

# Razvoj programskog alata za simulaciju i analizu performansi bolida Formula Student

---

**Krajnović, Josip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:037088>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Josip Krajnović**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Razvoj programskog alata za  
simulaciju i analizu performansi  
bolida Formula Student**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing.

Student:

Josip Krajnović

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem prof.dr.sc Zoranu Luliću na mentorstvu i podršci tijekom izrade završnog rada, te dr.sc. Goranu Šagiju na korisnim savjetima i ustupljenoj literaturi.

Josip Krajnović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Josip Krajnović Mat. br.: 0035177639

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj programskog alata za simulaciju i analizu performansi bolida Formula Student**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of a Vehicle Performance Simulation and Analysis Tool for Formula Student Race Car**

Opis zadatka:

U posljednjih nekoliko godina studenti FSB-a, sudjeluju u sklopu FSB Racing Team-a, u izradi trkaćeg bolida za međunarodno natjecanje studenata tehničkih fakulteta Formula Student. U sklopu tog natjecanja cilj je da studenti osmisle, konstruiraju i izrade novi trkaći bolid. Iako je već napravljeno nekoliko modela bolida, dosad prilikom ranog razvoja nisu u značajnijoj mjeri bile korištene računalne simulacije za analizu dinamike vozila te evaluaciju različitih koncepata.

U okviru završnog rada potrebno je:

- Opisati dinamičke testove u sklopu natjecanja Formula Student te osnovne parametre koji utječu na dinamiku vozila.
- Opisati jednostavan matematički model vozila s osnovnim parametrima te uvedene pretpostavke i ograničenja pri korištenju takvog modela.
- Razviti programski alat koji će omogućiti:
  - Modeliranje vozila osnovnim parametrima koji utječu na dinamiku vozila.
  - Simulaciju i analizu performansi vozila bitnih za vrednovanje različitih koncepata.
  - Modeliranje putanje vozila preko podataka sa senzora te analizu stvarnih performansi sa testiranja.
- Provesti evaluaciju vlastitog programskog alata usporedbom s programskim alatom OptimumLap s jednostavnim matematičkim modelom.
- Napraviti vrednovanje različitih koncepata trkaćeg bolida za 2016. godinu koristeći vlastiti programski alat i programski alat OptimumLap.

Pri izradi se treba pridržavati pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
25. studenog 2015.

Rok predaje rada:  
1. rok: 25. veljače 2016.  
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.  
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.  
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.  
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

|  |     |
|--|-----|
| SADRŽAJ .....  | I   |
| POPIS SLIKA .....  | III |
| POPIS TABLICA.....   | IV  |
| POPIS OZNAKA .....   | V   |
| SAŽETAK.....   | VI  |
| SUMMARY .....  | VII |
| 1. UVOD.....   | 1   |
| 1.1. Utrka ubrzanja.....                                       | 2   |
| 1.2. Utrka bočnog ubrzanja (engl. <i>Skid-pad</i> ) .....      | 2   |
| 1.3. Slalom (engl. <i>Autocross</i> ).....                     | 3   |
| 1.4. Utrka izdržljivosti i efikasnost (potrošnja goriva) ..... | 4   |
| 2. MATEMATIČKI MODEL VOZILA.....                               | 6   |
| 2.1. Pretpostavke i ograničenja .....                          | 6   |
| 2.2. Osnovni parametri koji utječu na performanse vozila ..... | 7   |
| 2.3. Jednadžbe koje opisuju matematički model vozila.....      | 8   |
| 2.3.1. Vučna sila.....   | 8   |
| 2.3.2. Brzina vožnje .....                                     | 8   |
| 2.3.3. Otpori vožnje .....                                     | 8   |
| 2.3.4. Statički limit trakcije na pogonskim kotačima.....      | 8   |
| 2.3.5. Ubrzanje vozila .....                                   | 9   |
| 2.3.6. Kočenje vozila .....                                    | 9   |
| 2.3.7. Bočno ubrzanje vozila.....                              | 10  |
| 2.3.8. Preraspodjela opterećenja .....                         | 10  |
| 3. PROGRAMSKI ALAT SIMAP(FSB) .....                            | 12  |
| 3.1. Model vozila .....  | 13  |
| 3.1.1. Osnovni podaci o vozilu .....                           | 13  |
| 3.1.2. Karakteristika motora.....                              | 13  |
| 3.1.3. Parametri transmisije .....                             | 14  |
| 3.1.4. Aerodinamička svojstva.....                             | 15  |
| 3.1.5. Parametri gume .....                                    | 15  |
| 3.1.6. Karakteristični dijagrami (model vozila) .....          | 16  |
| 3.1.7. Spremanje i učitavanje modela vozila .....              | 19  |
| 3.2. Simulacija idealnih performansi .....                     | 19  |
| 3.2.1. Uzdužne performanse vozila.....                         | 20  |
| 3.2.2. Bočne performanse vozila.....                           | 22  |
| 3.3. Analiza stvarnih performansi .....                        | 23  |
| 3.3.1. Model uzdužnog ubrzanja i kočenja .....                 | 24  |
| 3.3.2. Uzdužne performanse vozila.....                         | 25  |
| 3.3.3. Bočne performanse vozila.....                           | 27  |
| 3.3.4. Performanse vozila na proizvoljnoj stazi .....          | 28  |
| 3.4. Sprječavanje korisničkih pogrešaka .....                  | 32  |

|  |    |
|--|----|
| 3.4.1. Unos podataka.....  | 32 |
| 3.4.2. Pokretanje simulacije .....                                       | 32 |
| 3.4.3. Učitavanje tekstualnih datoteka .....                             | 34 |
| 3.5. Evaluacija programskog alata .....                                  | 35 |
| 3.5.1. Osnovni nedostaci programa OptimumLap .....                       | 36 |
| 3.5.2. Usporedba rezultata simulacija s rezultatima iz CarSim-a .....    | 37 |
| 4. VREDNOVANJE KONCEPATA PRI RAZVOJU TRKAĆEG BOLIDA ZA 2016. GODINU..... | 41 |
| 4.1. Odabir motora .....   | 41 |
| 4.2. Parametrizacija transmisije .....                                   | 43 |
| 4.3. Utjecaj aerodinamike na performanse.....                            | 45 |
| 5. ZAKLJUČAK.....  | 47 |
| LITERATURA.....  | 48 |

## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Staza na utrci bočnog ubrzanja.....                                      | 2  |
| Slika 2.  | Prikaz korisničkog sučelja.....  | 12 |
| Slika 3.  | Osnovni podaci o vozilu Strix.....                                       | 13 |
| Slika 4.  | Karakteristika motora vozila Strix.....                                  | 14 |
| Slika 5.  | Parametri transmisije vozila Strix.....                                  | 14 |
| Slika 6.  | Aerodinamička svojstva vozila Strix.....                                 | 15 |
| Slika 7.  | Parametri gume vozila Strix.....   | 15 |
| Slika 8.  | Brzinska karakteristika motora vozila Strix.....                         | 16 |
| Slika 9.  | Vučni dijagram vozila Strix.....   | 17 |
| Slika 10. | Pilasti dijagram mjenjača vozila Strix.....                              | 17 |
| Slika 11. | Model uzdužne trakcije vozila Strix.....                                 | 18 |
| Slika 12. | Model uzdužnog ubrzanja i kočenja vozila Strix.....                      | 18 |
| Slika 13. | Model bočnog ubrzanja vozila Strix.....                                  | 19 |
| Slika 14. | Dijagram brzine u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju.....                  | 20 |
| Slika 15. | Dijagram prijeđenog puta u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju.....         | 20 |
| Slika 16. | Dodavanje iznosa prijeđenog puta.....                                    | 21 |
| Slika 17. | Dijagram brzine u ovisnosti o vremenu pri kočenju.....                   | 21 |
| Slika 18. | Dijagram puta kočenja u ovisnosti o brzini.....                          | 22 |
| Slika 19. | Dijagram kritične brzine zavoja.....                                     | 22 |
| Slika 20. | Simulacija ispitne procedure <i>Skidpad</i> .....                        | 23 |
| Slika 21. | Učitavanje telemetrije.....  | 24 |
| Slika 22. | Model stvarnog ubrzanja.....   | 24 |
| Slika 23. | Model stvarnog kočenja.....  | 25 |
| Slika 24. | Analiza stvarne brzine u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju.....           | 25 |
| Slika 25. | Analiza stvarnog prijeđenog puta u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju..... | 26 |
| Slika 26. | Analiza stvarne brzine u ovisnosti o vremenu pri kočenju.....            | 26 |
| Slika 27. | Analiza stvarnog kočionog puta u ovisnosti o brzini pri kočenju.....     | 27 |
| Slika 28. | Dijagram brzine na ispitnoj proceduri <i>Skidpad</i> .....               | 27 |
| Slika 29. | Dijagram bočnog ubrzanja na ispitnoj proceduri <i>Skidpad</i> .....      | 28 |
| Slika 30. | Očitavanje vrijednosti s putanje vozila.....                             | 28 |
| Slika 31. | Stvarni izgled staze u programu CarSim.....                              | 29 |
| Slika 32. | Prikaz generirane putanje na stvarnom izgledu staze.....                 | 29 |
| Slika 33. | Dijagram brzine po duljini staze.....                                    | 30 |
| Slika 34. | Dijagram ubrzanja po duljini staze.....                                  | 30 |
| Slika 35. | Dijagram bočnog ubrzanja po duljini staze.....                           | 31 |
| Slika 36. | Dijagram proteklog vremena po duljini staze.....                         | 31 |
| Slika 37. | Usporedba modela ubrzanja programskog alata SIMAP(FSB) s CarSim-om.....  | 38 |
| Slika 38. | Usporedba ubrzanja u programskom alatu SIMAP(FSB) i CarSim-u.....        | 38 |
| Slika 39. | Usporedba modela kočenja programskog alata SIMAP(FSB) s CarSim-om.....   | 39 |
| Slika 40. | Usporedba kočenja u programskom alatu SIMAP(FSB) i CarSim-u.....         | 39 |
| Slika 41. | Usporedba brzinske karakteristike pri odabiru motora.....                | 42 |
| Slika 42. | Utjecaj odabira motora na model uzdužne trakcije.....                    | 42 |
| Slika 43. | Utjecaj parametrizacije transmisije na model uzdužne trakcije.....       | 44 |
| Slika 44. | Utjecaj aerodinamike na model bočnog ubrzanja.....                       | 45 |
| Slika 45. | Utjecaj aerodinamike na model uzdužnog ubrzanja i kočenja.....           | 46 |



**POPIS TABLICA**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Princip bodovanja na natjecanjima.....                             | 1  |
| Tablica 2. Osnovni parametri za definiranje matematičkog modela.....          | 7  |
| Tablica 3. Primjer pronađenih grešaka prilikom pokretanja simulacije.....     | 33 |
| Tablica 4. Primjer pronađenih grešaka pri učitavanju tekstualne datoteke..... | 34 |
| Tablica 5. Vrednovanje programa OptimumLap .....                              | 36 |
| Tablica 6. Vrednovanje programa SIMAP(FSB).....                               | 37 |
| Tablica 7. Vrednovanje odabira motora .....                                   | 43 |
| Tablica 8. Vrednovanje parametrizacije transmisije .....                      | 44 |
| Tablica 9. Vrednovanje utjecaja aerodinamike .....                            | 46 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka          | Jedinica   | Opis   |
|-----------------|------------|--|
| $A$             | $m^2$      | Napadna površina                                     |
| $a$             | $m/s^2$    | Ubrzanje vozila                                      |
| $a_k$           | $m/s^2$    | Usporenje vozila                                     |
| $a_{lat}$       | $m/s^2$    | Bočno ubrzanje vozila                                |
| $C_d$           | -          | Koeficijent otpora zraka                             |
| $C_L$           | -          | Koeficijent uzgona                                   |
| $\%C_L$         | %          | Postotak sile uzgona prenesene na pogoske kotače     |
| $f_k$           | -          | Koeficijent otpora kotrljanja                        |
| $F_k$           | N          | Otpor kotrljanja                                     |
| $F_K$           | N          | Sila kočenja   |
| $F_{S\_limit}$  | N          | Statički limit trakcije                              |
| $F_{D\_limit}$  | N          | Dinamički limit trakcije                             |
| $F_R$           | N          | Otpori vožnje  |
| $F_V$           | N          | Vučna sila   |
| $F_Z$           | N          | Otpor zraka  |
| $g$             | $m/s^2$    | Gravitacijsko ubrzanje                               |
| $\frac{h_T}{L}$ | -          | Omjer visine težišta vozila i međuosovinskog razmaka |
| $i_j$           | -          | Prijenosni omjer stupnja prijenosa                   |
| $i_o$           | -          | Prijenosni omjer u osovinskom prijenosniku           |
| $j$             | -          | Broj stupnjeva prijenosa                             |
| $k_m$           | -          | Koeficijent inercije rotacijskih dijelova            |
| $M_m$           | Nm         | Moment motora  |
| $m_V$           | kg         | Ukupna masa vozila                                   |
| $\%m$           | %          | Postotak mase na pogonskim kotačima                  |
| $n_m$           | $min^{-1}$ | Brzina vrtnje motora                                 |
| $R$             | m          | Polumjer zavoja                                      |
| $r_d$           | m          | Dinamički polumjer kotača                            |
| $\Delta t$      | s          | Vrijeme promjene stupnja prijenosa                   |
| $v$             | m/s        | Brzina vozila  |
| $\rho_z$        | $kg/m^3$   | Gustoća zraka  |
| $\eta_t$        | -          | Iskoristivost transmisije                            |
| $\mu$           | -          | Koeficijent trenja između gume i podloge             |

## **SAŽETAK**

U sklopu ovog završnog rada razvijen je programski alat za simulaciju i analizu performansi vozila na temelju jednostavnog matematičkog modela, koji opisuje vozilo pomoću seta osnovnih parametara koji utječu na performanse vozila. Svrha ovoga alata je analizirati utjecaj osnovnih parametara na performanse vozila te na temelju rezultata simulacija provesti evaluaciju različitih koncepata u ranoj fazi razvoja Formula Student bolida.

U uvodnom dijelu rada opisano je Formula Student natjecanje te potreba za ovakvim programskim alatom u ranoj fazi razvoja bolida. Detaljnije su opisane dinamičke discipline natjecanja te princip bodovanja u tim disciplinama. U sljedećem poglavlju opisani su osnovni parametri vozila koji utječu na performanse vozila, uvedena ograničenja i pretpostavke pri korištenju takvog modela te su raspisane jednadžbe koje čine matematički model. Glavni dio rada čini prikaz razvijenog programskog alata i mogućnosti koje nudi. Prikazan je proces modeliranja vozila, provedbe simulacija i analize dobivenih rezultata te je dana usporedba razvijenog programskog alata s programskim alatom OptimumLap temeljenim na sličnom matematičkom modelu. Vrednovanje programskog alata provedeno je usporedbom rezultata s rezultatima dobivenim simulacijama u komercijalnom programu CarSim, koji sadrži mnogo kompleksnije matematičke modele te simulira dinamiku vozila s vrlo velikom točnošću. U završnom dijelu rada provedena je evaluacija različitih koncepata pri razvoju ovogodišnjeg bolida FSB Racing Team-a koristeći vlastiti programski alat i programski alat OptimumLap.

**Ključne riječi:** Formula Student, dinamika vozila, simulacija, programiranje

## **SUMMARY**

The goal of this bachelor thesis was to develop a program for simulation and analysis of vehicle performance, based on a simple mathematical model which describes a vehicle as a set of basic parameters which influence vehicle performance. The purpose of this program is to analyze the influence of these parameters on performance and to perform an evaluation of different concepts in early stages of Formula Student race car development.

At the beginning of the thesis, Formula Student competition is described, and the need for this type of program in early stages of race car development is explained. Detailed description of dynamic disciplines is given as well as and scoring principles for these disciplines. The next chapter describes the basic parameters which influence vehicle performance, limitations and assumptions imposed by using this type of model and the equations of which the mathematical model consists. The main part of the thesis is the presentation of the developed program and its features. The process of vehicle modelling and simulation, as well as the analysis of the obtained results is shown, and the comparison of a developed program to a similar program called OptimumLap is given. Evaluation of a developed program is conducted by comparing the results with those obtained in a commercial program CarSim, which incorporates mathematical models of much higher complexity, thus simulating vehicle dynamics with very high accuracy. In the final part of the thesis, the evaluation of different concepts in development of FSB Racing Team's new race car, using both programs, is shown.

**Keywords:** Formula Student, vehicle dynamics, simulation, programming

## 1. UVOD

U posljednjih nekoliko godina studenti FSB-a, u sklopu FSB Racing Team-a, sudjeluju na međunarodnim natjecanjima studenata tehničkih fakulteta Formula Student. U sklopu projekta potrebno je osmisliti, konstruirati i izraditi trkaći bolid poštujući pravilnik natjecanja, te u konačnici s tim bolidom nastupiti na natjecanjima koja se održavaju diljem svijeta. Natjecanje se sastoji od statičkih i dinamičkih disciplina. U statičkim disciplinama ocjenjuje se konstrukcija bolida, opravdanost troškovnika izrade bolida (prema zamišljenoj proizvodnji od 1000 komada godišnje) te prezentacija projekta u obliku poslovnog plana. Tim disciplinama nastoji se potaknuti inovativnost u razvoju, ali uz razumno korištenje proizvodnih tehnologija imajući na umu troškovnik projekta. Također se nastoji potaknuti razvoj poslovnih i socijalnih vještina bitnih u pripremi studenata za tržište rada. Dinamički dio natjecanja sastoji se od utrke ubrzanja, utrke bočnog ubrzanja (engl. *Skid-pad*), slaloma (engl. *Autocross*) te utrke izdržljivosti (engl. *Endurance*) koja sadrži i mjerenje potrošnje goriva. Ove discipline ocjenjuju performanse vozila i nose preko dvije trećine ukupnih bodova na natjecanju [Tablica 1]. Stoga je bitno u ranim fazama razvoja bolida odluke donositi po kriteriju njihovog utjecaja na performanse bolida, odnosno evaluaciju koncepata provoditi na temelju simulacija performansi što je upravo i tema ovog završnog rada.

**Tablica 1. Princip bodovanja na natjecanjima**

| <b>Statičke discipline (325 bodova)</b>  |             |
|--|-------------|
| Prezentacija projekta                    | 75          |
| Konstrukcija bolida                      | 150         |
| Analiza troškovnika                      | 100         |
| <b>Dinamičke discipline (625 bodova)</b> |             |
| Utrka ubrzanja                           | 75          |
| Skid-pad                                 | 50          |
| Slalom                                   | 150         |
| Efikasnost                               | 100         |
| Utrka izdržljivosti                      | 300         |
| <b>UKUPNO BODOVA:</b>                    | <b>1000</b> |

### 1.1. Utrka ubrzanja

Utrka ubrzanja ocjenjuje ubrzanje vozila po pravcu na ravnoj podlozi. Ukupna duljina staze iznosi 75 metara. Vozilo kreće iz stanja mirovanja 0,3 metra iza startne linije. Vrijeme ubrzanja mjeri se od prelaska startne linije do prelaska ciljne linije. Svaki tim ima pravo nastupiti na utrci ubrzanja s dva vozača, a svaki od njih ima pravo na dva pokušaja.

Jednadžba (1) prikazuje princip bodovanja utrke ubrzanja.

$$\text{OSVOJENI BODOVI} = 71,5 \cdot \frac{(T_{max}/T_{your}) - 1}{(T_{max}/T_{min}) - 1} + 3,5 \quad (1)$$

gdje je:

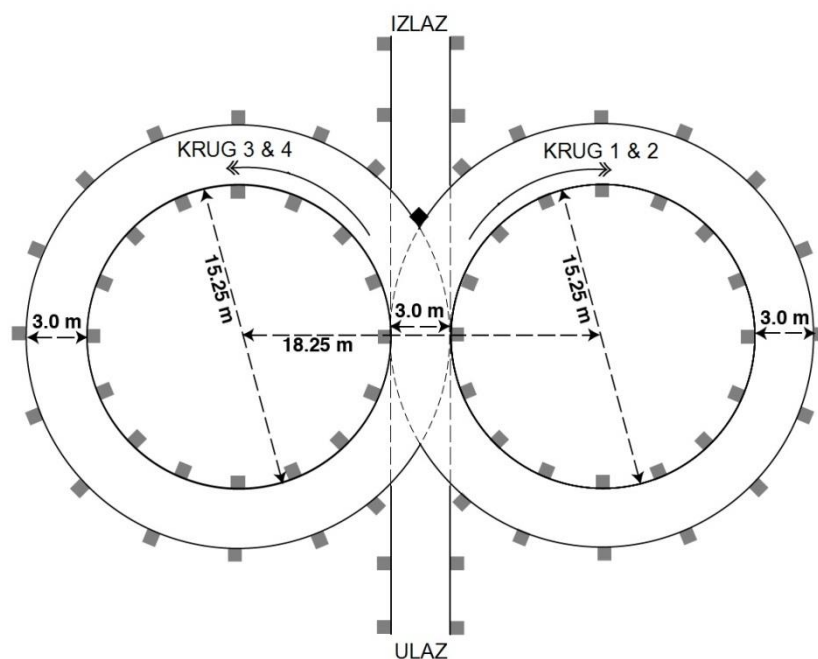
$T_{your}$  - najbolje izmjereno vrijeme bolida koji se boduje

$T_{min}$  - najbolje izmjereno vrijeme najbržeg bolida

$T_{max}$  - 150 % od  $T_{min}$

### 1.2. Utrka bočnog ubrzanja (engl. Skid-pad)

Utrka bočnog ubrzanja ocjenjuje sposobnost skretanja vozila na ravnoj podlozi u zavoju konstantnog polumjera. Staza je definirana čunjevima, a sastoji se od dva para koncentričnih krugova postavljenih u obliku osmice, dok je startno/ciljna ravnina definirana vodoravnom linijom koja spaja centre krugova [Slika 1].



Slika 1. Staza na utrci bočnog ubrzanja

Procedura je definirana tako da vozač ulazi u osmicu te radi dva puna desna kruga te nakon toga dva puna lijeva kruga. Vremena se mjere za drugi (desni) i četvrti (lijevi) krug, te se kao konačni rezultat uzima prosjek tih dvaju izmjerenih vremena. Kazna od 0,25 sekundi dodaje se prosječnom vremenu za svaki srušeni čunj. Svaki tim ima pravo nastupiti na utrci bočnog ubrzanja s dva vozača, od kojih svaki ima pravo na dva pokušaja.

