

Utjecaj debljine diskova kočnica trkaćeg vozila na njihovo zagrijavanje tijekom vožnje

Ercegovac, Zvonimir

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:056685>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Zvonimir Ercegovic

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**UTJECAJ DEBLJINE DISKOVA
KOČNICA TRKAČEG VOZILA
NA NJIHOVO ZAGRIJAVANJE
TIJEKOM VOŽNJE**

Mentor:

Dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing.

Student:

Zvonimir Ercegovac, univ. bacc. ing. mech.

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentoru prof. Zoranu Luliću i asistentu Krunoslavu Ormužu na prihvaćanju prijedloga teme za diplomski rad i što ste mi pružili fleksibilnost pri izradi ovog rada koja mi je svakako bila potrebna.

Jedno ogromno hvala svakom pojedinom članu FSB Racing Teama koji je uložio dio sebe u projekt i time omogućio da FSB Racing Team postane i bude to što danas jest. Ta mala tvornica inženjera nešto je najbolje što mi se dogodilo tijekom studiranja. Od srca hvala na rijetkoj privilegiji i povjerenju da naših ruku djelo vozim na natjecanjima. Hvala što ste stotruko nadmašili fakultet u mojem obrazovanju, na neopisivoj količini znanja i iskustva, ali i emocija, poznanstava i prijateljstava. Slaviti s vama uspjehe za koje smo se toliko trudili, nikada neću zaboraviti.

Hvala mom društvu s prve i druge godine što ste navodno najteže godine studija učinili mojim najluđim godinama druženja i zabave.

Hvala svim mojim prijateljima na lijepim trenucima i podršci, i što ste imali strpljenja čekati me dok sam se borio s obavezama.

Hvala ti, Inga, što si moja mirna luka gdje nestanu svi valovi. Hvala ti na tvojoj beskrajnoj podršci. Hvala ti što me držiš u komadu.

Draga obitelji, a osobito roditelji, hvala vam što ste me oblikovali kao osobu koja jesam i što ste mi pružili najbolje uvjete i ljubav bez kojih ne bih mogao ostvariti nijedan uspjeh.

Zahvaljujem svima vama koji se niste našli prozvani u ovim retcima, a koji ste bili uza me makar dijelom puta koji me doveo do ovog trenutka.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Zvonimir Ercegovac**

JMBAG: 0035203486

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj debljine diskova kočnica trkaćeg vozila na njihovo zagrijavanje tijekom vožnje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Impact of race car's brake discs' thickness on their heating during driving**

Opis zadatka:

Trkaća vozila razvijaju se za ispunjenje specifičnog zadatka: završavanje određene utrke u vremenu kraćem od konkurencije. Jedna od glavnih prepreka tom cilju jest masa, zbog čega se s posebnom pažnjom razvija svaki pojedini sustav vozila.

Kočni diskovi su dio sustava kočenja koji se rotira zajedno s kotačem i ubrajaju se u neovještene mase vozila. Smanjenje njihove mase predstavlja potencijal za poboljšanje dinamike vozila. Budući da su uvjeti u kojima rade mehanički i toplinski iznimno kompleksni, promjene i unaprjeđenje predstavlja vrlo zahtjevan zadatak. U okviru rada treba proučiti termodinamičke uvjete rada kočnih diskova na trkaćem vozilu te kako promjena njihove debljine utječe na zagrijavanje i zadovoljavanje toplinskih uvjeta u kojima mogu pouzdano raditi.

U radu je potrebno:

- opisati uvjete rada diskova kočnica na trkaćem vozilu;
- osmisliti metodu za postavljanje i validaciju tranzijentnog termodinamičkog simulacijskog modela prednjih i stražnjih kočnih diskova;
- osmisliti eksperimentalni sustav te njime izmjeriti temperaturu kočnih diskova tijekom vožnje vozila;
- odrediti cikluse zagrijavanja diskova kočnica tijekom eksperimenta i prema njima u simulacijskom modelu prilagoditi parametre hlađenja kako bi izračunate temperature što bolje odgovarale izmjerjenima;
- ispitati utjecaj broja stupnjeva slobode i veličine vremenskog koraka tranzijentne simulacije na preciznost rezultata i procesorsko vrijeme potrebno za obavljanje simulacije;
- eksperimentom odrediti utjecaj aerodinamičkih deflektora na hlađenje diskova kočnica;
- simulacijski model s prilagođenim parametrima upotrijebiti za određivanje toplinskih uvjeta rada kočnih diskova različitih debljina tijekom vožnje prema profilu brzina koji odgovara odabranoj trkaćoj stazi;
- prema provedenim mjerenjima i rezultatima simulacija, opisati utjecaj debljine diskova kočnica na njihovo zagrijavanje te odrediti minimalne debljine prednjih i stražnjih diskova koje zadovoljavaju toplinska ograničenja.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

11. studenoga 2021.

13. siječnja 2022.

17. – 21. siječnja 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr.sc. Zoran Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	5
POPIS OZNAKA	6
SAŽETAK.....	7
SUMMARY	8
1. UVOD.....	9
2. SUSTAV KOČENJA U VOZILIMA.....	11
2.1. Povijesni razvoj sustava kočenja.....	12
2.2. Suvremeni izvršni elementi sustava kočenja	16
2.2.1. Bubanj kočnice.....	16
2.2.1.1. Simplex bubanj	17
2.2.1.2. Duplex bubanj.....	17
2.2.1.3. Karakteristike bubanj kočnica.....	18
2.2.2. Disk kočnice.....	18
2.2.2.1. Disk kočnice s nepokretnim kliještima	21
2.2.2.2. Disk kočnice s pokretnim kliještima.....	21
2.2.2.3. Karakteristike disk kočnica.....	21
3. METODA TOPLINSKE ANALIZE KOČNIH DISKOVA	22
3.1. Formula Student bolid FSB-RT06R <i>VulpesR</i>	23
3.1.1. Sustav kočenja FSB-RT06R <i>VulpesR</i> -a.....	24
3.1.2. Kočni diskovi FSB-RT06R <i>VulpesR</i> -a	25
3.2. Objašnjenje metode toplinske analize	26
3.3. Mjerenje temperature pasivnim senzorom infracrvenog zračenja	27
3.3.1. Emisijski faktor i njegov utjecaj na mjerenje temperature	28
3.3.2. Određivanje nepoznatog emisijskog faktora.....	30
3.3.3. Pozicioniranje infracrvenog senzora.....	31
3.4. Primjena višekanalnog senzora infracrvenog zračenja	32
4. PLAN PROVEDBE TESTIRANJA ZA POTREBNA MJERENJA	37
4.1. Ispitne procedure.....	38
4.1.1. Mjerenje otpora vožnje	38
4.1.2. Mjerenje temperature stražnjih kočnica.....	39
4.1.3. Mjerenje temperature prednjih kočnica	40
5. SIMULACIJSKI MODEL U PROGRAMSKOM PAKETU SIMULIA ABAQUS FEA 41	
5.1. Osnovne postavke modela	41
5.1.1. Unos geometrije	41
5.1.2. Zadavanje rubnih uvjeta.....	42
5.1.3. Zadavanje interakcija	43
5.1.4. Zadavanje opterećenja.....	44
5.2. Odabir vremenskog koraka i gustoće mreže	45
5.2.1. Provjera konvergencije rezultata u ovisnosti o gustoći mreže.....	45

5.2.2. Provjera konvergencije rezultata u ovisnosti o veličini vremenskog koraka.....	46
6. DEFINIRANJE NEPOZNATIH ULAZNIH PODATAKA ZA SIMULACIJSKI MODEL	
48	
6.1. Ulazna gustoća toplinskog toka q	48
6.2. Određivanje omjera kočenja tijekom vožnje ispitnih procedura	50
6.3. Profil koeficijenata prijelaza topline	51
6.4. Podatci o materijalu	52
6.5. Mjerenje emisijskog faktora ε kočene površine diska	54
6.6. Koeficijent prijelaza topline za prirodnu konvekciju.....	55
6.7. Određivanje otpora vožnje	57
7. KALIBRIRANJE SIMULACIJSKOG MODELA PREMA IZMJERENIM	
TEMPERATURAMA DISKOVA	58
7.1. Pregled mjerenja različitih kanala IC senzora.....	58
7.2. Utjecaj rupa u disku na izmjerene temperature.....	62
7.2.1. Pokazatelji značajnog utjecaja rupa u disku na mjerenje.....	62
7.2.2. Eksperiment procjene utjecaja rupa na mjerene temperature	64
7.3. Iteriranje parametara simulacije c_1 , c_2 i p	69
8. TRANZIJENTNA TOPLINSKA SIMULACIJA KOČNIH DISKOVA PREMA	
PROFILU BRZINE ODABRANE TRKAĆE STAZE.....	74
8.1. Određivanje debljine diskova prema simulaciji utrke izdržljivosti.....	74
9. ZAKLJUČAK.....	77
LITERATURA.....	78

POPIS SLIKA

Slika 1. Formula Student bolid FSB-RT06R <i>VulpesR</i> po završetku natjecanja FS East 2021	10
Slika 2. Formula Student bolid FSB-RT06R <i>VulpesR</i> tijekom natjecanja FS Alpe Adria 2021	10
Slika 3. Ilustracija navodno prve automobilske nesreće u kojoj je sudjelovao Cugnotov automobil na parni pogon [3]	11
Slika 4. Skica mehanizma za kočenje drvenim blokom [2]	12
Slika 5. Mehanički aktuiran sustav kočenja [5]	13
Slika 6. Patent disk kočnica iz 1902. godine [6]	14
Slika 7. Dominantna pobjeda Jaguara C-Type na utrci 24 sata Le Mansa koja je dokazala nadmoć disk kočnica nad bubanj kočnicama [7]	15
Slika 8. Indikator djelovanja ABS sustava (lijevo) i ESP sustava (desno) na instrumentnoj ploči automobila [8]	16
Slika 9. Dijelovi bubanj kočnice [9]	17
Slika 10. Usporedba simplex i duplex inačica bubanj kočnica [10]	18
Slika 11. Dijelovi disk kočnice [12]	19
Slika 12. Klipovi disk kočnica imaju funkciju samopodesivosti i automatske regulacije zračnosti [13]	19
Slika 13. Disk kočnica s fiksnim kliještima (lijevo) i pokretnim kliještima (desno) [14]	20
Slika 14. Primjer kompleksne toplinske simulacije kočnog diska koja uključuje i kočne pločice [15]	22
Slika 15. Render FSB-RT06R <i>VulpesR</i> -a	23
Slika 16. Sklop pedala bolida FSB-RT06R <i>VulpesR</i> -a	24
Slika 17. Sustav kočenja FSB-RT06R <i>VulpesR</i> -a	25
Slika 18. Prednji (lijevo) i stražnji (desno) kočni disk FSB-RT06R <i>VulpesR</i> -a	26
Slika 19. Dijagram toka određivanja najmanje dozvoljene debljine kočnih diskova	27
Slika 20. Fotografija <i>Vulpesovog</i> kočnog diska termalnom kamerom	30
Slika 21. Smetnje mjerenju infracrvenim senzorom [20]	31
Slika 22. Utjecaj udaljenosti na veličinu površine koju IC senzor mjeri [21]	32
Slika 23. Optimalan kut mjerenja IC senzorom [22]	32
Slika 24. CAD model korištenog IC senzora s prikazom kanala za mjerenje	33
Slika 25. IC senzor u CAD modelu prednjeg sklopa kotača <i>VulpesR</i> -a	34
Slika 26. Nosač senzora (označen plavom bojom) u CAD modelu prihvaćen za senzor brzine vrtnje (dolje) i vijak prihvata gornje vilice ovjesa (gore)	35
Slika 27. IC senzor u CAD modelu stražnjeg sklopa kotača <i>VulpesR</i> -a	35
Slika 28. Prednji sklop kotača s IC senzorom i aerodinamičkim deflektorom za hlađenje diskova	36
Slika 29. Stražnji sklop kotača s IC senzorom i aerodinamičkim deflektorom za hlađenje diskova	36
Slika 30. Tlocrt testne staze Mičevac i raspored vatrogasnih aparata	37
Slika 31. Brza verzija male testne staze	38
Slika 32. Logotip programskog paketa SIMULIA Abaqus FEA [24]	41
Slika 33. Particioniranje lica prednjeg diska u SOLIDWORKS-u	42
Slika 34. Rubni uvjeti izolacije stavljani na ravnine simetrije	43
Slika 35. Površine s kojih se emitira toplina diska	43
Slika 36. Površine s konvekcijom s koeficijentom prijelaza topline α_1	44
Slika 37. Površine na koje toplinski tok kočenja ulazi u disk	44

