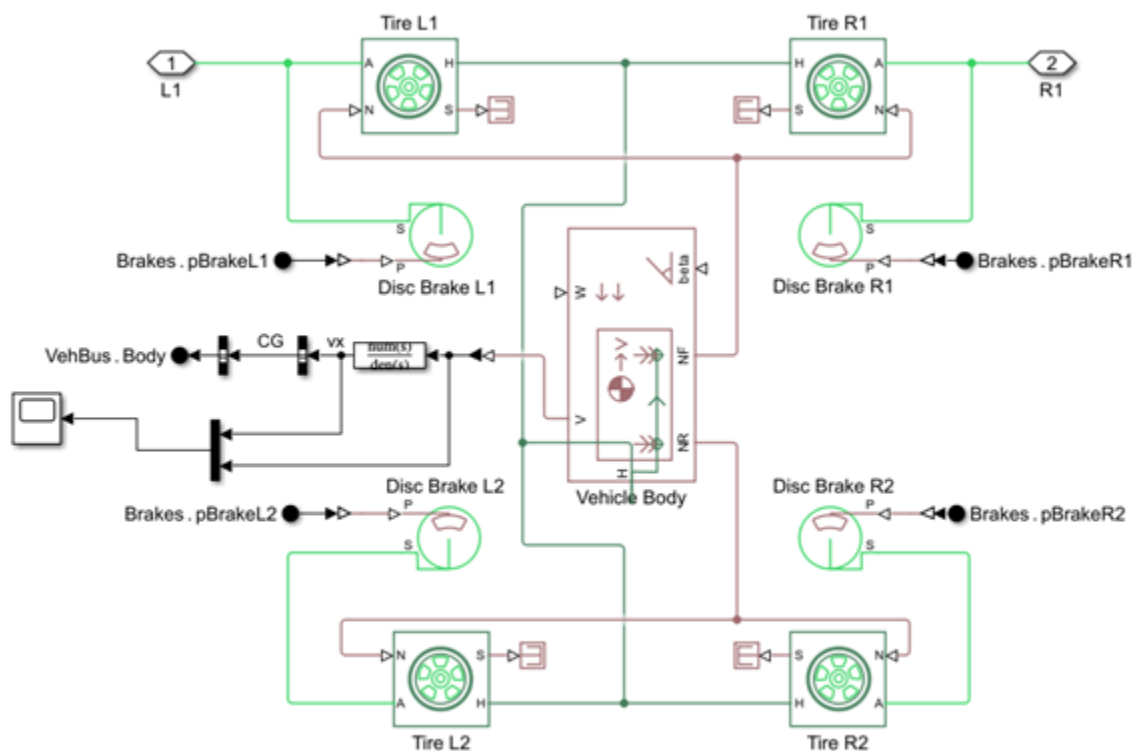


**Slika 13.** Simulink model regulacije tlaka kočnica

Važno je napomenuti kako automobil mora imat sustav kočenja i za prednju i za stražnju osovinu.

### Automobil

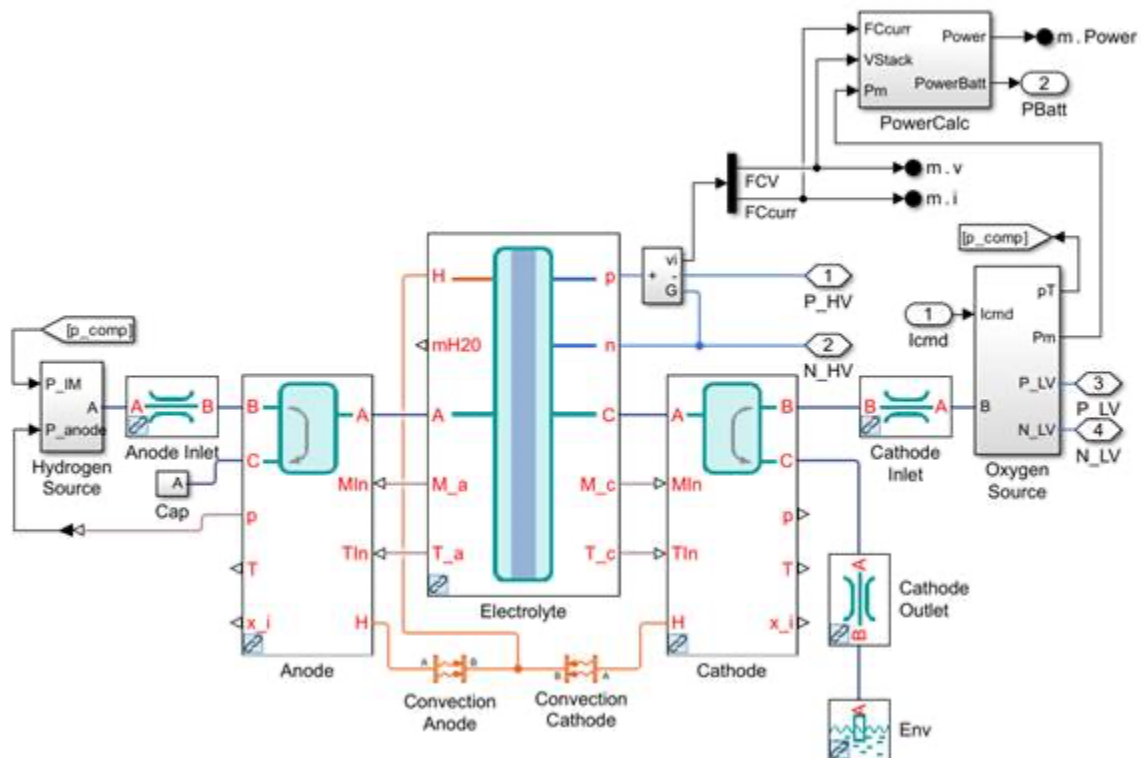
Podsustav „automobil“ (slika 14) u sebi sadrži sve dijelove automobila zajedno s njihovim značajkama, kao što su aerodinamičke sile, masa automobila, promjer i značajke guma i kočnica, značajke gorivnih članaka.



**Slika 14.** Simulink model šasije s gumama

Prilikom izrade modela svežnja gorivnih članaka (slika 15) korišten je primjer s Mathworks-a [23], koji se prilagodio za potrebe ovoga rada. Prilikom modeliranja podsustava uzete su sljedeće pretpostavke:

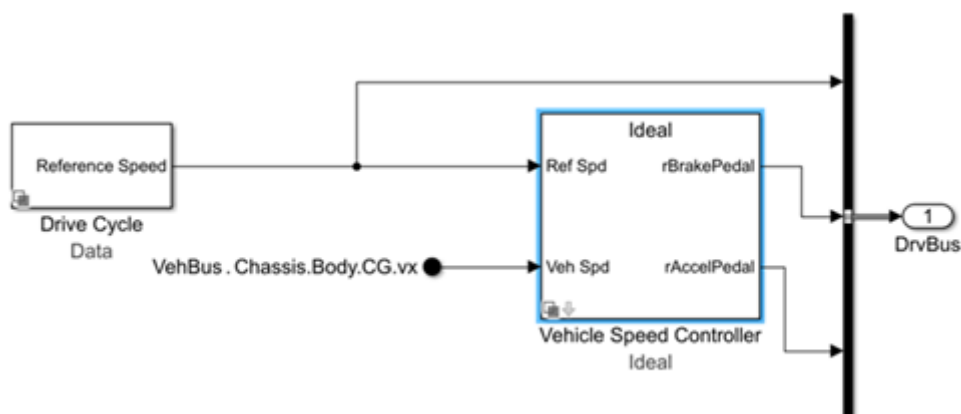
1. Zrak se smatra idealnim plinom koji se sastoji od 79% dušika i 21% kisika.
2. Kisik potreban za elektrokemijske reakcije dobiva se iz zraka.
3. Na strani anode nalaze se plinovi kisik, ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) i pregrijana vodena para.
4. Na strani katode nalaze se plinoviti kisik, pregrijana vodena para i dušik.
5. Plinovi navedeni pod točkama 3 i 4 smatraju se idealnim i nestlačivim plinovima.
6. Strujanje unutar katodnih kanala je jednofazno i laminarno.
7. Oksidacijsko – redukcijske reakcije opisane su Butler – Volmerovom jednačbom.



**Slika 15.** Simulink model svežnja gorivnih članaka

Vozač

Podsustav „vozač“ predstavlja ulazne podatke za cijeli sustav (slika 16). U bloku „drive cycle“ implementirana je staza na kojoj se održava natjecanje. Osim toga potrebno je unijeti podatke i o elektromotoru.



**Slika 16.** Podsustav „Vozač“

Odabrani motor prikazan je na slici 17.