Jednadžba (2) prikazuje princip bodovanja utrke bočnog ubrzanja.

$$\text{OSVOJENI BODOVI} = 47,5 \cdot \frac{(T_{max}/T_{your})^2 - 1}{(T_{max}/T_{min})^2 - 1} + 2,5 \quad (2)$$

gdje je:

$T_{your}$  - najbolje prosječno vrijeme bolida koji se boduje

$T_{min}$  - najbolje prosječno vrijeme najbržeg bolida

$T_{max}$  - 125 % od  $T_{min}$

### 1.3. Slalom (engl. *Autocross*)

Slalom je izuzetno dinamična ispitna procedura koja kombinira ubrzanje, kočenje i skretanje odnosno ocjenjuje upravljivost i performanse bolida na uskoj zavojitoj stazi definiranoj čunjevima. Ukupna duljina staze iznosi oko 805 metara, a najmanja širina staze iznosi 3,5 metara. Karakterističnost ove discipline je da prosječna brzina vožnje iznosi približno od 40 km/h do 48 km/h, a to je postignuto sljedećim pravilima pri formiranju staze:

1. Pravci koji počinju i završavaju oštrim zavojima (engl. *hairpin*) ne smiju biti duži od 60 metara, odnosno ne duži od 45 metara ako završavaju blagim zavojem.
2. Promjeri normalnih zavoja su od 23 metra do 45 metara.
3. Minimalni vanjski promjer oštrog zavoja iznosi 9 metara.
4. Slalomi izvedeni čunjevima u pravcu s razmacima od 7,62 do 12,19 metara.
5. Korištenje šikana, povezanih zavoja, zavoja kojima se smanjuje polumjer itd.

Svaki tim ima pravo nastupiti s dva vozača, a svaki od njih ima pravo na dva pokušaja. Mjere se vremena od startne do ciljne ravnine, a za rušenje čunjeva ili izlijetanje sa staze na izmjereno vrijeme dodaju se vremenske kazne definirane pravilnikom. Kao konačni rezultat za bodovanje uzima se najbolje ostvareno vrijeme.

Jednadžba (3) prikazuje princip bodovanja slaloma.

$$\text{OSVOJENI BODOVI} = 142,5 \cdot \frac{(T_{max}/T_{your}) - 1}{(T_{max}/T_{min}) - 1} + 7,5 \quad (3)$$

gdje je:

$T_{your}$  - najbolje ostvareno vrijeme bolida koji se boduje

$T_{min}$  - najbolje ostvareno vrijeme najbržeg bolida

$T_{max}$  - 145 % od  $T_{min}$

#### 1.4. Utrka izdržljivosti i efikasnost (potrošnja goriva)

Utrka izdržljivosti i efikasnost boduju se kao dvije odvojene discipline, a odrađuju se istovremeno. Ova ispitna procedura provjerava izdržljivost odnosno pouzdanost bolida te kombinirano ocjenjuje njegove performanse i potrošnju goriva. Staza je definirana čunjevima tako da bi prosječne brzine trebale biti između 48 km/h i 57 km/h, a maksimalna ostvariva brzina ne bi trebala prelaziti 105 km/h. To je postignuto sljedećim pravilima pri formiranju staze:

1. Pravci koji počinju i završavaju oštrim zavojima (engl. *hairpin*) ne smiju biti duži od 77 metara, odnosno ne duži od 61 metar ako završavaju blagim zavojem. Na pravcima se nalazi nekoliko zona za prelaženje sporijih bolida.
2. Promjeri normalnih zavoja su od 30 metara do 54 metra.
3. Minimalni vanjski promjer oštrog zavoja iznosi 9 metara.
4. Slalomi izvedeni čunjevima u pravcu sa razmacima od 9 do 15 metara.
5. Korištenje šikana, povezanih zavoja, zavoja kojima se smanjuje polumjer itd.

Najmanja širina staze iznosi 4,5 metara, a ukupni prevaljeni put na utrci izdržljivosti iznosi 22 kilometra. Utrku voze dva vozača, a zamjena vozača odvija se na polovici utrke. Za vrijeme utrke mjeri se vrijeme svakog kruga, a kao konačni rezultat uzima se ukupno vrijeme potrebno za završetak utrke izdržljivosti umanjeno za vrijeme kruga u kojemu je odrađena izmjena vozača. U slučaju dobivanja kazni za vrijeme utrke konačnom rezultatu dodaju se vremenski penali određeni pravilnikom natjecanja. Na kraju utrke mjeri se količina potrošenog goriva te se prema korištenom gorivu preračunava u emisiju  $CO_2$ , na temelju čega se boduje efikasnost.



Jednadžba (4) prikazuje princip bodovanja utrke izdržljivosti.

$$\text{OSVOJENI BODOVI} = 250 \cdot \frac{(T_{max}/T_{your}) - 1}{(T_{max}/T_{min}) - 1} + 50 \quad (4)$$

gdje je:

$T_{your}$  - ukupno ostvareno vrijeme bolida koji se boduje

$T_{min}$  - ukupno ostvareno vrijeme najbržeg bolida

$T_{max}$  - 145 % od  $T_{min}$

Jednadžbe (5) i (6) prikazuju princip bodovanja efikasnosti.

$$\text{OSVOJENI BODOVI} = 100 \cdot \frac{(Eff\_Factor_{MIN} / Eff\_Factor_{YOUR}) - 1}{(Eff\_Factor_{MIN} / Eff\_Factor_{MAX}) - 1} \quad (5)$$

$$Eff\_Factor = \frac{\frac{T_{min}}{L_{aptotalT_{min}}}}{\frac{T_{your}}{L_{apyour}}} \cdot \frac{\frac{CO2_{min}}{L_{aptotalCO2min}}}{\frac{CO2_{your}}{L_{apyour}}} \quad (6)$$

gdje je:

$T_{your}$  - ukupno ostvareno vrijeme bolida koji se boduje

$T_{min}$  - ukupno ostvareno vrijeme najbržeg bolida čija potrošnja goriva ne prelazi 26 litara/100km

$CO2_{min}$  - masa emitiranog CO<sub>2</sub> bolida s najmanjom izračunatom emisijom čije ukupno ostvareno vrijeme ne prelazi 145 % najboljeg ukupnog ostvarenog vremena na utrci

$CO2_{your}$  - masa emitiranog CO<sub>2</sub> bolida koji se boduje

$L_{aptotalT_{min}}$  - broj odvezenih krugova bolida koji je postavio  $T_{min}$

$L_{aptotalCO2min}$  - broj odvezenih krugova bolida koji je postavio  $CO2_{min}$

$Eff\_Factor_{MIN}$  - dobiva se uvrštavanjem u jednadžbu (6) pod  $T_{your}$  145 % najboljeg ukupnog ostvarenog vremena na utrci, a pod  $CO2_{your}$  ekvivalent emisiji od 60,06 kg CO<sub>2</sub> na 100 km

## 2. MATEMATIČKI MODEL VOZILA

Da bi se mogle simulirati performanse vozila, potrebno je postaviti matematički model vozila te poznavati parametre vozila koji su sadržani u matematičkom modelu. Danas postoje razni komercijalni programski paketi koji vozilo modeliraju do najsitnijih detalja kako bi što točnije opisali stvarno ponašanje vozila u dinamičkim uvjetima. U ovom slučaju, s obzirom da se radi o ranoj fazi razvoja u kojoj je većinu takvih parametara nemoguće pretpostaviti, cilj je pojednostaviti matematički model te opisati vozilo sa što manjim brojem parametara koji mogu s dovoljnom točnošću predvidjeti performanse, a mogu se odrediti ili pretpostaviti na samom početku razvoja vozila.

### 2.1. Pretpostavke i ograničenja

Pri definiranju razine kompleksnosti matematičkog modela, postavljene su određene pretpostavke i ograničenja:

1. Vozilo je zamišljeno kao kruto tijelo odnosno kao masa koncentrirana u jednoj točki, ispod koje se nalazi kotač.
2. Vertikalna dinamika se ne opisuje te se zanemaruje utjecaj preraspodjele opterećenja i kinematike ovjesa na performanse vozila.
3. Pretpostavlja se masa vozila i postotak opterećenja na pogonskim kotačima.
4. Koeficijent trenja između gume i podloge je konstantan i može se pretpostaviti.
5. Poznate su dimenzije gume.
6. Poznata je brzinska karakteristika motora.
7. Poznati su ili se pretpostavljaju parametri transmisije.
8. Aerodinamičke sile definirane su napadnom površinom i konstantnim koeficijentima otpora i uzgona, koji se mogu pretpostaviti.
9. Kočni sustav je idealiziran tako da se koči maksimalnom silom koju guma može prenijeti na podlogu.
10. Simuliraju se performanse na ravnoj podlozi.
11. Otpore vožnji čine otpor zraka, otpor kotrljanja te otpor uslijed inercije rotirajućih dijelova.

## 2.2. Osnovni parametri koji utječu na performanse vozila

Na temelju navedenih pretpostavki i ograničenja, određen je set parametara koje je potrebno poznavati za formulaciju takvog matematičkog modela [Tablica 2].

Tablica 2. Osnovni parametri za definiranje matematičkog modela

| NAZIV PARAMETRA   | OZNAKA U JEDNADŽBAMA |
|---|----------------------|
| <b>Osnovni parametri vozila</b>                           |                      |
| Ukupna masa vozila  | $m_V$                |
| Postotak mase na pogonskim kotačima                       | $\%m$                |
| <b>Parametri motora (brzinska karakteristika)</b>         |                      |
| Raspon brzina vrtnje motora                               | $(n_m)_i$            |
| Moment motora pri određenoj brzini vrtnje                 | $(M_m)_i$            |
| <b>Parametri transmisije</b>                              |                      |
| Broj stupnjeva prijenosa                                  | $j$                  |
| Prijenosni omjeri stupnjeva prijenosa                     | $i_j$                |
| Prijenosni omjer u osovinskom prijenosniku                | $i_o$                |
| Vrijeme promjene stupnja prijenosa                        | $\Delta t$           |
| Iskoristivost transmisije                                 | $\eta_t$             |
| <b>Aerodinamički parametri</b>                            |                      |
| Napadna površina  | $A$                  |
| Koeficijent otpora zraka (engl. <i>drag coefficient</i> ) | $C_d$                |
| Koeficijent uzgona (engl. <i>lift coefficient</i> )       | $C_L$                |
| Postotak sile uzgona prenesene na pogoske kotače          | $\%C_L$              |
| <b>Parametri gume</b>                                     |                      |
| Dinamički polumjer kotača                                 | $r_d$                |
| Koeficijent trenja između gume i podloge                  | $\mu$                |
| Koeficijent otpora kotrljanja                             | $f_k$                |

### 2.3. Jednadžbe koje opisuju matematički model vozila

U ovome podpoglavlju prikazane su jednadžbe koje opisuju matematički model vozila. Izračunate vrijednosti dobivaju se u matričnom zapisu, pri čemu index  $j$  označava stupanj prijenosa u kojem se vozilo nalazi, a index  $i$  predstavlja index brzine vrtnje motora u zadanom trenutku.

#### 2.3.1. Vučna sila

Jednadžba (7) daje iznos vučne sile u određenom stupnju prijenosa i pri određenoj brzini vrtnje motora.

$$(F_V)_{j,i} = \frac{(M_m)_i \cdot i_j \cdot i_o \cdot \eta_t}{r_d} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

#### 2.3.2. Brzina vožnje

Jednadžba (8) daje iznos brzine vožnje u određenom stupnju prijenosa i pri određenoj brzini vrtnje motora.

$$v_{j,i} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_d \cdot (n_m)_i}{60 \cdot i_j \cdot i_o} \quad [\text{m/s}] \quad (8)$$

#### 2.3.3. Otpori vožnje

Jednadžba (9) daje iznos ukupnih otpora vožnje u ovisnosti o brzini vozila, pri čemu je  $F_Z$  otpor zraka, a  $F_k$  otpor kotrljanja. Otpor ubrzanju uslijed inercije rotirajućih dijelova uzet je u obzir direktno pri računanju iznosa uzdužnog ubrzanja u jednadžbi (11).

$$(F_R)_{j,i} = F_Z + F_k = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A \cdot \rho_z \cdot (v_{j,i})^2 + m_V \cdot g \cdot f_k \quad [\text{N}] \quad (9)$$

#### 2.3.4. Statički limit trakcije na pogonskim kotačima

Jednadžba (10) daje statički limit trakcije odnosno iznos maksimalne sile koju guma može prenijeti na podlogu, a ona je jednaka umnošku normalne sile na pogonskim kotačima i koeficijenta trenja gume i podloge.

$$(F_{S,limit})_{j,i} = \left( \frac{\%m}{100} \cdot m_V \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \frac{\%C_L}{100} \cdot C_L \cdot A \cdot \rho_z \cdot (v_{j,i})^2 \right) \cdot \mu \quad [\text{N}] \quad (10)$$

### 2.3.5. Ubrzanje vozila

Jednadžba (11) daje iznos ubrzanja vozila u određenom stupnju prijenosa i pri određenoj brzini vrtnje motora.

$$a_{j,i} = \frac{(F_V)_{j,i} - (F_R)_{j,i}}{k_m \cdot m_V} \quad [\text{m/s}^2] \quad (11)$$

Koeficijent  $k_m$  predstavlja otpor ubrzanju uslijed inercije rotirajućih dijelova, a program ga računa automatski prema jednadžbi (12):

$$(k_m)_j = 1 + 0,04 + 0,0025 \cdot (i_j \cdot i_o)^2 \quad [\text{m/s}^2] \quad (12)$$

Ukoliko je  $(F_V)_{j,i} - (F_R)_{j,i} > (F_{limit})_{j,i}$  tada je iznos ubrzanja ograničen maksimalnom silom koja se može prenijeti na podlogu te iznosi prema jednadžbi (13):

$$a_{j,i} = \frac{(F_{limit})_{j,i}}{m_V} \quad [\text{m/s}^2] \quad (13)$$

Kako bi se simuliralo ubrzanje vozila iz stanja mirovanja do maksimalne brzine, moraju se poznavati još dva bitna parametra, a to su brzina vrtnje motora pri kojoj se prebacuje u viši stupanj prijenosa, te brzina vrtnje motora nakon prebacivanja, i to za svaki prijelaz iz nižeg u viši stupanj prijenosa. Brzina vrtnje pri kojoj se prebacuje u viši stupanj može se zadati, ili pretpostaviti da se prebacuje pri maksimalnoj brzini vrtnje motora. Na osnovu toga parametra određuje se brzina vrtnje nakon prebacivanja prema jednadžbi (14):

$$(n_{m,np})_j = \frac{60 \cdot i_j \cdot i_o \cdot v_{j-1,i}}{2 \cdot \pi \cdot r_d} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (14)$$

### 2.3.6. Kočenje vozila

Već je spomenuto da je model kočenja idealiziran tako da vozilo u svakom trenutku koči najvećom mogućom silom koju guma može prenijeti na podlogu, pa je sila kočenja prema jednadžbi (15) jednaka:

$$(F_K)_{j,i} = (m_V \cdot g - \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot A \cdot \rho_z \cdot (v_{j,i})^2) \cdot \mu \quad [\text{N}] \quad (15)$$

Osim sile kočenja vozilo usporavaju i otpori vožnje pa se prema jednadžbi (16) dobiva:

$$(a_k)_{j,i} = \frac{(F_K)_{j,i} + (F_R)_{j,i}}{m_V} \quad [\text{m/s}^2] \quad (16)$$

### 2.3.7. Bočno ubrzanje vozila

Model bočnog ubrzanja daje maksimalne performanse pri skretanju vozila pod pretpostavkom da vozilo vozi konstantnom brzinom kroz zavoj konstantnog polumjera. Kako bi vozilo održavalo konstantnu brzinu potrebna je uzdužna vučna sila po iznosu jednaka otporima vožnje, te bočna sila skretanja jednaka centripetalnoj sili u zavoj. Rezultanta tih dviju sila jednaka je maksimalnoj sili trakcije, prema jednadžbi (17).

$$(F_R)^2 + \left(\frac{m_V \cdot v^2}{R}\right)^2 = (m_V \cdot g \cdot \mu - \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot A \cdot \rho_z \cdot v^2 \cdot \mu)^2 \quad [\text{N}] \quad (17)$$

Nakon uvrštavanja izraza za otpore vožnji te sređivanja jednadžbe (17) dobiva se izraz za maksimalnu brzinu vožnje kroz zavoj u ovisnosti o polumjeru zavoja prema jednadžbi (18):

$$v = \sqrt{\frac{m_V \cdot g \cdot \mu}{\sqrt{\left(\frac{m_V}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A \cdot \rho_z\right)^2} + \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot A \cdot \rho_z \cdot \mu}} \quad [\text{m/s}] \quad (18)$$

Bočno ubrzanje vozila računa se preko izračunate brzine prema jednadžbi (19):

$$a_{lat} = \frac{v^2}{R} \quad [\text{m/s}^2] \quad (19)$$

### 2.3.8. Preraspodjela opterećenja

Kako pri naglom ubrzanju vozila uzdužna preraspodjela opterećenja na kotače, tzv. transfer mase može imati značajan utjecaj na performanse, uključena je u matematički model i opcija simuliranja tog efekta. Uzimajući u obzir efekt preraspodjele opterećenja, limit trakcije mijenja se pri ubrzanju vozila u ovisnosti o iznosu uzdužnog ubrzanja i to tako da je efekt pozitivan za vozila s pogonom na stražnje kotače, a negativan za vozila s pogonom na prednje kotače.

Pri tome korisnik mora zadati, odnosno pretpostaviti omjer visine težišta vozila i međuosovinskog razmaka, a jednadžbi (10) dodaje se iznos preraspodjele opterećenja pa je dinamički limit trakcije prema jednadžbi (20):

$$(F_{D\_limit})_{j,i} = (F_{S,limit})_{j,i} \pm m_V \cdot a_{j,i-1} \cdot \frac{h_T}{L} \cdot \mu \quad [\text{N}] \quad (20)$$

Na temelju prikazanog matematičkog modela razvijeni su algoritmi za računanje idealnih performansi, i to za:

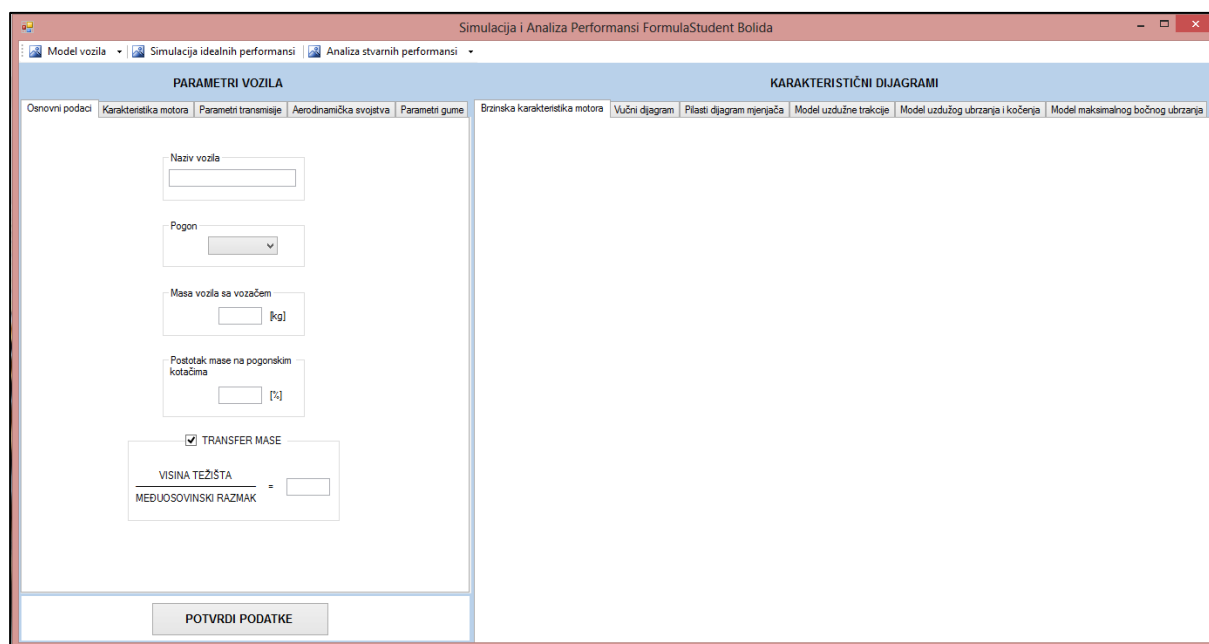
- ubrzanje vozila od stanja mirovanja do maksimalne brzine vozila
- kočenje od maksimalne brzine vozila do potpunog zaustavljanja
- bočne performanse na ispitnoj proceduri *Skid-pad*
- maksimalnu brzinu prolaska zavoja zadanog polumjera

Rezultati simulacija prikazuju se dijagramima u cijelom rasponu ostvarive brzine vozila, što daje mogućnost očitavanja idealnih performansi za različite ispitne procedure direktno iz dijagrama. Prikaz programa i njegovih mogućnosti dan je u sljedećem poglavlju.

### 3. PROGRAMSKI ALAT SIMAP(FSB)

Za razvoj programskog alata korišten je programski jezik *Visual Basic*. Implementiran je matematički model vozila te su razvijeni algoritmi za unos podataka, simulaciju idealnih performansi vozila te prikaz i analizu rezultata simulacija, spremanje i naknadno učitavanje gotovih modela i sprječavanje eventualnih korisničkih grešaka. Također su razvijeni algoritmi za analizu telemetrije i prikaz rezultata kako bi se mogle analizirati stvarne performanse vozila. Korisničko sučelje izrađeno je unutar *Visual Studio* platforme pomoću *Visual Basic Form Designer-a* koristeći standardnu bazu alata za izradu korisničkog sučelja (engl. *toolbox*).

Korisničko sučelje podijeljeno je na dva dijela, pri čemu lijeva strana služi za unos podataka dok desna strana služi za prikaz i analizu rezultata [Slika 2].