Slika 38. Primjer konvergencije rezultata u ovisnosti o broju stupnjeva slobode [25]	45
Slika 39. Mreža elemenata odabrana za korištenje u analizi.....	45
Slika 40. Razlike u temperaturama korištenjem različitih veličina vremenskog koraka	46
Slika 41. Dijelovi prednjeg (gore) i stražnjeg (dolje) diska korišteni u simulacijskom modelu	49
Slika 42. Profil brzine tijekom ispitne procedure mjerenja temperature stražnjih kočnica	50
Slika 43. Omjeri kočenja tijekom ispitne procedure mjerenja temperature stražnjih kočnica	51
Slika 44. Lice diska (plavo) i površine okomite na lice diska (crveno)	52
Slika 45. Specifični toplinski kapacitet Tooloxa 44.....	53
Slika 46. Mjerenje temperature diska pomoću termalne kamere i krep trake.....	55
Slika 47. Mjerenje temperature kočnog diska s hladnim i toplim objektom u odrazu.....	55
Slika 48. Mjerenje temperature diska dok se hladi na mirujućem zraku bez vjetra.....	56
Slika 49. Usporedba rezultata simulacije i mjerene temperature tijekom ispitivanja hlađenja diska prirodnom konvekcijom.....	57
Slika 50. Ukupna snaga otpora vožnje u ovisnosti o brzini bolida	57
Slika 51. Profil brzine s ispitne procedure 4.1.3 za mjerenje temperature prednjih kočnica ...	59
Slika 52. Raspored kanala na IC senzoru [23]	60
Slika 53. Temperature mjerene kanalima 2-7 na prednjem desnom disku	60
Slika 54. Temperature mjerene kanalima 2 i 8-16 na prednjem desnom disku	61
Slika 55. Temperature mjerene kanalima 1, 2, 3 i 7 na prednjem desnom disku.....	61
Slika 56. Nagli pad temperature nakon zaustavljanja bolida na 380 s mjereno na kanalu 3 prednjeg desnog IC senzora	62
Slika 57. Anomalija na mjerenjima temperatura stražnjeg lijevog diska gdje se temperatura „najtoplijeg“ mjerenja kanala 6 dodatno zagrijava	63
Slika 58. Pojava oscilacija u mjerenjima temperatura pri niskim brzinama vrtnje kotača	64
Slika 59. Primjer odreza u obliku kružnog vijenca u CAD modelu diskova za mjerenje udjela površine rupa u mjerenoj površini diska	64
Slika 60. Primjer mjerenja površine diska na odrezu u obliku kružnog vijenca u CAD modelu diskova za mjerenje udjela površine rupa u mjerenoj površini diska.....	65
Slika 61. Skica sustava za bilancu energije toplinskog zračenja koju primi IC senzor	66
Slika 62. Eksperiment određivanja utjecaja rupa u disku na mjerene temperature.....	67
Slika 63. Mjerena temperatura i obodna brzina kotača tijekom eksperimenta određivanja utjecaja rupa u disku na mjerene temperature	69
Slika 64. Mjerne točke u simulacijskom modelu prednjeg diska (gore) i stražnjeg diska (dolje)	70
Slika 65. Brzina bolida i podudaranje mjerenih temperatura s rezultatima simulacije ispitne procedure 4.1.3 – Mjerenje temperature prednjih kočnica b) „Kočenje i krstarenje“	71
Slika 66. Brzina bolida i podudaranje mjerenih temperatura s rezultatima simulacije ispitne procedure 4.1.3 – Mjerenje temperature prednjih kočnica e) „Autocross“	72
Slika 67. Profil brzine bolida tijekom jednog kruga staze FS Germany	74
Slika 68. Profil gustoće toplinskog toka prednjih diskova na 2 kruga staze FS Germany.....	75
Slika 69. Profil koeficijenta prijenosa topline na 2 kruga staze FS Germany.....	75
Slika 70. Utjecaj debljine diskova na njihovu maksimalnu temperaturu na 2 kruga staze FS Germany	76

POPIS TABLICA

Tablica 1. Najistaknutije karakteristike FSB-RT06R <i>VulpesR</i> -a	23
Tablica 2. Utjecaj emisijskog faktora na mjerenje temperature objekta temperature 335 °C..	29
Tablica 3. Glavne karakteristike ALS Brake Wired IC senzora [23].....	33
Tablica 4. Konvergencija rezultata po gustoći mreže za prednji kočni disk.....	46
Tablica 5. Konvergencija rezultata po gustoći mreže za prednji kočni disk.....	47
Tablica 6. Svojstva Tooloxa 44.....	53
Tablica 7. Specifični toplinski kapacitet Tooloxa 44.....	54
Tablica 8. Popis kanala IC senzora prema usmjerenosti prema diskovima	58
Tablica 9. Udjeli površine rupa u mjerenoj površini diska za prednji i stražnji disk na kružnim vijencima u vidnom polju IC senzora.....	65

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	W/m^2	gustoća snage emitiranog infracrvenog zračenja
ε	-	emisijski faktor tijela
σ	$W/(m^2 \cdot K^4)$	Stefan-Boltzmannova konstanta
T	K	termodinamička temperatura tijela
m	kg	masa
v	m/s	brzina
J	$kg \cdot m^2$	moment inercije
ω	rad/s	kutna brzina
r	m	radijus
Φ	W	toplinski tok
$\frac{\Delta E_k}{\Delta t}$	W	brzina smanjenja kinetičke energije bolida
Δt	s	vremenski interval
P_{otp}	W	ukupna snaga otpora vožnje
$b. b.$	-	omjer kočenja (brake bias)
$\alpha_{prednji}$	°	kut dijela prednjeg diska
$\alpha_{stražnji}$	°	kut dijela stražnjeg diska
$A_{prednji}$	m^2	kočeni dio površine dijela prednjeg diska
$A_{stražnji}$	m^2	kočeni dio površine dijela stražnjeg diska
α_1	$W/(m^2 \cdot K)$	koeficijent prijenosa topline 1
α_2	$W/(m^2 \cdot K)$	koeficijent prijenosa topline 2
λ	$W/m \cdot K$	toplinska provodnost
c_1	-	multiplikator brzine strujanja zraka preko lica diska
c_2	-	multiplikator brzine strujanja zraka preko poprečnih površina diska
ν	$Pa \cdot s$	dinamička viskoznost zraka
p	-	udio topline koji prime kočni diskovi
D	mm	promjer
y	-	udio površine rupa u mjerenoj površini diska
t	°C	temperatura tijela

SAŽETAK

Sustavi kočenja u vozilima služe za brzo i kontrolirano usporavanje i zaustavljanje vozila. Kinetička energija vozila umanjuje se pretvorbom u druge oblike energije, većinom u toplinsku energiju. Pritom kočni diskovi preuzimaju oko 90 % topline [1] i moraju je disipirati kako ne bi došlo do njihovog pregrijavanja. Budući da se mase kočnih diskova ubrajaju u neovještene mase vozila i mase koje se rotiraju zajedno s kotačima, njihovo smanjenje predstavlja potencijal za poboljšanje dinamike vozila, udobnosti vožnje te potrošnju goriva i emisije štetnih plinova, no i rizik za pregrijavanje i kompromitiranje funkcije kočenja.

Rad je izrađen s ciljem određivanja najmanje debljine prednjih i stražnjih kočnih diskova koje uz ostale konstrukcijske zahtjeve zadovoljavaju i toplinske zahtjeve u sklopu razvoja trkaćeg vozila. U početku rada iznesen je kratki pregled povijesnog razvoja sustava kočenja u automobilima te su opisane teorijske osnove na kojima počiva metoda korištena pri ispitivanju na trkaćoj stazi i analizi uvjeta rada kočnih diskova postojećeg vozila. Prikazan je plan eksperimenata koji su provedeni kako bi se definirali ulazni podatci potrebni za provedbu analize. Opisan je tranzijentni toplinski simulacijski model korišten u sklopu analize, korištene postavke i rubni uvjeti modela.

Potom su detaljno proučeni termodinamički uvjeti rada kočnih diskova i dokumentirani su načini kako su prikupljeni ulazni podatci za simulacijski model. U završnoj fazi rada, kalibrirani simulacijski model primijenjen je za još jednu usporedbu s vrijednostima izmjerenima na testiranju vozila i na simulaciju vožnje po odabranoj stazi. Iterativnim postupkom simulirano je korištenje različitih debljina kočnih diskova i odabrana je debljina prednjih i stražnjih kočnih diskova novog trkaćeg vozila.

Ključne riječi: sustav kočenja, kočnice, kočni diskovi, kočni disk, tranzijentna simulacija, toplinska simulacija, mjerenje temperature, infracrveni senzor, temperaturni senzor

SUMMARY

Brake systems in vehicles are used to slow down and stop vehicles quickly and in a controlled manner. Kinetic energy of the vehicle is reduced by converting into other forms of energy, primarily into heat. The brake discs thereby take in about 90 % of the heat [1] and must dissipate it, so as not to overheat. Considering that the masses of brake discs account into unsprung masses and masses which rotate together with the wheels, their reduction presents a potential for improving vehicle dynamics, ride comfort along with fuel economy and harmful gas emissions, but also a risk of overheating and compromising the function of braking.

This thesis is produced with a goal of determining the minimal thicknesses of front and rear brake discs which, along with other design requirements, fulfil thermal requirements too in the process of development of a race car. In the beginning of the work, a short view back to the past of the development of brake systems in cars is presented and the theoretical foundations on which the method used for testing on a racetrack and analysis of the operating conditions of the existing vehicle are explained. A plan of experiments conducted to define the input data required for the analysis is shown. A transient thermal simulation model is described, used as a part of the analysis, the settings used and boundary conditions as well.

Afterwards, thermodynamic operating conditions are examined in detail and the ways to gather input data for the simulation model are documented. In the final phase of the thesis, the calibrated simulation model is applied for another comparison to the data measured during vehicle testing and to simulate driving on a chosen track. The usage of different thicknesses of new race car's brake discs is simulated through iterating.

Keywords: brake system, brakes, brake discs, brake disc, transient simulation, thermal simulation, temperature measurement, infrared sensor, temperature sensor

1. UVOD

Sustavi kočenja u vozilima služe za brzo i kontrolirano usporavanje vozila. Kinetička energija vozila umanjuje se pretvorbom u druge oblike energije, većinom u toplinsku energiju. Pritom kočni diskovi preuzimaju oko 90 % topline [1] i moraju je disipirati kako ne bi došlo do njihovog pregrijavanja. Kako bi ih se zaštitilo od pregrijavanja mogu se primijeniti neke od sljedećih metoda:

1. povećanje njihove mase kako bi mogli pohraniti u sebe veću količinu topline,
2. disipiranje kinetičke energije drugim metodama (korištenjem retardera, zračne kočnice, regenerativno kočenje elektromotorom)
3. izrada diskova od materijala sa svojstvima koja pogoduju smanjenju vršnih temperatura (veći toplinski kapacitet, veća toplinska provodnost),
4. poboljšanje uvjeta hlađenja diskova (najčešće snažnijim usmjerenim protokom zraka).

Kočni diskovi ubrajaju se u neovještene mase vozila. Stoga bi povećanje njihove mase pri vožnji po neravninama uzrokovalo snažniju buku i vibracije, što vodi do smanjenja udobnosti vožnje i lošijih voznih karakteristika. Budući da se diskovi ubrajaju i u mase koje rotiraju zajedno s kotačem, povećanje njihove mase doprinosi povećanju inercije automobila pri longitudinalnim akceleracijama i time potrošnje goriva. Proizvođači vozila stoga se sve češće odriču metode 1. i okreću drugim metodama.

Ovaj rad dio je procesa razvoja Formula Student bolida FSB-RT07 tima Sveučilišta u Zagrebu – FSB Racing Team-a. Neki od glavnih ciljeva razvoja tog bolida su iskoristiti što je više moguće potencijala guma smanjenjem mase i inercija bolida te osigurati pouzdanost. Kočni diskovi razvit će se u skladu s ovim temeljnim smjernicama.

Kako bi se dobili ulazni podatci korišteni pri razvoju diskova, tijekom testiranja na stazi izmjerene su temperature kočnih diskova prethodnog bolida, FSB-RT06R *VulpesR*-a (Slike 1.i 2.). Ulazni su podatci potom, uz procjenu glavnih karakteristika koje će bolid FSB-RT07 imati nakon proizvodnje i inicijalnih testiranja na stazi, korišteni za proračune kočnih diskova bolida FSB-RT07.

Tijekom proračuna, korišteni su programski paketi MS Excel i SIMULIA Abaqus FEA, kako bi se provele tranzijentne toplinske simulacije s ciljem određivanja najmanje debljine prednjih i stražnjih kočnih diskova FSB-RT07 koje uz ostale konstrukcijske zahtjeve vozila zadovoljavaju i toplinske zahtjeve.



Slika 1. Formula Student bolid FSB-RT06R *VulpesR* po završetku natjecanja FS East 2021

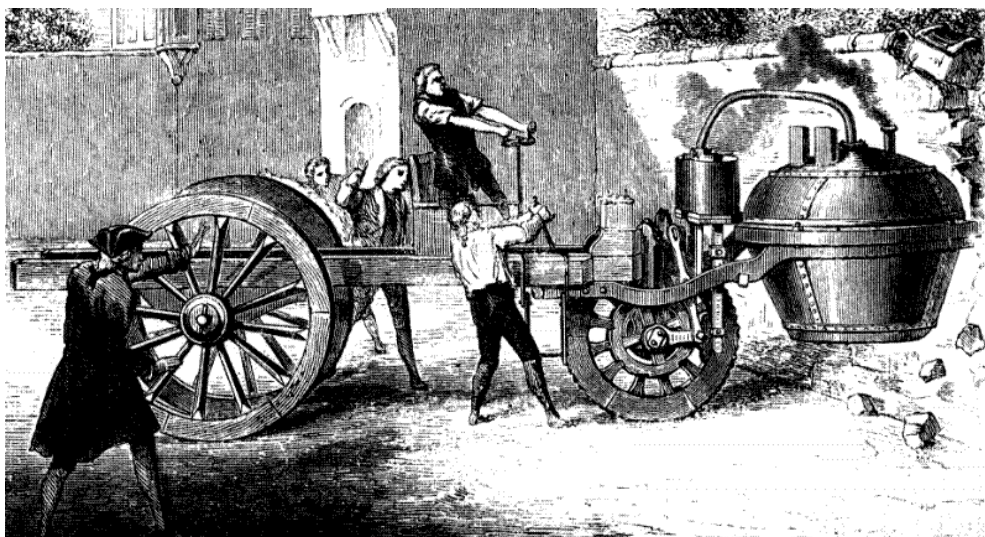


Slika 2. Formula Student bolid FSB-RT06R *VulpesR* tijekom natjecanja FS Alpe Adria 2021

2. SUSTAV KOČENJA U VOZILIMA

U samom početku razvoja automobila kočnice nisu bile smatrane bitnim dijelom automobila. Za to je postojao dobar razlog, a to je da je da jednostavno nisu bile potrebne jer je trenje u pogonskom sklopu bilo toliko veliko da je automobil mogao usporiti i bez dodatnog kočenja. Kako se počela brže razvijati industrija, tako je počela rasti i brzina automobila te njihova masa i snaga motora, a kočnice su postale ključan dio svakog automobila.

Prvi automobil bio je na parni pogon i izumio ga je Nicolas-Joseph Cugnot 1769., a već 1771. shvatio je važnost kočnica. Te godine navodno je imao prvu prometnu nesreću u povijesti kad se s brzinom od 4 km/h zabio u zid u Parizu [2]. Prema priči, bio je uhićen i optužen za obijesnu vožnju [3]. Ilustracija događaja prikazana je na Slici 3.