**Slika 17.** VIVI brushless HUB motor [24]

#### Izbor svežnja gorivnih članaka

Izbor svežnja gorivnih članaka započeo je istraživanjem mogućih izbora i njihovih pripadajućih značajki. Neke od najvažnijih značajki pri odabiru su:

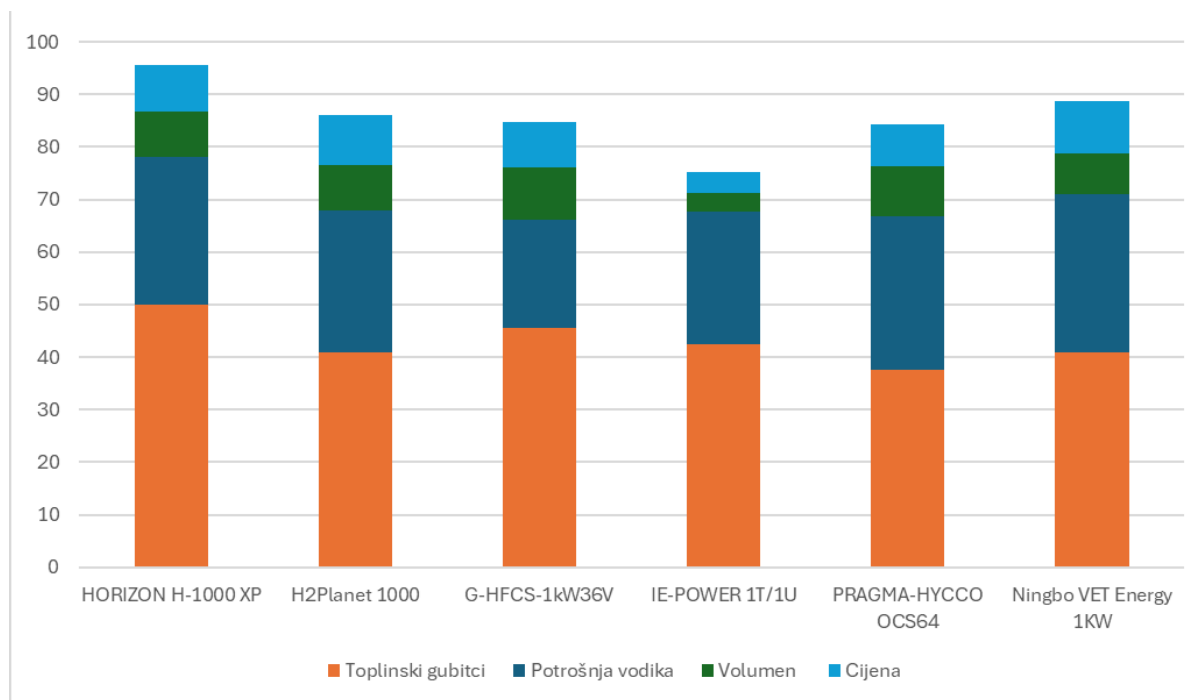
1. Potrošnja vodika [l/min]
2. Tlak dobave vodika [bar]
3. Masa [kg]

Prilikom odabira, određena su četiri glavna kriterija, a to su toplinski gubitci, potrošnja vodika, masa i cijena. Svaki od svežnjeva skaliran je s postocima za svaki kriterij. Članak sa najboljim ukupnim značajkama predstavlja najbolji izbor. Kako bi se dobila realnija vrijednost parametara svakom kriteriju dodijeljen je težinski faktor. Nakon više iteracija odlučeno je koristiti težinske faktore koji su prikazani u tablici 1.

**Tablica 1.** Definirani težinski faktori za odabir svežnja gorivnih članaka

|                        | Toplinski gubitci | Potrošnja vodika | Masa | Cijena |
|------------------------|-------------------|------------------|------|--------|
| <b>Težinski faktor</b> | 0,5               | 0,3              | 0,1  | 0,1    |

Parametri potencijalnih svežnjeva gorivnih članaka prikazan je na slici 18.



**Slika 18.** Parametri istraživanih svežnjeva gorivnih članaka

Prema analizi najbolji svežanj je "HORIZON H-100XP" jer zadovoljava sve uvjete te će se s njim nastaviti daljnji proračun.

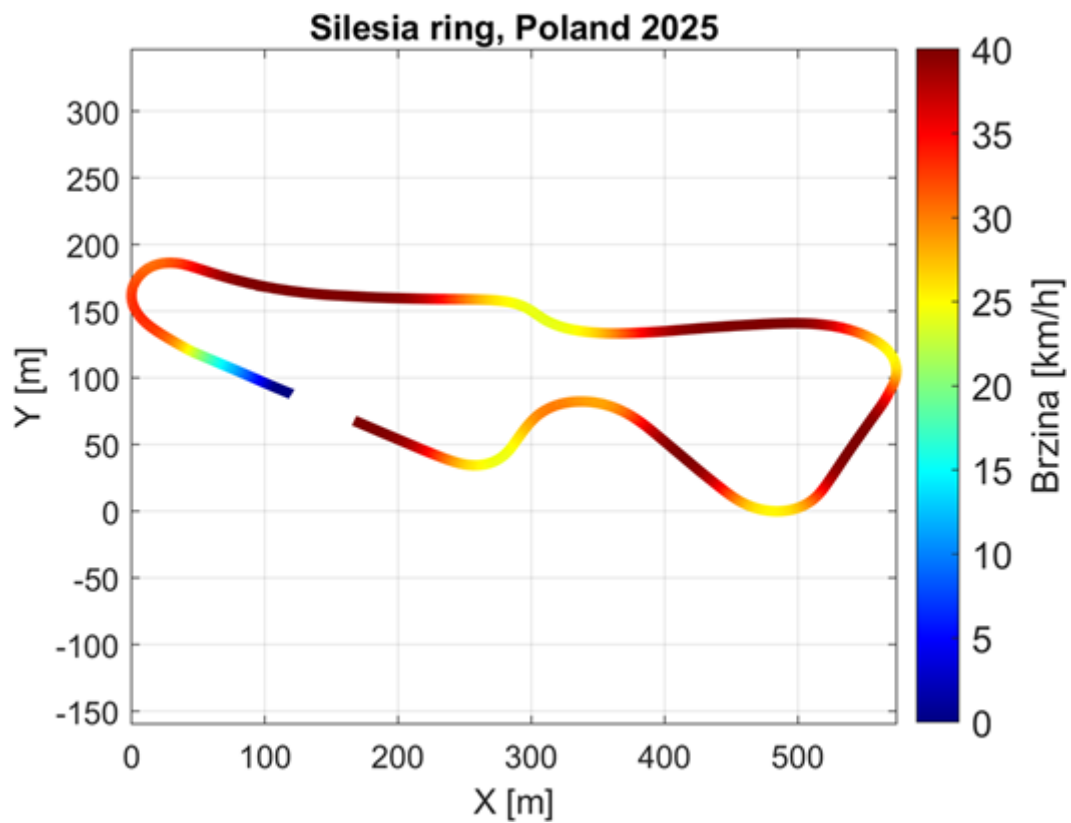


**Slika 19.** HORIZON H-1000 XP svežanj vodikovih članaka [4]

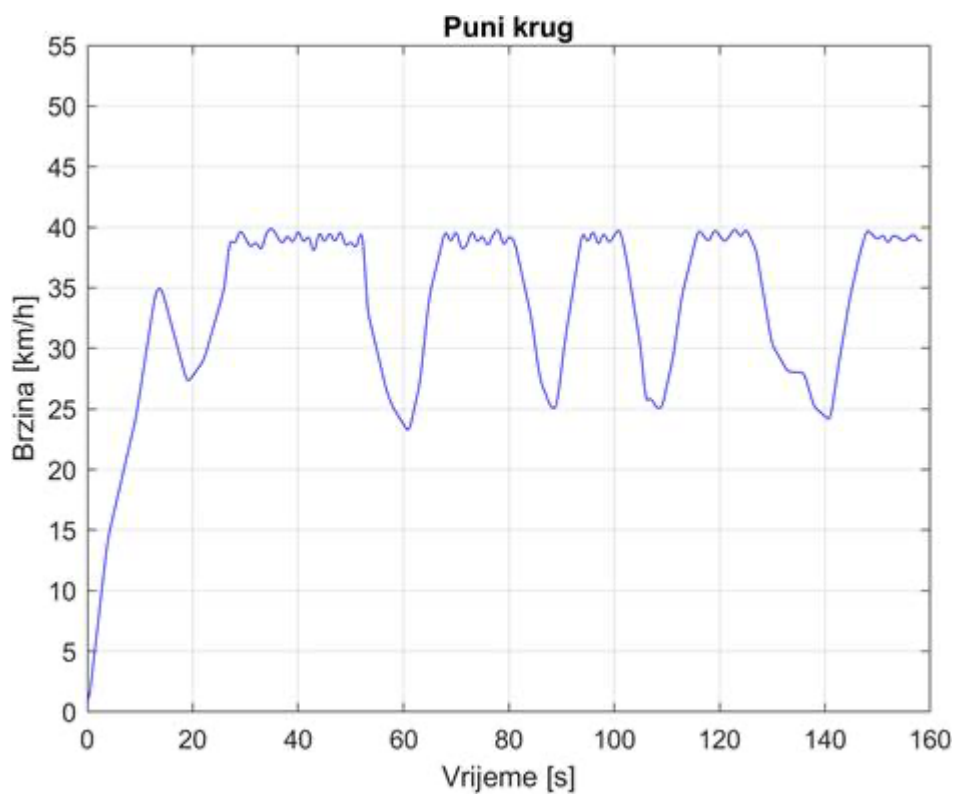
## PROVEDENE SIMULACIJE

### Referentna brzina

Prvo je generiran profil referentne brzine kako je prikazano na slikama 20 i 21. Referentna brzina je najviša brzina koju automobil može teorijski postići.