Slika 2. Prikaz korisničkog sučelja

Program sadrži tri glavna modula:

1. Model vozila
2. Simulacija idealnih performansi
3. Analiza stvarnih performansi



Prva dva modula detaljno će biti objašnjeni na primjeru modeliranja i simuliranja performansi trkaćeg bolida FSB Racing Team-a iz 2016. godine kodnog imena FSB-RT05 "Strix". Treći modul, s obzirom da bolid još nije dovršen, bit će objašnjen na primjeru simuliranih performansi bolida Strix u programu CarSim, koji koristi kompleksan matematički model vozila i trebao bi s visokom točnošću simulirati stvarne performanse vozila.

### 3.1. Model vozila

U ovom modulu potrebno je unijeti tražene parametre, a nakon potvrđivanja unesenih parametara prikazuju se karakteristični dijagrami koji opisuju model vozila.

#### 3.1.1. Osnovni podaci o vozilu

Osnovni podaci o vozilu sadrže naziv vozila, konfiguraciju pogona odnosno broj pogonskih kotača, ukupnu masu vozila te postotak mase na pogonskim kotačima. Ukoliko se uključi transfer mase, zadaje se i omjer visine težišta vozila i međuosovinskog razmaka. [Slika 3].

PARAMETRI VOZILA

Osnovni podaci | Karakteristika motora | Parametri transmisije | Aerodinamička svojstva | Parametri gume

Naziv vozila  
FSB-RT-05R - final\_filter

Pogon  
RWD

Masa vozila sa vozačem  
260 [kg]

Postotak mase na pogonskim kotačima  
60 [%]

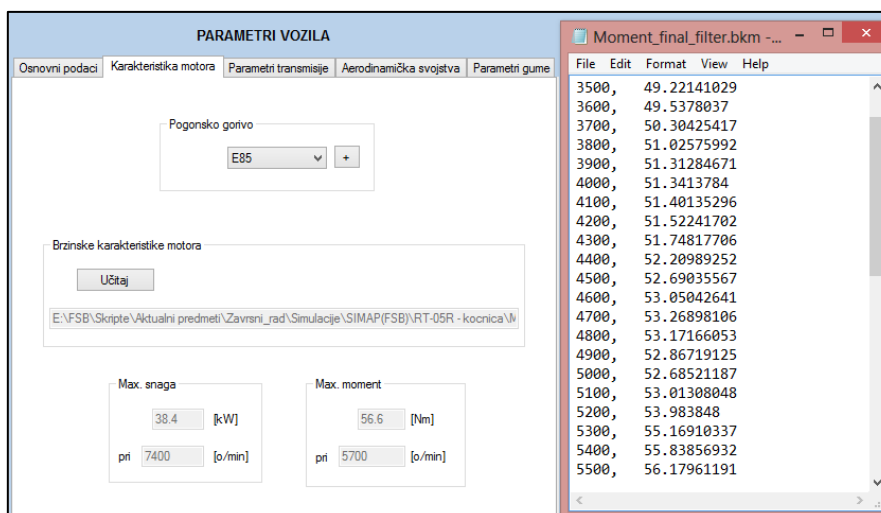
TRANSFER MASE

$\frac{\text{VISINA TEŽIŠTA}}{\text{MEĐUOSOVINSKI RAZMAK}} = 0.2$

Slika 3. Osnovni podaci o vozilu Strix

#### 3.1.2. Karakteristika motora

Karakteristika motora unosi se kao raspon brzina vrtnje motora i odgovarajućih momenata zapisanih u tekstualnu datoteku kojoj se dodaje ekstenzija *.bkm* (*brzinska karakteristika motora*). U programu se automatski odrađuje linearna interpolacija unesenih vrijednosti kako bi se dobila finija podjela, pronalaze se vrijednosti maksimalne snage i momenta te pripadajućih brzina vrtnje motora i upisuju u odgovarajuća polja [Slika 4].



Slika 4. Karakteristika motora vozila Strix

### 3.1.3. Parametri transmisije

U izborniku parametri transmisije potrebno je odabrati tip mjenjača, o kojemu ovisi vrijeme promjene stupnja prijenosa, te unijeti broj stupnjeva prijenosa i odgovarajuće prijenosne omjere, prijenosni omjer u osovinskom prijenosniku i iskoristivost transmisije. Moguće je zadati i brzinu vrtnje motora pri kojoj se prebacuje u viši stupanj prijenosa. U protivnom taj parametar program zadaje sam [Slika 5].

PARAMETRI VOZILA

Osnovni podaci | Karakteristika motora | **Parametri transmisije** | Aerodinamička svojstva | Parametri gume

Tip mjenjača: Sekvencijalni mjenjač

Vrijeme promjene stupnja prijenosa: 150 [ms]

Broj stupnjeva prijenosa: 4

Prijenosni omjeri stupnjeva prijenosa /  Brzina vrtnje za prebacivanje u viši stupanj

|                      |       |      |
|----------------------|-------|------|
| 1. stupanj prijenosa | 1.350 | 8100 |
| 2. stupanj prijenosa | 1.091 | 8100 |
| 3. stupanj prijenosa | 0.916 | 8100 |
| 4. stupanj prijenosa | 0.769 |      |

Prijenosni omjer u osovinskom prijenosniku: 8.4

Iskoristivost transmisije: 95 [%]

Slika 5. Parametri transmisije vozila Strix

### 3.1.4. Aerodinamička svojstva

U izborniku aerodinamička svojstva potrebno je unijeti napadnu površinu vozila, koeficijente otpora zraka (engl. *drag*) i sile potiska (engl. *downforce*) te postotak sile potiska koja se prenosi na pogonske kotače [Slika 6].

The screenshot shows the 'PARAMETRI VOZILA' window with the 'Aerodinamička svojstva' tab selected. The parameters are as follows:

| Parameter                                  | Value | Unit              |
|--|-------|-------------------|
| Napadna površina                           | 1.05  | [m <sup>2</sup> ] |
| Koeficijent drag-a                         | 1.2   |                   |
| Koeficijent downforce-a                    | 2.6   |                   |
| Postotak downforce-a na pogonskim kotačima | 60    | [%]               |

Slika 6. Aerodinamička svojstva vozila Strix

### 3.1.5. Parametri gume

Parametri gume sastoje se od dimenzija gume, na temelju čega se izračunava dinamički polumjer kotača, te koeficijenata trenja između gume i podloge i otpora kotrljanju [Slika 7].

The screenshot shows the 'PARAMETRI VOZILA' window with the 'Parametri gume' tab selected. The parameters are as follows:

| Parameter                        | Value         |
|----------------------------------|---------------|
| Dimenzije gume [METRIČKA OZNAKA] | 191 / 53 R 10 |
| Koeficijent trenja               | 1.4           |
| Koeficijent otpora kotrljanju    | 0.025         |

Slika 7. Parametri gume vozila Strix

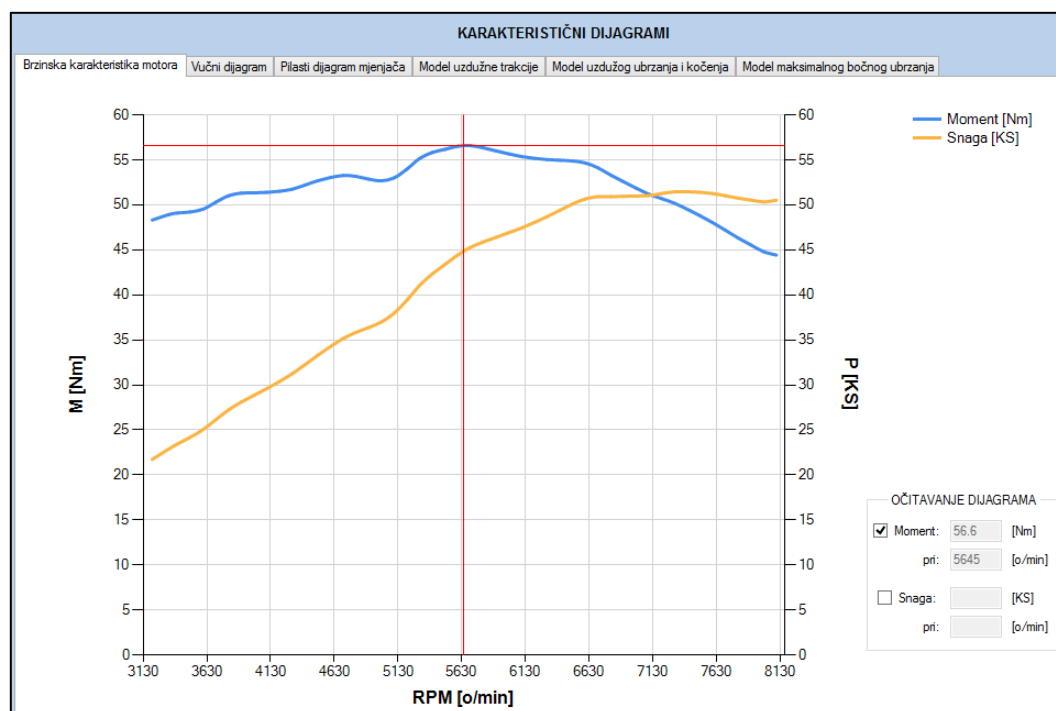
### 3.1.6. Karakteristični dijagrami (model vozila)

Model vozila prikazan je u obliku karakterističnih dijagrama:

1. Brzinska karakteristika motora
2. Vučni dijagram
3. Pilasti dijagram mjenjača
4. Model uzdužne trakcije
5. Model uzdužnog ubrzanja i kočenja
6. Model maksimalnog bočnog ubrzanja

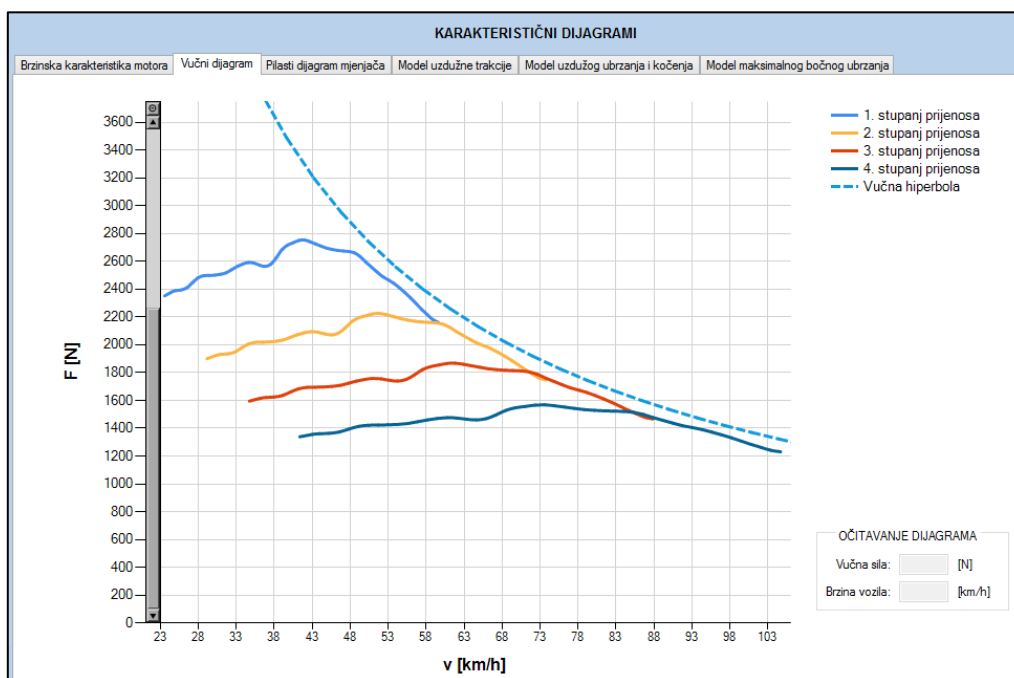
Svaki dijagram nudi mogućnost očitavanja vrijednosti klikom na krivulju koje tada program automatski upisuje u odgovarajuća polja. Također nudi korisniku opciju uvećavanja područja unutar dijagrama (engl. *zoom*).

Brzinska karakteristika motora prikazuje dijagram momenta i snage motora u ovisnosti o brzini vrtnje [Slika 8]. Ovdje prikazana brzinska karakteristika motora vozila Strix dobivena je nakon svih preinaka na motoru snimanjem na motornoj kočnici, dok je pri vrednovanju koncepata (poglavlje 4), uzeta originalna brzinska karakteristika motora bez ikakvih preinaka.



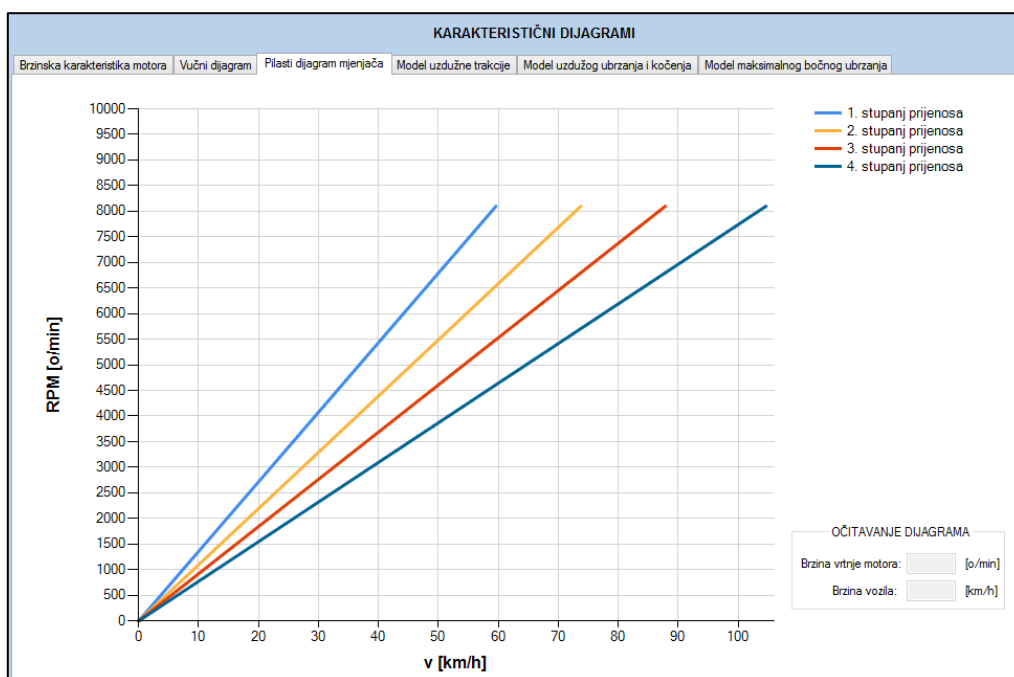
Slika 8. Brzinska karakteristika motora vozila Strix

Vučni dijagram prikazuje vučnu hiperbolu odnosno idealnu vučnu silu te dijagram vučne sile u pojedinom stupnju prijenosa u ovisnosti o brzini vozila [Slika 9].



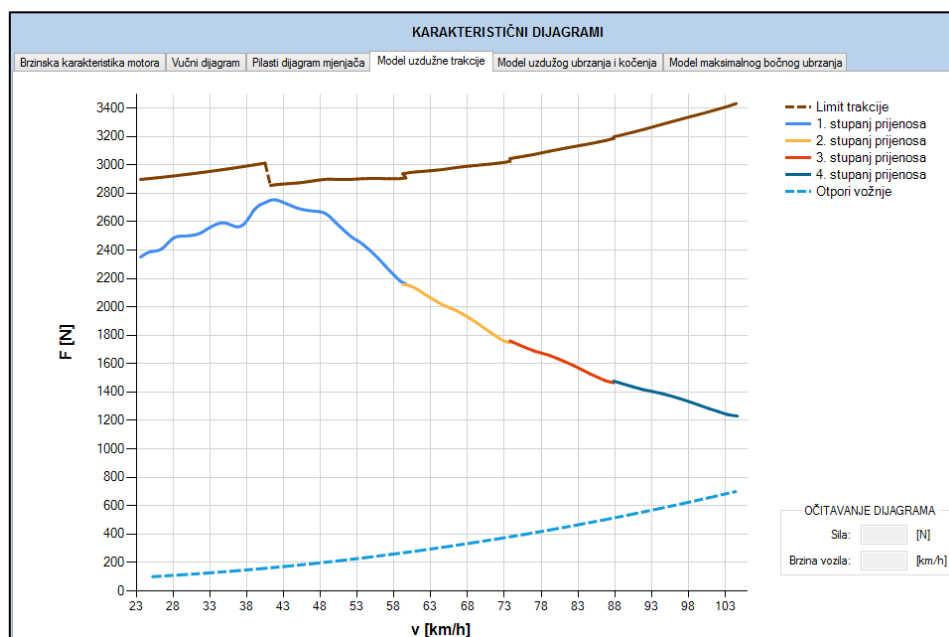
Slika 9. Vučni dijagram vozila Strix

Pilasti dijagram mjenjača prikazuje dijagram brzine vrtnje motora u pojedinom stupnju prijenosa u ovisnosti o brzini vozila [Slika 10].



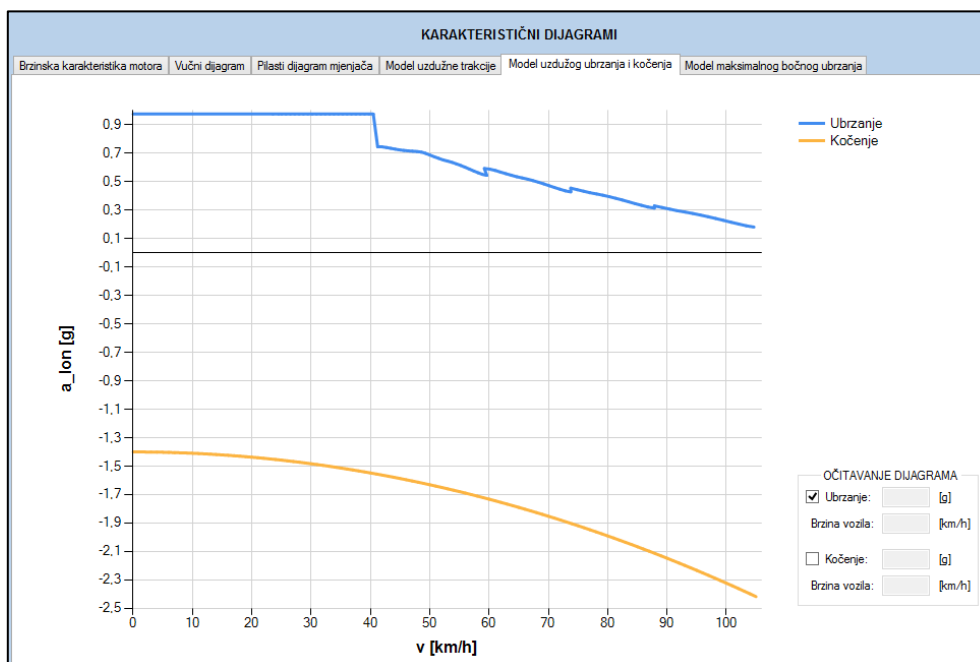
Slika 10. Pilasti dijagram mjenjača vozila Strix

Model uzdužne traktije prikazuje dijagram vučne sile u pojedinom stupnju prijenosa u ovisnosti o brzini vozila, s ucrtanim limitom traktije te otporima vožnje [Slika 11].



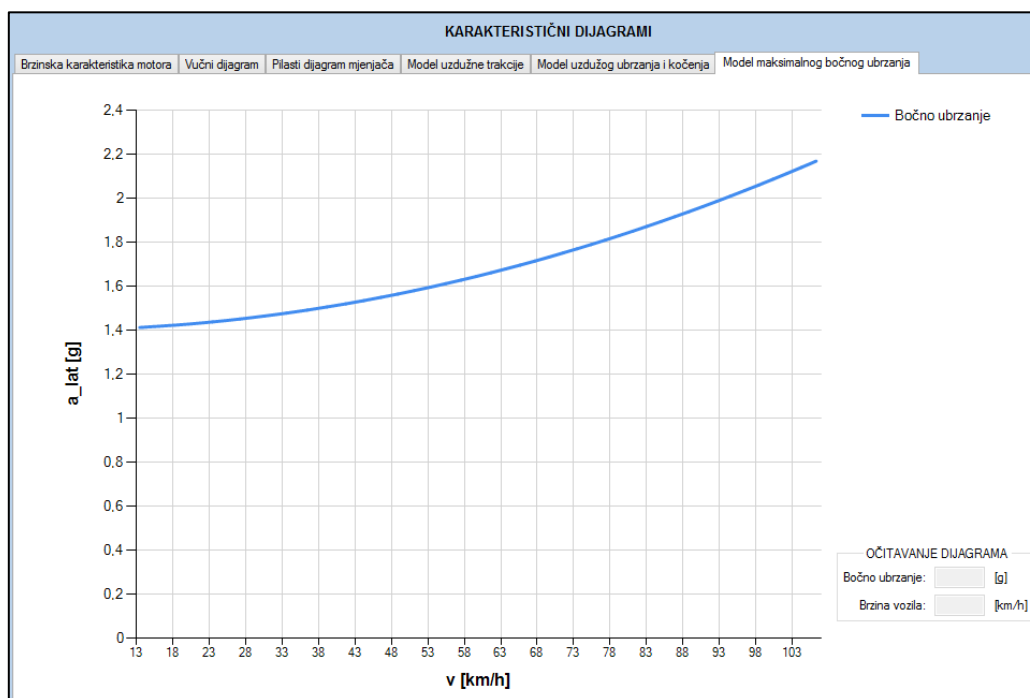
Slika 11. Model uzdužne traktije vozila Strix

Model uzdužnog ubrzanja i kočenja prikazuje dijagram maksimalnog uzdužnog ubrzanja odnosno usporenja u ovisnosti o brzini vozila [Slika 12].



Slika 12. Model uzdužnog ubrzanja i kočenja vozila Strix

Model maksimalnog bočnog ubrzanja prikazuje dijagram maksimalnog bočnog ubrzanja u ovisnosti o brzini vozila [Slika 13].



Slika 13. Model bočnog ubrzanja vozila Strix

### 3.1.7. Spremanje i učitavanje modela vozila

Program nudi mogućnost spremanja i učitavanja gotovog modela vozila. Spremanjem modela vozila program čita unesene parametre te ih zapisuje u tekstualnu datoteku kojoj dodjeljuje ekstenziju *.mdlv* (*model vozila*). Jednom spremljeni model vozila može se direktno učitati u program pri čemu program čita tekstualnu datoteku, te učitane parametre upisuje u odgovarajuća polja.