Slika 3. Ilustracija navodno prve automobilske nesreće u kojoj je sudjelovao Cugnotov automobil na parni pogon [3]

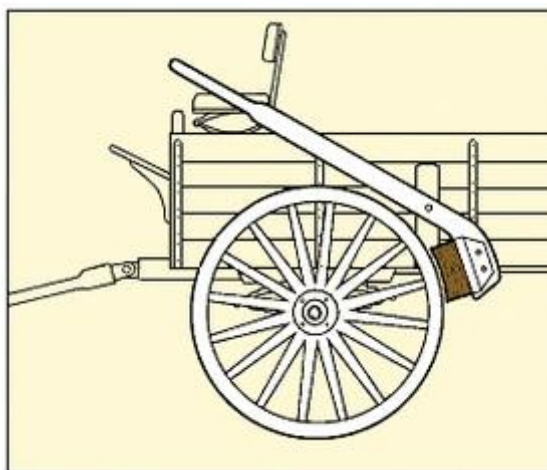
Prema zadaći koju obavlja, kočnica može biti:

- radna kočnica – koristi se za usporavanje vozila, zaustavljanje ili za sprječavanje prevelike brzine na nizbrdicama,
- pomoćna kočnica – služi za usporavanje vozila u slučaju otkazivanja radne kočnice,
- parkirna kočnica – sprječava pomicanje zaustavljenog vozila,
- motorna kočnica ili usporivač – smanjuje opterećenje radne kočnice pri vožnji nizbrdo.

Ovaj rad usredotočen je na radne kočnice.

2.1. Povijesni razvoj sustava kočenja

Radna kočnica kroz većinu povijesti automobila funkcionirala je na principu trenja – kinetička energija automobila pretvara se u toplinsku energiju i s izvršnog se elementa otpušta okolnom zraku ili dijelovima automobila. To je najjednostavniji način kako brzo smanjiti kinetičku energiju automobila s tehnologijom dostupnom tijekom većine razdoblja razvoja automobila. Prvi automobili, s kotačima obloženim čelikom, kočili su pritiskanjem drvenog bloka o kotač (Slika 4.). Princip je bio provjeren i korišten na kočijama koje su vukli konji.



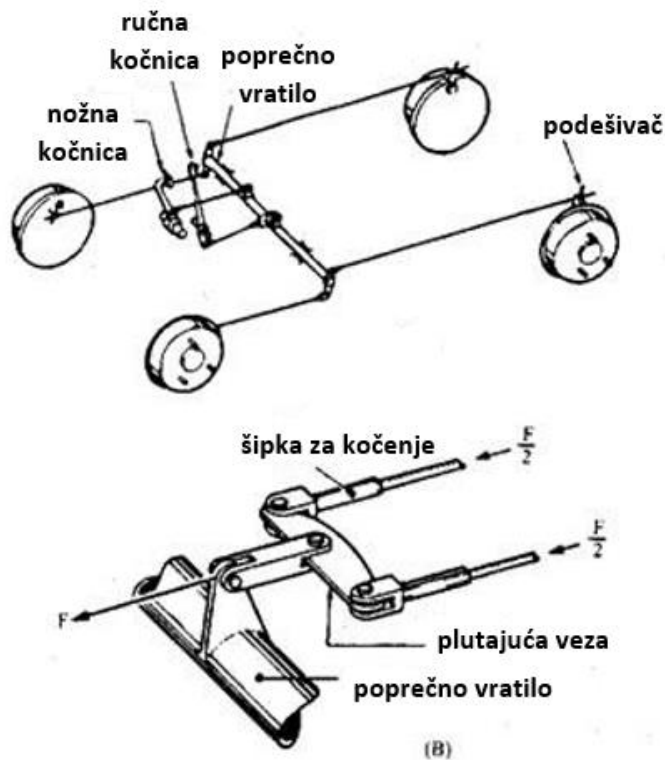
Slika 4. Skica mehanizma za kočenje drvenim blokom [2]

Pojavom gumenih pneumatika ta tehnologija brzo je napuštena jer su se u pokušajima primjene pneumatici vrlo brzo trošili [4]. Općenito, razvojem automobila, povećavanjem trakcije guma i brzina vožnje, kočnice su također morale evoluirati kako bi nastavile ispunjavati svoje zadaće. Mehanički aktuirane bubanj kočnice prva su vrsta kočnica koja je dobila širu primjenu. Gottlieb Daimler je već 1899. pokrenuo ideju takvih kočnica, Wilhelm Maybach je 1901. iskoristio osnovne mehaničke bubanj kočnice, ali tek je Louis Renault patentirao ovaj tip kočnica 1902. godine.

No da bi se moglo učinkovito i kontrolirano kočiti, potrebno je silu kočenja ravnomjerno raspodijeliti na kotače. Stoga je razvijen mehanički prijenosni sustav kočenja na sva 4 kotača. Prvo se pojavio u obliku sustava u kojem se moralo istovremeno kočiti nožnom pedalom i povlačenjem ručne poluge, a kasnije u obliku samo jedne pedale ili poluge koja je upravljala kočenjem sva 4 kotača (Slika 5.). Razvijala su se i rješenja koja su koristila čeličnu sajlu za prijenos sile kočenja.

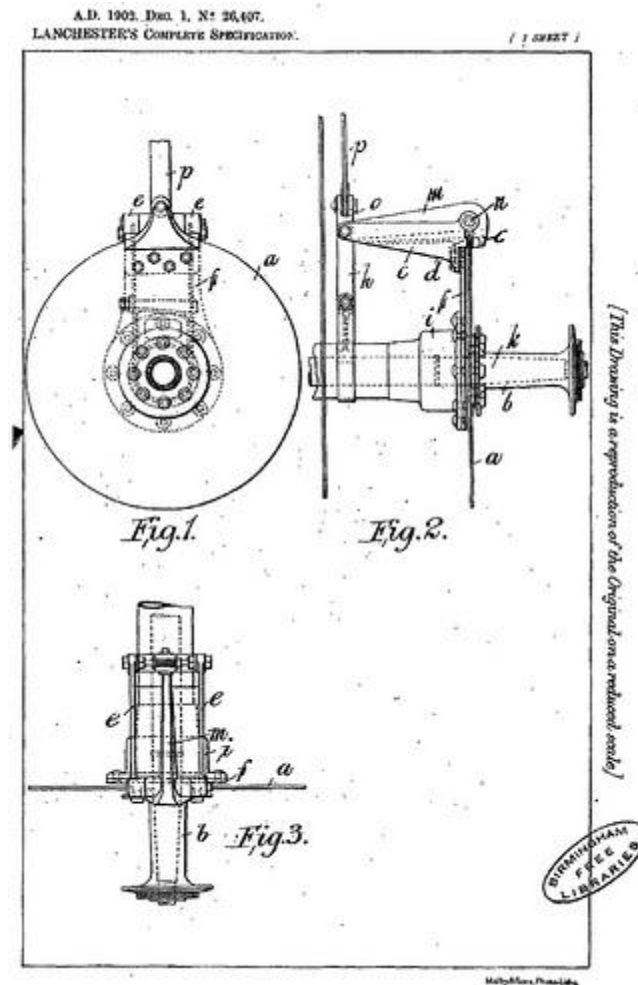
Glavni problem mehaničkog sustava je redovita potreba za podešavanjem elemenata koji prenose silu kočenja od pedale/poluge do kočnica. Prva rješenja tog problema bile su samopodesive kočnice s klinovima koji bi se trošenjem kočnih obloga naslanjali na zube

okretnog adaptera kako bi osigurali mali razmak kočne obloge i bubnja. Izumom hidrauličkog sustava kočenja, mnogo je olakšana raspodjela sile na kotače. Prvi put je takav sustav u automobilu primijenio Ernest Walter Weight 1908. godine.



Slika 5. Mehanički aktuiran sustav kočenja [5]

Danas, najrašireniji tip kočnica su hidraulički aktuirane disk kočnice. Frederick William Lanchester patentirao je disk kočnice još 1902. godine (Slika 6.), ali nisu našle primjenu u svakodnevnim automobilima do sredine 1950-ih godina. Glavni problem ranog izuma bila je velika buka koju je proizvodila bakrena obloga na kočnim pločicama kad je došla u kontakt s metalnim diskom. Problem je riješen korištenjem kočnih pločica s oblogama od azbesta, koje su se koristile do 1980-ih godina. U odnosu na bubanj kočnice koje su se s vremenom deformirale i uzrokovale vibracije, disk kočnice trajale su duže i kočile konzistentnije. Duguju to svojoj manjoj osjetljivosti na promjenu faktora trenja (u prisustvu vode npr.) od bubanj kočnica i boljem otpuštanju generirane topline.



Slika 6. Patent disk kočnica iz 1902. godine [6]

Te su karakteristike dapače prvo primijećene u svijetu motorsporta – Jaguar C-Type 1953. godine dominantno je pobijedio u utrci 24 sata Le Mansa (Slika 7.) zahvaljujući disk kočnicama razvijenim s firmom Dunlop i postao prvi automobil koji je završio utrku s prosječnom brzinom većom od 100 milja na sat (160 km/h).



Slika 7. Dominantna pobjeda Jaguara C-Type na utrci 24 sata Le Mansa koja je dokazala nadmoć disk kočnica nad bubanj kočnicama [7]

Današnji sustav kočenja u automobilu potpomognut je raznim sustavima kako bi bilo kojem vozaču omogućio jednostavno i učinkovito korištenje. Najznačajniji sustav svakako je ABS (anti-lock braking system) koji je donio revoluciju u sigurnosti (Slika 8.). Koristeći ovaj sustav, i nevješti vozači imaju priliku kočiti vrlo blizu maksimumu koji gume dopuštaju. Sustav služi za popuštanje sile kočenja na kotaču koji blokira pri kočenju, čime se smanjuje gubitak prijanjanja gume. Elektronička jedinica nadzire očitavanja senzora brzine vrtnje svakog kotača i, u slučaju prepoznavanja sporije vrtnje pojedinog (ili više) kotača, brzo otvara i zatvara hidrauličke ventile, čime se smanjuje sila kočenja na ciljani kotač. Uz to hidraulička pumpa nadoknađuje otpuštenu hidrauličku tekućinu i tlak kroz ventile. ABS sustav je od 2004. godine obavezan u svim automobilima prodanim u Europskoj Uniji.

Današnjim vozačima u slučaju gubitka stabilnosti vozila pomaže ESP sustav (electronic stability program, Slika 8.). Djeluje koristeći iste elemente kao ABS sustav na način da ciljano usporava pojedini kotač i time generira moment oko vertikalne osi automobila koji ga stabilizira.



Slika 8. Indikator djelovanja ABS sustava (lijevo) i ESP sustava (desno) na instrumentnoj ploči automobila [8]

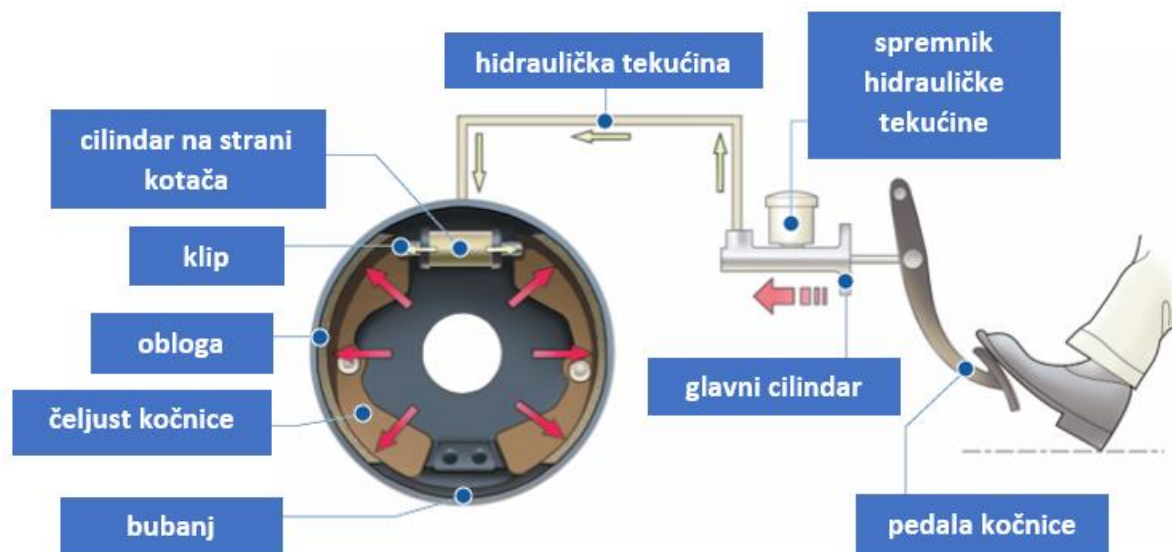
Redovit dio sustava kočenja u modernim automobilima je i pojačalo sile kočenja. Uglavnom koristi vakuum ili hidraulički servouređaj kako bi multipliciralo vozačevu silu na pedalu kočnice. Služi za smanjenje puta kočenja, u slučaju da vozač ne može unijeti dovoljno sile u sustav kočenja za maksimalno snažno kočenje. Osim toga, olakšava vožnju automobila i manje umara vozača.

Hibridna i električna vozila upotpunjuju hidrauličku radnu kočnicu automobila regenerativnim kočenjem. Time se značajno smanjuje potrošnja goriva i ispuštanje štetnih emisija plinova motora s unutarnjim izgaranjem te se umanjuje trošenje kočnih diskova i pločica.

2.2. Suvremeni izvršni elementi sustava kočenja

2.2.1. Bubanj kočnice

Kočni sustav sastoji se od bubnja koji se rotira zajedno s kotačem i stražnje ploče na kojoj se nalaze čeljusti kočnice s oblogama, opruga za zatezanje čeljusti i cilindar koji ih širi (Slika 9.). Primjenom sile na pedalu hidraulička se tekućina širi kroz vodove i dolazi do cilindra ili cilindra gdje klipovima širi kočne čeljusti, koje se stišću na bubanj i trenjem usporavaju automobil.



Slika 9. Dijelovi bubanj kočnice [9]

Čeljusti mogu biti potiskivane i povlačne. Potiskivane čeljusti su one koje pritišću bubanj u smjeru u kojem se on rotira, pri čemu sila trenja kočenja povećava pritisak na bubanj za jači moment kočenja. Povlačna čeljust pritišće bubanj u smjeru suprotnom od njegove rotacije i doživljava suprotan efekt koji oslabljuje moment kočenja.

Bubanj mora imati veliku krutost, toplinsku vodljivost i otpornost na trošenje. Zato se za masovnu proizvodnju najčešće proizvode od raznih vrsta lijevova ili lijevanog željeza.