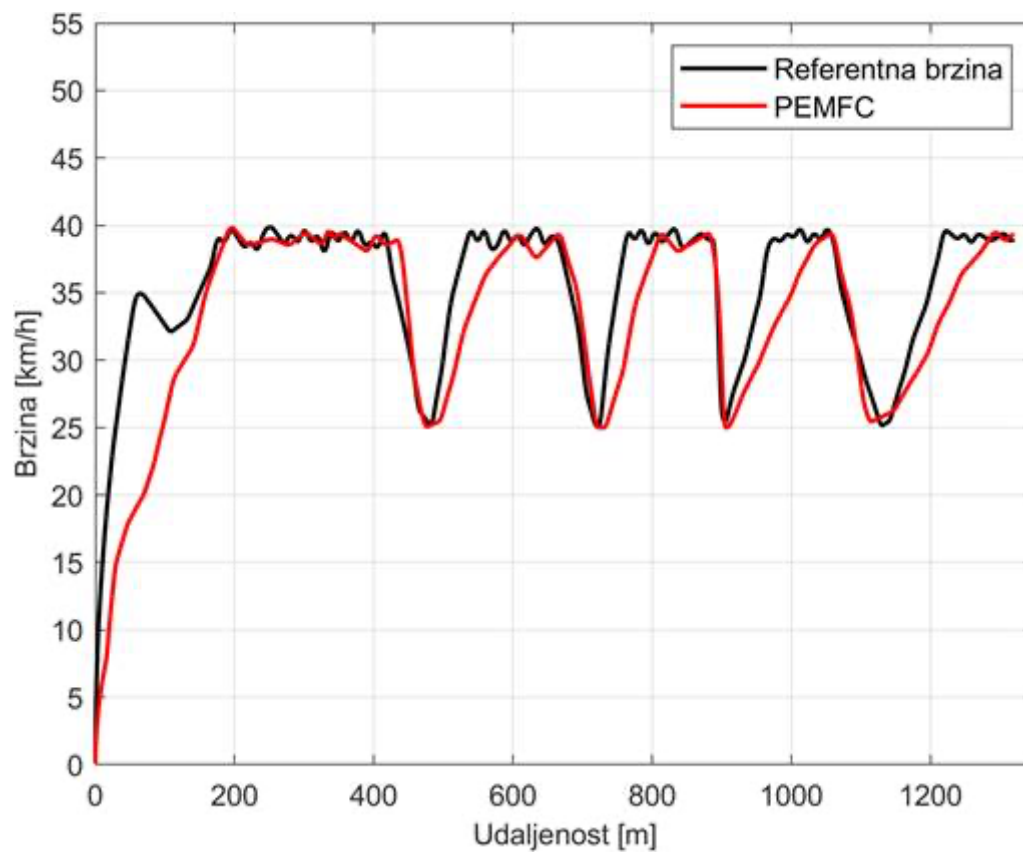
**Slika 20.** Rezultati simulacije: Profil referentne brzine po stazi



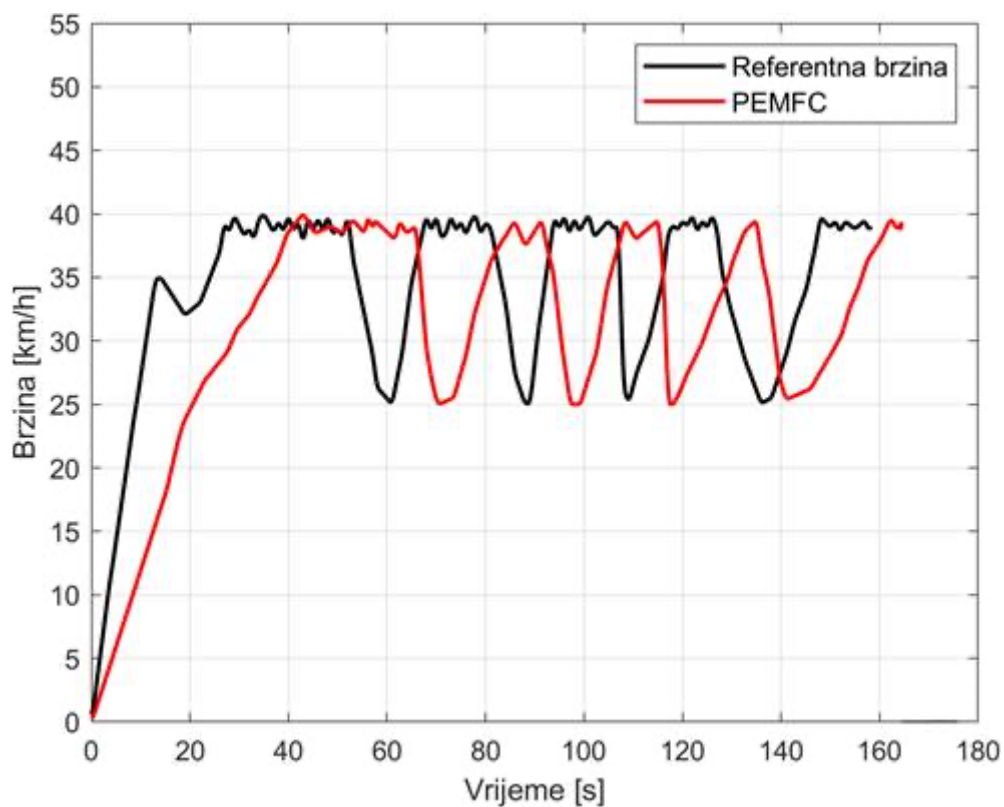
**Slika 21.** Rezultati simulacije: Profil referentne brzine u ovisnosti o vremenu

### Brzina pogonom s PEMFC

U ovom dijelu prikazat će se usporedba brzine ostvarene pogonom gorivnim člancima i referentne brzine.