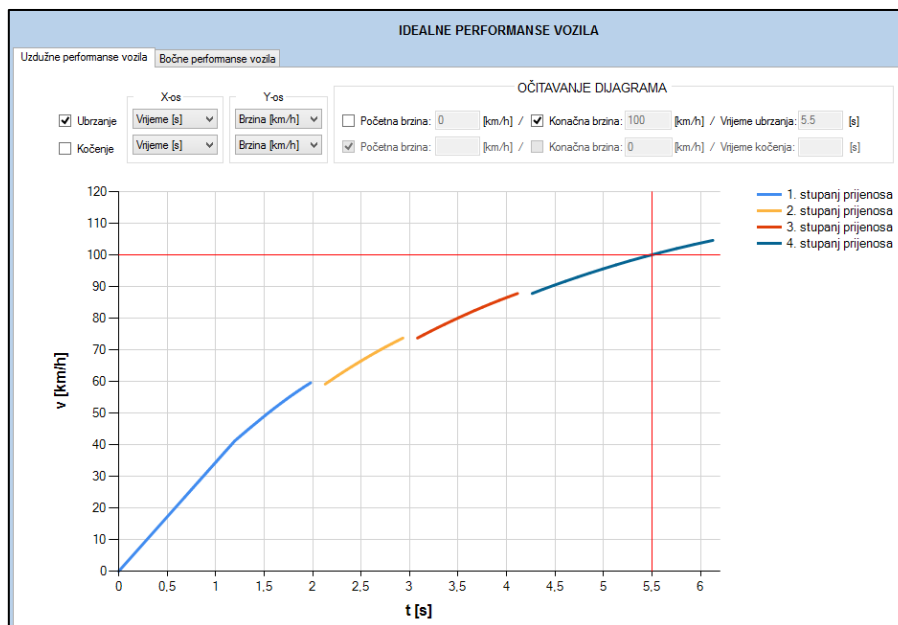
## 3.2. Simulacija idealnih performansi

Simuliraju se idealne uzdužne i bočne performanse vozila. Uzdužne performanse ispituju ubrzanje vozila iz stanja mirovanja do maksimalne brzine vozila, te kočenje vozila s maksimalne brzine do zaustavljanja.

Simulacija bočnih performansi vozila daje dijagram maksimalne brzine prolaska kroz zavoje konstantnog polumjera, te prikazuje rezultate ispitne procedure bočnog ubrzanja (engl. *skidpad*) na ispitnoj stazi zadanog srednjeg polumjera krugova koji formiraju stazu.

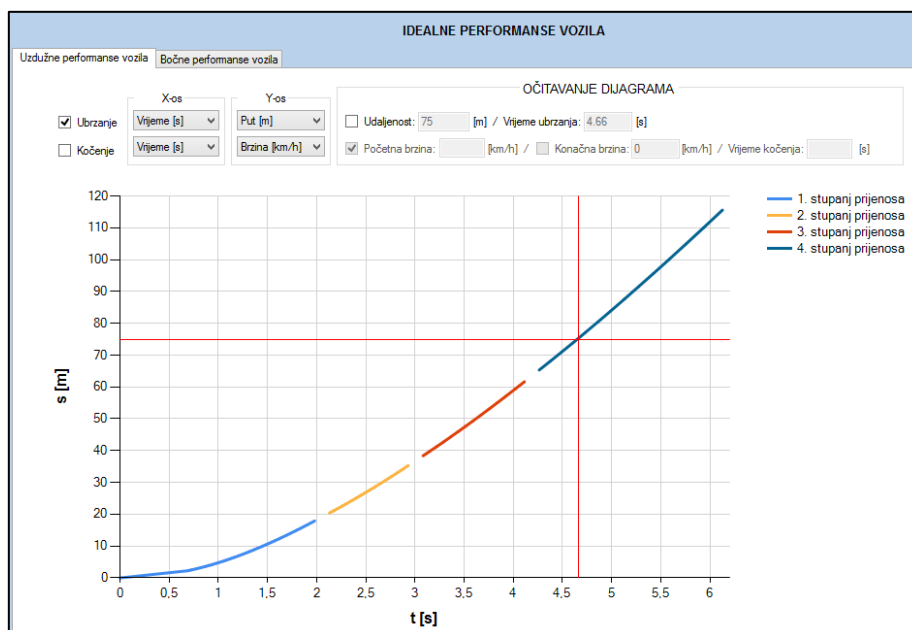
### 3.2.1. Uzdužne performanse vozila

Dijagram brzine vozila u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju nudi mogućnosti očitavanja vremena potrebnog za ubrzanje od bilo koje početne brzine do bilo koje konačne brzine u rasponu od stanja mirovanja do maksimalne brzine vozila [Slika 14].



Slika 14. Dijagram brzine u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju

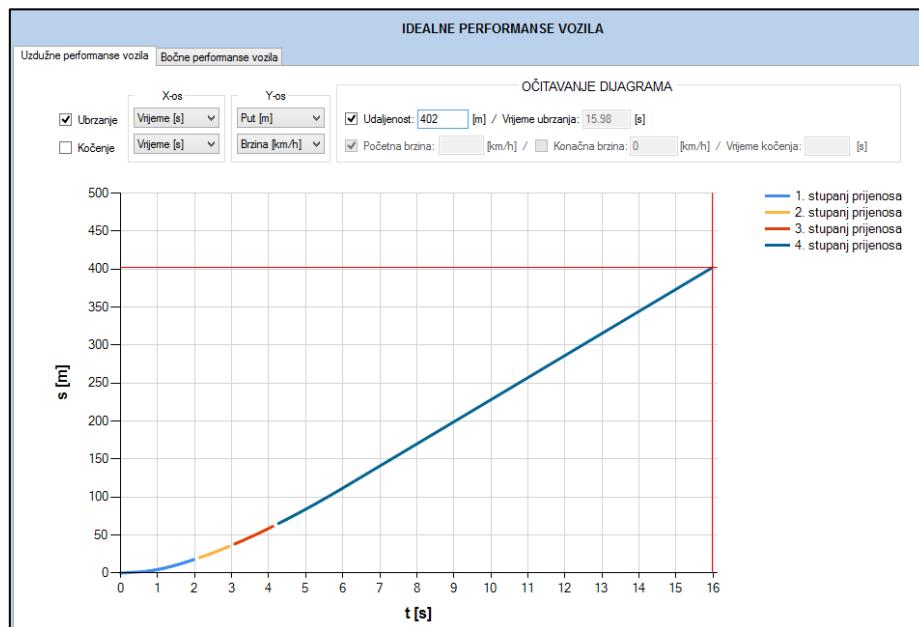
Dijagram prijeđenog puta u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju nudi mogućnosti očitavanja vremena potrebnog za ubrzanje od stanja mirovanja na putu zadane duljine [Slika 15].



Slika 15. Dijagram prijeđenog puta u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju

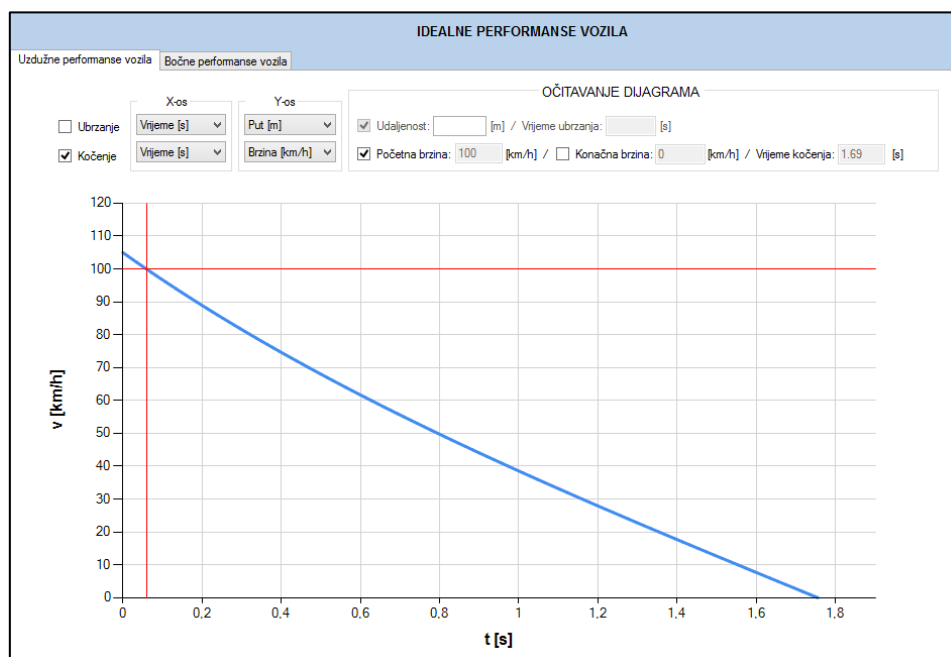


Ukoliko pri ubrzanju od stanja mirovanja do maksimalne brzine vozilo ne prijeđe put za koji se želi učitati vrijeme ubrzanja, korisnik može upisati željeni iznos puta čime se dijagram proširuje do traženog iznosa prijađenog puta [Slika 16].



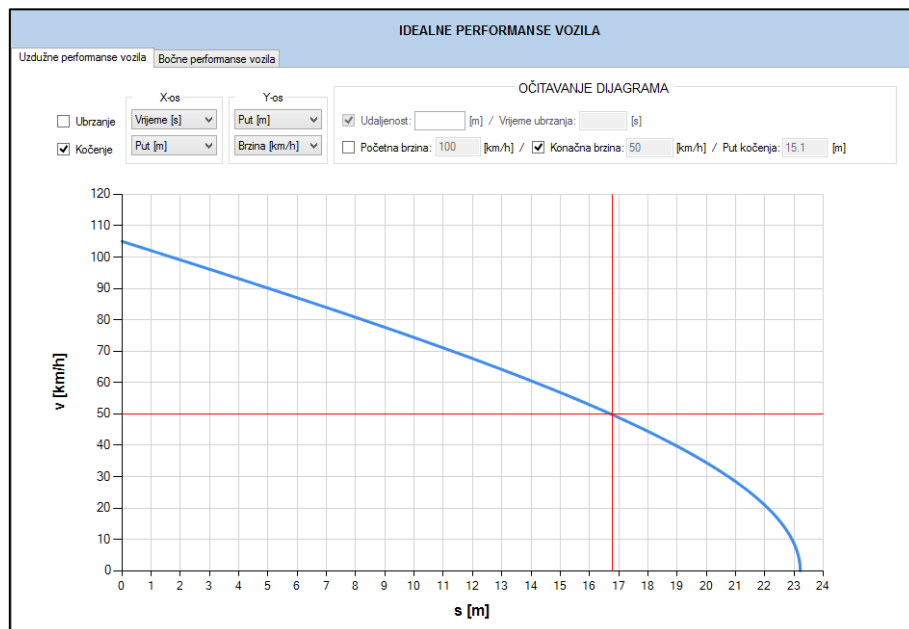
Slika 16. Dodavanje iznosa prijađenog puta

Dijagram brzine vozila u ovisnosti o vremenu pri kočenju nudi mogućnosti očitavanja vremena kočenja od bilo koje početne brzine do bilo koje konačne brzine u rasponu od maksimalne brzine vozila do potpunog zaustavljanja [Slika 17].



Slika 17. Dijagram brzine u ovisnosti o vremenu pri kočenju

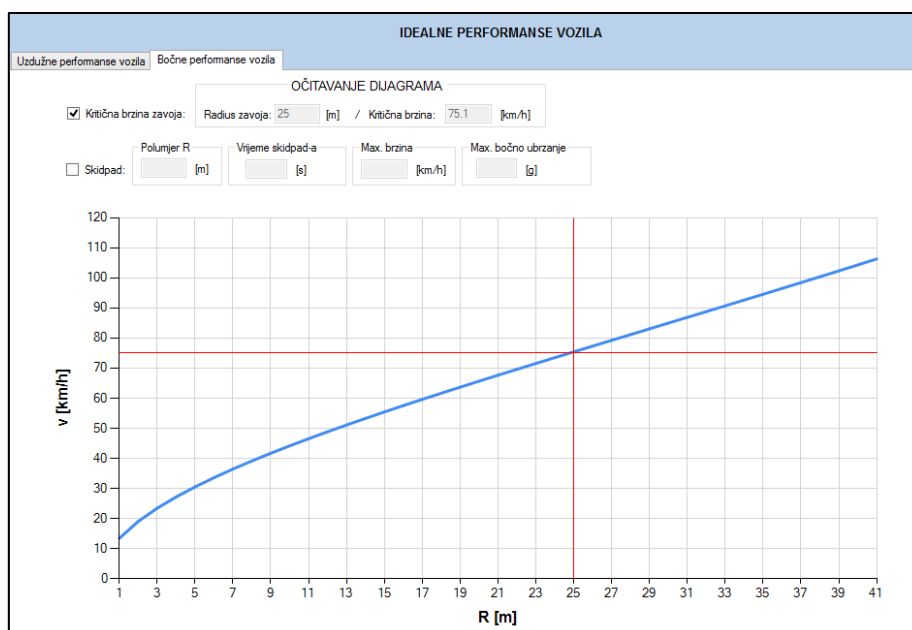
Dijagram prijedrenog puta vozila u ovisnosti o brzini vozila pri kočenju nudi mogućnosti očitavanja puta kočenja od bilo koje početne brzine do bilo koje konačne brzine u rasponu od maksimalne brzine vozila do potpunog zaustavljanja [Slika 18].



Slika 18. Dijagram puta kočenja u ovinosti o brzini

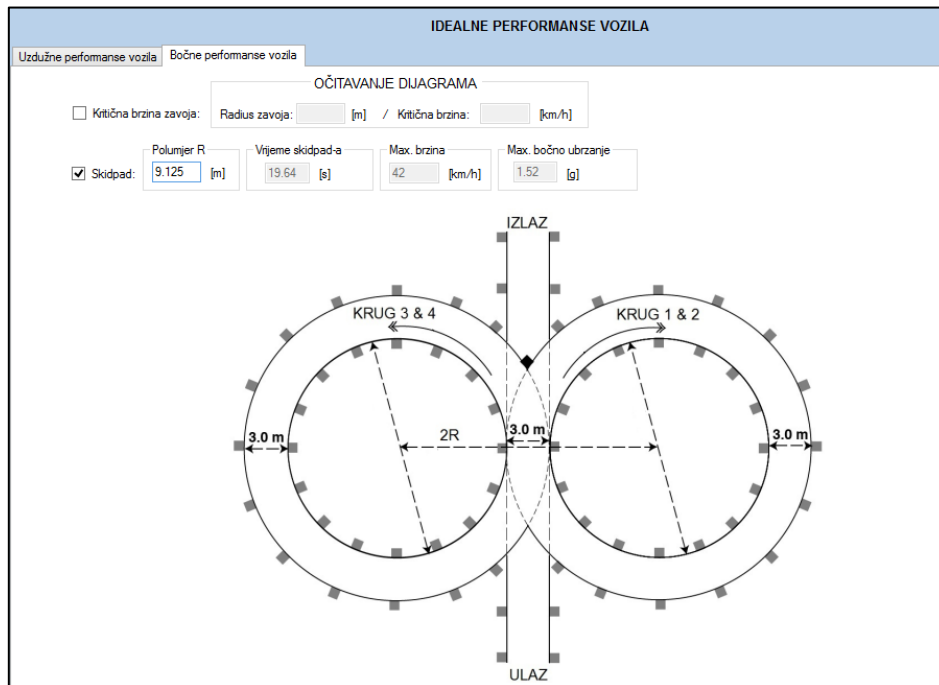
### 3.2.2. Bočne performanse vozila

Dijagram brzine vozila u ovisnosti o polumjeru zavoja nudi mogućnost očitavanja maksimalne brzine prolaska kroz zavoj konstantnog polumjera [Slika 19].



Slika 19. Dijagram kritične brzine zavoja

Ispitna procedura *skidpad* daje maksimalnu brzinu te maksimalno bočno ubrzanje pri prolasku ispitne procedure te vrijeme potrebno za prolazak procedure zadanog srednjeg polumjera krugova koji formiraju stazu [Slika 20].



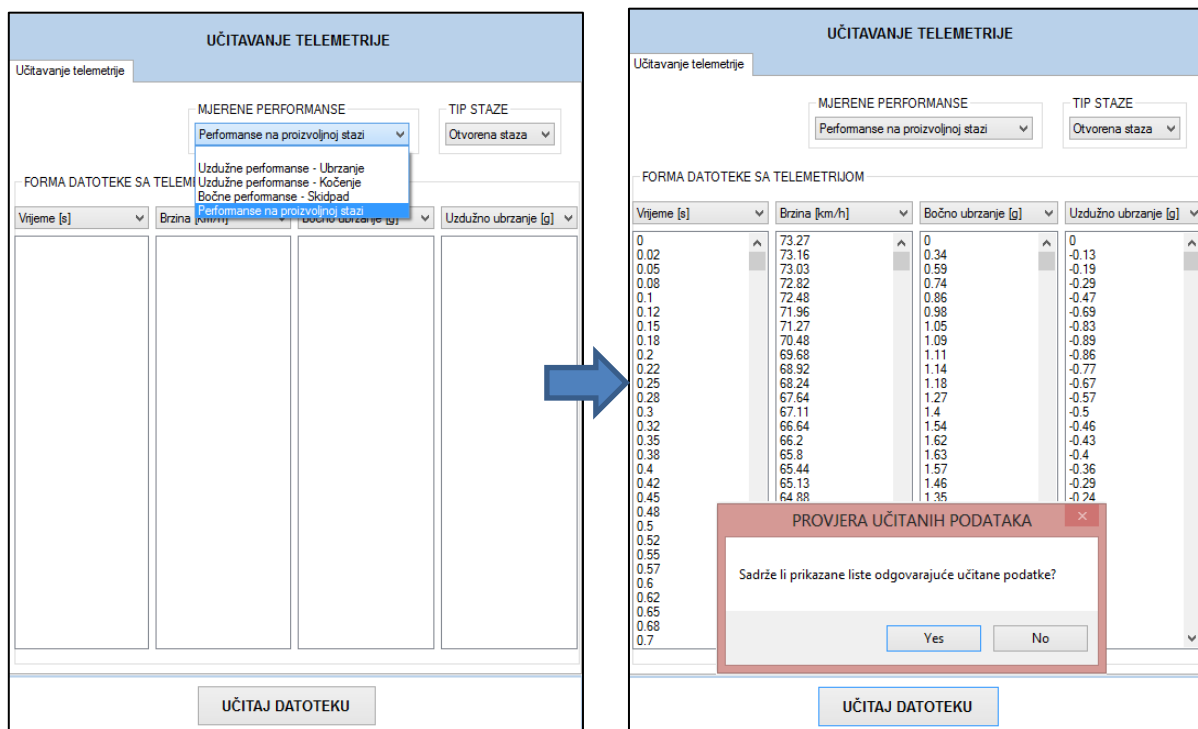
Slika 20. Simulacija ispitne procedure *Skidpad*

### 3.3. Analiza stvarnih performansi

Modul *Analiza stvarnih performansi* nudi mogućnost učitavanja telemetrije te analizu rezultata za različite ispitne procedure. Mogu se analizirati uzdužne performanse vozila, bočne performanse na ispitnoj proceduri *skidpad* te performanse na proizvoljnoj stazi.

Potrebno je pripremiti odgovarajuću telemetriju koja sadrži tražene parametre u tekstualnoj datoteci kojoj se dodaje ekstenzija *.tel* (*telemetrija*). Kako bi se telemetrija ispravno učitala, potrebno je unutar programa odabrati tip učitavane telemetrije, te podesiti redoslijed učitavanih parametara tako da odgovara redoslijedu parametara iz tekstualne datoteke. Nakon učitavanja program izlistava učitane vrijednosti radi provjere [Slika 21].

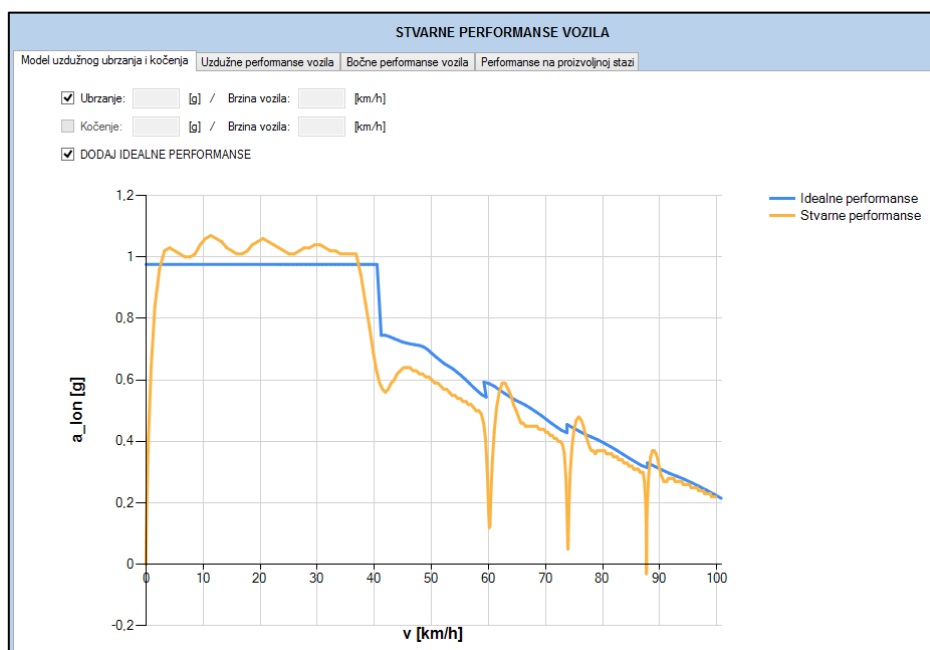
Učitavanjem telemetrije generiraju se dijagrami za analizu rezultata. Svaki dijagram nudi mogućnost učitavanja simuliranih idealnih performansi za analiziranu proceduru radi direktne usporedbe idealnih i stvarnih performansi. Komentari rezultata prikazanih na dijagramima u ovom poglavlju dani su u poglavlju 3.5 (Evaluacija programskog alata).