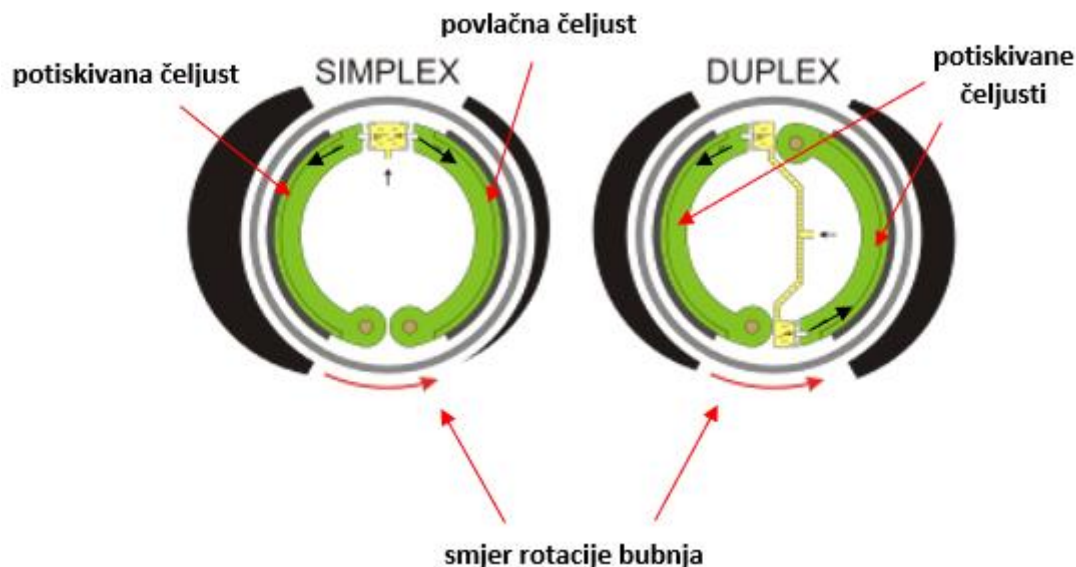
Glavne izvedbe bubanj kočnica su simplex i duplex (Slika 10.).

2.2.1.1. Simplex bubanj

Simplex bubanj najjednostavnija je konstrukcija bubanj kočnice. Jedna čeljust je uvijek povlačna, a druga potiskivana, ovisno o smjeru vrtnje kotača. Omjer sile kočenja od pedale do kotača jednak je u oba smjera rotacije. Jedan element može potiskivati obje čeljusti, što smanjuje cijenu izrade. Također, jednostavnije je izvesti parkirnu kočnicu nego kod duplex bubnja.

2.2.1.2. Duplex bubanj

Duplex bubanj izvodi se s dva hidraulička cilindra, po jedan za svaku čeljust. Na taj način obje čeljusti su potiskivane, odnosno povlačne, ovisno o smjeru rotacije bubnja. Moment kočenja za jednaku silu na pedali veći je u odnosu na simplex bubanj, pod uvjetom da se automobil giba unaprijed.



Slika 10. Usporedba simplex i duplex inačica bubanj kočnica [10]

2.2.1.3. Karakteristike bubanj kočnica [11]

Pozitivne karakteristike bubanj kočnica su:

- samopojačanje momenta kočenja,
- zaštićenost od vanjskih nečistoća – budući da su zatvorene bubnjem,
- jednostavna izvedba parkirne kočnice,
- manje trošenje kočnih obloga – zbog velike kontaktne površine i kompatibilne zakrivljenosti bubnja i čeljusti.

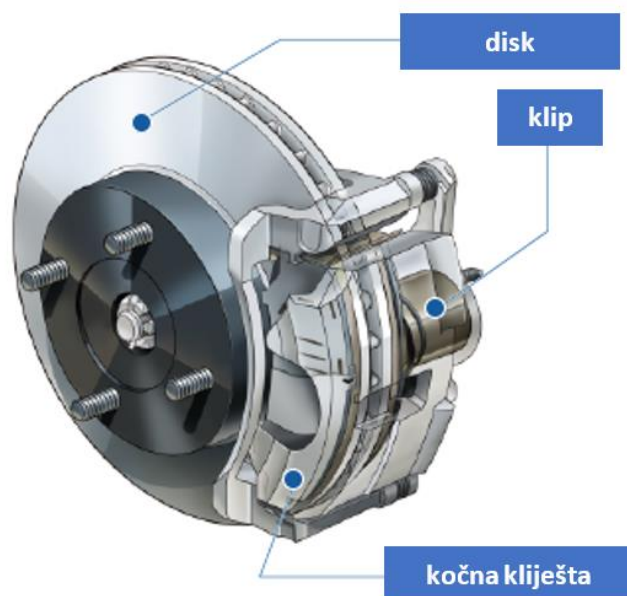
Negativne karakteristike bubanj kočnica su:

- otežana kontrola i održavanje – moraju se skidati dijelovi kako bi se provjerile kočne obloge,
- slabije čišćenje nečistoća i prašine kočnih obloga – promjenjiv kočni učinak,
- lošije hlađenje jer su zatvorene bubnjem – može dovesti do ranog pregrijavanja pločica i time smanjenja pozitivnog momenta kočenja,
- osjetljive na ekscentričnost bubnja, što može dovesti do neravnomjernog kočenja pojedinih kotača.

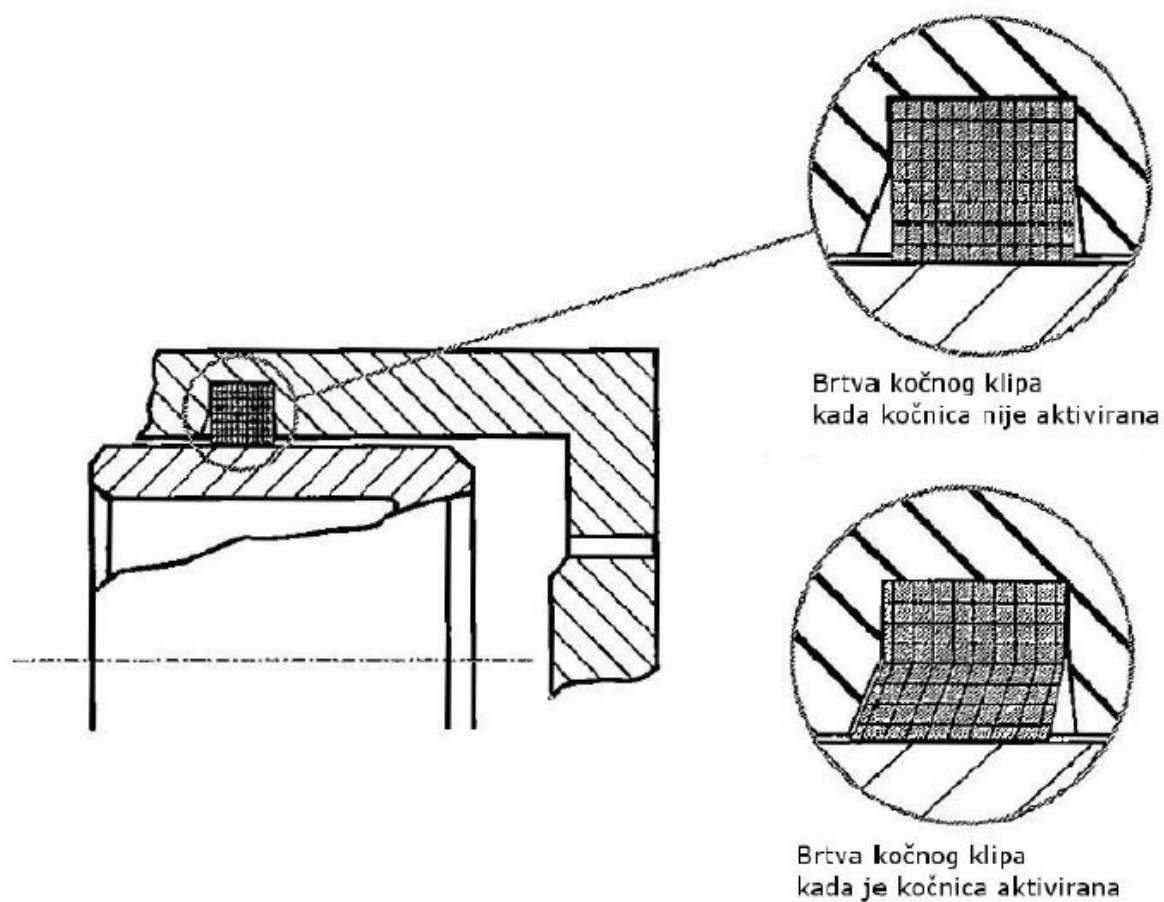
2.2.2. Disk kočnice

Disk kočnica sastoji se od diska koji se rotira zajedno s kotačem i kliješta (sedla) pričvršćenim za nosač kotača, koja je spojena na hidraulički sustav kočenja automobila (Slika 11.). Pritiskom

pedale kočnice, raste tlak hidrauličke tekućine, potiskujući klipove u klještima koji kočnim pločicama stišću disk.



Slika 11. Dijelovi disk kočnice [12]



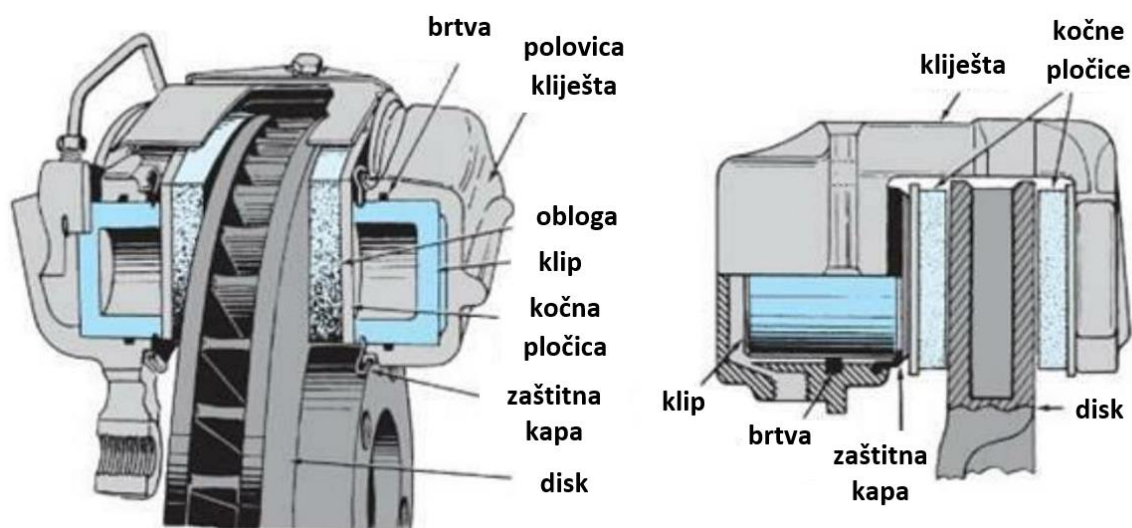
Slika 12. Klipovi disk kočnica imaju funkciju samopodesivosti i automatske regulacije zračnosti [13]

Utor za brtvu kočnog klipa izrađen je na takav način da u smjeru kočenja brtva ima prostora za određenu deformaciju. Pri popuštanju pedale kočnice, brtva vraća klip u početni položaj (Slika 12.). Kako se kočne pločice troše, klip sve više izlazi iz cilindra. Brtva ga može pratiti koliko joj utor u cilindru omogućava, a zatim prokliže, efektivno podesivši položaj klipa prema manjoj debljini kočnih pločica. Tako brtva disk kočnice osigurava automatsku regulaciju zračnosti i povrat klipa.

U masovnoj proizvodnji diskovi su najčešće izrađeni od sivog, temper ili čeličnog lijeva, a za primjenu u utrkama koriste se i druge vrste materijala diskova. Diskovi i pločice ojačani karbonskim vlaknima prvi put su korišteni u Formuli 1 1976. godine, a danas se ugljik-ugljik kompozitni diskovi koriste u gotovo svim vrhunskim motorsport natjecanjima zbog iznimno male mase, visokog faktora trenja i strukturnih svojstava. Uz ugljične diskove koriste se i diskovi izrađeni od keramičkih kompozita – keramička matrica ojačana ugljičnim vlaknima. Keramika osigurava stabilnost i pri jako visokim temperaturama do kojih može doći kočenjem s jako velikih brzina, za razliku od diskova od ugljik-ugljik kompozita koji se moraju hladiti odmah po zaustavljanju bolida jer će se u suprotnom zapaliti. Ovi napredni materijali sve češće vide primjenu i na sportskim cestovnim automobilima.

Vrlo su česti samoventilirajući diskovi, s radijalnim kanalima za hlađenje. Pri rotaciji disk radi kao centrifugalni ventilator propuhujući zrak kroz radijalne kanale. Kočne površine diska mogu imati provrte i ovalne utore za dodatno hlađenje, ali i za čišćenje kočne prašine iz kontakta diska i pločica te uklanjanje vode iz kontakta, kako bi se izbjeglo stvaranje parnih jastuka isparavanjem vode, što smanjuje učinkovitost kočenja.

Osnovne vrste disk kočnica su kočnice s nepokretnim i pokretnim kliještima (Slika 13.).



Slika 13. Disk kočnica s fiksnim kliještima (lijevo) i pokretnim kliještima (desno) [14]

2.2.2.1. *Disk kočnice s nepokretnim kliještima*

Budući da su kliješta nepokretna, manje toleriraju nesavršenosti diska i prihvata diska. Pritiskom pedale kočnice, s obje strane diska klipovi izlaze iz čeljusti stišćući disk. Zbog većeg broja finih hidrauličkih dijelova, skuplje su od disk kočnica s pokretnim kliještima. No zato klipovi konzistentnije pritišću pločice o disk i vraćaju se u prvobitan položaj nakon popuštanja pedale kočnice. Ravnomjerno se troše kočne pločice i kočenje je predvidljivije.

2.2.2.2. *Disk kočnice s pokretnim kliještima*

Disk kočnice s pokretnim kliještima manjih su gabarita od disk kočnica s nepokretnim kliještima. Manja je izglednost pojave parnih mjehura u kočnoj tekućini, budući da je upola manji broj klipova koji su u dodiru s hidrauličkom tekućinom, u usporedbi s nepokretnim kliještima. Kočne pločice mogu se zamijeniti bez skidanja držača kočnice s nosača kotača. No pokretna kliješta nose sa sobom nedostatke veće potrebne kočne sile i rizik od zaglavljivanja zbog prljavštine ili korozije.