**Slika 22.** Usporedba referentne brzine i brzine pogonom s PEMFC u ovisnosti o putu

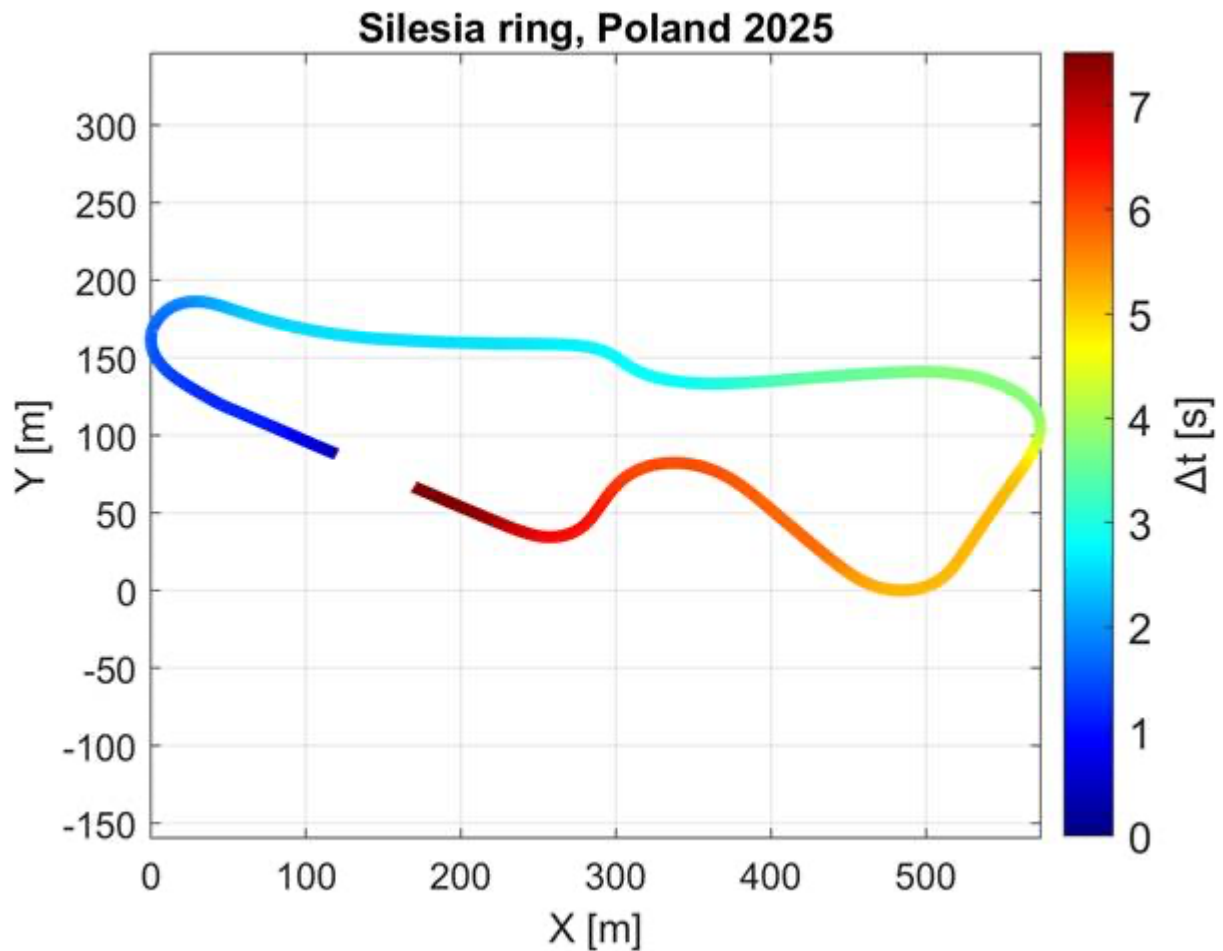


**Slika 23.** Usporedba referentne brzine i brzine pogonom s PEMFC u ovisnosti o vremenu

Ono što se jasno vidi je da pogonom na gorivne članke postoje odstupanja u odnosu na referentnu brzinu. Najviše vremena se „gubi“ prilikom pokretanja iz starta i na ubrzanju na izlasku iz zavoja. Sveukupno vrijeme po krugu je sporije za 7,7 sekunda. Usporedni podatci nalaze se u tablici 2, dok je razlika u vremenu na stazi prikazana na slici 24.

**Tablica 2.** Usporedbeni podatci referentnog vremena i pogona na PEMFC

|                              | Referentno vrijeme | PEMFC pogon |
|------------------------------|--------------------|-------------|
| <b>Srednja brzina [km/h]</b> | 31,4               | 29,9        |
| <b>Vrijeme [s]</b>           | 158,4              | 166,1       |



**Slika 24.** Razlika u vremenu po stazi

Na slici 24  $\Delta t$  predstavlja vremensku razliku kada se automobil kreće referentnom brzinom i kada se kreće brzinom koju osigurava svežanj gorivnih članaka s obzirom na trenutni položaj automobila na stazi.

#### 4.1.3 Spremnik vodika

Kako bi se odredila količina vodika potrebna za pogon automobila sa svežnjem gorivnih članaka snage 1 kW, napravljen je niz proračuna temeljenih na poznatim vrijednostima gustoće vodika, energetske gustoće, te učinkovitosti gorivnoga članka.

- Energetska gustoća vodika: 33,3 kWh/kg [25]
- Snaga gorivnoga članka: 1 kW
- Tlak u spremniku: 700 bar
- Gustoća vodika: 0,08988 kg/m<sup>3</sup> (ili 0,08988 g/L pri standardnim uvjetima)
- Gustoća vodika na 700 bar: 42 kg/m<sup>3</sup> [26]

Proračun pri standardnim uvjetima (informativno radi usporedbe):

- Potrebna električna energija po satu: 1 kW x 1 h = 1 Kwh
- Potrebna energija iz vodika uz učinkovitost 50%: 1 kWh/0,5 = 2 kWh

- Masa vodika za potrošnju od 2 kWh i energetska gustoću vodika od 33,3 kWh/kg:  $2 \text{ kWh} / (33,3 \text{ kWh/kg}) = 0,06006 \text{ kg}$
- Volumen vodika pri standardnim uvjetima:  $0,06006 \text{ kg} / (0,08988 \text{ kg/m}^3) = 0,668225 \text{ m}^3 = \mathbf{668,2L}$

#### Proračun pri 700 bar:

- Potrebna električna energija u satu:  $1 \text{ kW} \times 1 \text{ h} = 1 \text{ Kwh}$
- Potrebna energija iz vodika uz učinkovitost 50%:  $1 \text{ kWh} / 0,5 = 2 \text{ kWh}$
- Masa vodika za potrošnju od 2 kWh i energetska gustoću vodika od 33,3 kWh/kg:  $2 \text{ kWh} / (33,3 \text{ kWh/kg}) = 0,06006 \text{ kg}$
- Volumen vodika:  $0,06006 \text{ kg} / (42 \text{ kg/m}^3) = 0,00143 \text{ m}^3 = \mathbf{1,43 L}$

#### Proračun količine vodika potrebnog za domet od 1000 km:

- Maksimalna brzina vožnje: 50 km/h
- Volumen vodika u 1h za gorivni članak snage 1 kW: 1,43 L
- Broj sati vožnje:  $1000 \text{ km} / (50 \text{ km/h}) = 20 \text{ h}$
- Količina vodika potrebna za 20 sati vožnje:  $20 \times 1,43 \text{ L} = 28,6 \text{ L} = \mathbf{30 L}$

Dakle za domet od 1000 km automobilu će biti potrebno približno 28,6 litara vodika pri tlaku od 700 bar. U usporedbi s volumenom potrebnim pri standardnim uvjetima (668,2 L), vidljivo je koliko je visokotlačna pohrana ključna za primjenu vodika u mobilnosti. Za pohranu izračunate količine vodika, odabran je konvencionalni spremnik Hexagon Purus H2 TU 35, koji se koristi u automobilske industriji (slika 25).



**Slika 25.** Spremnik Hexagon Purus H2 TU 35

Spremnik je tipa Type IV, radnog tlaka 700 bar, nominalnog volumena 34,8 litara, te kapaciteta 1,3 kg vodika. Njegove dimenzije i značajke čine ga prikladnim za eksperimentalne i energetske učinkovite

automobile pogonjena svežnjevima gorivnih članaka male snage, što odgovara automobilu dizajniranom u ovom radu.

#### 4.1.4 Gume, diskovi i kočnice

S obzirom na odabrane gume proračun je započeo s ulaznim podacima za računanje potrebnih podataka za gume, diskove i kočnice.

**Tablica 3.** Ulazni podaci za proračun guma, diskova i kočnica

| Parametar                                | Vrijednost         |
|------------------------------------------|--------------------|
| <b>Ukupna masa</b>                       | 300 kg             |
| <b>Masa po kotaču</b>                    | 10 kg              |
| <b>Koeficijent trenja (suha podloga)</b> | 0,8                |
| <b>Maksimalno ubrzanje</b>               | 5 m/s <sup>2</sup> |
| <b>Kočenje</b>                           | 60 km/h            |
| <b>Polumjer kotača</b>                   | 0,3 m              |

Prvo će se računati vertikalne sile na podlogu koji stvara svaki kotač.

- $F_z (m \cdot g/4) = (300 \cdot 9,81/4) = 735,75 \text{ N}$

Maksimalna sila trenja:

- $F_{\text{max,trenja}} = \mu \cdot F_z = 0,8 \cdot 735,75 = 588,6 \text{ N (po kotaču)}$

Momenti ubrzanja i kočenja:

- Ubrzanje:  $F = m \cdot a = 75 \cdot 2 = 150 \text{ N}$
- $M = 150 \cdot 0,3 = 45 \text{ Nm}$

Kočenje:  $F = m \cdot a = 75 \cdot 5 = 375 \text{ N}$

- $M = 375 \cdot 0,3 = 112,5 \text{ Nm}$

Centrifugalna sila u zavoju:

- $F_{\text{cef}} = (m \cdot v^2)/r = (300 \cdot 16,67 \cdot 16,67)/20 = 4167 \text{ N}$

Tlak gume na podlogu:

- $p = F_z/A = 735,75/0,015 = 49 \text{ kPa}$

Kočiona sila na podlogu:

- $F_{\text{kočiona}} = M/r = 112,5/0,12 = 937,5 \text{ N}$

#### 4.1.5 Električni sustav vozila

Električni sustav vozila dijeli se na funkcionalne cjeline koje zajedno omogućuju sigurnu i učinkovitu vožnju. U kontekstu automobila pogonjenog vodikom razvijenih za Shell Eco-marathon natjecanje, električni sustav se dijeli u dvije glavne skupine:

1. Svežanj gorivnih članaka (pogonski sustav).
2. Unutarnje ožičenje vozila i sigurnosni sustav (pomoćni sustav).

Ova podjela omogućuje jasnu organizaciju komponenti prema njihovoj funkciji i sigurnosnoj važnosti, čime se olakšava njihova integracija unutar vozila, kao i ispunjavanje tehničkih pravila natjecanja.