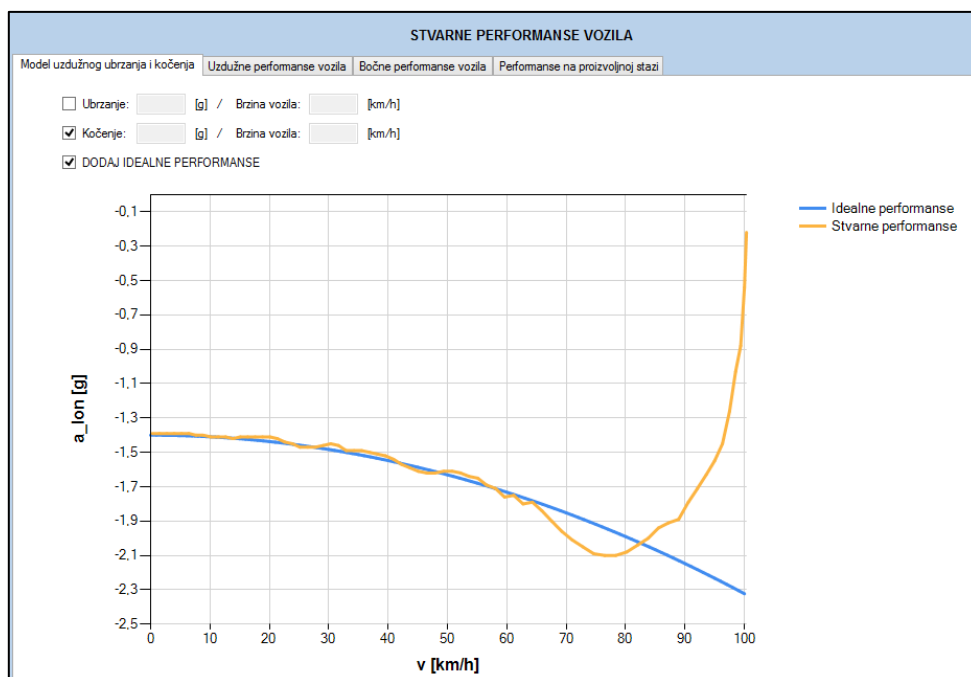
Slika 21. Učitavanje telemetrije

### 3.3.1. Model uzdužnog ubrzanja i kočenja

Učitavanjem telemetrije ubrzanja i kočenja vozila program generira stvarni model ubrzanja, odnosno kočenja te nudi mogućnost učitavanja simuliranog idealnog modela na isti dijagram radi direktne usporedbe [Slika 22] i [Slika 23].



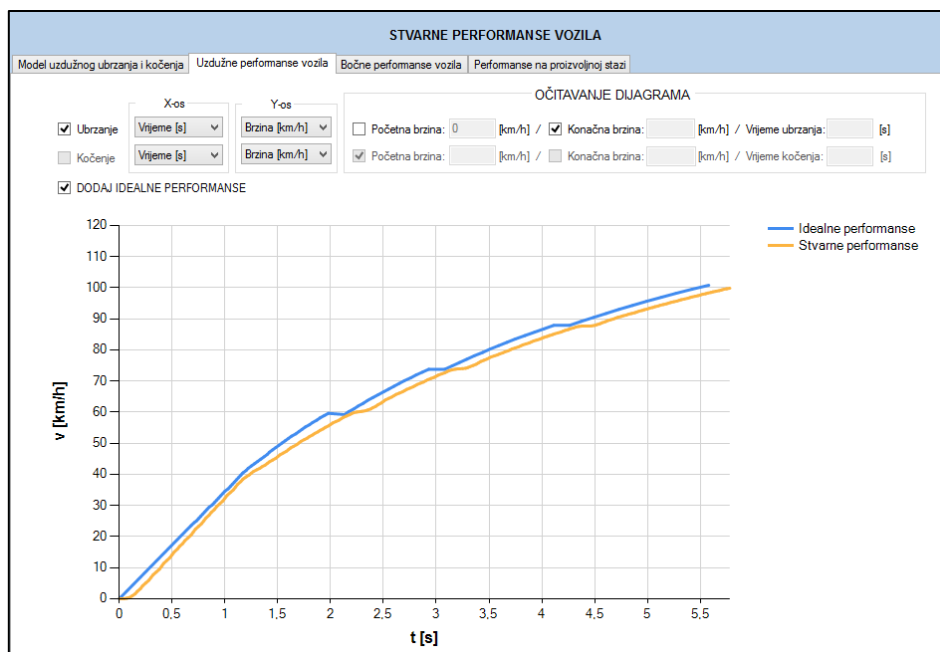
Slika 22. Model stvarnog ubrzanja



Slika 23. Model stvarnog kočenja

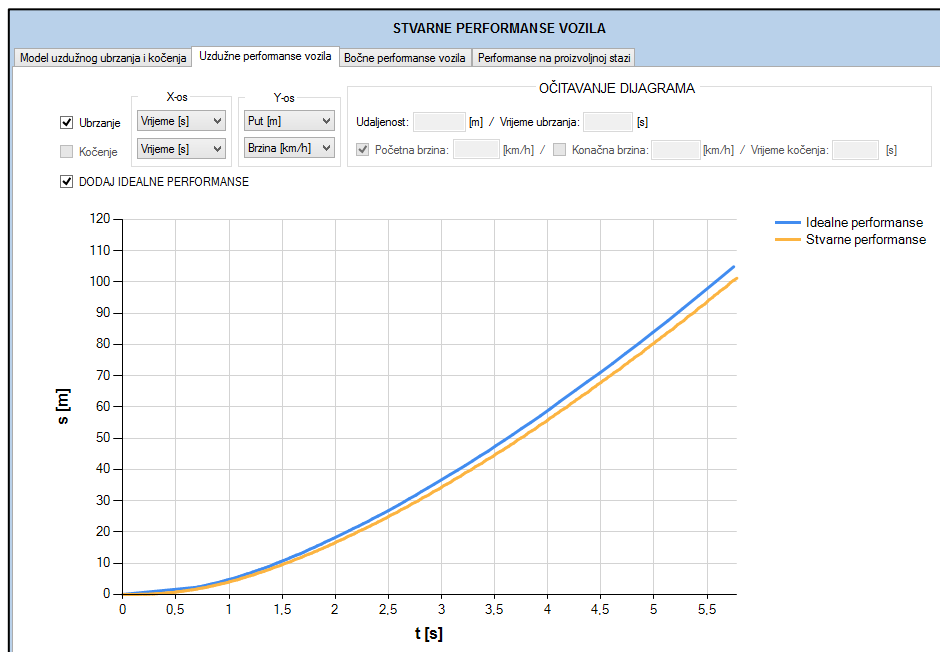
### 3.3.2. Uzdužne performanse vozila

Dijagram brzine vozila u ovisnosti o vremenu pri stvarnom ubrzanju nudi mogućnost očitavanja vremena potrebnog za ubrzanje od bilo koje početne brzine do bilo koje konačne brzine u rasponu učitanih vrijednosti, te usporedbu s idealnim performansama [Slika 24].



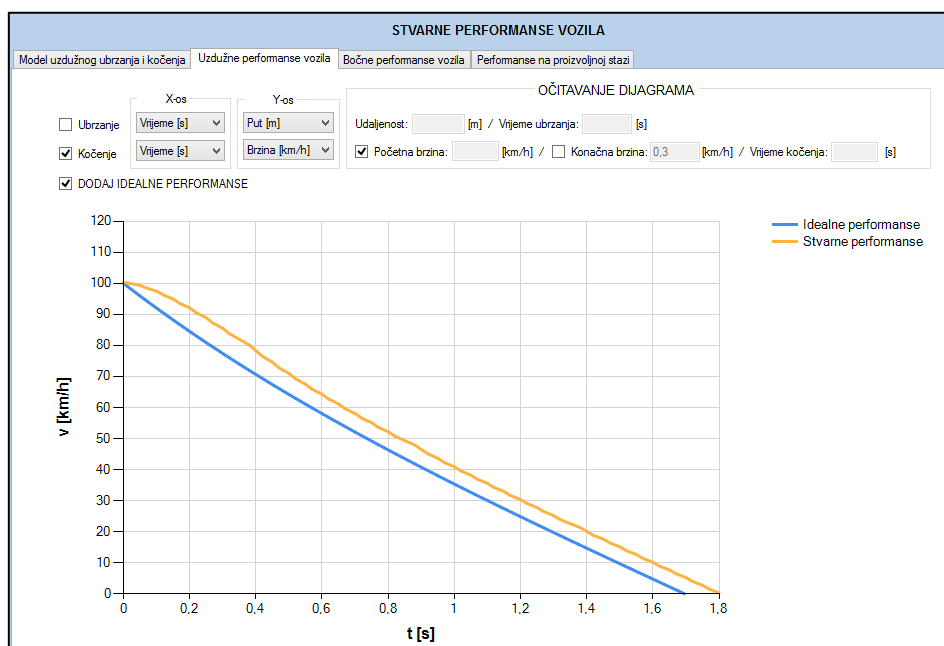
Slika 24. Analiza stvarne brzine u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju

Dijagram prijađenog puta u ovisnosti o vremenu pri stvarnom ubrzanju nudi mogućnost očitavanja vremena potrebnog za ubrzanje od početne brzine na putu zadane duljine, te usporedbu s idealnim performansama [Slika 25].



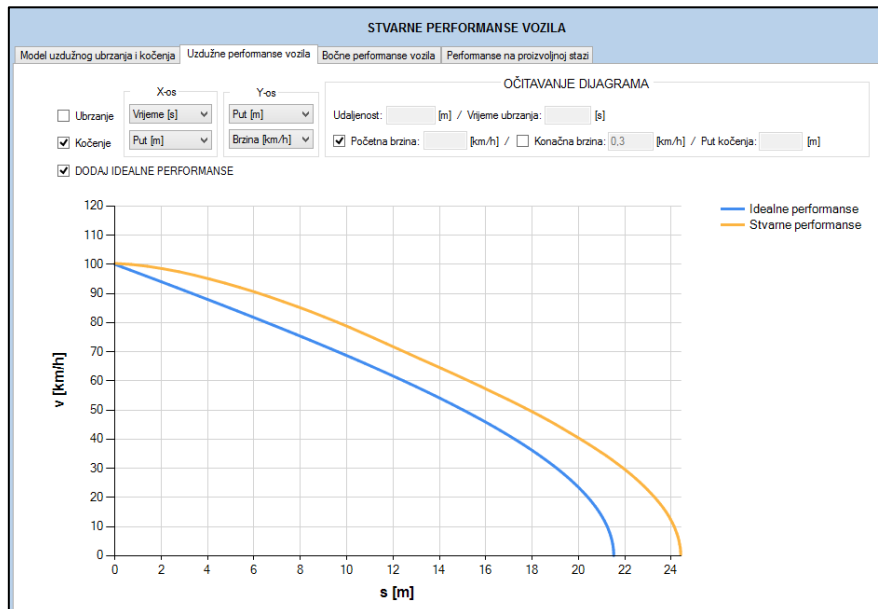
**Slika 25.** Analiza stvarnog prijađenog puta u ovisnosti o vremenu pri ubrzanju

Dijagram brzine vozila u ovisnosti o vremenu pri stvarnom kočenju nudi mogućnost očitavanja vremena kočenja od bilo koje početne brzine do bilo koje konačne brzine u rasponu učitanih vrijednosti, te usporedbu s idealnim performansama [Slika 26].



**Slika 26.** Analiza stvarne brzine u ovisnosti o vremenu pri kočenju

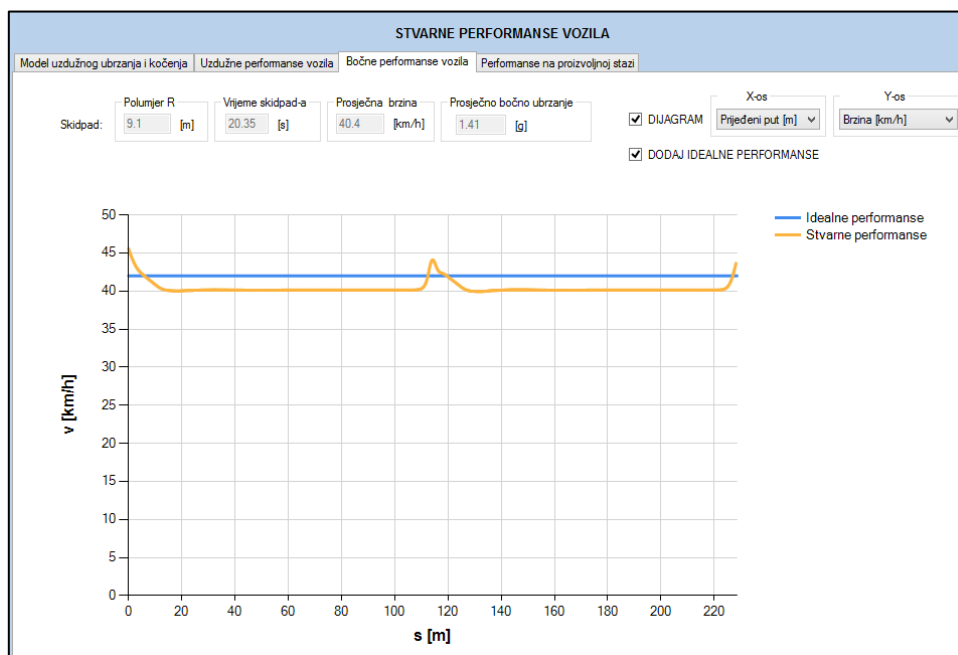
Dijagram prijedrenog puta u ovisnosti o brzini vozila pri stvarnom kočenju nudi mogućnost očitavanja puta kočenja od bilo koje početne brzine do bilo koje konačne brzine u rasponu učitanih vrijednosti, te usporedbu s idealnim performansama [Slika 27].



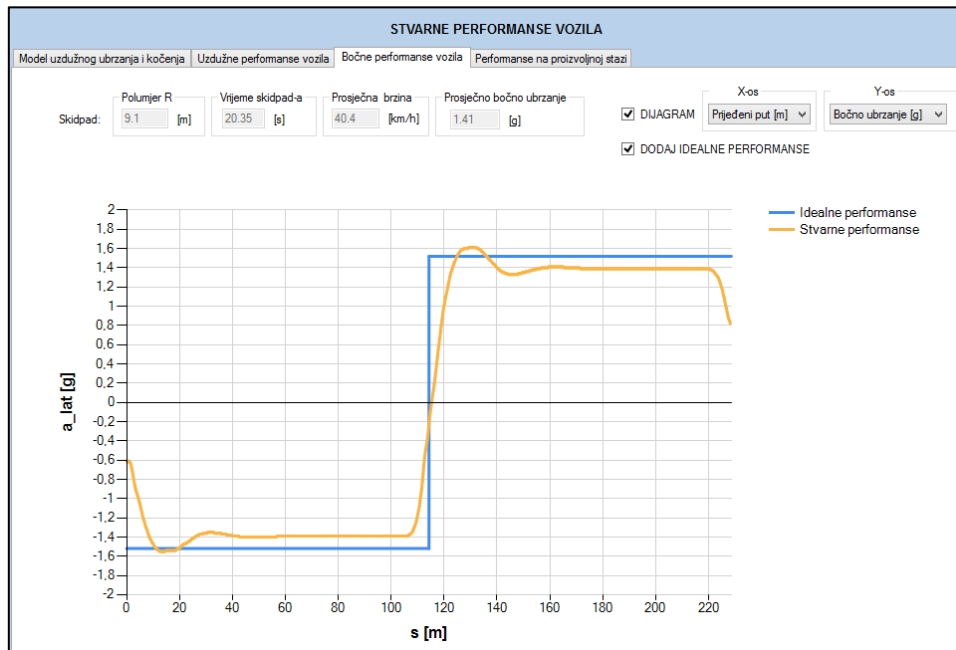
Slika 27. Analiza stvarnog koćionog puta u ovinosti o brzini pri koćenju

### 3.3.3. Boćne performanse vozila

Ućitavanje telemetrije s ispitne procedure *skidpad* daje prosjećnu brzinu i boćno ubrzanje pri prolasku ispitne procedure te vrijeme potrebno za prolazak procedure. Također generira dijagrame brzine i boćnog ubrzanja u ovisnosti o prijedrenom putu [Slika 28] i [Slika 29].

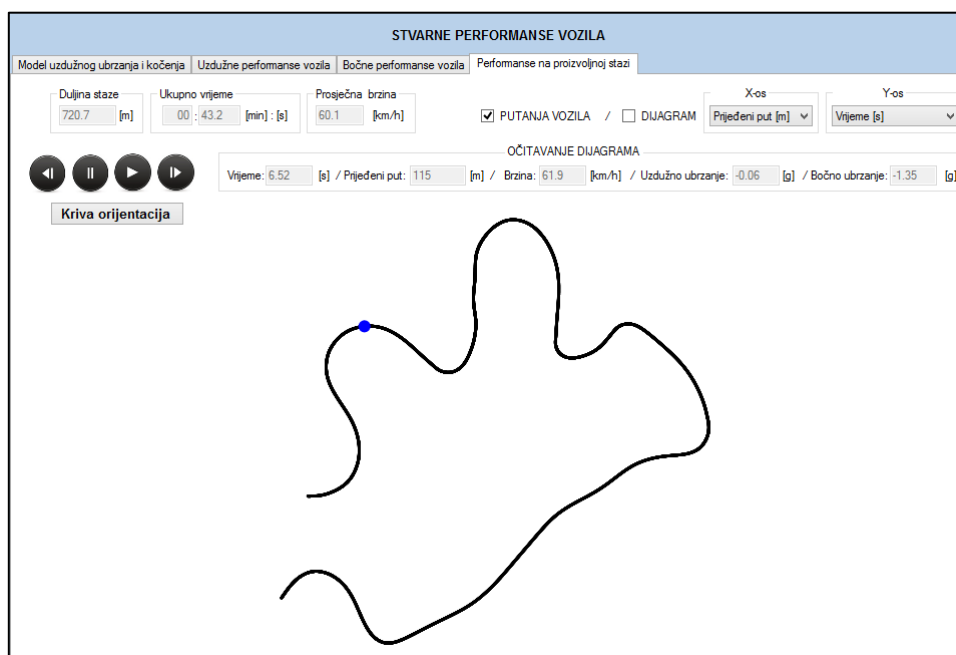


Slika 28. Dijagram brzine na ispitnoj proceduri *Skidpad*

Slika 29. Dijagram bočnog ubrzanja na ispitnoj proceduri *Skidpad*

### 3.3.4. Performanse vozila na proizvoljnoj stazi

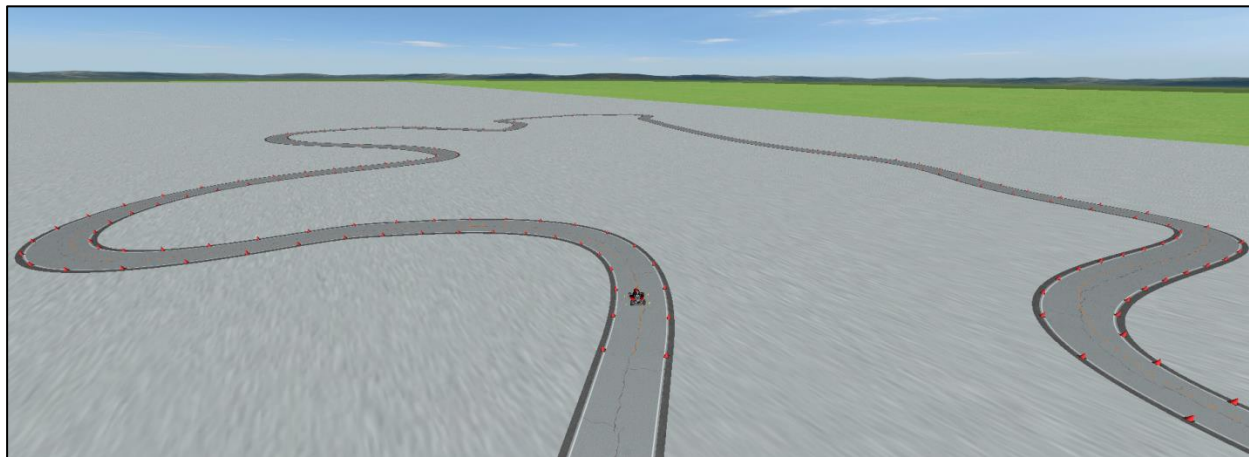
Učitavanjem telemetrije snimljene na proizvoljnoj stazi generira se putanja vozila te dijagrami brzine, vremena, uzdužnog i bočnog ubrzanja u ovisnosti o prijedenu putu. Program nudi mogućnost očitavanja vrijednosti u bilo kojoj točki s generirane putanje ili iz dijagrama. Također nudi mogućnost animacije vožnje u obliku točke koja se giba po putanji vozila u stvarnom vremenu, a vrijednosti u trenutnoj točki upisuje u odgovarajuće kućice [Slika 30].