2.2.2.3. *Karakteristike disk kočnica [11]*

Pozitivne karakteristike disk kočnica su:

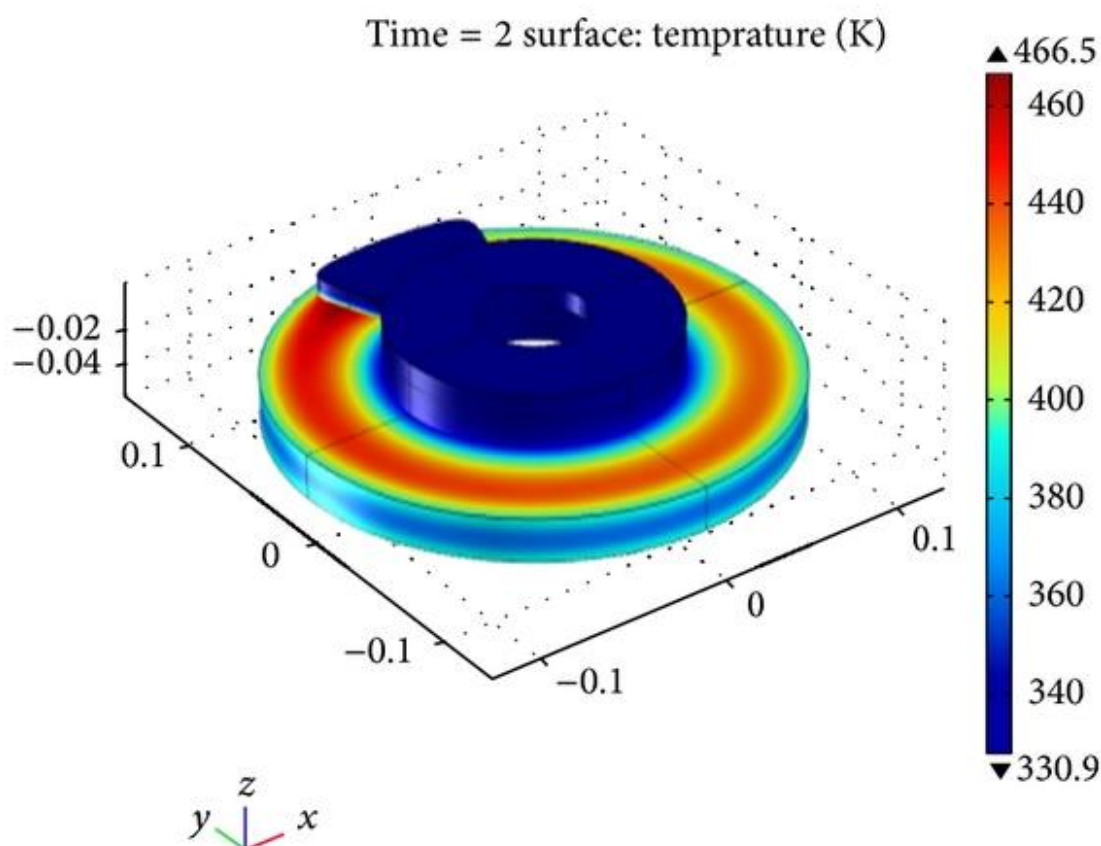
- dobro hlađenje – konzistentniji omjer sile na pedali i momenta kočenja u usporedbi s bubanj kočnicama,
- jednostavno održavanje i kontrola potrošenosti,
- automatsko podešavanje zračnosti – bez dodatnih mehanizama i naknadnih podešavanja,
- dobro samočišćenje – centrifugalna sila skida vlagu i nečistoće s diska.

Negativne karakteristike disk kočnica su:

- nema samopojačanja, pa su potrebne velike sile kočenja – potrebni veći hidraulički cilindri i pojačivač sile kočenja,
- veće trošenje obloga zbog velikih sila i male kontaktne površine,
- jače zagrijavanje kočne tekućine jer su klip i kočna pločica u izravnom kontaktu,
- složena ugradnja parkirne kočnice.

3. METODA TOPLINSKE ANALIZE KOČNIH DISKOVA

Mnogo je faktora koji utječu na temperaturu kočnih diskova u vozilima. Osobito su kompleksni uvjeti strujanja zraka oko sklopa kotača koji se rotira promjenjivom brzinom. Ne postoji način na koji bi se mogle izračunati temperature dijelova kočnog diska analitičkim putem. Uz neograničenu procesorsku snagu, rješenje bi se moglo dobiti koristeći kompleksni simulacijski model (Slika 14.), npr. koji povezuje računalnu dinamiku fluida s prijenosom topline, no tako zahtjevan postupak i dalje bi rezultirao podacima koje se treba validirati eksperimentom da se potvrdi njihova točnost.



Slika 14. Primjer kompleksne toplinske simulacije kočnog diska koja uključuje i kočne pločice [15]

Zahtjevi odabrani za provođenje analize su dobivanje pouzdanih rezultata relativno jednostavnim postupkom uz izračun maksimalne dostignute temperature diska. Poželjno je imati rezultate za što više izračunatih radnih točaka kako bi se mogli jasnije vidjeti utjecaji pojedinih faktora. Toplinska analiza kočnih diskova u ovom radu bazira se na mjerenjima na stvarnom trkaćem vozilu, Formula Student bolidu FSB-RT06R *VulpesR*-u, da se osigura pouzdanost dobivenih rezultata. Preostali uvjeti ispunjeni su kombiniranjem analitičkog proračuna s jednostavnim tranzijentnim simulacijskim modelom.

3.1. Formula Student bolid FSB-RT06R *VulpesR*

Trkaće vozilo FSB-RT06R *VulpesR* na kojem su obavljena mjerenja temperature diskova deveti je bolid FSB Racing Team-a (Slika 15.). Evolucija je *Vulpesa*, prvog električnog bolida tima.



Slika 15. Render FSB-RT06R *VulpesR*-a

Kostur *Vulpesa* prva je kompozitna *monocoque* šasija proizvedena u Hrvatskoj. Uz taj veliki korak u smjeru razvoja novih tehnologija, tim je prvi put razvio električni pogon bolida.

Šasija, električni motori, pretvarači, baterijske ćelije i amortizeri neke su od rijetkih komponenata preuzetih s *Vulpesa* kako bi nastao *VulpesR* – gotovo svaki sustav u bolidu doživio je korjenite promjene. Glavni ciljevi bili su povećanje pouzdanosti i smanjenje mase komponenata. Najistaknutije karakteristike *VulpesR*-a mogu se vidjeti u Tablici 1.

Tablica 1. Najistaknutije karakteristike FSB-RT06R *VulpesR*-a

Dimenzije (duljina x širina x visina)	2963 x 1502 x 1191 mm
Međuosovinski razmak	1530 mm
Masa	204,5 kg
Pogonski moment (na kotačima)	2 x 480 Nm
Pogon	Zasebno pogonjeni stražnji kotači
Maksimalna izlazna snaga iz baterijskog paketa	80 kW
Kapacitet baterijskog paketa	7,5 kWh

3.1.1. Sustav kočenja FSB-RT06R VulpesR-a

Postupak kočenja u *VulpesR*-u počinje pritiskom pedale kočnice. Sklop pedale kočnice (Slika 16.) prihvaćen je brzo uklonjivim zaticima za vodilicu koja omogućuje uzdužni raspon položaja pedale od 120 mm, čime se bolid može prilagoditi vrlo niskom i vrlo visokom vozaču.

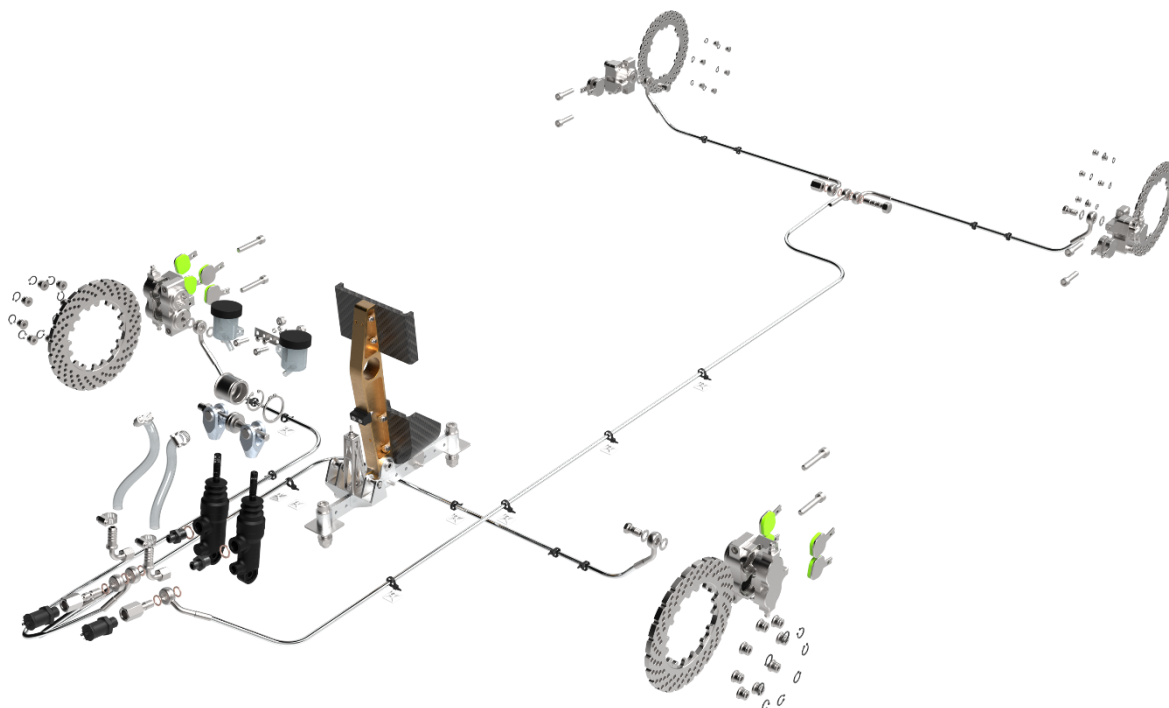
U sklopu pedale kočnice nalaze se 2 glavna kočna cilindra koji kroz oklopljene fleksibilne cijevi potiskuju hidrauličku tekućinu prema kliještima kočnica u sklopovima kotača (Slika 17.). Konačno, svaka kliješta pritišću kočne pločice o disk, čime nastaje sila trenja koja usporava rotaciju glavčine kotača, usporavajući time i cijeli bolid.

Prednja kliješta povezana su vodovima s jednim glavnim cilindrom, a stražnja kliješta s drugim. Klipovi cilindara povezani su na zajedničku polugu s navojima, rotacijom koje se hvatište jednog klipa glavnog cilindra približava osi pedale kočnice, a drugo udaljava. Time se mijenjaju krakovi na kojima poluga pritišće klipove glavnih cilindara. Posljedično tome, mijenja se omjer kočenja prednjih i stražnjih kotača, što je postavka ključna za učinkovito kočenje trkačkog vozila i postizanje željenog ponašanja vozila pri ulasku u zavoj.

VulpesR-ova kočna kliješta su lagana aluminijska kliješta za motocikle. Prednja kliješta su četveroklipna, a stražnja dvoklipna. Klipovi su im jednakog promjera od 25,4 mm.



Slika 16. Sklop pedala bolida FSB-RT06R *VulpesR*-a

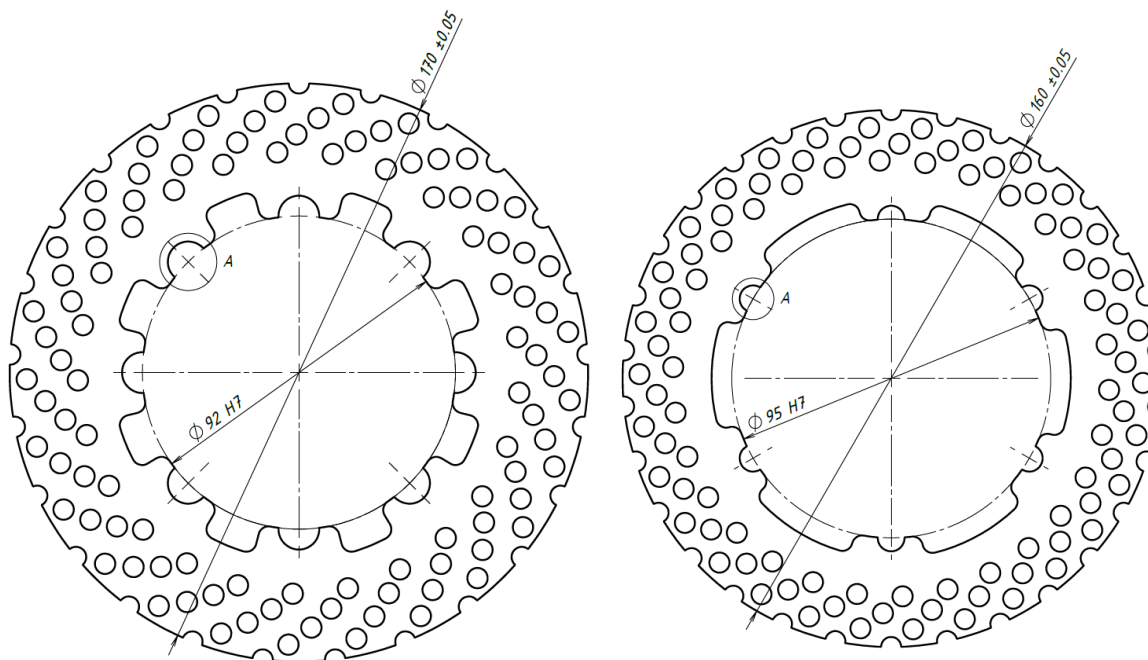


Slika 17. Sustav kočenja FSB-RT06R *VulpesR-a*

3.1.2. *Kočni diskovi FSB-RT06R VulpesR-a*

Diskovi Formula Student bolida najčešće su izrađeni rezanjem vodenim mlazom ili laserom iz metalne ploče debljine 3-6 mm. Nakon odabira materijala za izradu diskova i inicijalne konstrukcije sklopa kotača, njihovu masu primarno definira debljina, ovisna o toplinskim tokovima koje diskovi moraju primiti i toplinskim tokovima koji hlade diskove.

