



ANALIZA AKTIVNOG SPOJLERA SPORTSKOG AUTOMOBILA PRIMENOM
RAČUNARSKE DINAMIKE FLUIDA

SPORTS CAR ACTIVE SPOILER ANALYSIS BY USING COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS

Denis Rapić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Oblast – MEHATRONIKA

Kratak sadržaj – U radu su opisana poglavlja koja ukazuju na specifične efekte po pitanju upravljivosti, usled generisanja aerodinamičnih sila i momenata primenom zadnjeg dvosegmentnog aktivnog spojlera na primeru sportskog automobila. Cilj je bio izvršiti detaljnu CFD analizu fluidnog modela aktivnog spojlera, i u skladu sa tako dobijenim rezultatima formirati prihvatljivu upravljačku logiku, kako bi se tokom vožnje posredstvom njega uticalo na brojne faktore od interesa u skladu sa trenutnim predefinisanim režimima vožnje. Svi priloženi dijagramski prikazi karaktera promena relevantnih parametara omogućuju izvođenje određenih zaključaka po pitanju upravljivosti i ekonomičnosti, između ostalog.

Ključne reči: Vozilo, Performanse, Aerodinamika, CFD, Spojleri, Upravljanje

Abstract – In this paper we can see the chapters which indicate specific effects in terms of vehicle handling, due to the generation of aerodynamic forces and momentums by using rear two-segment active spoiler on sport car example. The goal was actually to do the detailed CFD analysis of the fluid model of the active spoiler, and to form an acceptable control logic in accordance with the generated results. This way, we can influence important factors of interests in accordance with the currently predefined driving modes. The accompanying diagrams of the changes in the relevant parameters allows the execution of certain conclusions which refers to the sport vehicle handling and economy, inter alia.

Keywords: Vehicle, Performance, Aerodynamics, CFD, Spoilers, Control

1. UVOD

Kod većine drumskih motornih vozila koja su danas u primeni gotovo da nema značajnijih pomaka po pitanju iskorišćenja svih prednosti koje aktivna aerodinamika kao takva nudi. Na račun generisanih aerodinamičnih sila i momenata o kojima će se govoriti u narednom tekstu, moguće je u prilično dobroj meri uticati na upravljivost i ekonomičnost, koji generalno predstavljaju najvažnije performansne pokazatelje jednog savremenog automobila.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Dragan Ružić.

Relativno strogi uvedeni *standardi* po pitanju prethodno pomenutih korisničkih zahteva se u glavnom očekuju kod projektovanja trkačkih sportskih automobila. Upravo zbog toga, elementi aktivne aerodinamike često nisu prisutni kod klasičnih drumskih vozila za potrebe svakodnevne vožnje, ali se u pojedinim slučajevima pasivni spojleri primenjuju čisto iz estetskih razloga kako bi vozilo dobilo svoju sportsku notu.

U radu će se prvenstveno na detaljnom nivou razmotriti primer konstruktivnog rešenja zadnjeg dvosegmentnog aktivnog spojlera aeroprofilnog poprečnog preseka u oznaci NACA 4412. Nakon toga će se izvršiti neophodne CFD (*Computational Fluid Dynamics*) simulacije u softverskom okruženju *Star-CCM+* proizvođača *Siemens*, i potom kao krajnji rezultat svega formirati odgovarajuća upravljačka logika. Na taj način će se uvođenjem jednog ovako koncipiranog rešenja uticati na podupravljenost, nadupravljenost, delimičnu redukciju radijusa krivine, smanjenje traga kočenja, i na odnos aerodinamičnih sila.

Aktivan spojler se može primeniti kao dodatno rešenje uz primenu sistema ESP (*Electronic Stability Program*), a ideja za rad je proistekla iz jednog već realizovanog aktivnog sistema ove vrste - ALA (*Active Lamborghini Aerodynamics*) [1].

2. AEROPROFIL AKTIVNOG SPOJLERA

2.1. Izvor dimenzionih parametara usvojenog profila

Prema dostupnim podacima u arhivi Departmana za aero-inženjering (*Department of Aerospace Engineering*) na web sajtu [2], navedenim od strane organizacije *UIUC Applied Aerodynamics Group*, odlučeno je da se usvoje ravanske koordinate aeroprofila oznake NACA 4412.