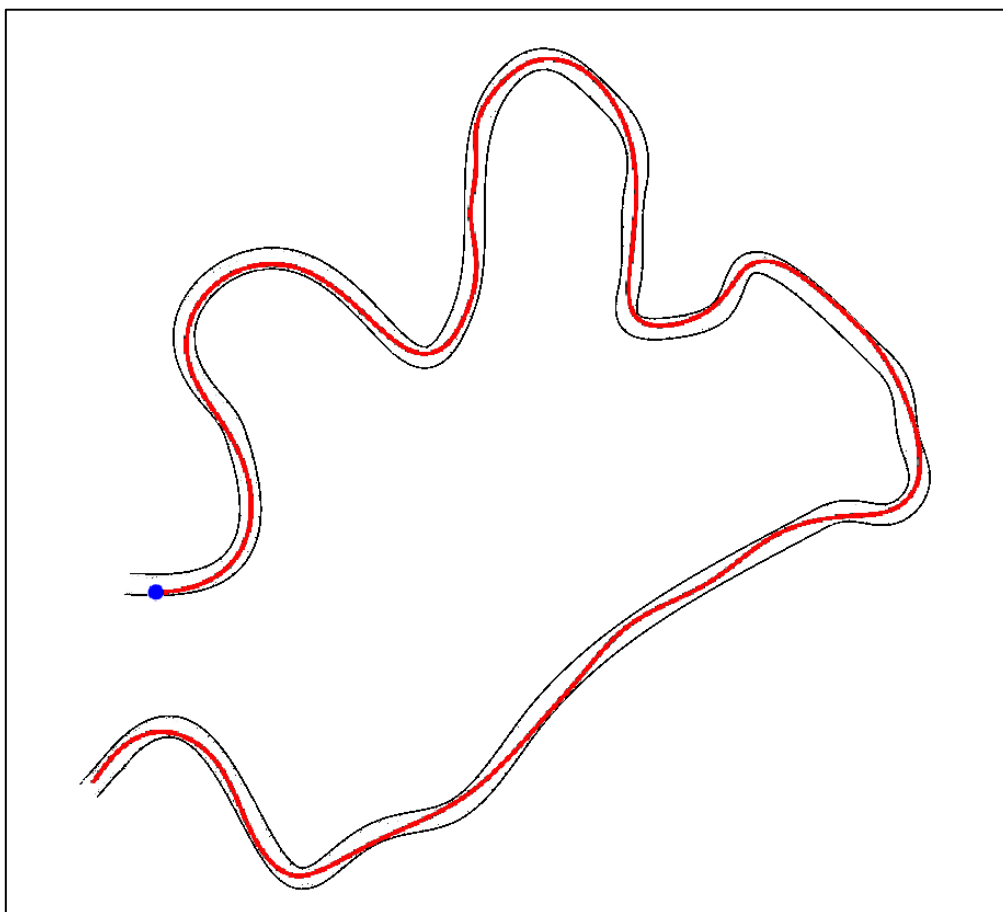
Slika 30. Očitavanje vrijednosti s putanje vozila



Prikazana putanja vozila dobivena je učitavanjem telemetrije iz programa CarSim. Na temelju stvarnog izgleda staze možemo zaključiti kako razvijeni algoritam s vrlo visokom točnošću generira stvarnu putanju vozila. [Slika 31] i [Slika 32].

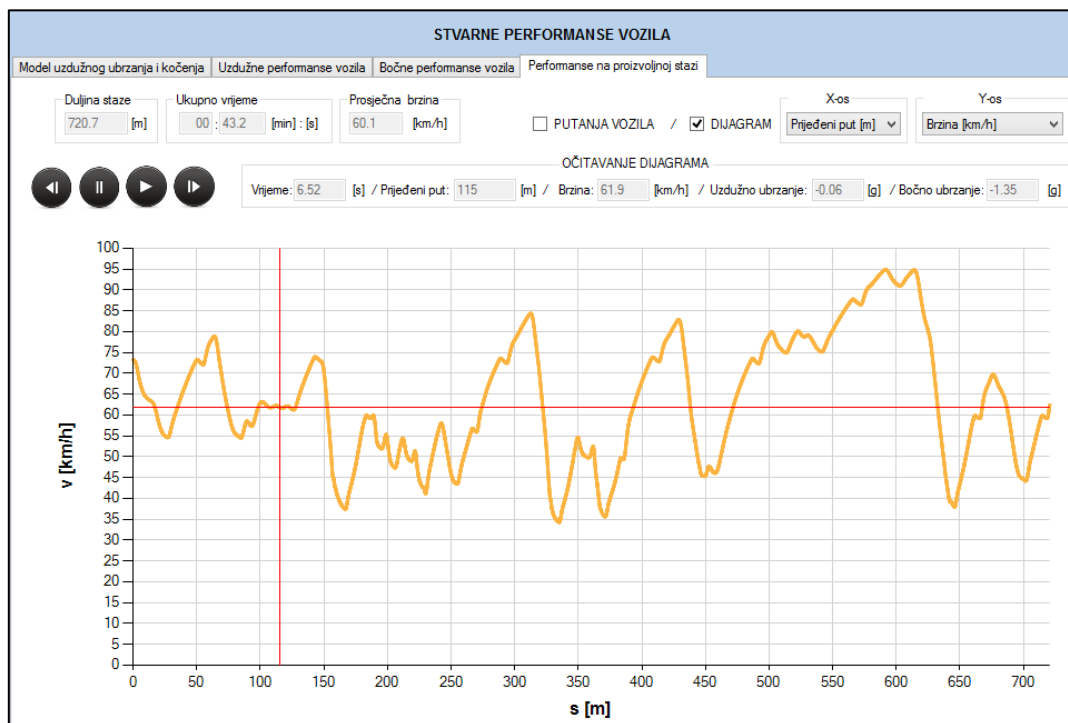


Slika 31. Stvarni izgled staze u programu CarSim

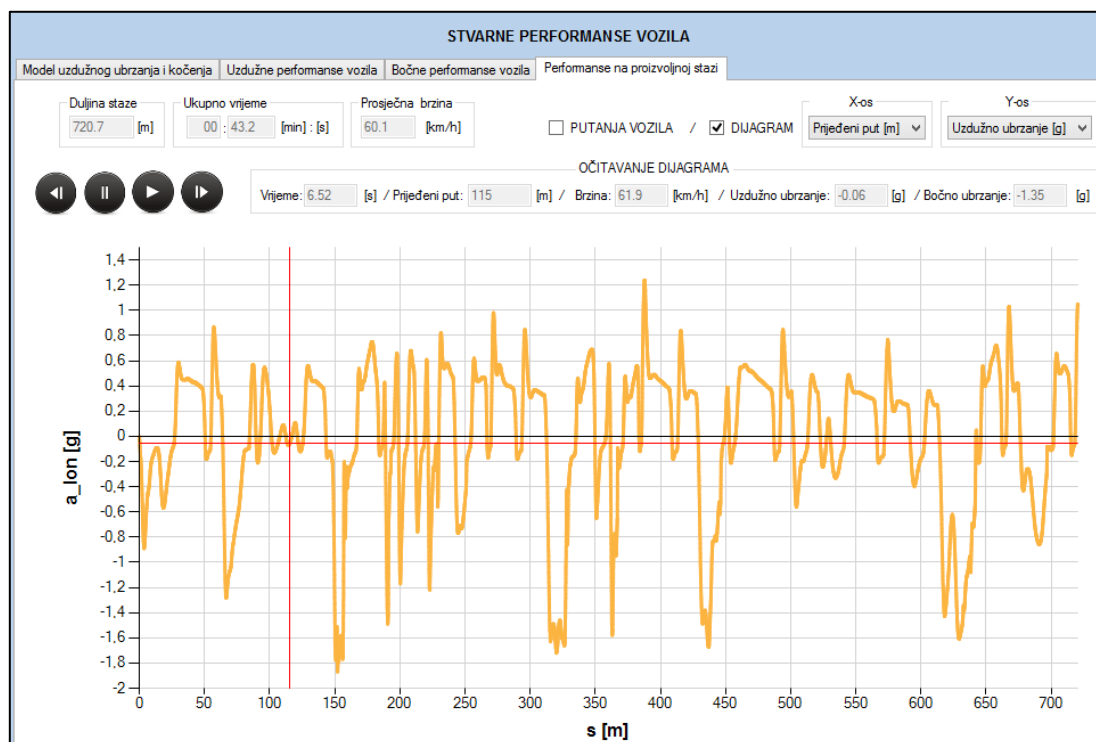


Slika 32. Prikaz generirane putanje na stvarnom izgledu staze

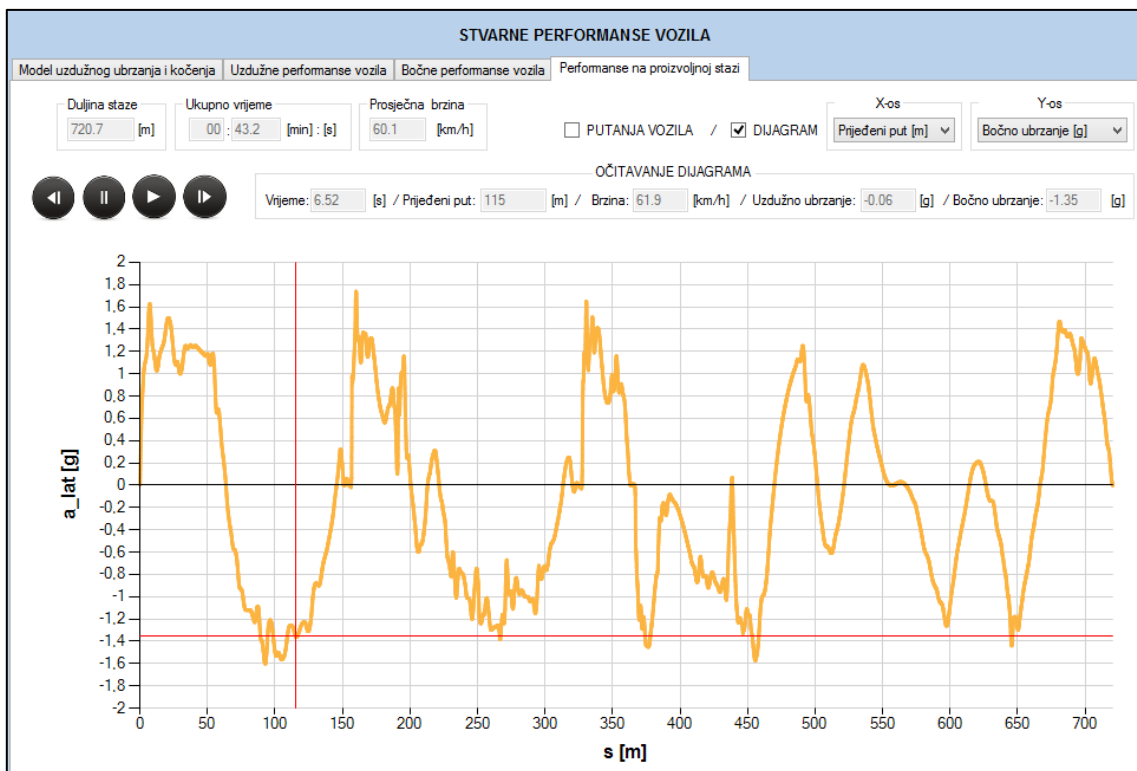
Generirani dijagrami prikazuju brzinu vozila, uzdužno i bočno ubrzanje te vrijeme na ukupnom prijeđenom putu odnosno po cijeloj duljini staze. [Slika 33] do [Slika 36].



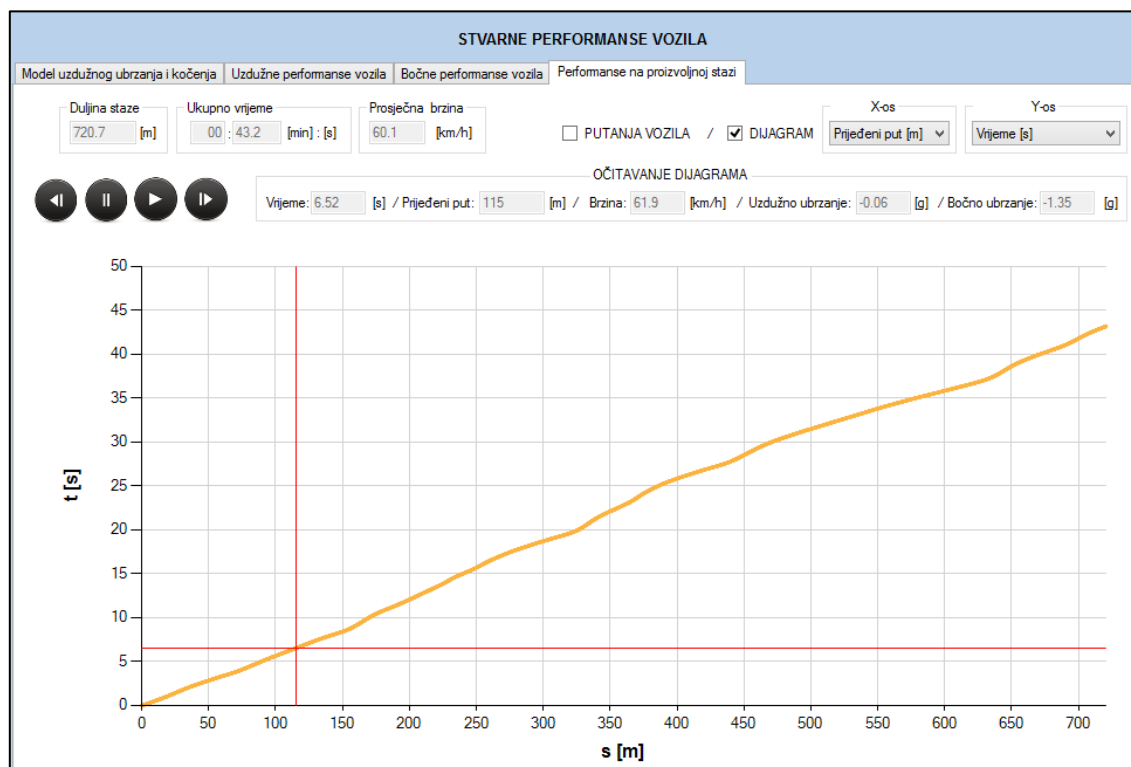
Slika 33. Dijagram brzine po duljini staze



Slika 34. Dijagram ubrzanja po duljini staze



Slika 35. Dijagram bočnog ubrzanja po duljini staze



Slika 36. Dijagram proteklog vremena po duljini staze

### **3.4. Sprječavanje korisničkih pogrešaka**

Iako je programski alat sam po sebi vrlo jednostavan, uvijek postoji mogućnost pojave korisničkih grešaka koje bi dovele do rušenja programa. Takve greške poželjno je predvidjeti, te onemogućiti njihovu pojavu, odnosno razraditi algoritme koji će takve greške pronaći. Pronađene greške program može ili sam automatski otkloniti ili upozoriti korisnika na pronađene greške te mu dati uputstva kako ih otkloniti. U ovome poglavlju opisane su potencijalne korisničke greške te način njihova rješavanja.

#### **3.4.1. Unos podataka**

Korisnik u polja određena za unos podataka unosi vrijednosti traženih parametara vozila. Pri samom ručnom unosu podataka program može prepoznati neispravan unos te onemogućiti grešku. Ovisno o tipu parametra koji se unosi program ograničava unos u odgovarajuće polje na sljedeće načine:

- 1) Računski parametri moraju biti brojčane vrijednosti. Program zanemaruje svaki unos koji nije brojčana vrijednost na način da prilikom pritiska tipke na tipkovnici program automatski vrši provjeru te dozvoljava upis samo ukoliko je pritisnuta tipka brojčane vrijednosti. Iznimno je dozvoljen jedan unos decimalne točke odnosno decimalnog zareza, te jedan unos znaka za negativni brojčani iznos.
- 2) Svi parametri moraju imati fizikalnog smisla. Primjerice svi parametri osim koeficijenta aerodinamičke sile potiska moraju biti pozitivne brojčane vrijednosti, pa je tako unos znaka za negativni brojčani iznos dozvoljen samo u polje koje odgovara tom parametru.

#### **3.4.2. Pokretanje simulacije**

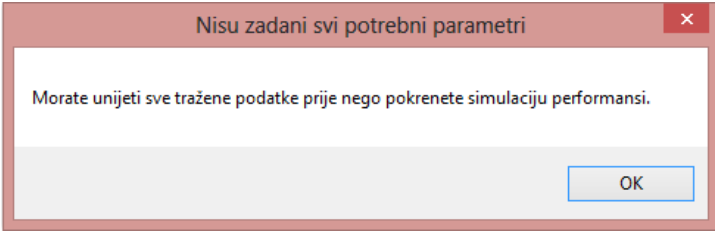
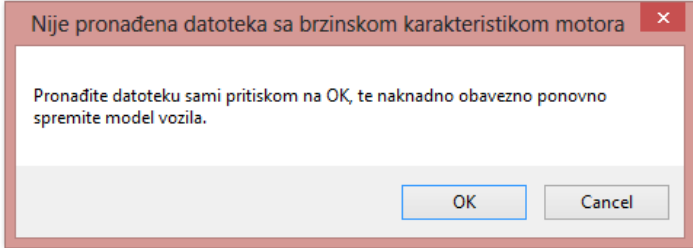
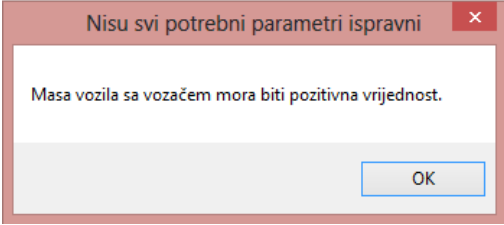
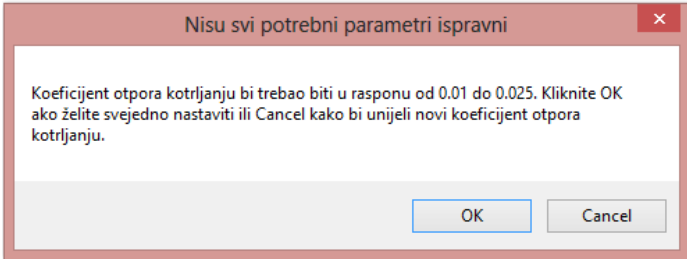
Programski jezik *Visual Basic* za odvajanje decimalnih vrijednosti koristi decimalnu točku, no radi jednostavnosti je dozvoljeno i korištenje decimalnog zareza. Takve unose program prilikom pokretanja simulacije pronalazi i automatski mijenja u decimalne točke kako bi s takvim vrijednostima mogao računati.

Također, s obzirom da je jednom spremljeni model vozila moguće učitati iz tekstualne datoteke, postoji mogućnost da je korisnik određene parametre mijenjao unutar same datoteke. Tada se neispravan unos ne može onemogućiti i time automatski eliminirati, nego program prilikom potvrđivanja unesenih podataka te prije pokretanja simulacije provjerava:

- 1) Jesu li uneseni svi potrebni parametri?
- 2) Jesu li svi uneseni parametri ispravni?

Ukoliko je greška pronađena, iskače prozorčić s opisom greške, te ukoliko se radi o neispravnom parametru daje informaciju o kojem se parametru radi. [Tablica 3] prikazuje nekoliko primjera pronađenih grešaka i odgovarajuće upozorenje.

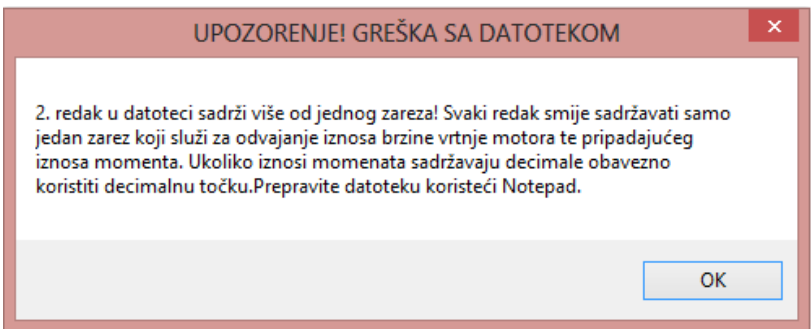
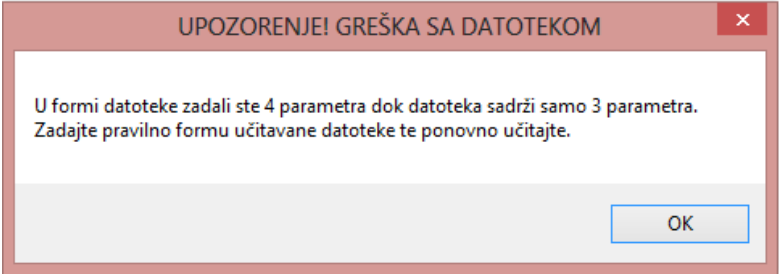
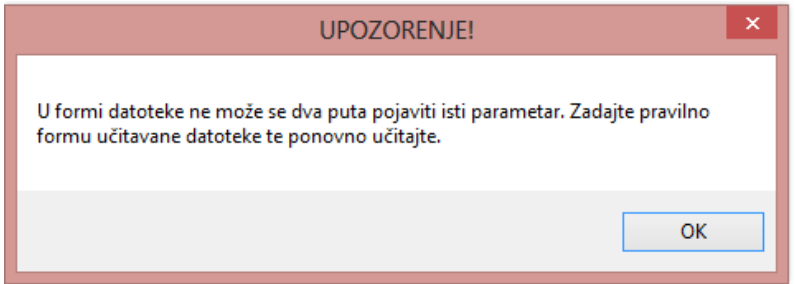
**Tablica 3. Primjer pronađenih grešaka prilikom pokretanja simulacije**

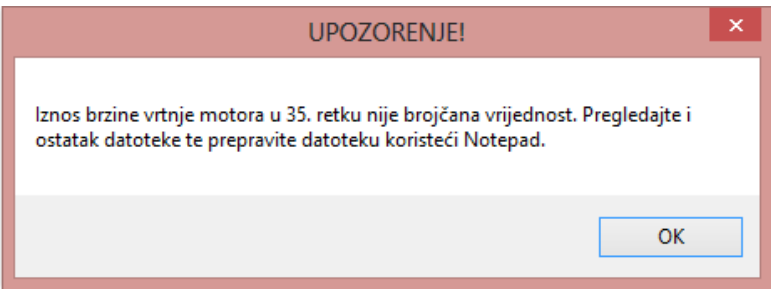
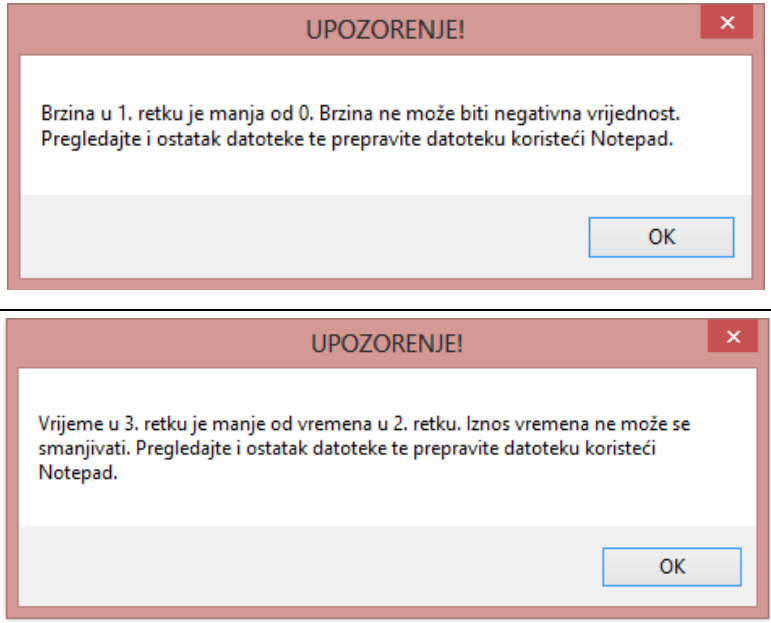
|    | PRIMJER GREŠKE   | PRIKAZ UPOZORENJA  |
|----|--|--|
| 1. | Korisnik nije unio sve potrebne parametre.   |    |
| 2. | Nije pronađena datoteka s brzinskom karakteristikom motora. Pritiskom na OK otvara se dijalog za lociranje datoteke. |   |
| 3. | Uneseni parametar nije brojčana vrijednost.  |  |
| 4. | Vrijednost parametra nema fizikalni smisao.  |  |
| 5. | Vrijednost parametra nije u tipičnom rasponu, ali unos može biti prihvaćen.  |  |

### 3.4.3. Učitavanje tekstualnih datoteka

Prilikom učitavanja tekstualnih datoteka, primjerice brzinske karakteristike motora ili telemetrije za analizu stvarnih performansi, datoteka mora sadržavati ispravne parametre te forma datoteke mora biti odgovarajuća. Program prije učitavanja vrijednosti iz datoteke provjerava ispravnost forme, a prilikom učitavanja simultano provjerava ispravnost svakog parametra. Ovdje je bitno napomenuti da se u tekstualnim datotekama zarez koristi za odvajanje stupaca pa se za odvajanje decimalnih vrijednosti mora koristiti isključivo decimalna točka. U slučaju pronalaska greške, iskače prozorčić s opisom i točnom lokacijom greške te uputama za otklanjanje greške. [Tablica 4] prikazuje neke od primjera pronađenih grešaka te odgovarajući prikaz upozorenja.