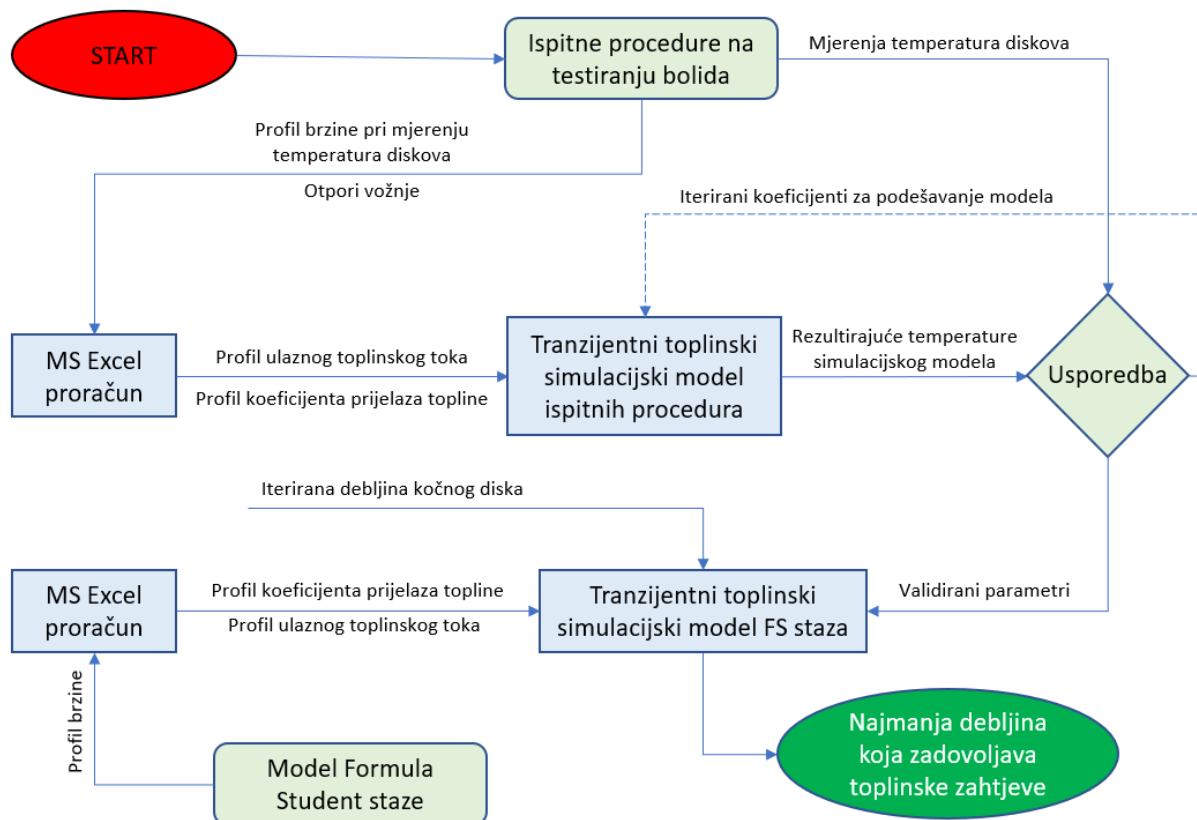
U fokusu rada su kočni diskovi bolida (Slika 18.) izrađeni od alatnog čelika Toolox 44. Materijal je odabran prema visokoj dopuštenoj radnoj temperaturi, velikoj tvrdoći i otpornosti na trošenje te dostupnosti.



Slika 18. Prednji (lijevo) i stražnji (desno) kočni disk FSB-RT06R *VulpesR-a*

3.2. Objašnjenje metode toplinske analize

Kako bismo mogli odrediti najvišu temperaturu koju će kočni diskovi bolida dostići tijekom vožnje na stazama Formula Student natjecanja, provedena je složena metoda analize (Slika 19.), čija je osnova mjerenje temperatura postojećih kočnih diskova bolida infracrvenim senzorom prilikom vožnje ispitnih procedura. Uz temperature, GPS sustavom je mjerena brzina vožnje bolida, koja je korištena za proračun toplinskog toka koji prime diskovi. Izmjerena brzina vozila s otporima vožnje unesena je u proračunsku tablicu u programu MS Excel, u kojoj se izračunaju profili toplinskih tokova koji zagrijavaju diskove i koeficijenta prijelaza topline s diska na okolni zrak. Izračunati profili uneseni su u tranzijentni toplinski simulacijski model i pomnoženi s koeficijentima, čijim su iteriranjem rezultati simulacijskog modela podešeni kako bi se podudarali s izmjerenim temperaturama diskova tijekom ispitnih procedura.



Slika 19. Dijagram toka određivanja najmanje dozvoljene debljine kočnih diskova

Kad je osigurano podudaranje rezultata simulacije i mjerenih temperatura, koristeći dobivene parametre provedene su simulacije termodinamičkih uvjeta rada kočnih diskova tijekom vožnje Formula Student stazom za različite debljine diskova. Uzevši u obzir najveću dozvoljenu temperaturu materijala od kojeg je izrađen kočni disk, odabrana je najmanja debljina diskova.

3.3. Mjerenje temperature pasivnim senzorom infracrvenog zračenja

Budući da se diskovi rotiraju zajedno s kotačem, ne može se koristiti kontaktna metoda mjerenja temperature. Korišteni su infracrveni senzori, senzori koji primaju infracrveno zračenje koje emitiraju čvrste tvari toplije od okoline. To je vrsta elektromagnetskog zračenja, valnih duljina između 700 nm i 1 mm [16], čija se energija računa prema izrazu [17]:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (1)$$

pri čemu su:

E – gustoća snage emitiranog infracrvenog zračenja [W/m^2],

ε – emisijski faktor tijela [-],

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$,

T – termodinamička temperatura tijela [K].

Poznajemo li materijal od kojeg je izrađeno neko tijelo i temperaturu okoline, emitirano infracrveno zračenje ovisi mu samo o temperaturi. Stoga, ukoliko možemo izmjeriti zračenje, možemo i odrediti temperaturu tijela. Velika prednost infracrvenog zračenja je što se to može obaviti beskontaktno, budući da svaki kontakt omogućuje prijenos topline i utjecaj na temperaturu tijela.

3.3.1. Emisijski faktor i njegov utjecaj na mjerenje temperature

Emisijski faktor definira koliko topline tijelo zrači. Vrijednost koeficijenta je između 0 i 1. 0 je za površine koje ne apsorbiraju niti emitiraju zračenje, nego samo reflektiraju. Apsolutna crna tijela imaju vrijednost 1, to znači da ne reflektiraju ništa od zračenja koje dolazi u njihovom smjeru već ga u potpunosti apsorbiraju i emitiraju. Ako se pokuša izmjeriti temperatura predmeta s emisijskim faktorom jednakim 0 zapravo će se mjeriti temperatura predmeta u odrazu, slično kao kod zrcala.

Za sva siva tijela (tijela s emisijskim faktorom između 0 i 1) emisijski faktor definira u kojoj mjeri predmet emitira zračenje, a ne u kojoj reflektirano od nekog objekta u odsjaju površine. Zbroj emisijskog faktora i faktora reflektivnosti uvijek je 1 kao što je pokazano u jednadžbi (2):

$$\varepsilon + r = 1 \quad (2)$$

U teoriji postoji i koeficijent transmisije a (tanki predmeti izrađeni od materijala koji propuštaju zračenje, tako da se zapravo mjeri temperatura predmeta iza njega), ali u većini slučajeva on je blizu 0 i može se zanemariti.

Većina infracrvenih termometara i kamera nude podešavanje emisijskog faktora tako da odgovara površini čija se temperatura mjeri. Ponekad je, zbog jednostavnosti kasnijeg računa, korisno podesiti koeficijent na 1. Preporuča se da, ako je emisijski faktor manji od 0,6, se koriste druge metode mjerenja zbog značajnih pogrešaka koje se mogu pojaviti [18]. Moguće je napraviti točno mjerenje ukoliko se zna točan emisijski faktor objekta i točna temperatura objekata u odrazu. U tom se slučaju temperatura mjerenog objekta računa prema [19]:

$$T_{\text{objekt}} = \sqrt[4]{\frac{T_{\text{mjerena}}^4 - (1 - \varepsilon) \cdot T_{\text{pozadina}}^4}{\varepsilon}}, \quad (3)$$

pri čemu su:

T_{objekt} – stvarna temperatura objekta koji se mjeri [K],

T_{mjerena} – temperatura koju mjeri senzor [K],

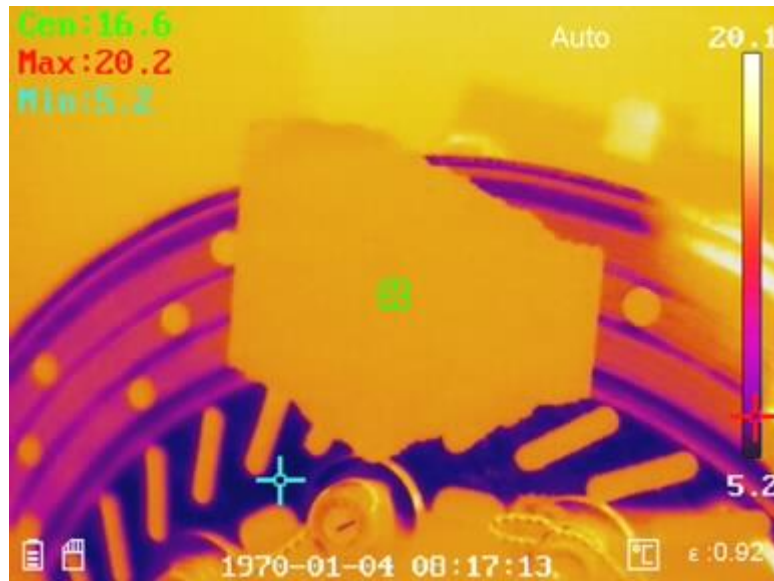
T_{pozadina} – temperature objekata u odrazu mjerene površine [K].

Utjecaj emisijskog faktora na mjerenje može se vidjeti u Tablici 2. Nepoznavanje ili zanemarivanje emisijskog faktora može u potpunosti promijeniti magnitudu mjerenih temperatura.

Tablica 2. Utjecaj emisijskog faktora na mjerenje temperature objekta temperature 335 °C

Emisijski faktor	Stvarna temperatura objekta	Emisijski faktor	Stvarna temperatura objekta
-	°C	-	°C
0.05	999.509	0.55	429.5754
0.1	797.6274	0.6	414.8331
0.15	694.9505	0.65	401.5737
0.2	628.2744	0.7	389.5515
0.25	579.8416	0.75	378.5757
0.3	542.2898	0.8	368.495
0.35	511.8996	0.85	359.1878
0.4	486.5471	0.9	350.5552
0.45	464.9125	0.95	342.5154
0.5	446.1235	1	335

Termalna kamera vrlo je pristupačan i detaljan infracrveni senzor. Sva pravila za pravilnu upotrebu IC senzora primjenjuju se i na termalnu kameru. Fotografija napravljena termalnom kamerom može se vidjeti na Slici 20. Neke termalne kamere imaju i mogućnost postavljanja temperature pozadine, pa je točno mjerenje dostupno bez zasebnog preračunavanja.



Slika 20. Fotografija *Vulpesovog* kočnog diska termalnom kamerom

Slika sadrži nekoliko bitnih dijelova:

- temperatura na sredini slike (zelena oznaka i vrijednost),
- maksimalna temperatura i njen položaj (crveni križić i vrijednost),
- minimalna temperatura i njen položaj (plavi križić i vrijednost),
- temperaturna skala – sadrži vrijednosti minimuma i maksimuma temperature na slici,
- mjerna jedinica,
- postavka emisijskog faktora – temperature sa slike su preračunate koristeći tu vrijednost,
- temperaturna skala (na ovom modelu: $-20\dots150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\dots550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ili Auto),
- datum i vrijeme,
- krep traka (jeftin materijal s visokim emisijskim faktorom).

3.3.2. *Određivanje nepoznatog emisijskog faktora*

Ukoliko neka površina ima relativno visok emisijski faktor, reflektivnost ima mali utjecaj na mjerenje te se ta pogreška može prihvatiti. Ako emisijski faktor nije visok ili je nepoznat, postoji nekoliko načina da se problem riješi:

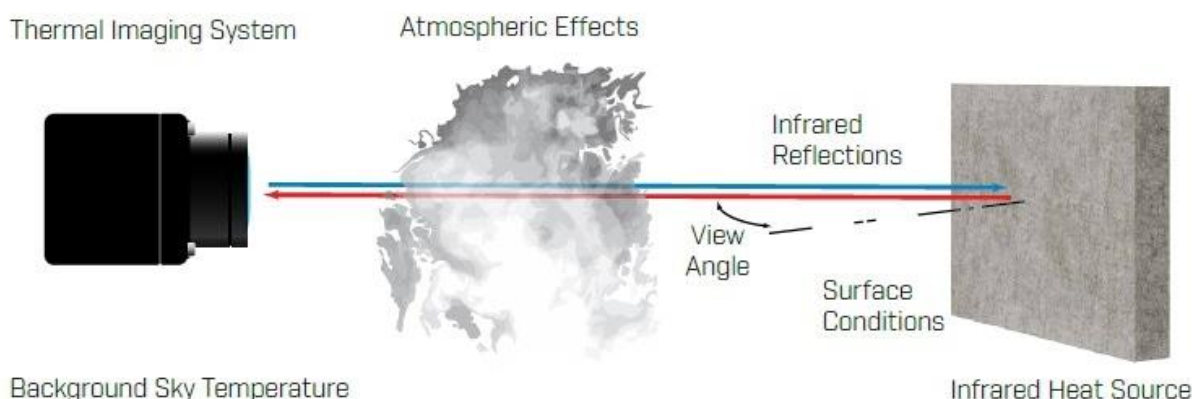
- Pronalazak emisijskog faktora u tablicama – dobro rješenje za brza, ali nije potpuno pouzdano za precizna mjerenja. Potrebno je naći pouzdani izvor!
- Mjerenje koeficijenta za danu površinu – kompliciran proces u kojemu postoje velike šanse za pogrešku, ali pouzdaniji od tabličnih podataka,

- c) Prekrivanje površine s materijalom poznatog i visokog emisijskog faktora (termografskom bojom ili krep trakom) – jednostavno rješenje s malo mogućnosti pogreške,
- d) Korištenje neke druge metode mjerenja temperature (pr. kontaktni termometar) – potrebno je više opreme, potencijalno nije pouzdano za mjerenje predmeta s naglo promjenjivom temperaturom (kočnice ili gume automobila) i potencijalno imaju utjecaj na temperaturu površine.