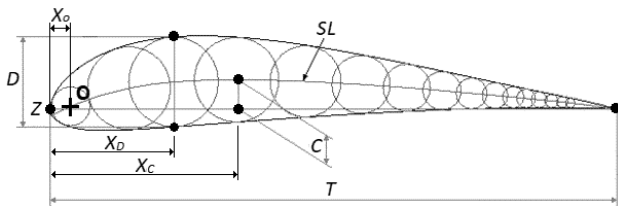
UIUC raspolaže velikim brojem izvedbi aeroprofilnih oblika NACA i drugih, sa obzirom da se organizacija bavi eksperimentalnom analizom aerodinamičnih elemenata pimenjenih kako u vazduhoplovstvu tako i u drugim oblastima (pumpna radna kola, elise vetrogeneratora, itd.).

2.2. Dimenzioni parametri navedeni u oznaci profila

Značenja broječanih oznaka aeroprofila NACA 4412 sa usvojenom dužinom tetive od $T = 200$ mm su sledeća:

- 4 - maksimalna krivina profila, $C = 4 \cdot \frac{T}{100}$,
- 4 - položaj maksimalne krivine, $X_c = 40 \cdot \frac{T}{100}$,
- 12 - maksimalna debljina profila, $D = 12 \cdot \frac{T}{100}$.

Važna dimenziona i geometrijska obeležja *asimetričnog* aeroprofila sa središnjom linijom SL i tačkom centra nosa u oznaci O (geometrijska osa), predstavljena su na slici 1.



Slika 1. Dimenzioni i geometrijski parametri asimetričnog aeroprofila

Pored prethodno zadatih dimenzija $C = 8\text{mm}$, $X_c = 80\text{mm}$, $D = 24\text{mm}$, usvojena je i ukupna širina jednog segmenta, $a = 700\text{mm}$. Masa spojlera se neće uzimati u obzir.

2.3. Značaj koeficijenta otpora oblika c_D i sile F_D

Čeona površina aeroprofila NACA 4412 u oznaci A_a ima direktan uticaj na vrednost bezdimenzionog koeficijenta otpora oblika, c_D (*Drag Coefficient*). Kako je navedeno od strane autora *T. Gillespie* u knjizi [3], koeficijent c_D za jedan primer simetričnog aeroprofila je svega oko 0,007. To i jeste zapravo pravi pokazatelj da se profil bez nekog većeg otpora kreće kroz prostor - „lakše seče vazduh“. Povećanjem A_a , vrednost koeficijenta c_D takođe raste.

Sopstveno izvedenim CFD analizama za slučaj samo jednog NACA 4412 segmenta dvodelnog aeroprofilnog aktivnog spojlera u softveru *Star-CCM+* (v. 8.04.007) je ustanovljeno da je vrednost koeficijenta c_D za relativni ugao vazdušne struje AOA - *Angle of Attack* od 0° , brzinu strujanja vazduha v od 100 km/h ($27,77\text{ m/s}$), Reynoldsov broj Re od oko $3,5786 \cdot 10^5$ i čeonu površinu profila A_a od $0,0178\text{ m}^2$, čak $0,2174$. Napominje se da ovako dobijeni rezultati važe za profil okrenut oko svoje geometrijske ose za ugao od 180° iz želje za povećanjem sile $F_{NA\ DOLE}$.

Bez obzira na trenutni položaj aeroprofila, vazdušna struja je usmerena tako da strujnice prvo „naleću“ na zaustavnu tačku, Z (slika 1).

Koeficijent otpora oblika se analitički može izračunati na osnovu sledećeg obrasca prema izvoru [3]:

$$c_D = \frac{2 F_D}{A_a \rho v^2} (-), \quad (1)$$

gde su:

F_D – eksperimentalno određena sila otpora oblika u N,

A_a – čeona površina aeroprofila u m^2 (zavisi od AOA),

ρ – gustina vazduha u $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (na $T = 25^\circ\text{C}$ je $\rho = 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$),

v – brzina strujanja fluida – vazduha u $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ (brzina vozila).