##### Pogonski sustav

Budući da je riječ o prvom hrvatskom konceptu vozila ovakvog tipa, odabran je komercijalni svežanj gorivnih članaka koji zadovoljava zahtjeve Shell Eco-marathon natjecanja, konkretno model Horizon H-1000XP. Svežanj gorivnih članaka Horizon H-1000XP (slika 26) integrira se u električni sustav vozila kao primarni izvor napajanja. Svežanj čine PEM gorivni članci s nazivnom izlaznom snagom od 1000 W i maksimalnom snagom do 1200 W, radnim naponom od 30 V i maksimalnom strujom od 33,5 A. Ulazni tlak vodika ograničen je na 0,45 – 0,55 bar, a prosječna potrošnja vodika iznosi 14 litara u minuti pri punom opterećenju.



**Slika 26.** Horizon H-1000XP svežanj gorivnih članaka s pratećom opremom

Izlaz gorivnoga članka je istosmjerni (DC) napon koji se vodi preko ugrađenog DC/DC pretvarača, koji stabilizira napon za potrebe potrošača, prvenstveno električnoga pogona. Pretvarač može biti dodatno konfiguriran tako da regulira napon prema radnim uvjetima, ili za punjenje međuspremnika (superkondenzator ili pomoćna baterija). Kontrolna jedinica unutar sustava omogućuje nadzor i distribuciju električne energije. Sve upravljačke komponente (uključujući ventilator, solenoidne ventile, SCU jedinicu i LCD zaslon) napajaju se putem pomoćne baterije od 12 V tijekom startne faze rada. Ova baterija mora osiguravati minimalno 12 V pri 4 A, a spaja se preko predviđenih terminala, uz preporuku ugradnje osigurača od 3 A na pozitivnoj strani. Kontrolna jedinica omogućuje komunikaciju putem RS232 serijskog sučelja, preko kojeg se mogu pratiti električni parametri (napon, struja, temperatura svežnja) i status komponenti u stvarnom vremenu. Za povezivanje s ostatkom električne mreže vozila, izlazni terminali iz svežnja gorivnih članaka vode se prema glavnom izlaznom releju, a zatim do pogonskoga sustava. Dodatno, uključuju se osigurači i sigurnosni prekidači, sukladno pravilima natjecanja. Ukupno gledajući, odabrani svežanj gorivnih članaka integrira sve ključne komponente

električnoga pogona u jedinstvenu platformu, a njegova kompatibilnost s tipičnim sustavima niskonaponske distribucije (12 – 48 V) i integriranim nadzorom čini ga optimalnim rješenjem za Shell eco Marathon automobile s naglaskom na sigurnost i učinkovitost. U kompletu sa svežnjem gorivnih članaka isporučuje se i osjetnik vodika koji služi za detekciju prisutnosti vodika u okolini automobila (slika 27).



**Slika 27.** Osjetnik vodika

Riječ je o komponenti ključne važnosti za sigurnost, osobito u zatvorenim i natjecateljskim aplikacijama poput Shell Eco-marathona. Njegova uloga unutar električnoga sustava vozila je nezamjenjiva, a njegovo korištenje obavezno je prema pravilima natjecanja Shell Eco-marathon [7].

#### Pomoćni sustav

Za potrebe napajanja pomoćnih sustava automobila, kao što su upravljačka elektronika svežnja gorivnih članaka, osjetnik vodika, ventilatori, sigurnosni ventili i komunikacijski moduli, odabrana je LiTime 12V 50Ah LiFePO<sub>4</sub> baterija (slika 28).



**Slika 28.** Pomoćna baterija LiTime 12V 50Ah LiFePO<sub>4</sub>

Nazivni napon baterije iznosi 12,8 V, a kapacitet od 50 Ah omogućuje dovoljno energije za napajanje svih pomoćnih potrošača tijekom cijelog radnog ciklusa automobila, uključujući startne faze svežnja gorivnih članaka. Baterija može isporučiti kontinuiranu struju do 50 A, što je u potpunosti u skladu s ograničenjima definiranim pravilima Shell Eco-marathon natjecanja (maksimalna dopuštena izlazna snaga pomoćne baterije <1000 Wh). Baterija dolazi s integriranim Battery Management System (BMS) koji osigurava zaštitu od previsokoga napona, preniskoga napona, prekomjerne struje, kratkog spoja i pregrijavanja. Time se povećava pouzdanost cijelog električnog sustava i minimizira rizik od prekida

rada ili oštećenja svežnja gorivnih članaka. Preporučuje se ugradnja osigurača od 5 – 10 A na pozitivni pol baterije te korištenje vodiča presjeka 2,5 mm<sup>2</sup> ili većeg, ovisno o duljini i maksimalnoj struji. Odabirom ove baterije postiže se ravnoteža između energetske pouzdanosti, dimenzija i mase, čime se dodatno optimizira ukupna učinkovitost vozila unutar natjecateljskih zahtjeva. Za upravljanje pomoćnim električnim sustavima H2CRO automobila odabran je Emerald K6 EVO ECU (slika 29) , koji se napaja iz pomoćne 12 V baterije i nije direktno povezan sa svežnjem gorivnih članaka. Ovaj ECU pruža visoku fleksibilnost u konfiguraciji te se široko koristi u razvojnim i natjecateljskim primjenama zbog mogućnosti preciznoga mapiranja upravljačkih funkcija.



**Slika 29.** Elektronička upravljačka jedinica Emerald K6 EVO ECU

Glavna uloga ECU-a u ovom automobilu je upravljanje pogonskim motorom, obrada ulaznih signala (npr. temperatura, detekcija vodika) te upravljanje sigurnosnim izlazima, poput aktivacije releja za napajanje motora ili isključenja sustava u slučaju nužde. Zahvaljujući integriranom CAN i serijskom sučelju, omogućuje se i praćenje podataka u stvarnom vremenu te daljnje prilagodbe rada sustava tijekom testiranja ili natjecanja.

I jednako važno, truba predstavlja obveznu sigurnosnu komponentu svakog automobila na natjecanju Shell Eco-marathon, sukladno tehničkom pravilniku. Njezina primarna funkcija je osigurati zvučnu signalizaciju u slučaju opasnosti ili potrebe za upozorenjem drugih sudionika, članova tima ili osoblja tijekom testiranja i vožnje na stazi. Prema pravilima natjecanja, truba mora biti električna i imati konstantan, jasan ton. Također, minimalna razina glasnoće mora biti najmanje 85 dBA, izmjereno na udaljenosti od četiri metra ispred vozila. U praksi se preporučuje i jača truba ( $\geq 100$  dBA), kako bi bila učinkovita i u bučnim uvjetima vožnje ili u okruženju natjecanja. Truba se napaja iz pomoćne baterije od 12 V, a njezino aktiviranje mora biti jednostavno dostupno vozaču putem fizičke tipke. Dodatno, preporučuje se da truba bude spojena preko osigurača i, po potrebi, releja koji podnosi odgovarajuću struju. Za potrebe H2CRO automobila odabrana je Bosch universal električna truba, model Bosch EC6 12V Horn, koji zadovoljava sve tehničke uvjete propisane pravilnikom natjecanja (slika 30).



**Slika 30.** Truba Bosch EC6 12V Horn

Zahvaljujući svojim značajkama, Boschova truba osigurava izuzetnu pouzdanost i visoku čujnost, čak i u bučnom ambijentu staze. Ugradnja je jednostavna jer se spaja direktno na 12 V iz pomoćne baterije, preko tipkala za vozača i osigurača od 5 A, uz mogućnost korištenja releja ako je potrebno.

Također, u skladu s tehničkim pravilima natjecanja Shell Eco-marathon [7], svaki automobil u klasi Urban Concept mora biti opremljeno potpunim sustavom svjetlosne signalizacije. Ova obveza proizlazi iz zahtjeva da se automobil ponaša kao urbano cestovno prijevozno sredstvo, uključujući sve osnovne sigurnosne i komunikacijske funkcije. U tu svrhu automobil mora imati funkcionalna prednja svjetla, stražnja pozicijska svjetla, kočiona svjetla te prednje i stražnje žmigavce. Svi navedeni svjetlosni elementi moraju biti jasno vidljivi s udaljenosti od najmanje deset metara. Napajaju se isključivo iz pomoćne baterije od 12 V, te moraju biti kontrolirani od strane vozača putem zasebnih fizičkih prekidača. Svaki električni krug mora biti zaštićen odgovarajućim osiguračem, a po potrebi i relejem, čime se osigurava sigurnost i neovisnost svake funkcionalne skupine.