Najjednostavniji način je prekrivanje dijela kojem se mjeri temperatura samoljepljivom trakom koja ima stabilan emisijski faktor od 0,92. Ova vrijednost također je dovoljno visoka da ne uzrokuje velike pogreške mjerenja, tako da, ukoliko nije potrebna velika preciznost rezultata, nema potrebe za preračunavanjem dobivenih rezultata mjerenja.

3.3.3. Pozicioniranje infracrvenog senzora

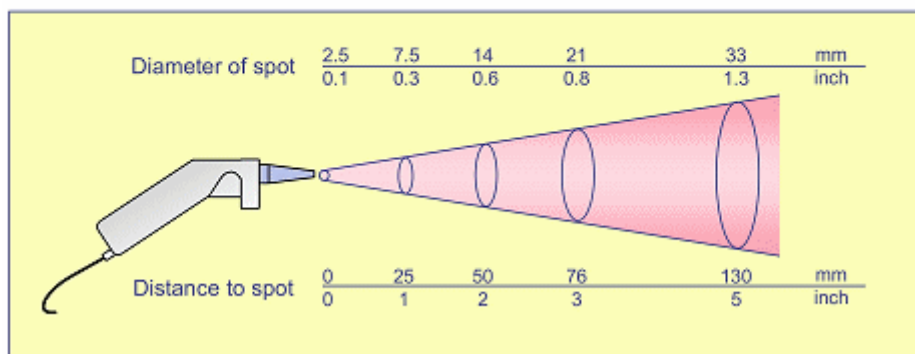
Infracrveni senzori fleksibilni su što se tiče pozicioniranja. Udaljenost senzora od mjenenog objekta nije važna sa strane preciznosti, osim ako se u zraku između mjenenog objekta i senzora nalaze čestice koje bi spriječile normalan tok zračenja (Slika 21.).



Slika 21. Smetnje mjerenju infracrvenim senzorom [20]

No, udaljenost senzora važna je zbog načina na koji IC senzori mjere. Svaki senzor ima deklarirane smjerove iz kojih mjeri IC zračenje, najčešće je to zadano kao vidno polje (field of view) senzora. Što je veća udaljenost od mjenenog objekta, to je veća površina s koje će senzor mjeriti prosječno emitirano zračenje (Slika 22.). Mjerenje koje senzor očitava odgovara prosjeku mjerenja s te površine, budući da prima IC zračenje s cijele te površine. Termalna kamera rješava taj problem visokom rezolucijom, pa se unatoč povećavanju udaljenosti i dalje mjeri jako mala površina.

$$\frac{\text{Distance from sensor to object}}{\text{Size of spot}} = D:S$$



Slika 22. Utjecaj udaljenosti na veličinu površine koju IC senzor mjeri [21]

Napadni kut pod kojim IC senzor mjeri također ima utjecaja na preciznost mjerenja (Slika 23.). Ukoliko je kut prevelik, reflektivnost može dovesti do greške u mjerenju. Također, ne preporuča se da bude potpuno okomit na mjerenu površinu.



Slika 23. Optimalan kut mjerenja IC senzorom [22]

3.4. Primjena višekanalnog senzora infracrvenog zračenja

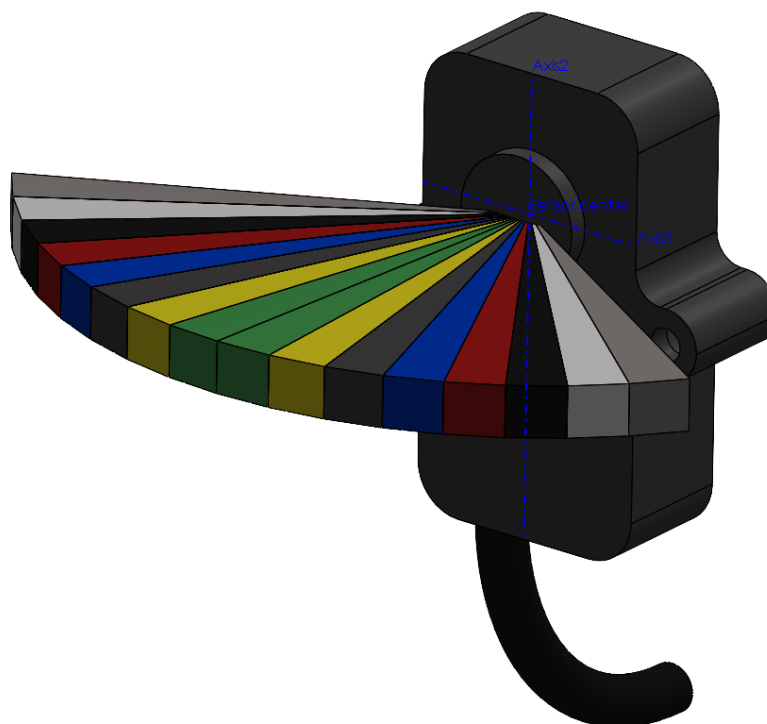
Zbog prisustva rupa za pospješivanje hlađenja na kočnim diskovima *VulpesR*-a, odabrano je korištenje višekanalnog senzora IC zračenja. Kupljena su 2 ALS Brake Wired senzora proizvođača Alsense, kao dobar omjer cijene i raspoloživih mogućnosti. Glavna karakteristika koja je presudila za kupnju točno ovog senzora je mogućnost napajanja različitim naponima,

što je omogućilo da se senzori spoje na postojeći niskonaponski sustav bolida bez pretvarača napona. Glavne karakteristike mogu se vidjeti u Tablici 3.

Tablica 3. Glavne karakteristike ALS Brake Wired IC senzora [23]

Broj kanala	16 / 8 / 4 / 1
Frekvencija očitavanja	Do 64 Hz
Točnost	1 – 100 °C 30 °C u rasponu 800 – 1000 °C
Horizontalno vidno polje	110°
Vertikalno vidno polje	6°
Raspon temperatura	-40 – 1000 °C
Radna temperatura	-40 – 85 °C
Napajanje	5 – 20 V, 15 mA
Rezolucija	0,1 °C
Dimenzije	48 x 25 x 12 mm

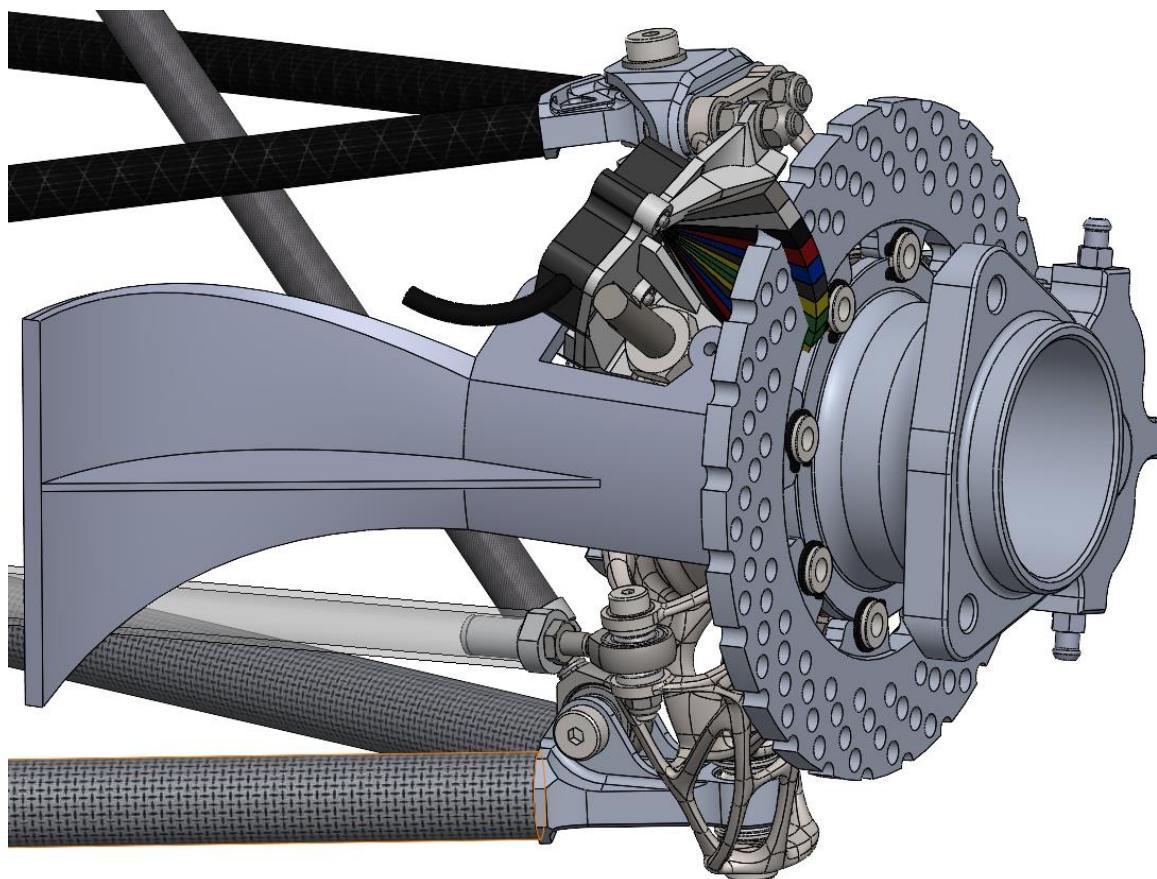
Kako bi se mogao precizno pozicionirati za mjerenje diskova, napravljen je njegov CAD model s kanalima za mjerenje i unesen u CAD model bolida (Slika 24.).



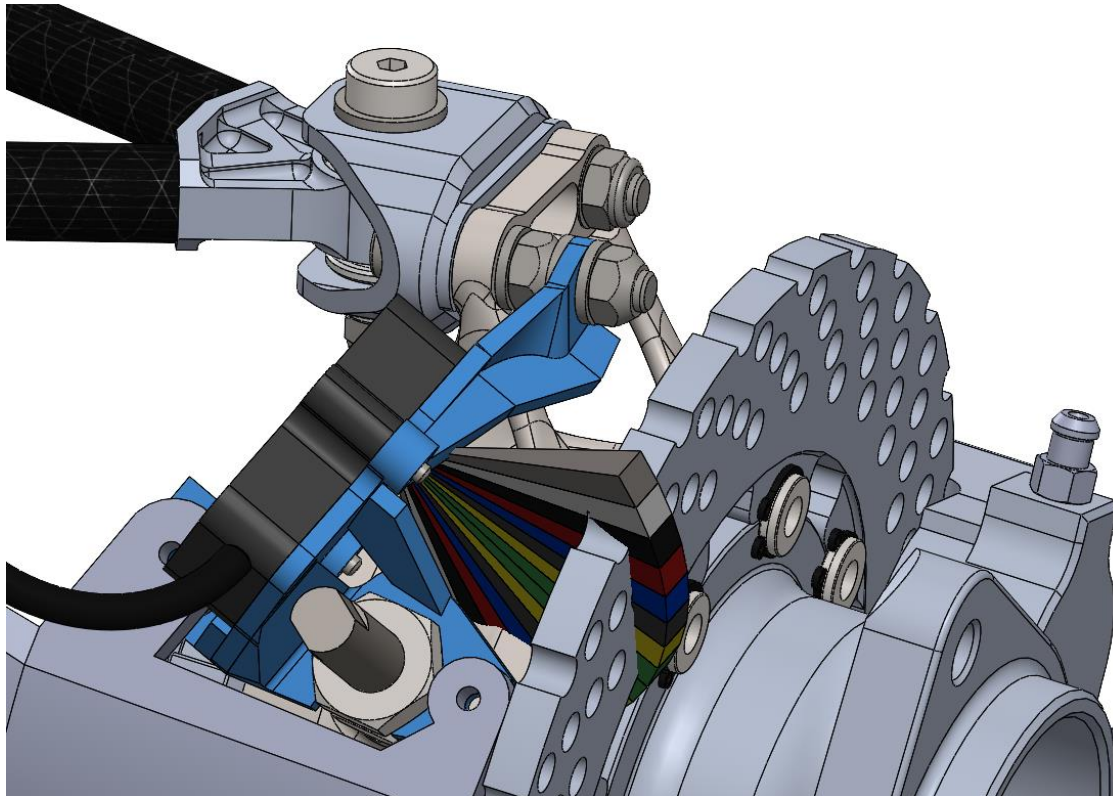
Slika 24. CAD model korištenog IC senzora s prikazom kanala za mjerenje

Smjestiti temperaturni senzor s nosačem na dovoljnu udaljenost uz osiguravanje dobre vidljivosti u sklop 10" kotača, složen je zadatak (Slike 25. i 27.). Najbolja opcija je prihvatiti senzor za nosače kotača kako bi bili blizu diskovima te kako bi na prednjim kotačima mjerenja bila neovisna o zakretu volana. Budući da su nosači kotača *VulpesR*-a topološki optimirani i proizvedeni selektivnim laserskim topljenjem (postupak aditivne proizvodnje), na njima se ne smije uklanjati materijal ni na kojem mjestu. Sensori imaju plastično kućište, pa je dodatni zahtjev bio udaljiti ih od kliješta kočnice što je više moguće da se smanji opasnost od pregrijavanja senzora.