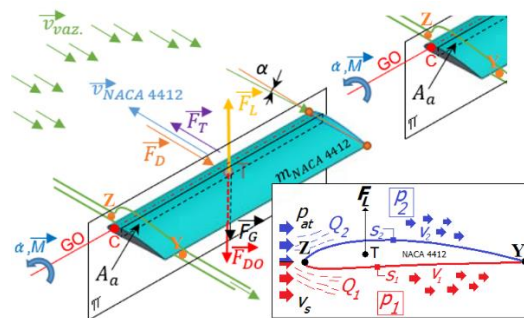
Procentualno izražen doprinos generisanju aerodinamične sile otpora kretanju F_D je [4]:

- $\approx 90\%$ – uticaj oblika tela koje se kreće (oblika aktivne površine izložene strujanju, A_a),
- $\approx 10\%$ – uticaj viskoznoeg trenja (između strujnica i kontaktne površine profila).

Zbog relativno malog udela uticaja trenja na generisanje sile F_D usvojiće se da je površina aeroprofila „idealno glatka“, zanemarujući tako njenu površinsku hrapavost.

2.4. Sila izdizanja i njen koeficijent, F_L i c_L

Kada se aeroprofil počne kretati kroz prostor, jasno je da će pojedine strujnice vazdušne struje (*eng. Streamlines*) najpre sa profilom ostvariti kontakt u zaustavnoj tački Z . U njoj će one početi da se granaju u dva strujna toka Q_1 i Q_2 kako je prikazano na slici 2.



Slika 2. Šematski prikaz parametara radnog medija i generisanih sila tokom strujanja vazduha duž i oko čvrstog tela aeroprofilnog poprečnog preseka

Pre neposrednog kontakta, na određenoj udaljenosti od profila, strujnice su okarakterisane svojom *uniformnom* raspodelom. To ukazuje da sve one u zoni atmosferskog pritiska p_{at} imaju isti (paralelan) pravac, smer i konstantnu brzinu v_s (nestišljivo stanje vazduha ($M < 0,3$)). Konkretno: $p_{at} = 1,01325\text{ Pa}$, $v_s = 27,77\text{ m/s}$. Naravno, brzina će se menjati sve do $69,44\text{ m/s}$ (250 km/h).

Napominje se da je u softveru *Star-CCM+* aeroprofil bio stacionaran, dok se brzina saopštavala vazdušnoj struji.

Neminovno je da će strujnice u tokovima Q_1 i Q_2 različitim brzinama v_1 i v_2 prelaziti puteve različitih dužina, s_1 i s_2 . Na taj način će u skladu sa *Bernulijevom jednačinom* formirati zone visokog i niskog pritiska respektivno, kako navodi relacija [3]:

$$s_1 < s_2 \Rightarrow p_1 > p_2, \quad (2)$$

gde su:

s_1 i s_2 – dužine pređenih puteva od tačke Z do tačke Y različitim putanjama u m,

p_1 i p_2 – nadpritisak (p_{nad}) i podpritisak (p_{pod}) u bar.

Zbog povišenog pritiska p_1 u zoni ispod donje površine profila, u težišnoj tački T se generiše sila izdizanja F_{IZ} (N). U literaturi se najčešće predstavlja kao F_L – *Lift Force*. Ona svojim učešćem delujući vertikalno navise formira *uzgon*.

Za postizanje uzgona je dovoljno samo obezbediti razliku između pritisaka p_1 i p_2 . Dakle p_2 ne mora biti striktno podpritisak.

Koeficijent sile izdizanja se analitički može izračunati na osnovu sledećeg obrasca prema izvoru [5]:

$$c_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_a} (-). \quad (3)$$

Svi parametri obrasca su definisani u prethodnom tekstu.

Imajući u vidu da je u prvom planu bio cilj ostvariti što bolji kontakt pneumatika sa podlogom, analizirana je sila izdizanja suprotnog smera, predstavljena kao sila potiska na dole, $-F_L = F_{NA\ DOLE} = F_{DO}$ (*eng. Downforce*) u N.

3. POSTUPNI KORACI CFD ANALIZE

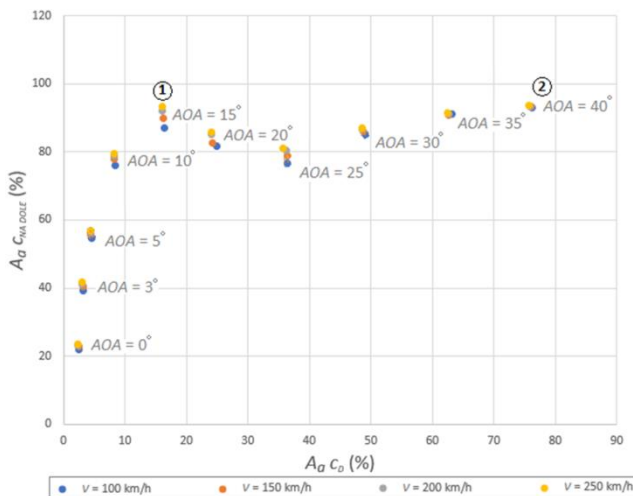
Da bi se dobili validni rezultati CFD analize, potrebno je bilo ispravno podesiti *softverske* parametre numeričkog modela i proći kroz:

- formiranje domena simulacije (vazdušnog tunela),
- kreiranje fluidnog modela aeroprofila NACA 4412,
- definisanje regiona / ograničenja za ulaz, izlaz i zid tunela,
- podešavanje parametara fizike problema (radnog medija),
- generisanje diskretne interpretacije domena tj. mreže (gustina mreže na ulazu i izlazu tunela je 300 % ređa u odnosu na gustinu koju definiše veličina baze konačne zapremine B_s kao softverski parametar (eng. *Base Size*)),
- definisanje parametara *solvera* (broja iteracija i dr.),
- proveru zadovoljenja kriterijuma konvergencije gubitaka ($v_x, v_y, v_z, p, TKE, TED, T$ - ako se koristi *Heat Transfer*),
- postprocesiranje i vizuelizaciju (*scena*: skalar ili vektor),
- formiranje *ISOSURFACE* prikaza karaktera strujanja,
- pokretanje CFD simulacije i analizu dobijenih rezultata.

4. DIJAGRAMSKI PRIKAZ REZULTATA

4.1. Izvođenje zaključaka

Nakon mnogobrojnih CFD simulacija formiran je dijagram predstavljen ispod. Referenca: $0,0015 = 1\%$.



Slika 3. Odnosi proizvoda čeonih površina aeroprofila A_α i pripadajućih aerodinamičnih koeficijenata C_D i $C_{NA\ DOLE}$ dobijeni CFD analizom

Ukoliko se posmatraju slučajevi za interval uglova AOA od 0 do 15° (poz. 1), vidi se da se malom promenom ugla utiče na drastično povećanje intenziteta sile $F_{NA\ DOLE}$ dok se otpor kretanju (sila F_D) toliko ne menja, i relativno je mali.

Najveći intenzitet sile $F_{NA\ DOLE}$, ali istovremeno i najmanja vrednost sile otpora kretanju F_D uočena je za ugao AOA od oko 15° ($F_D = 68,7\text{ N}$ dok je $F_{NA\ DOLE} = 399,3\text{ N}$). Proizvod $A_\alpha C_D$ u ovoj tački iznosi $16,2\%$, dok je $A_\alpha C_{NA\ DOLE}$ čak $93,4\%$. Posmatraju se brzine $v = v_{vaz.}$ od 100 i 150 km/h.

Kada se premaši ugao od 15° , otpor kretanju F_D nastavlja da raste sve vreme. Sila potiska $F_{NA\ DOLE}$ opada do nekih 25° , nakon čega je prisutan ponovo njen trend rasta.

Kada AOA dostigne svoju krajnju vrednost od 40° , sile F_D i $F_{NA\ DOLE}$ se po intenzitetu ne razlikuju *mnogo* (poz. 2). Konkretno: $A_\alpha C_{NA\ DOLE} = 93,4\%$ (kao u slučaju u poz. 1) i $A_\alpha C_D = 75,8\%$. Svi rezultati se odnose na jedan segment spojlera!

Od konkretnog predefinisano *režima vožnje* zavisi koji će se deo dijagrama sa slike 3 koristiti za potrebe formiranja upravljačke logike zadnjeg aktivnog spojlera.

5. UPRAVLJAČKA LOGIKA AKTIVNOG SISTEMA

Na brzinama vozila manjim od 100 km/h nema potrebe za korišćenjem aktivnog spojlera zbog činjenice da su generisane aerodinamične sile prilično malih intenziteta. Spojler će se *aktivirati* tek nakon dostizanja ove brzine. U svom referentnom položaju se nalazi pod uglom AOA 0° .