**Tablica 4. Primjer pronađenih grešaka pri učitavanju tekstualne datoteke**

|    | PRIMJER GREŠKE   | PRIKAZ UPOZORENJA  |
|----|--|--|
| 1. | Previše stupaca u datoteci ili korištenje decimalnog zareza. |   |
| 2. | Krivo zadana forma datoteke koja sadrži telemetriju.         |  |
|    |  |  |

|    |  |   |
|----|--|---|
| 4. | Pronađen parametar koji nije brojčane vrijednosti. |   |
| 5. | Pronađen parametar koji nema fizikalnog smisla.    |  |

### 3.5. Evaluacija programskog alata

OptimumLap, kao program za simulaciju idealnih performansi koji koristi sličan matematički model, bio je polazna točka pri razvoju programskog alata SIMAP(FSB). Analizom njegovih mogućnosti te analizom rezultata dobivenih u tom programu određeni su glavni nedostaci koje se nastojalo ispraviti novim programskim alatom. Postavljen je konačni cilj, a to je razviti jednostavan, ali efikasan programski alat koji će zadržati jednostavnost matematičkog modela te istovremeno ponuditi veću točnost u odnosu na OptimumLap. Bitno je napomenuti kako svrha razvoja programskog alata nije bila prekopirati sve dobre opcije programa OptimumLap, nego otkloniti njegove osnovne nedostatke i stvoriti kvalitetnu bazu za potencijalni daljnji razvoj i usavršavanje programskog alata. Konačno vrednovanje točnosti programa odrađeno je usporedbom rezultata simulacija s rezultatima iz programa CarSim.

### 3.5.1. Osnovni nedostaci programa OptimumLap

[Tablica 5] prikazuje usporedbu rezultata simulacija u programu OptimumLap s rezultatima dobivenim u programu CarSim. Za model vozila korišten je model opisan u poglavlju 3.1.

**Tablica 5. Vrednovanje programa OptimumLap**

| ISPITNA PROCEDURA                                   | PARAMETAR ZA VREDNOVANJE  | OptimumLap       | CarSim           | GREŠKA        |
|---|---------------------------|------------------|------------------|---------------|
| Ubrzanje iz stanja mirovanja do brzine od 100 km/h  | Vrijeme ubrzanja          | <b>4,46 s</b>    | <b>5,77 s</b>    | <b>22,7 %</b> |
|   | Prijeđeni put             | <b>87 m</b>      | <b>101 m</b>     | <b>13,9 %</b> |
|   | Najveći iznos ubrzanja    | <b>0,85 g</b>    | <b>1,05 g</b>    | <b>19 %</b>   |
| Kočenje s brzine 100 km/h do potpunog zaustavljanja | Vrijeme zaustavljanja     | <b>1,21 s</b>    | <b>1,8 s</b>     | <b>32,8 %</b> |
|   | Zaustavni put             | <b>19,6 m</b>    | <b>24,2 m</b>    | <b>19 %</b>   |
|   | Najveći iznos usporenja   | <b>2,33 g</b>    | <b>2,1 g</b>     | <b>10,9 %</b> |
| Ispitna procedura Skidppad polumjera 9,125 metara   | Vrijeme ispitne procedure | <b>19,64 s</b>   | <b>20,35 s</b>   | <b>3,5 %</b>  |
|   | Prosječna brzina          | <b>42 km/h</b>   | <b>40,4 km/h</b> | <b>3,9 %</b>  |
| Performanse na proizvoljnoj stazi "AutoX"           | Vrijeme ispitne procedure | <b>39,15 s</b>   | <b>43,2 s</b>    | <b>9,4 %</b>  |
|   | Prosječna brzina          | <b>66,3 km/h</b> | <b>60,1 km/h</b> | <b>10,3 %</b> |

Vidljivo je da se pri simulaciji uzdužnih performansi javljaju značajne greške. Osnovni je dakle nedostatak programa OptimumLap nemogućnost kvalitetnog simuliranja uzdužnih performansi, odnosno ubrzanja iz stanja mirovanja te kočenja do potpunog zaustavljanja. Razlog tome nije samo u matematičkom modelu vozila, nego prvenstveno u algoritmu samih simulacija. Naime, uzmemo li u obzir brzinu vrtnje motora u praznom hodu, lako je moguće izračunati minimalnu brzinu vozila kojom se ono kreće kada je spojka uključena. OptimumLap uzima tu brzinu kao početnu brzinu vozila pri ubrzanju, zanemarujući ciklus početnog ubrzanja vozila za vrijeme uključivanja spojke. Isto tako pri kočenju smatra tako izračunatu brzinu konačnom brzinom vozila, zanemarujući ciklus potpunog zaustavljanja.

Matematički model također ima određenih nedostataka, a osnovni je nedostatak korištenje statičkog limita trakcije uz pretpostavku ravnomjerne raspodjele mase između pogonskih i gonjenih kotača, odnosno zanemarivanje transfera mase pri ubrzanju. Taj je nedostatak posebno od značaja prilikom simuliranja performansi vozila kao što je bolid Formule Student,



koja su prvenstveno ograničena trakcijom. Transfer mase, s obzirom da povisuje limit trakcije, ima u tom slučaju jako veliki utjecaj omogućujući prijenos veće vučne sile na kotače. Drugi nedostatak matematičkog modela je zanemarivanje otpora ubrzanju uslijed inercije rotacijskih dijelova, kao i zanemarivanje vremena potrebnog za promjenu stupnja prijenosa. Svi ti nedostaci uzeti su u obzir prilikom razvoja programskog alata SIMAP(FSB), time značajno povećavajući točnost simuliranja uzdužnih performansi.

Točnost simuliranja bočnih performansi mnogo je veća, a točnost simuliranja performansi na proizvoljnoj stazi iznosi zadovoljavajućih 90 %. Ovdje je bitno naglasiti da CarSim pri simulaciji performansi na proizvoljnoj stazi uzima u obzir i agresivnost vozača te na taj način ograničava maksimalno uzdužno i bočno ubrzanje. U ovom slučaju ograničenje uzdužnog ubrzanja je bilo postavljeno pri ubrzanju na 1 g, a pri kočenju na 1.5 g, dok je ograničenje bočnog ubrzanja postavljeno također na 1.5 g. Samim time može se zaključiti kako bi greška programa OptimumLap pri simuliranju performansi na proizvoljnoj stazi bila još i manja kada bi CarSim simulirao idealne performanse bez ograničenja agresivnosti vozača.

### 3.5.2. Usporedba rezultata simulacija s rezultatima iz CarSim-a

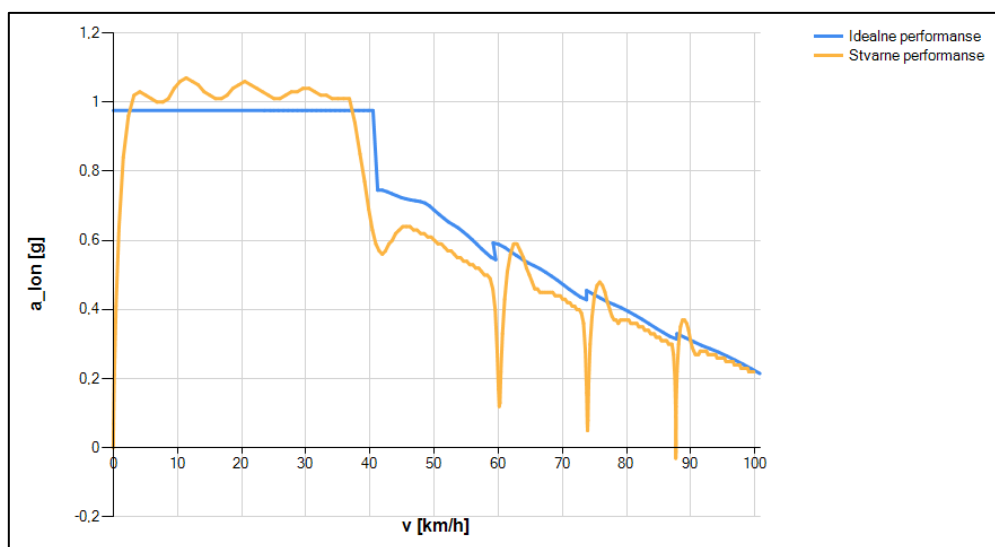
[Tablica 6] prikazuje usporedbu rezultata simulacija u programskom alatu SIMAP(FSB) s rezultatima dobivenim u programu CarSim. Za model vozila korišten je model opisan u poglavlju 3.1.

**Tablica 6. Vrednovanje programa SIMAP(FSB)**

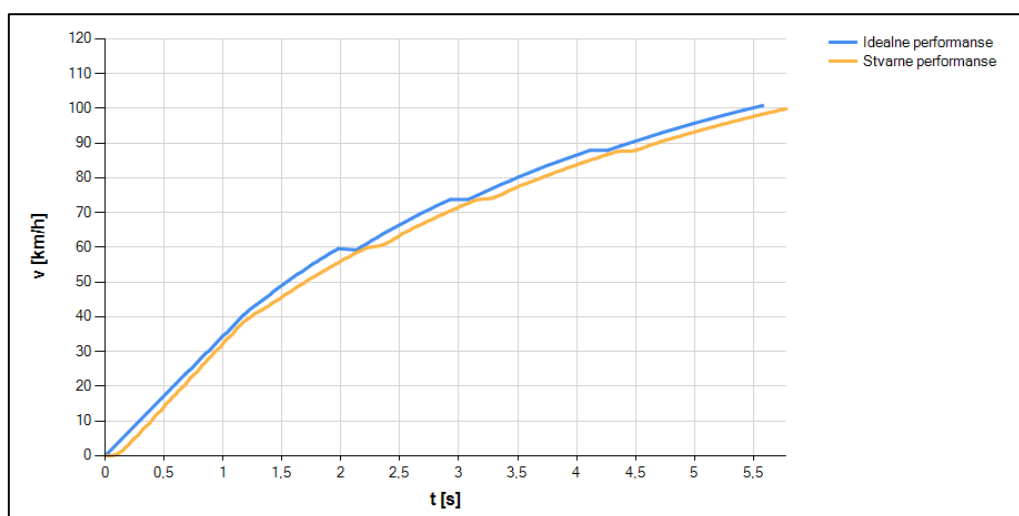
| ISPITNA PROCEDURA                                   | PARAMETAR ZA VREDNOVANJE  | SIMAP(FSB)     | CarSim           | GREŠKA        |
|---|---------------------------|----------------|------------------|---------------|
| Ubrzanje iz stanja mirovanja do brzine od 100 km/h  | Vrijeme ubrzanja          | <b>5,52 s</b>  | <b>5,77 s</b>    | <b>4,3 %</b>  |
|   | Prijeđeni put             | <b>99,2 m</b>  | <b>101 m</b>     | <b>1,8 %</b>  |
|   | Najveći iznos ubrzanja    | <b>0,99 g</b>  | <b>1,05 g</b>    | <b>5,7 %</b>  |
| Kočenje s brzine 100 km/h do potpunog zaustavljanja | Vrijeme zaustavljanja     | <b>1,69 s</b>  | <b>1,8 s</b>     | <b>6,1 %</b>  |
|   | Zaustavni put             | <b>21,5 m</b>  | <b>24,2 m</b>    | <b>11,1 %</b> |
|   | Najveći iznos usporenja   | <b>2,33 g</b>  | <b>2,1 g</b>     | <b>10,9 %</b> |
| Ispitna procedura Skidppad polumjera 9,125 metara   | Vrijeme ispitne procedure | <b>19,64 s</b> | <b>20,35 s</b>   | <b>3,5 %</b>  |
|   | Prosječna brzina          | <b>42 km/h</b> | <b>40,4 km/h</b> | <b>3,9 %</b>  |

Vidljivo je kako programski alat SIMAP(FSB) daje puno veću točnost pri simuliranju uzdužnih performansi vozila. Određene greške i dalje postoje, a analiza dijagrama, pri čemu idealne performanse predstavljaju SIMAP(FSB), a stvarne performanse CarSim, pokazuje kako je najveći razlog tome ponovno algoritam simulacije.

[Slika 37] prikazuje kako pri simulaciji ubrzanja u programskom alatu SIMAP(FSB) do ubrzanja dolazi instantno, dok u programu CarSim iznos ubrzanja raste postepeno do trenutka proklizavanja kotača. Razlog tome je što CarSim uzima u obzir dinamiku uključivanja spojke. Ovaj efekt je vidljiv na dijagramu brzine u ovisnosti o vremenu gdje se vidi početno kašnjenje porasta brzine kod stvarnih performansi, i ta razlika u vremenu ostaje približno konstantna [Slika 38].



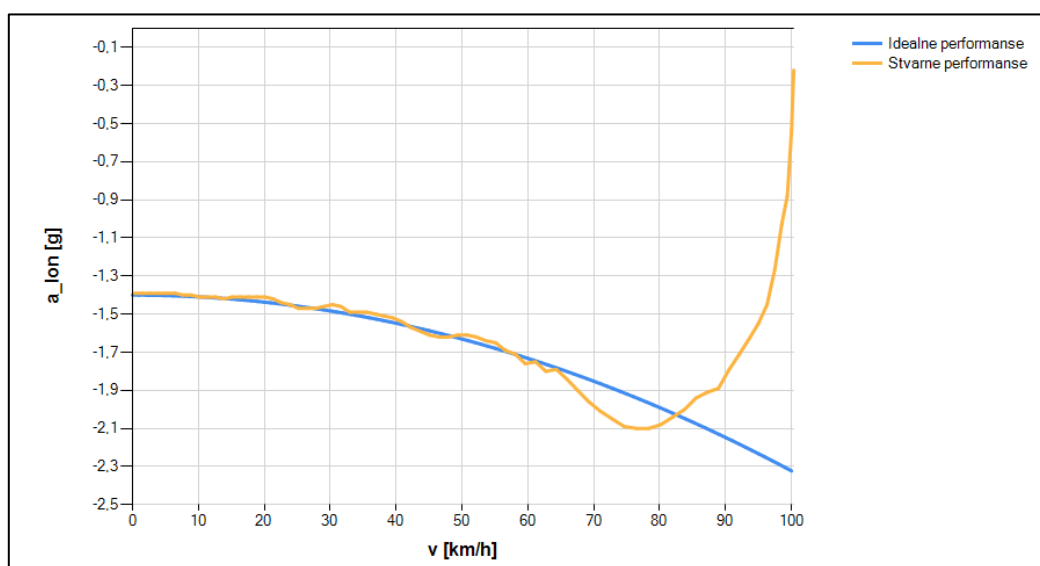
**Slika 37.** Usporedba modela ubrzanja programskog alata SIMAP(FSB) s CarSim-om



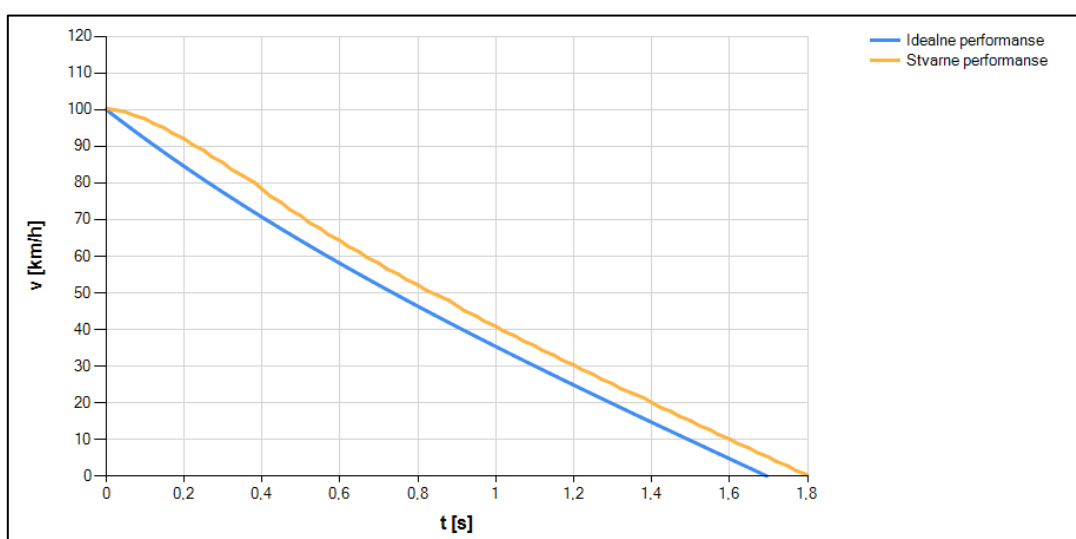
**Slika 38.** Usporedba ubrzanja u programskom alatu SIMAP(FSB) i CarSim-u

[Slika 39] prikazuje kako pri simulaciji kočenja u programskom alatu SIMAP(FSB) do usporavanja dolazi instantno, dok u programu CarSim iznos usporavanja raste postepeno. Razlog tome je što CarSim uzima u obzir dinamiku akcije kočnica. Ovaj efekt je vidljiv na dijagramu brzine u ovisnosti o vremenu gdje se vidi početno kašnjenje smanjenja brzine kod stvarnih performansi, i ta razlika u vremenu ostaje približno konstantna [Slika 40].

Također je vidljivo, kao i kod ubrzanja, da u jednom trenutku iznos stvarnog usporavanja prelazi iznos idealnog usporavanja. Taj trenutak predstavlja blokiranje kotača, nakon čega iznos usporavanja kreće padati.



Slika 39. Usporedba modela kočenja programskog alata SIMAP(FSB) s CarSim-om



Slika 40. Usporedba kočenja u programskom alatu SIMAP(FSB) i CarSim-u

Uzimajući u obzir ove efekte, dolazimo do zaključka kako je matematički model sam po sebi iznimno točan, što je s obzirom na njegovu jednostavnost veliko postignuće. To nam pokazuje da je moguće u ranoj fazi razvoja trkaćeg bolida, poznavajući osnovni set parametara, s visokom točnošću simulirati idealne performanse, te na temelju toga donositi daljnje zaključke o razvoju bolida.

Također je bitno naglasiti da iako OptimumLap postiže zadovoljavajuću točnost simulacija performansi na proizvoljnoj stazi, korištenjem matematičkog modela razvijenog programskog alata SIMAP(FSB) i ta bi se točnost povisila. Algoritam za simulaciju performansi na proizvoljnoj stazi nije razvijen u sklopu ovog završnog rada, ali svakako predstavlja logičan slijed daljnjeg razvoja programskog alata SIMAP(FSB).

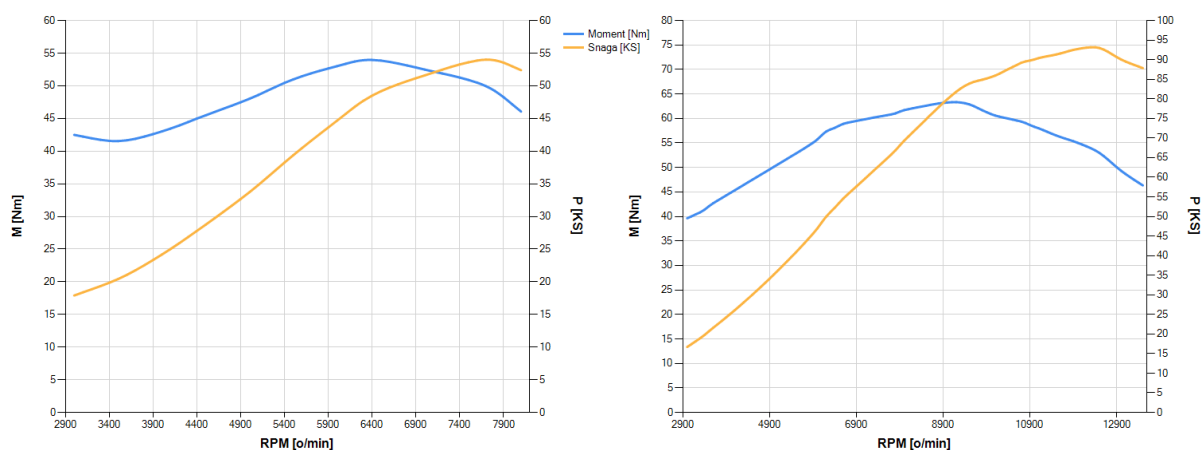
## 4. VREDNOVANJE KONCEPATA PRI RAZVOJU TRKAČEG BOLIDA ZA 2016. GODINU

Specifičnost Formula Student natjecanja je postojanje statičkih disciplina na kojima se ocjenjuje upravo opravdanost same konstrukcije, odnosno smislenost razvoja bolida. Početna, tzv. konceptualna faza razvoja trkačeg bolida zahtjeva donošenje određenih odluka i smjernica za daljnji razvoj. Razmatraju se različiti koncepti, njihove prednosti i mane, a kako bi se donijele ispravne odluke, potreban je jasan sustav vrednovanja tih koncepata. Performanse trkačeg bolida svakako su jedan od najbitnijih faktora pri donošenju odluka, ali ponekad ne i presudan. Stoga je bitno pri razvoju postaviti određene ciljeve, ali i ograničenja, razmatrati različite ideje te pri vrednovanju ispitati njihov utjecaj, kako na performanse tako i na ostale faktore. Čak i u slučaju negativnog utjecaja na performanse odluka može biti opravdana ukoliko pridonosi smislenosti razvoja, odnosno ukoliko je negativan utjecaj na performanse zanemariv u odnosu na ostale prednosti. U ovome radu prikazana su tri primjera donošenja odluka u konceptualnoj fazi, a razmatrat će se samo utjecaj na performanse i to za one ispitne procedure koje se boduju na natjecanjima. Za vrednovanje koncepata korišten je razvijeni programski alat SIMAP(FSB), u kombinaciji s programom OptimumLap.