#### 4.1.6 Grijanje, hlađenje i ventilacija

Zbog složenosti sustava grijanja i hlađenja, u početnoj verziji automobila odlučeno je razviti samo sustav ventilacije kabine. Ventilacija ima ključnu ulogu u osiguravanju toplinske udobnosti, sprječavanju zamagljenja stakala i sigurnosti u slučaju potencijalnoga curenja vodika. Uzeta je srednja vrijednost kabinskoga prostora  $V = 2,5 \text{ m}^3$  i  $N = 20$  izmjena na sat (zbog sigurnosti), odabrana brzina strujanja je  $2,5 \text{ m/s}$ , te je izračunato:

$$Q = V \cdot N = 2,5 \cdot 20 = 50 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$S = \frac{Q}{3600 \cdot v} = \frac{50}{3600 \cdot 2,5} = 0,0056 \text{ m}^2$$

Prijedlog je osigurati dva pravokutna otvora na prednjem dijelu  $5 \times 5,56 \text{ cm}$  i dva na stražnjem dijelu automobila ili ekvivalentni otvor drugog oblika. Također, napravljena je provjera za ekstremne uvjete, odnosno koliko se može hladiti kabinski prostor ljeti, npr. ako se kabina ugrijala na  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ , a vanjska temperatura je  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Uzeti su toplinski dobici sunca, tijela vozača i elektronika  $300 \text{ W}$ , te je izračunato:

$$Q = \frac{Q_{\text{dobici}}}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T} = \frac{300}{1,2 \cdot 1005 \cdot 15} = 0,0166 \text{ m}^3/\text{s} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$$

Vidljivo je da se odabirom protoka i ventilatora prema sigurnosnim uvjetima dobivaju relativno velike izmjene koje mogu biti dobre u vrućim periodima. Ipak za bolju mogućnost upravljanja sustavom ventilacije bilo bi dobro ugraditi manji ventilator od 12 V, ovisno o dodatnoj bateriji. Preporuka je staviti ventilator u stražnji dio automobila kako bi se potaknula cirkulacija zraka i odsis istrošenoga ili toploga zraka. Primjer aksijalnoga ventilatora na 12 V kakvi se koriste za pomoćne sustave prikazan je na slici 31 koji omogućava protok do 120 m<sup>3</sup>/h pri 3000 rpm (okretaja po minuti). Najčešće dimenzije takvih ventilatora su 120 x 120 mm, pa prema tome treba prilagoditi i otvore na automobilu.



**Slika 31.** Aksijalni ventilator Noctua NF-F12 iPPC

Postoje i nešto manji ventilatori dimenzija 60 x 60 (npr. Sunon MagLev) s maksimalnom dobavom do 50 m<sup>3</sup>/h koji bi se također mogli koristiti. Manji ventilatori su nešto tiši i ekonomičniji, odnosno jeftiniji, a može ih se postaviti i u paru. Također, bitno je za ventilatore dodati upravljanje kako bi se postigla kontinuirana dobava zraka, smanjila buka i stvorili ugodni toplinski uvjeti za vozača, uz dodatne sigurnosne aktivacije maksimalnoga protoka pri propuštanju vodika.

#### 4.1.7 Dizajn interijera

Jedan od glavnih dizajnerskih izazova bio je razviti rješenje za sjedala. Usvojen je hibridni dizajn sjedala od lanenih vlakana s dvoslojnom presvlakom od recikliranog PET tekstila (*engl. polyethylene terephthalate*) i certificirane karbonski neutralne Alcantare [27]. Kompoziti od lanenih vlakana odabrani su kao strukturna osnova sjedala. Ovaj materijal ima vrlo dobre mehaničke značajke. Lanena vlakna su biorazgradiva, obnovljiva i potječu iz neprehrambenih kultura. Kontaktne površine sjedala, jastuk, središnji dio naslona i naslon za glavu, presvučene su recikliranim PET vlaknima, izrađene iz recikliranog otpada poput plastičnih boca. Bočne potpore, koje zahtijevaju veću otpornost na habanje i mrlje, izrađene su od Alcantara materijala, karbonski neutralnog mikrovlaknastog materijala. Konačno, uz pomoć umjetne inteligencije, izrađen je vizualni prikaz koncepta sjedala za H2CRO automobil (slika 32).



**Slika 32. Koncept sjedala H2CRO automobila**

Što se tiče boja interijera, ciljane su nijanse svijetlozelene i bijele boje. Kontrolna ploča i obloge vrata zamišljeni su kao komponente izrađene od prešanih prirodnih vlakana ojačanih biorazgradivom smolom. Površina je zaštićena premazom na bio-bazi koji osigurava trajnost. Tepisi, podnožja i donje obloge zamišljeni su u materijalu ECONYL®, regeneriranom najlonu izrađenom od odbačenih ribarskih mreža i tekstilnog otpada, a koji se već koristi u serijskim vozilima [28]. Kontrolna ploča izgrađena oko središnjeg OLED zaslona veličine 15 inča s nosačem ima uobičajene funkcije, poput voznih i multimedijских podataka, a ključne funkcije uključuju grafički prikaz korištenja vodika, regeneracije i statusa punjenja u stvarnom vremenu. Prikaz uključuje smjer protoka, kapacitet spremnika, opterećenje svežnja gorivnih članaka i ukupnu emisijsku uštedu u odnosu na fosilna goriva.

#### 4.1.8 Sigurnost vozila

Spremnik vodika smješten je u posebno dizajniranom odjeljku, fizički odvojenom od vozačkoga prostora i električnih komponenti [29]. Odjeljak je izrađen od neprovodnih i vatrootpornih materijala, s pasivnom ventilacijom na vrhu (minimalna površina otvora 500 mm<sup>2</sup>). U ovom radu odabran je certificirani kompozitni spremnik tipa IV (slika 33), radnog tlaka 700 bar, u skladu s normama GTR 13 [30] i ISO 19881 [31].



**Slika 33.** Type IV kompozitni spremnik za vodik s ugljičnim vlaknima i metalnim ventilom

Spremnik je opremljen s integriranim sigurnosnim ventilom, manometrom, regulatorom tlaka i zaštitnim poklopcem za transport. Svi spojevi moraju biti izvedeni od nehrđajućeg čelika s hermetičkim brtvama prema ISO 15869 standardu [32]. Za protupožarnu zaštitu preporučuje se epoksidna boja u sloju od 20 mm [33] koja može povećati otpornost na vatru s trenutnih 6-12 minuta na preko 2 sata, ili dvokomponentni IP9189 sustav [34]. Katalitički osjetnici predstavljaju standardno rješenje za detekciju vodika u vozilima. Odabrani model je Winsen ZC61 koji koristi MEMS katalitički princip koji je prikazan na slici 34 [35].



**Slika 34.** Winsen ZC61 katalitički osjetnik za detekciju vodika

Za precizniju detekciju niskih koncentracija dostupni su H2scan Gen 5 paladij-nikl osjetnik [36]. Ventili su certificirani prema API 527 [37] i postižu nultu propusnost pri 90% podešenog tlaka. Tlačni sigurnosni uređaj mora biti dizajniran da se aktivira pri visokim temperaturama i usmjeri protok vodika na sigurno mjesto, dalje od osoba i električnih priključaka. Ventilacijski sustavi moraju osigurati minimalnu površinu otvora od 500 mm<sup>2</sup> na vrhu energetske i vozačke odjeljke. Za vozila s kabinom volumena 2-4 m<sup>3</sup>, potreban protok zraka izračunava se prema formuli:

$$Q = V \cdot N$$

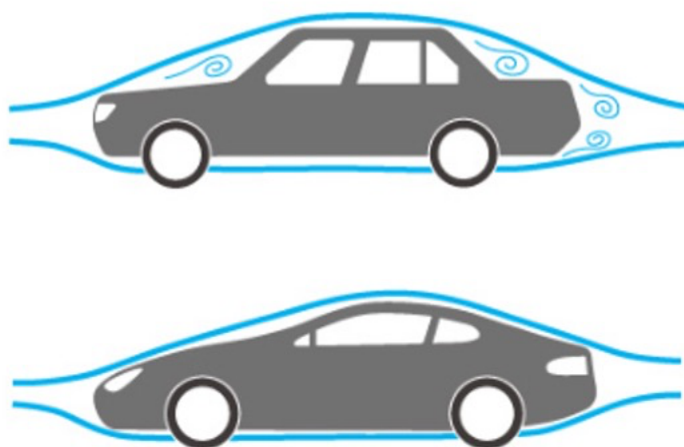
gdje je:

- Q = potreban protok u m<sup>3</sup>/h
- V = volumen kabine u m<sup>3</sup>
- N = broj izmjena zraka po satu

Preporučuje se minimum 10 izmjena zraka po satu za sigurno uklanjanje eventualnih curenja vodika.

## 5. RASPRAVA

Cilj dimenzioniranja automobila jest postići što bolju aerodinamiku koja će doprinijeti učinkovitosti potrošnje goriva, pri čemu je potrebno definirati 2 glavna pojma: tok fluida (u ovom slučaju zraka) i koeficijent otpora zraka. Tok fluida može biti laminarni i turbulentan (slika 35). Laminarni tok je tip strujanja fluida u kojemu se čestice fluida gibaju uredno, paralelno i slojevito, a da pri tome ne dolazi do međusobnog miješanja slojeva i vrtloženja. Ako do tih pojava dođe, tok postaje turbulentan i pridonosi otporu zraka. Vjerojatnost vrtloženja i miješanja čestica uvelike ovisi o tome kako je modelirana karoserija automobila. Slika ukazuje na to da se tokom zraka oko automobila može manipulirati npr. kreiranjem glatkih prijelaza između površina, snižavanjem visine automobila, i dr.