Tabela 1. Parametri spojlera u referentnom položaju

| Uslov | AOA u° | $v_{vaz.}$ u $\frac{km}{h}$ | F_D u N | $F_{NA\ DOLE}$ u N |
|---|---------------|-----------------------------|-----------|--------------------|
| referentni položaj | 0 | $< 27,77$ | $< 1,8$ | $< 15,1$ |
| Govori se o položaju oba segmenta dvodelnog spojlera. | | | | |

Tokom ubrzanja ili održavanja konstantne brzine teži se smanjenju otpora kretanju (lakše kretanje kroz prostor), ali i što je moguće većem povećanju sile $F_{NA\ DOLE}$. Zakreću se oba segmenta. U tabeli 2. su navedene konkretne vrednosti.

Tabela 2. Parametri za konstantnu brzinu ili ubrzanje

| AOA u° | $v_{vaz.}$ u $\frac{km}{h}$ | F_D u N | $F_{NA\ DOLE}$ (F_{ND}) u N |
|---|-----------------------------|------------------------|---------------------------------|
| 0 | $v < 100$ | $< 1,8$ | $< 15,1$ |
| 3 | $100 \leq v < 110$ | $2,2 \leq F_D < 3,7$ | $26,9 \leq F_{ND} < 45,3$ |
| 5 | $110 \leq v < 120$ | $3,7 \leq F_D < 8,2$ | $45,3 \leq F_{ND} < 76,0$ |
| 10 | $120 \leq v < 130$ | $8,2 \leq F_D < 18,8$ | $76,0 \leq F_{ND} < 102,5$ |
| 15 | $130 \leq v \leq 150$ | $18,8 \leq F_D < 24,9$ | $102,5 \leq F_{ND} < 138,5$ |
| Za kretanje vozila isključivo po pravolinijskoj deonici puta! | | | |

Za potrebe kočenja je odlučeno da se iskoristi slučaj kada su aerodinamične sile F_D i $F_{NA\ DOLE}$ maksimalne. Taj uslov je ispunjen za relativni ugao vazdušne struje AOA 40° . Oba segmenta se zakreću u slučaju pravolinijske deonice puta.

Tabela 3. Parametri spojlera za slučaj kočenja

| AOA u° | $v_{vaz.}$ u $\frac{km}{h}$ | F_D u N | $F_{NA\ DOLE}$ u N |
|---------------|-----------------------------|-------------------|--------------------|
| 40 | ceo opseg | $52,2 \div 117,1$ | $63,6 \div 143,7$ |

Poslednji, četvrti uslov se odnosi na kretanje vozila po krivolinijskoj deonici. U ovom slučaju će se svaki segment spojlera pojedinačno zakretati, saopštavajući istovremeno spoljašnjem (S) i unutrašnjem paru točkova (U) potrebne odnose aerodinamičnih sila tokom vožnje automobila.

Tabela 4. Uslovi na krivolinijskoj deonici puta

| Slučaj | Par točkova | AOA u° | F_D | $F_{NA\ DOLE}$ | $v_{vaz.}$ |
|--|-------------|---------------|-------|----------------|------------|
| skretanje uz kočenje ili skretanje uz ubrzanje | U | 40 | max. | max. | ceo opseg |
| | S | 25 | max. | min. | |
| Cilj je formirati kontra moment momentu valjanja - sprečiti prevrtanje vozila! | | | | | |

6. EFEKTI POSTIGNUTI UPOTREBOM SPOJLERA

Upotrebom prethodno opisanog rešenja aktivnog spojlera uticalo se na postizanje sledećih efekata:

- na nešto bolje prijanjanje pneumatika na podlozi generisanjem potisne sile $F_{NA DOLE}$. Ključni su parametri:
 - a. mikroprofil podloge,
 - b. koeficijent trenja μ_p i
 - c. vremenski uslovi,
- smanjenje puta kočenja formiranjem većeg otpora kretanju silom F_D . Ostvaruje se kraći zaustavni put s_z i kraće zaustavno vreme t_z ,
- potisnom silom $F_{NA DOLE}$ povećava se moguća bočna sila zbog povećanog prijanjanja. Drugim rečima, smanjuje se povodjenje. Dvodelnim spojlerom se formira kontra moment M_k nastalom momentu valjanja M_v što smanjuje mogućnost prevrtanja vozila, i to naročito na krivolinijskim deonicama. Različiti su intenziteti reakcija veza unutrašnjih U, odnosno spoljašnjih pneumatika S,
- generisanjem aerodinamičnih sila se povećava stabilnost i upravljivost. Time se utiče na faktor bezbednosti učesnika u saobraćaju,
- aktivnim dvodelnim spojlerom se smanjuje odstupanje kretanja vozila od prvobitne željene trajektorije. Kontrolom tzv. ugla zanošenja β sprečava se pojava podupravljenosti / nadupravljenosti,
- ukoliko se NACA aeroprofil zakreće oko svoje geometrijske ose u negativnom matematičkom smeru, umesto sile $F_{NA DOLE}$ generiše se sila F_L koja može da ima ulogu statičkog osovinskog rasterećenja ukoliko za tako nešto postoji potreba. U ovom radu uticaj sile izdizanja nije analiziran.