### 4.1. Odabir motora

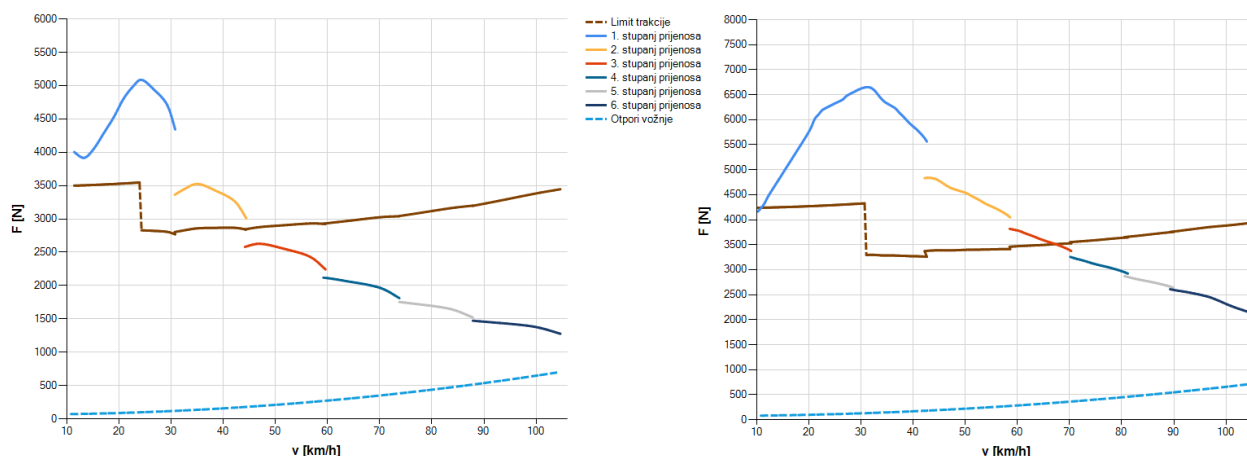
Prema pravilniku Formule Student radni volumen motora ograničen je na 600 ccm. Unutar tog ograničenja moguće je pronaći različite tipove motora, od jednocilindričnih do četverocilindričnih. Naizgled očita i glavna prednost četverocilindričnog motora je veća snaga, dok je osnovna prednost jednocilindričnog motora manja masa. Imajući na umu da su bolidi Formule Student zbog iznimno male mase (~200kg) prvenstveno ograničeni trakcijom, potrebno je ispitati relativnu iskoristivost snage motora, odnosno ne mijenjajući ostale parametre usporediti idealne performanse bolida s jednocilindričnim i četverocilindričnim motorom na temelju njihove brzinske karakteristike.

[Slika 41] lijevo prikazuje brzinsku karakteristiku jednocilindričnog motora Husqvarna TE610, dok [Slika 41] desno prikazuje brzinsku karakteristiku četverocilindričnog motora Honda CBR600, korištenog na prethodnom bolidu FSB Racing Team-a. Vidljivo je da je maksimalna snaga četverocilindričnog motora za skoro 30 kW, odnosno za preko 70 % veća od maksimalne snage jednocilindričnog motora, pa se postavlja logično pitanje koliki je gubitak na performansama korištenjem jednocilindričnog motora?



Slika 41. Usporedba brzinske karakteristike pri odabiru motora

Ukoliko za oba motora prijenosom ograničimo maksimalnu brzinu vozila na 105 km/h, što je prema pravilniku Formule Student najveća ostvariva brzina na trkačkoj stazi, dobivamo sljedeće dijagrame koji prikazuju model uzdužne trakcije. [Slika 42] lijevo prikazuje model uzdužne trakcije za jednocilindrični motor Husqvarna TE610, dok [Slika 42] desno prikazuje model uzdužne trakcije za četverocilindrični motor Honda CBR600. Vidljivo je da je u oba slučaja bolid u nižim stupnjevima prijenosa ograničen trakcijom što znači da u cijelom tom rasponu nije moguće prenijeti maksimalnu vučnu silu motora na podlogu. Prema tome, prednost četverocilindričnog motora uslijed veće raspoložive vučne sile javlja se tek pri većim brzinama gdje bolid nije više ograničen trakcijom, dok će bolid s jednocilindričnim motorom uslijed manje ukupne mase imati blagu prednost pri kočenju i bočnom ubrzanju.



Slika 42. Utjecaj odabira motora na model uzdužne trakcije

[Tablica 7] prikazuje rezultate simulacija ispitnih procedura koje se boduju na natjecanjima, pri čemu je crvenom bojom označen bolji rezultat. Iz tablice je vidljivo da motor s četiri cilindra, iako ima puno veću snagu, ne donosi značajno poboljšanje performansi, štoviše ukupni dojam svakako je na strani jednocilindričnog motora, uzme li se u obzir smanjenje mase, manja cijena i sve ostale prednosti na samu konstrukciju.

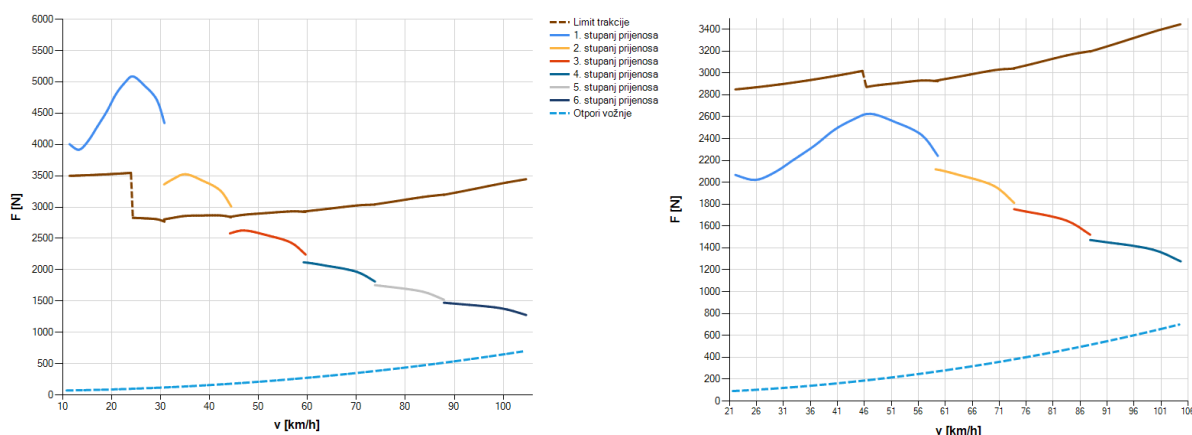
**Tablica 7. Vrednovanje odabira motora**

| ISPITNA PROCEDURA                                 | PARAMETAR ZA VREDNOVANJE   | JEDAN CILINDAR | ČETIRI CILINDRA |
|---|----------------------------|----------------|-----------------|
| Ubrzanje iz stanja mirovanja na putu od 75 metara | Vrijeme prolaska procedure | 4,68 s         | <b>4,39 s</b>   |
| Ispitna procedura Skidppad polumjera 9,125 metara | Vrijeme prolaska procedure | <b>19,64 s</b> | 19,75 s         |
| Ispitna procedura Autocross                       | Vrijeme prolaska procedure | <b>77,16 s</b> | 77,31 s         |
| Ispitna procedura Endurance                       | Vrijeme prolaska procedure | 85,02 s        | <b>84,65 s</b>  |
|   | Potrošnja goriva           | <b>0,11 kg</b> | 0,14 kg         |

#### 4.2. Parametrizacija transmisije

Već je rečeno da je čak i korištenjem jednocilindričnog motora manje snage, bolid i dalje ograničen trakcijom u nižim stupnjevima prijenosa. To prvenstveno predstavlja problem vozaču jer je teško održavati vozilo na granici proklizavanja i svako pretjerano dodavanje gasa pri nižim brzinama može dovesti do gubitka kontrole. Stoga je moguće ili korigirati ukupni prijenosni omjer te time povećati maksimalnu brzinu vozila ili smanjiti broj stupnjeva prijenosa na način da se eliminiraju oni koji se nalaze u području ograničene trakcije. S obzirom da se povećanjem maksimalne brzine vozila neće dobiti na performansama radi ograničenja pravilnikom Formule Student, ostaje za ispitati smanjenje broja stupnjeva prijenosa. Neke od prednosti su svakako dodatno smanjenje mase te pojednostavljenje konstrukcije mjenjača, a još značajnija prednost bit će lakša kontrola bolida.

[Slika 43] prikazuje usporedbu modela uzdužne trakcije za motor Husqvarna TE610 prije i nakon eliminiranja prva dva stupnja prijenosa. Vidljivo je da nakon eliminiranja prva dva stupnja prijenosa vozilo više ni u kojem trenutku nije ograničeno trakcijom. Bitno je napomenuti da se ovdje radi o dinamičkom limitu trakcije, što znači da pri naglom ubrzanju iz stanja mirovanja i dalje može doći do proklizavanja.



**Slika 43. Utjecaj parametrizacije transmisije na model uzdužne traksije**

[Tablica 8] prikazuje rezultate simulacija ispitnih procedura koje se boduju na natjecanjima, pri čemu je crvenom bojom označen bolji rezultat. Kao parametar za vrednovanje dodan je i broj promjena stupnja prijenosa u ispitnim procedurama Autocross i Endurance. Iz tablice je vidljivo da eliminacija prvog i drugog stupnja prijenosa značajno smanjuje broj promjena stupnja prijenosa čime olakšava posao vozaču, ali i pozitivno utječe na performanse vozila iz razloga što svaka promjena stupnja prijenosa nosi određeni gubitak na vremenu. Ta prednost vidljiva je na ubrzanju, dok na ispitnim procedurama Autocross i Endurance nije vidljiva iz razloga što program OptimumLap zanemaruje vrijeme promjene stupnja prijenosa. Stoga se zaključuje kako je eliminacija prvog i drugog stupnja prijenosa opravdana odluka.

**Tablica 8. Vrednovanje parametrizacije transmisije**

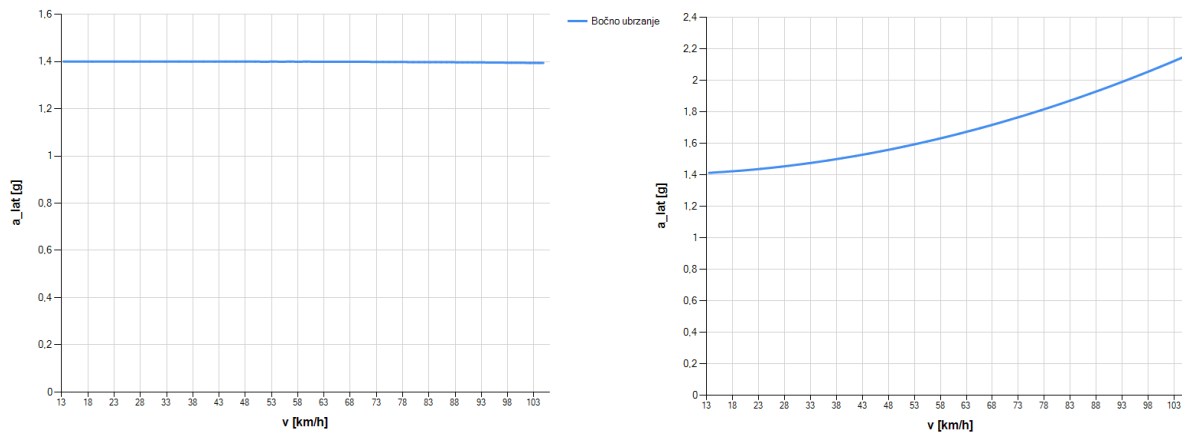
| ISPITNA PROCEDURA                                 | PARAMETAR ZA VREDNOVANJE               | 6 STUPNJEVA PRIJENOSA | 4 STUPNJA PRIJENOSA |
|---|--|-----------------------|---------------------|
| Ubrzanje iz stanja mirovanja na putu od 75 metara | Vrijeme prolaska procedure             | 4,68 s                | <b>4,66 s</b>       |
| Ispitna procedura Skidppad polumjera 9,125 metara | Vrijeme prolaska procedure             | 19,64 s               | 19,64 s             |
| Ispitna procedura Autocross                       | Vrijeme prolaska procedure             | 77,16 s               | 77,16 s             |
|   | <b>Broj promjena stupnja prijenosa</b> | 96                    | <b>78</b>           |
| Ispitna procedura Endurance                       | Vrijeme prolaska procedure             | 85,02 s               | 85,02 s             |
|   | Potrošnja goriva                       | 0,11 kg               | 0,11 kg             |
|   | <b>Broj promjena stupnja prijenosa</b> | 135                   | <b>87</b>           |



### 4.3. Utjecaj aerodinamike na performanse

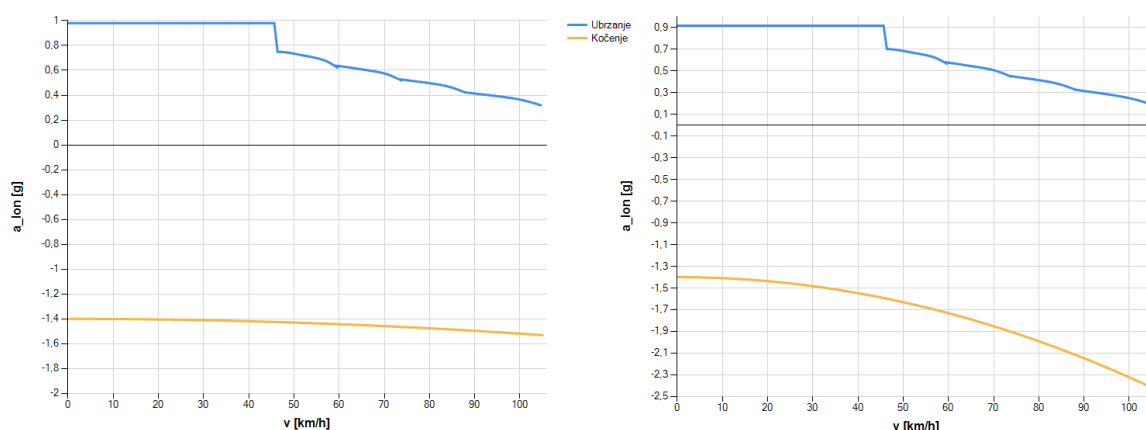
S obzirom na niske brzine koje se postižu na natjecanjima Formule Student, prije nego se krene s razvojem aerodinamike bolida, potrebno je ispitati koliki je utjecaj aerodinamike na performanse i je li razvoj aero-paketa uopće opravdan. Pri tome se temeljem dostupnih podataka i prethodnog iskustva mogu pretpostaviti aerodinamički koeficijenti za slučaj bez korištenja aero-paketa, kao i za slučaj korištenja aero-paketa, dok se ostali parametri ne mijenjaju. Osnovna prednost korištenja aero-paketa je poboljšanje bočnih performansi bolida. Uz povećanje mase, osnovni nedostatak je povećanje otpora zraka što negativno utječe na ubrzanje, ali ima dvostruko pozitivan učinak pri kočenju. Naime, povećanjem normalne sile na kotač povisuje se limit trakcije što znači da se može kočiti većom silom, a da ne dođe do blokiranja kotača. S druge strane, sam otpor zraka dodatno usporava vozilo, smanjujući time vrijeme i put kočenja.

[Slika 44] prikazuje utjecaj aerodinamike na iznos maksimalnog bočnog ubrzanja, pri čemu je lijevo na slici bolid bez aero-paketa, a desno na slici bolid s aero-paketom. Vidljiv je značajan utjecaj aerodinamike na bočno ubrzanje bolida.



Slika 44. Utjecaj aerodinamike na model bočnog ubrzanja

[Slika 45] prikazuje utjecaj aerodinamike na model uzdužnog ubrzanja i kočenja, pri čemu je lijevo na slici bolid bez aero-paketa, a desno na slici bolid s aero-paketom. Vidljivo je da je negativan utjecaj na ubrzanje gotovo zanemariv u odnosu na pozitivan utjecaj pri kočenju koji je itekako značajan.



**Slika 45. Utjecaj aerodinamike na model uzdužnog ubrzanja i kočenja**

[Tablica 9] prikazuje rezultate simulacija ispitnih procedura koje se boduju na natjecanjima, pri čemu je crvenom bojom označen bolji rezultat. Iz tablice je vidljivo da unatoč niskim brzinama koje se postižu na natjecanjima Formule Student aerodinamika značajno poboljšava performanse na ispitnim procedurama Autocross i Endurance. Nedostaci su negativan utjecaj na ubrzanje i nešto veća potrošnja goriva, ali taj utjecaj je zanemariv u odnosu na prednosti dobivene na ostalim ispitnim procedurama. Stoga je korištenje aero-paketa opravdana odluka.

**Tablica 9. Vrednovanje utjecaja aerodinamike**

| ISPITNA PROCEDURA                                 | PARAMETAR ZA VREDNOVANJE   | BEZ AERO-PAKETA | S AERO-PAKETOM |
|---|----------------------------|-----------------|----------------|
| Ubrzanje iz stanja mirovanja na putu od 75 metara | Vrijeme prolaska procedure | <b>4,55 s</b>   | 4,66 s         |
| Ispitna procedura Skidppad polumjera 9,125 metara | Vrijeme prolaska procedure | 20,48 s         | <b>19,64 s</b> |
| Ispitna procedura Autocross                       | Vrijeme prolaska procedure | 82,16 s         | <b>77,16 s</b> |
| Ispitna procedura Endurance                       | Vrijeme prolaska procedure | 89,26 s         | <b>85,02 s</b> |
|   | Potrošnja goriva           | <b>0,09 kg</b>  | 0,11 kg        |

## **5. ZAKLJUČAK**

U okviru ovog završnog rada na temelju jednostavnog matematičkog modela razvijen je programski alat za simulaciju i analizu performansi bolida Formula Student. Svrha takvog programa je da se u ranoj fazi razvoja bolida, kada većina parametara vozila još nije poznata, korištenjem ograničenog broja osnovnih parametara bolida omogući simuliranje idealnih performansi bolida. Analiza idealnih performansi kao što su ubrzanje vozila, kočenje, bočno ubrzanje, kao i analiza stvarnih performansi učitavanjem telemetrije, mogućnosti su koje takav programski alat nudi. Upotreba programa u procesu koncipiranja bolida omogućuje međusobnu usporedbu različitih koncepata bolida te njihovo vrednovanje.

Polazna točka razvoja programskog alata bila je analiza sličnog programa OptimumLap, odnosno određivanje nedostataka takvog programa kako bi se u sljedećem koraku u vlastitom programu unaprijedio matematički model odnosno algoritmi samih simulacija te povisila točnost rezultata. Utvrđeno je kako se najveće greške, u iznosima i do 30 %, javljaju pri simuliranju uzdužnih performansi vozila, a analizom rezultata utvrđeni su i glavni razlozi pojavljivanja tih grešaka. Simulacije bočnih performansi vozila programom OptimumLap, kao i performansi na proizvoljnoj stazi daju zadovoljavajuće rezultate s točnošću preko 90 %.

Pri razvoju programskog alata SIMAP(FSB) proširen je matematički model, te su razvijeni algoritmi simulacija uzdužnih performansi koji eliminiraju uzroke nastajanja značajnih grešaka kod programa OptimumLap. Proširenje matematičkog modela je neznatno, uzimajući u obzir samo dva dodatna faktora, a to su preraspodjela opterećenja te otpor ubrzanju uslijed inercije rotacijskih dijelova. Greške koje se javljaju pri simuliranju uzdužnih performansi vozila smanjene su u prosjeku na ispod 5 %, dajući time visoku relativnu točnost programa od 95 %, uz zadržavanje jednostavnosti matematičkog modela.

Referentni rezultati simulacija za određivanje točnosti programa OptimumLap i programa SIMAP(FSB) dobiveni su korištenjem programa za analizu dinamike vozila CarSim koji koristi, u odnosu na navedene programe, znatno složeniji matematički model.

Iako OptimumLap postiže zadovoljavajuću točnost simulacija performansi na proizvoljnoj stazi, korištenjem matematičkog modela razvijenog programskog alata SIMAP(FSB) i ta bi se točnost povisila. Algoritam za simulaciju performansi na proizvoljnoj stazi nije razvijen u sklopu ovog završnog rada, ali svakako predstavlja logičan slijed daljnjeg razvoja programskog alata SIMAP(FSB).

## **LITERATURA**

- [1] 2015 Formula SAE® Rules – 09/17/2014 Revision, SAE International, 2014.
- [2] Lulić, Ormuž, Šagi: Predavanja iz kolegija Motorna vozila, 2015./2016.
- [3] Milliken, W.L., Milliken, D.L.: Race Car Vehicle Dynamics, SAE International, Warrendale, PA, USA, 1995.
- [4] Bojčetić, N., Pavković N., Todić R., Deković D., Marjanović D., Rhode D.: Programiranje i algoritmi, podloge za vježbe - programiranje, Visual Basic, 2006.
- [5] Visual Basic .NET Tutorials: URL: <http://www.visual-basic-tutorials.com/>
- [6] Mechanical Simulation Corporation: CarSim, Educational User Manual, VERSION 4.5, 2000.