**Slika 53.** Usporedba turbulentnog i laminarnog toka

Provedenom CFD analizom dobiven je vrijedan uvid u ponašanje strujanja zraka oko vozila. Identificirana su ključna područja na kojima dolazi do gubitaka, osobito iza stražnjeg dijela vozila te u zoni oko kotača i ispod podnice. Također je jasno vidljivo da aerodinamička optimizacija može značajno utjecati na ukupne značajke automobile, odnosno smanjenje otpora, povećanje stabilnosti i bolju energetske učinkovitosti.

S obzirom da vozilo neće koristiti suspenzijski sustav, potrebno je koristiti čvrste i lagane materijale za konstrukciju šasijske. Time se postiže dovoljna krutost i otpornost vozila na dinamička opterećenja, bez potrebe za dodatnim sustavima ovjesa. U kombinaciji s niskootpornim gumama, ovaj pristup omogućuje postizanje visoke energetske učinkovitosti. To je važno jer Shell Eco-marathon postavlja visoke standarde u pogledu energetske učinkovitosti, ali i sigurnosti. Pravilnim izborom guma, felgi i kočionog sustava moguće je istodobno postići minimalan otpor kotrljanja i maksimalnu sigurnost pri kočenju.

Naknadno se prema potrebi može ugraditi električni grijač kao pomoćni sustav ovisno o periodu natjecanja i vrsti klime u kojoj se odvija. Ugradnja dodatnog sustava hlađenja najzahtjevniji je dodatak sustava, budući da može značajno doprinijeti ukupnoj masi vozila te sveukupno povećati potrošnju goriva zbog mase. Jedan od načina kako bi se smanjilo vrijeme po krugu je uvođenje superkondenzatora. Prilikom ugradnje superkondenzatora treba imati na umu nekoliko stvari iz pravilnika:

- Ukupni napon ne smije bit veći od 60 V.
- Energija za punjenje superkondenzatora mora dolaziti isključivo od svežnja gorivnih članaka.
- Uz superkondenzator ne smije postojati nikakav dodatni izvor energije za pogon.

Ovakav pristup sigurnosti omogućuje ne samo ispunjavanje propisanih normi, već i stvaranje temelja za širu primjenu vodika u prometu. Kombinacija naprednih materijala, pametnih sigurnosnih sustava i temeljite edukacije osigurava najviše standarde sigurnosti u radu s vodikom.

## 6. ZAKLJUČCI

Projekt H2CRO pokazao je da je moguće uspješno primijeniti znanja stečena tijekom studija na složenom i interdisciplinarnom zadatku poput razvoja koncepta trkaćeg automobila na pogon vodikom. Kroz projekt su objedinjena različita područja inženjerstva, a rezultati potvrđuju mogućnost integracije gorivnih članaka, spremnika za vodik i električnog pogona u jedinstven i funkcionalan sustav. Takav pristup omogućio je da se teorijska znanja pretoče u praktična rješenja te razviju vještine timskoga rada, projektnog upravljanja i inovativnog razmišljanja.

Važan doprinos rada leži i u edukativnoj dimenziji. Radeći na projektu, stečeno je iskustvo u rješavanju stvarnih inženjerskih problema te su se upoznali aktualni trendovi u području održive mobilnosti. Time je projekt poslužio kao most između akademskog obrazovanja i industrijske prakse, pružajući vrijednu pripremu za buduću profesionalnu karijeru svih članova tima. Posebno je značajno što je projekt nastao u okviru Sveučilišta u Zagrebu, koje svojim resursima, znanstvenim kadrom i potporom potiče ovakve inicijative i omogućuje studentima da svoje znanje i vještine razvijaju u smjeru suvremenih tehnoloških rješenja.

S obzirom na to da je u ovoj fazi izrađen konceptualni model, H2CRO predstavlja kvalitetnu podlogu za daljnji razvoj projekta i prelazak na izradu funkcionalnog prototipa. Time se otvara mogućnost provođenja testiranja, unaprjeđenja sustava i demonstracije stvarnih značajki vozila u uvjetima trkaćih staza. Uz to, projekt stvara odličnu platformu za suradnju s industrijskim partnerima te za povezivanje i zajedničke projekte s domaćim i inozemnim fakultetima, čime se dodatno širi mreža znanja, iskustava i inovacija. Za daljnji razvoj preporučuje se analiza dodatnih geometrijskih varijacija, korištenje realnijih uvjeta (rotacija kotača, vjetar, različiti napadni kutevi) te validacija rezultata eksperimentalnim metodama (npr. tunelom ili osjetnicima u vožnji).

Zaključno, projekt H2CRO pokazao je da studentske inicijative imaju značajan potencijal i to ne samo u tehničkom smislu, već i u obrazovanju i promociji novih tehnologija. Kao koncept, H2CRO čini temelj na kojem se može graditi konkretan prototip, a ujedno i inspiraciju za buduće projekte koji će doprinijeti razvoju znanja, inovacija i održivih rješenja kako u prometu tako i u drugim područjima.

## ZAHVALE

Ovim putem želimo zahvaliti svima koji su na bilo koji način doprinijeli izradi ovoga rada i realizaciji projekta H2CRO.

Našu najveću zahvalnost dugujemo našoj mentorici, Ankici Kovač, koja je svojim pristupom i podrškom stvorila okruženje u kojem smo se osjećali ravnopravnim članovima tima. Ostavila nam je prostor da sami istražujemo i donosimo odluke, ali i poticala rasprave u kojima su se naše ideje oblikovale u zajedničko rješenje.

Isto tako, jedno veliko, veliko hvala našem kolegi, Robertu Lasiću, koji je s nama podijelio svoje bogato iskustvo i znanje koje je stekao u svjetski poznatom i nadasve uspješnom FSB Racing Team – Formula Student Team, gdje obnaša funkciju glavnog menadžera. Nesebično nas je usmjerio putem kojim treba ići i do trenutka pisanja ovoga rada ostao nam na raspolaganju.

Zahvalni smo i svim profesorima, docentima, asistentima, laborantima i suradnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje čija smo znanja i iskustva kroz ovaj projekt po prvi puta u potpunosti iskusili u praksi.

Ovih 15 tjedana bili su nam prilika da osjetimo kako izgleda odgovornost inženjera i upravo nas je to iskustvo ohrabrilo i motiviralo za nastavak ovoga, ali i nove buduće projekte koji su pred nama.

## POPIS LITERATURE

- [1] Toyota: <https://www.toyota.hr/company/archive/toyota-mirai> , pristupljeno 19.5.2025.
- [2] AFDC: <https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen-basics> , pristupljeno 19.5.2025.
- [3] Hydrogen Storage: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>, pristupljeno 19.5.2025.
- [4] Eco-Runner: <https://www.ecorunner.nl/> , pristupljeno 21.5.2025.
- [5] WMG: [https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/news-and-events/news/wmgnews/waste2race\\_sewage\\_powered\\_car/](https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/news-and-events/news/wmgnews/waste2race_sewage_powered_car/), pristupljeno 21.5.2025.
- [6] Tecnico Lisboa: <https://tecnico.ulisboa.pt/en/news/campus-community/tecnico-fuel-cell-presents-first-hydrogen-car-developed-by-students-in-portugal/>, pristupljeno 21.5.2025.
- [7] N. Koch: Shell Eco-marathon – 2025 Official Rules, Chapter I, II & III, 2025.
- [8] Navinkumar, T. M. & Bharatiraja, C. "Sustainable hydrogen energy fuel cell electric vehicles: A critical review of system components and innovative development recommendations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 215, 2025. doi:10.1016/j.rser.2025.115601
- [9] ScienceDirect. *Compressed Gaseous Hydrogen*.  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/compressed-gaseous-hydrogen>
- [10] Cryospain. *Compressed hydrogen: tips for handling and storing it*.  
<https://cryospain.com/compressed-hydrogen>
- [11] Toyota Global Newsroom. *Toyota Develops New Liquid Hydrogen System for Racing*.  
<https://global.toyota/en/newsroom/>
- [12] Zhang, L. et al. (2021). *Recent advances in MOFs and carbon-based materials for hydrogen storage*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110897.
- [13] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). *Global Technical Regulation No. 13 (GTR 13)*. <https://unece.org/transport/documents/2023/07/global-technical-regulation-no-13>
- [14] [https://en.wikipedia.org/wiki/Trailing-arm\\_suspension](https://en.wikipedia.org/wiki/Trailing-arm_suspension)
- [15] [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/164475/3/2020\\_04\\_Rongoni.pdf?utm](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/164475/3/2020_04_Rongoni.pdf?utm)
- [16] <https://thetiredigest.michelin.com/michelin-ultimate-energy-tire>
- [17] Soldo V., Podloga za predavanje "Hlađenje u automobilskoj i transportnoj tehnici" (2024.)
- [18] H2tools – Cylinder Safety, Pacific Northwest National Laboratory, Hydrogen Tools.,  
<https://h2tools.org/cylinder-safety>
- [19] INFICON – Leak Testing of Hydrogen Tanks, INFICON, Technical Article, 2022.,  
<https://www.inficon.com/en/solutions/applications/leak-testing-of-hydrogen-tanks>
- [20] Wingoil – High Pressure Hydrogen Shut-off Valve, Wingoil, Product Information, 2021.,  
<https://www.wingoil.com/high-pressure-hydrogen-shut-off-valve>
- [21] MVFRI – Fire Safety of Hydrogen-Fueled Vehicles, Motor Vehicle Fire Research Institute, 2020.,  
<https://www.mvfri.org/FireSafetyHydrogenVehicles>
- [22] Analytical Approach to Predict Hydrogen Consumption of a Lightweight PEM Fuel Cell Vehicle
- [23] [https://ebikes.ca/tools/simulator.html?throt=100&wheel=12i&hp=500&frame=cust\\_0.05\\_0.005&motor=MG01\\_STD&axis=rpm](https://ebikes.ca/tools/simulator.html?throt=100&wheel=12i&hp=500&frame=cust_0.05_0.005&motor=MG01_STD&axis=rpm)
- [24] <https://www.horizoneducational.com/h-1000-xp-fuel-cell-stack/p1407>