7. ZAKLJUČAK

Primena aktivnih spojlera na vozilima tokom svakodnevnih vožnje nema posebnog efekta sa obzirom da su brzine kretanja veoma male. Rešenje obrađeno u ovom radu bi moglo da se upotrebi na jednom trkačkom vozilu gde su brzine svakako veće od 150 km/h.

Ideja o korišćenju zadnjeg aktivnog dvodelnog spojlera je proistekla iz jednog već realizovanog aktivnog sistema ove vrste, ALA - *Active Lamborghini Aerodynamics*. Osnovni cilj je bio sprečiti prevrtanje vozila u krivini, ili drugačije rečeno, redukovati generisani moment valjanja M_v .

Ravanske koordinate aeroprofila oznake NACA 4412 su usvojene zbog mogućnosti postizanja prihvatljivog odnosa aerodinamičnih koeficijenata c_D i c_L kod ovog tipa profila.

Za slučajeve da se aeroprofil nalazi u svom *normalnom* položaju - nije preokrenut, CFD analizama je utvrđeno da je sila F_L prisutna sve do AOA od oko 4°. Tek nakon toga se generiše aerodinamična sila $F_{NA DOLE}$ ($-F_L$), i postepeno raste sa povećanjem ugla vazdušne struje AOA.

U slučaju preokrenutog aeroprofila, sila $F_{NA DOLE}$ je prisutna za sve vrednosti uglova AOA do maksimalnih 40°.

Najvažniji faktor CFD analize koji direktno utiče na tačnost dobijenih rezultata jeste postupak generisanja mrežnog modela. Kroz projekat je ustanovljeno da se najveći deo utrošenog vremena odnosi na formiranje mreže. Kod ozbiljnijih projekata je prema rečima *Mouffouk M.* [6] to čak i do oko 70% u odnosu na ukupno vreme utrošeno u CFD analizu. Korišćen je softver *Star-CCM+*.

Da bi se u što većoj meri sprečio turbulentni karakter strujanja u zonama oko bočnih površina aeroprofila, uz pretpostavku da je faktor razmere blokade dobro definisan, preporučuje se uvođenje jedne konstruktivne modifikacije tj. primena bočnih zakrilaca (eng. *Winglets or Wingtips*). Faktor razmere blokade je: $\emptyset = 9,86 < \emptyset_{gr}$.

Za potrebe modifikacije već definisane upravljačke logike moguće je uvesti još neke uticajne parametre. Time bi se između ostalog dobilo na univerzalnosti sistema.

8. LITERATURA

- [1] <https://edgardaily.com/articles/lamborghini-huracan-performante-ala> (pristupljeno u martu 2019.).
- [2] UIUC Applied Aerodynamics Group, <https://m-selig.ae.illinois.edu> (pristupljeno u martu 2019.).
- [3] Gillespie T. 1992. Road Loads. In: Fundamentals of Vehicle Dynamics, ed. Gillespie T, ch. 4, 79-124. University of Michigan.
- [4] Stojić B. 2012a. Predavanja iz predmeta Teorija kretanja drumskih vozila – Osnovi aerodinamike drumskih vozila, <https://tkdv.files.wordpress.com/2012/03/p02-aerodinamika.pdf> (pristupljeno u januaru 2019.).
- [5] Cakir M. 2012. CFD study on aerodynamic effects of a rear wing/spoiler on a passenger vehicle. Santa Clara University, California.
- [6] Mouffouk M. 2013. Aerodynamic Development of the Seguracing F1-R01 Prototype Using CFD. University H. L., Batna Algeria.
- [7] <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview> (pristupljeno u junu 2019.).

Kratka biografija:



Denis Rapić rođen je u Subotici 1994. god. Osnovne studije studijskog programa Mehatronika na Fakultetu tehničkih nauka, završio je 2018. godine. Master rad je odbranio na istom usmerenju godine 2019. kontakt: rapicdenis@gmail.com