- [25] <https://hypertextbook.com/facts/2005/MichelleFung.shtml>)
- [26] <https://www.polytechnique-insights.com/en/braincamps/energy/sustainable-hydrogen-still-a-long-way-to-go/storage-a-major-hurdle-for-the-hydrogen-industry/#:~:text=Storage%20of%20compressed%20hydrogen%20in,is%2042kg%20per%20cubic%20meter>
- [27] Alcantara S.p.A. (2022). *Sustainability Report and Material Overview*. <https://www.alcantara.com>
- [28] Aquafil Group. (2023). *ECONYL Regeneration System*. <https://www.econyl.com>
- [29] Shell Eco-marathon 2025 Official Rules, Chapter I – Safety. Shell International, 2025., <https://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/for-participants.html>
- [30] United Nations Global Technical Regulation No. 13 (UN GTR 13): Hydrogen and Fuel Cell Vehicles, UNECE, Geneva, 2024., <https://unece.org/transport/standards/vehicle-regulations-wp29/global-technical-regulations-gtrs/un-gtr-no13>
- [31] ISO 19881:2025 (en), Gaseous hydrogen — Land vehicle fuel containers, International Organization for Standardization, Geneva, 2025., <https://www.iso.org/standard/70169.html>
- [32] ISO/TS 15869:2009, Hydrogen Fuel Tanks for Land Vehicles, International Organization for Standardization, Geneva, 2009., <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/sa-479>
- [33] Sherwin-Williams. Firetex M90/02 Intumescent Epoxy Coating – Technical Data Sheet, 2024., <https://industrial.sherwin-williams.com/emea/gb/en/protective-marine/catalog/product/products-firetex-m9002.html>
- [34] Indestructible Paint Ltd. IP9189-A/B Two-Component Intumescent Coating – Product Data, 2024., <https://industrial.sherwin-williams.com/emea/gb/en/protective-marine/catalog/product/products-firetex-m9002.html>
- [35] Winsen Electronics. ZC61 Vehicle Hydrogen Leakage Sensor – User Manual, 2025., <https://www.winsen-sensor.com/d/files/Vehicle-Hydrogen-Leakage-Sensor-ZC61.pdf>
- [36] H2scan Corporation. Gen 5 Solid-State Hydrogen Sensor – Product Sheet, 2025., <https://h2scan.com/products/gen-5-solid-state-hydrogen-sensor/>
- [37] API 527: 2023, Seat Tightness of Pressure Relief Valves, American Petroleum Institute, Washington DC., <https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/api-527>

## **SAŽETAK**

Vid **Andrašić**, Ivan **Bajić**, Marko **Briški**, Ilijana **Cvitanović**, Maurizio **Dellavia**, Ivan **Gašpar**, Renato **Grđanjski**, Viktor **Harapin**, Jelena **Križaić**, Evita **Leljak**, Anđa **Logara**, Ines **Mijić**, Iva **Mraz**, Fran **Nola**, Patrik **Perišić**, Stela **Perković**, Marta **Petrovčić**, David **Plank**, Karlo **Pongrac**, Lovro **Puček**, Nikola **Radić**, Daniel Martoba **Sadowski**, Matej **Šalić**, Dino **Valetić**, Jan **Vulama**, Dario **Zahatek**, Bruno **Zanetti**

### **PRVI HRVATSKI TRKAĆI AUTOMOBIL NA VODIK – H2CRO**

Projekt H2CRO predstavlja značajnu inicijativu u području održive mobilnosti i vodikove tehnologije u Hrvatskoj. Njegov je primarni cilj projektiranje i razvoj koncepta prototipa trkaćeg vozila na vodikov pogon, koji integrira sustav gorivnih članaka s električnim pogonom kako bi se demonstrirala visoka razina značajki uz očuvanje okolišne odgovornosti. Projekt okuplja studente s vrijednim znanjem iz područja strojarstva radi rješavanja ključnih izazova u konstrukciji vozila, uključujući smanjenje mase, poboljšanje aerodinamike, energetske učinkovitost i sigurnost. Posebna se pozornost posvećuje integraciji spremnika za vodik, svežnja gorivnih članaka i razvoju sustava za upravljanje energijom koji može podržati zahtjeve visokih značajki u trkaćim uvjetima. Osim tehničkih ciljeva, H2CRO nastoji podići svijest o vodiku kao čistom energetsom nositelju, potičući pritom suradnju između studenata, akademske zajednice i industrije. Kao prvi studentski trkaći automobil na vodik u Hrvatskoj, projekt naglašava potencijal vodikove mobilnosti te postavlja temelje za buduće inovacije u ovom području.

**Ključne riječi:** vodik; gorivni članci; nulta emisija; električni automobil.

## SUMMARY

Vid **Andrašić**, Ivan **Bajić**, Marko **Briški**, Ilijana **Cvitanović**, Maurizio **Dellavia**, Ivan **Gašpar**, Renato **Grdanjski**, Viktor **Harapin**, Jelena **Križaić**, Evita **Leljak**, Anđa **Logara**, Ines **Mijić**, Iva **Mraz**, Fran **Nola**, Patrik **Perišić**, Stela **Perković**, Marta **Petrovčić**, David **Plank**, Karlo **Pongrac**, Lovro **Puček**, Nikola **Radić**, Daniel Martoba **Sadowski**, Matej **Šalić**, Dino **Valetić**, Jan **Vulama**, Dario **Zahatek**, Bruno **Zanetti**

## THE FIRST CROATIAN HYDROGEN RACING CAR – H2CRO

The project H2CRO brings a great initiative in sustainable mobility and hydrogen technology in Croatia. Its primary goal is the design and development of a hydrogen-powered racing prototype concept, integrating a fuel cell system with an electric drive to demonstrate both performance and environmental responsibility. The project brings together students with valuable knowledge across mechanical engineering to address key challenges in vehicle design, including weight reduction, aerodynamics, energy efficiency, and safety. Particular focus is given to the integration of hydrogen storage, the fuel cell stack, and the development of an energy management system capable of supporting high-performance racing conditions. Beyond its technical objectives, H2CRO aims to raise awareness of hydrogen as a clean energy carrier, while fostering collaboration between students, academia, and industry. As the first student-built hydrogen racing car in Croatia, the project highlights the potential of hydrogen mobility and establishes a foundation for future innovations in this field.

**Key words:** *hydrogen; fuel cells; zero emission; electric vehicle.*

## **KRATKI ŽIVOTOPISI AUTORA**

Vid **Andrašić**, Ivan **Bajić**, Marko **Briški**, Ilijana **Cvitanović**, Maurizio **Dellavia**, Ivan **Gašpar**, Renato **Grdanjski**, Viktor **Harapin**, Jelena **Križaić**, Evita **Leljak**, Anđa **Logara**, , Ines **Mijić**, Iva **Mraz**, Fran **Nola**, Patrik **Perišić**, Stela **Perković**, Marta **Petrovčić**, David **Plank**, Karlo **Pongrac**, Lovro **Puček**, Nikola **Radić**, Daniel Martoba **Sadowski**, Tomo **Smital**, Matej **Šalić**, Dino **Valetić**, Jan **Vulama**, Dario **Zahatek**, Bruno **Zanetti**

su studenti Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu s različitih smjerova, od konstrukcijskog preko procesno-energetskog do usmjerenja energetika i termotehnika, koji su ambiciozni i znatiželjni, puni znanja i želje za učenjem. Osim akademskog angažmana, aktivni su i u studentskim udrugama te raznim projektima, gdje razvijaju kreativnost, komunikacijske vještine i inovativan pristup inženjerskim izazovima. Njihov entuzijazam i zajednički rad na projektu automobila na vodik potvrđuju da interdisciplinarnost i timski duh donose najbolja rješenja.