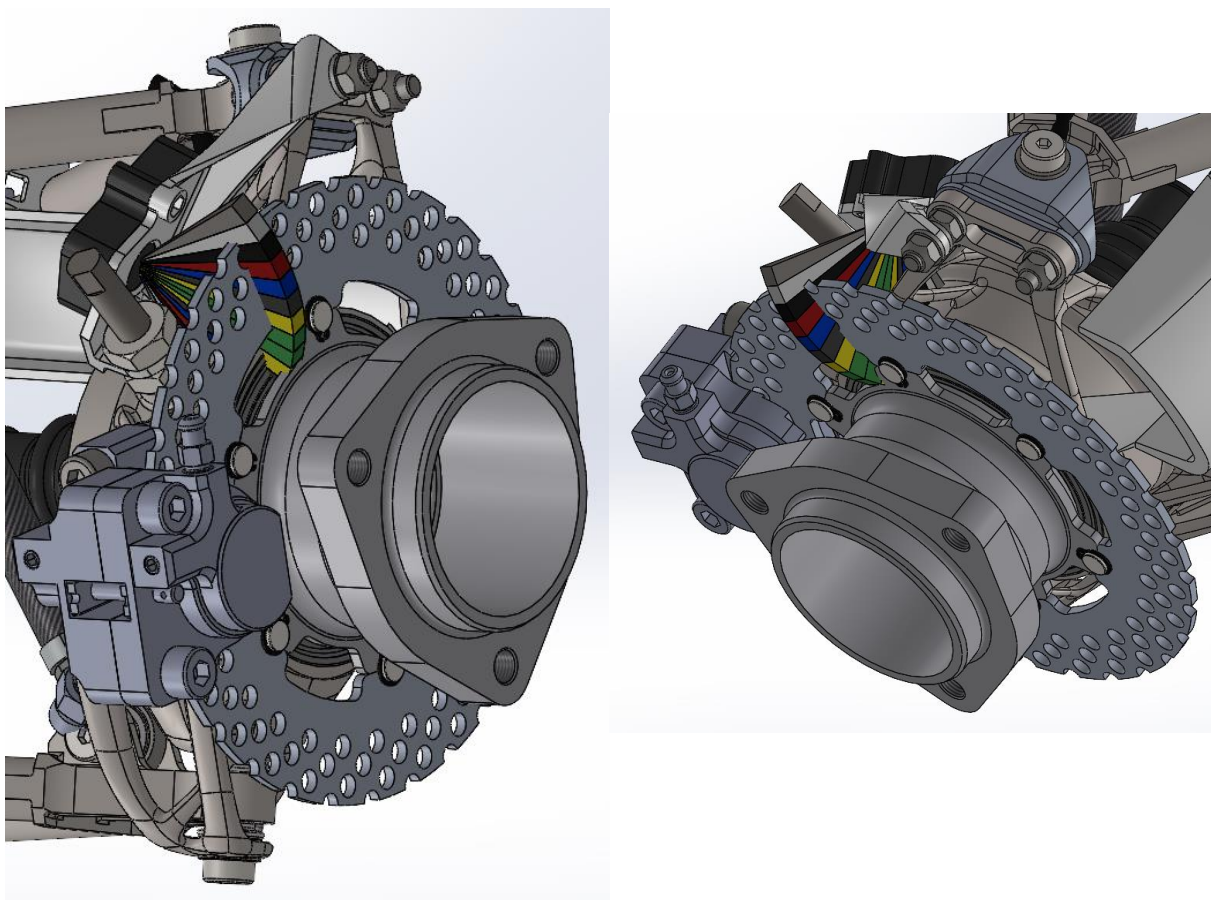
Najprije je određena pozicija iz koje senzor ima dobar pogled na disk, što je zahtijevalo zakret senzora u sve 3 osi. Kako bi se ostvarila tako složena pozicija, konstruirani su prihvat i proizvedeni aditivnom proizvodnjom. Sensori se tako i na prednjem i na stražnjem sklopu kotača bolida prihvaćaju za senzor brzine vrtnje kotača, koji na sebi ima UNF navoj, i jedan od 2 vijka nosača gornje vilice ovjesa (Slika 26.). Kako bi se osiguralo da se sile ovjesa ne prenose preko plastičnog nosača, stavljeni su duži vijci kako bi se mogle staviti 2 samokočne matice DIN 980 – jedna za pričvršćivanje prihvata gornje vilice ovjesa i jedna za prihvat senzora. Konačni rezultat vidljiv je na Slikama 28. i 29.



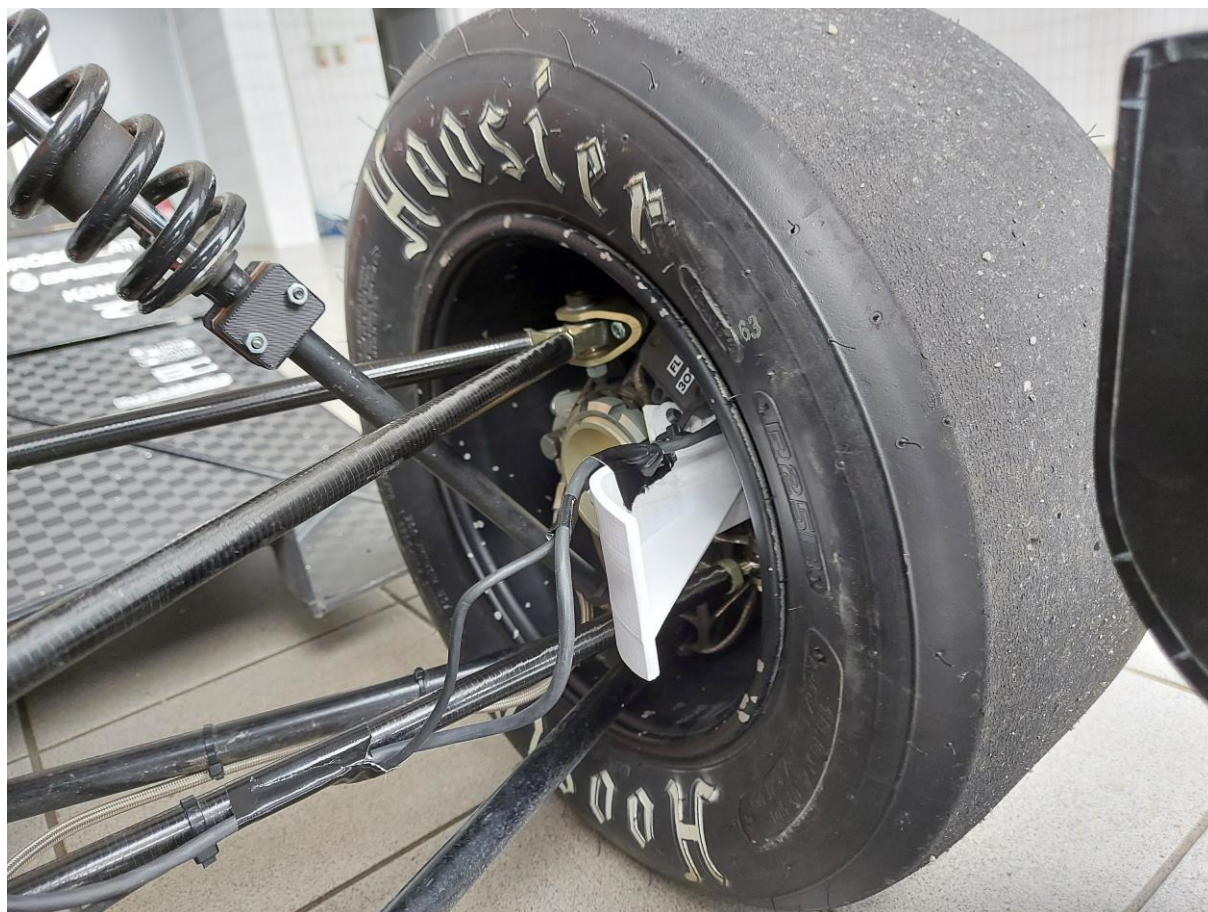
Slika 25. IC senzor u CAD modelu prednjeg sklopa kotača *VulpesR*-a



Slika 26. Nosač senzora (označen plavom bojom) u CAD modelu prihvaćen za senzor brzine vrtnje (dolje) i vijak prihvata gornje vilice ovjesa (gore)



Slika 27. IC senzor u CAD modelu stražnjeg sklopa kotača *VulpesR-a*



Slika 28. Prednji sklop kotača s IC senzorom i aerodinamičkim deflektorom za hlađenje diskova



Slika 29. Stražnji sklop kotača s IC senzorom i aerodinamičkim deflektorom za hlađenje diskova

4. PLAN PROVEDBE TESTIRANJA ZA POTREBNA MJERENJA

Ispitne procedure provedene su na testnoj stazi Mičevac. Svaki odlazak na testiranje bolida na testnu stazu je organizacijski poduhvat, stoga je potrebno kvalitetno planiranje.

Za lakše sporazumijevanje međusobno i jasnoću plana testiranja, definirane su zone na kojima se obavljaju ispitne procedure, a mogu se vidjeti na tlocrtu staze (Slika 30.).



Slika 30. Tlocrt testne staze Mičevac i raspored vatrogasnih aparata

Ovisno o trenutno voženoj ispitnoj proceduri, ljudi s vatrogasnim aparatima raspoređeni su na neka od mjesta ucrtana na tlocrt:

- CRC – vatrogasni aparati 1, 2, 3
- Ravnica 1 – vatrogasni aparati 3, 4, 6 (ako procedura to dopušta – 5)
- Ravnica 2 – vatrogasni aparati 6, 7, 8
- Skid pad – vatrogasni aparati 9, 10
- Zona A – vatrogasni aparati 11, 12

Zone B i C u pravilu se ne koriste za potrebe testiranja FSB Racing Team-a.

U Zoni CRC prije početka ispitivanja osmišljena je i postavljena tzv. „brza verzija male testne staze“, prikazano na Slici 31., uz izmjenu da je zatvoren zavoja kod ulaza na Ravnicu 1 kako bi se dobio potpuni krug.



Slika 31. Brza verzija male testne staze

4.1. Ispitne procedure

Detaljno definirane ispitne procedure olakšavaju naknadnu obradu podataka i povećavaju kvalitetu mjerenja. Stoga u nastavku slijede detaljni opisi ispitnih procedura.

4.1.1. Mjerenje otpora vožnje

Na početku testiranja, dok je visokonaponska baterija bolida još uvijek puna i pod najvišim naponom, bolid može postići maksimalnu brzinu. Zato se ova procedura vozi prva.

- Mjesto: Ravnica 2
 - Mjerenje temperature zraka. Upaliti GoPro kameru na bolidu.
- a) Ući na ravnicu brzo koliko zavoj dopušta. Ubrzati do maksimalne brzine. Kad bolid dostigne maksimalnu brzinu, pustiti gas i ne kočiti tijekom krstarenja niz cijelu ravnicu dok se bolid ne zaustavi. Nakon zaustavljanja nastaviti prema završetku ravnice, okrenuti se i ponoviti proceduru u drugom smjeru ravnice.
- Ugasiti GoPro.

4.1.2. Mjerenje temperature stražnjih kočnica

- Sva kočenja odraditi bez blokiranja kotača kako bi se u simulaciji mogla povezati brzina bolida iz GPS-a s brzinom vrtnje kočnih diskova
 - Mjesto: procedure a), b) i c) - Ravnica 1; b) - Ravnica 2; e) - CRC
 - Mjerenje temperatura asfalta i zraka. Upaliti GoPro kameru.
- a) ZAGRIJAVANJE KOČNICA – 6 uzastopnih naglih ubrzanja i kočenja da se diskovi zagriju na visoke temperature. Od desnog do lijevog kraja ravnice 1, po donjoj/južnoj strani ravnice – ubrzanje do najveće brzine i naglo kočenje do neke jako male brzine (bez zaustavljanja i proklizavanja). Jako kratko vrijeme voziti ravno (da se kotač okrene nekoliko puta bez kočenja da senzori izmjere temperature nakon kočenja bez razlike u brzini lijevog i desnog kotača), pa se što brže okrenuti udesno za 180°. Ubrzanje u suprotnom smjeru s jednakim opisom i okretom ulijevo za 180°. Bez pauze započeti sljedeću proceduru.
- b) KOČENJE I KRSTARENJE – 5 puta ponoviti: voziti konstantnom brzinom s lijevog kraja ravnice 1 na desni kraj. Okrenuti se velikim radijusom držeći konstantnu brzinu ako je moguće. 2 ubrzanja s naglim kočenjima. Oštro i brzo okretanje za 180°. Ponoviti - krstariti malo većom konstantnom brzinom, okrenuti se velikim radijusom i napraviti u vozeći ravno 2 ubrzanja i kočenja. Zadnju vožnju u povratnom smjeru odraditi i 3. ubrzanje još dalje od desnog kraja ravnice 1, skrenuti desno na ravnice 2 i voziti velikom konstantnom brzinom do kraja ravnice 2. Povratak na ravnice 1 lijevim prilazom kako bi se uštedilo na bateriji i vremenu.
- c) ZAGRIJAVANJE KOČNICA I STAJANJE – 6 ubrzanja i naglih kočenja bez proklizavanja. 7. kočenje do zaustavljanja na gornjoj strani ravnice 1, blizu mjesta gdje stoje ljudi s vatrogasnim aparatom i telemetrijom. Pali se štoperica. Obavezno puštena kočnica. Visokonaponski sustav se gasi, niskonaponski ostaje upaljen kako bi snimač podataka spremao mjerenja. Zaustavljen bolid stoji 5 minuta. Tijekom stajanja, termoparom se mjeri temperatura jednog diska, na mjestu koje ne smeta temperaturnom senzoru. Zapisuje se vrijeme od zaustavljanja bolida do prvog mjerenja. Svakih 10 sekundi, zapisuje se mjerena temperatura.
- d) Opcionalno: Provjera jesu li se logirali podatci.
- e) AUTOCROSS: Odlazak na CRC. 5 krugova Autocrossa na brzom verziji male staze.
- Ugasiti GoPro kameru.

4.1.3. Mjerenje temperature prednjih kočnica

- Preduvjeti: Po potrebi punjenje HV baterije i LV baterije. Provjereno logiranje podataka s posljednje vožnje. Temperaturni senzori premješteni sa stražnjih kočnica na prednje, dijagonalno zamijenjeni.
- Mjesto: procedura a), b) i c) - Ravnica 1; b) - Ravnica 2; e) - CRC
- Mjerenje temperatura asfalta i zraka. Upaliti GoPro kameru.
 - a) ZAGRIJAVANJE KOČNICA – kao u proceduri 4.1.1.
 - b) KOČENJE I KRSTARENJE – kao u proceduri 4.1.1.
 - c) ZAGRIJAVANJE KOČNICA I STAJANJE – kao u proceduri 4.1.1.
 - d) Opcionalno: Provjera jesu li se logirali podatci.
 - e) AUTOCROSS: Odlazak na CRC dio staze. 5 krugova Autocrossa na brzjoj verziji male staze.
- Ugasiti GoPro kameru.

5. SIMULACIJSKI MODEL U PROGRAMSKOM PAKETU SIMULIA ABAQUS FEA

Nakon definiranja svih ulazni podatci, oni su uneseni u tranzijentni toplinski simulacijski model napravljen u programskom paketu SIMULIA Abaqus FEA (Slika 32.), programskom paketu za provođenje analiza metodom konačnih elemenata. Metoda konačnih elemenata široko je korištena metoda za rješavanje složenih skupova diferencijalnih jednačbi u inženjerskim problemima. Primjenjuje se za analiziranje problema čvrstoće, krutosti, protoka kapljevine, plinova, struje itd.



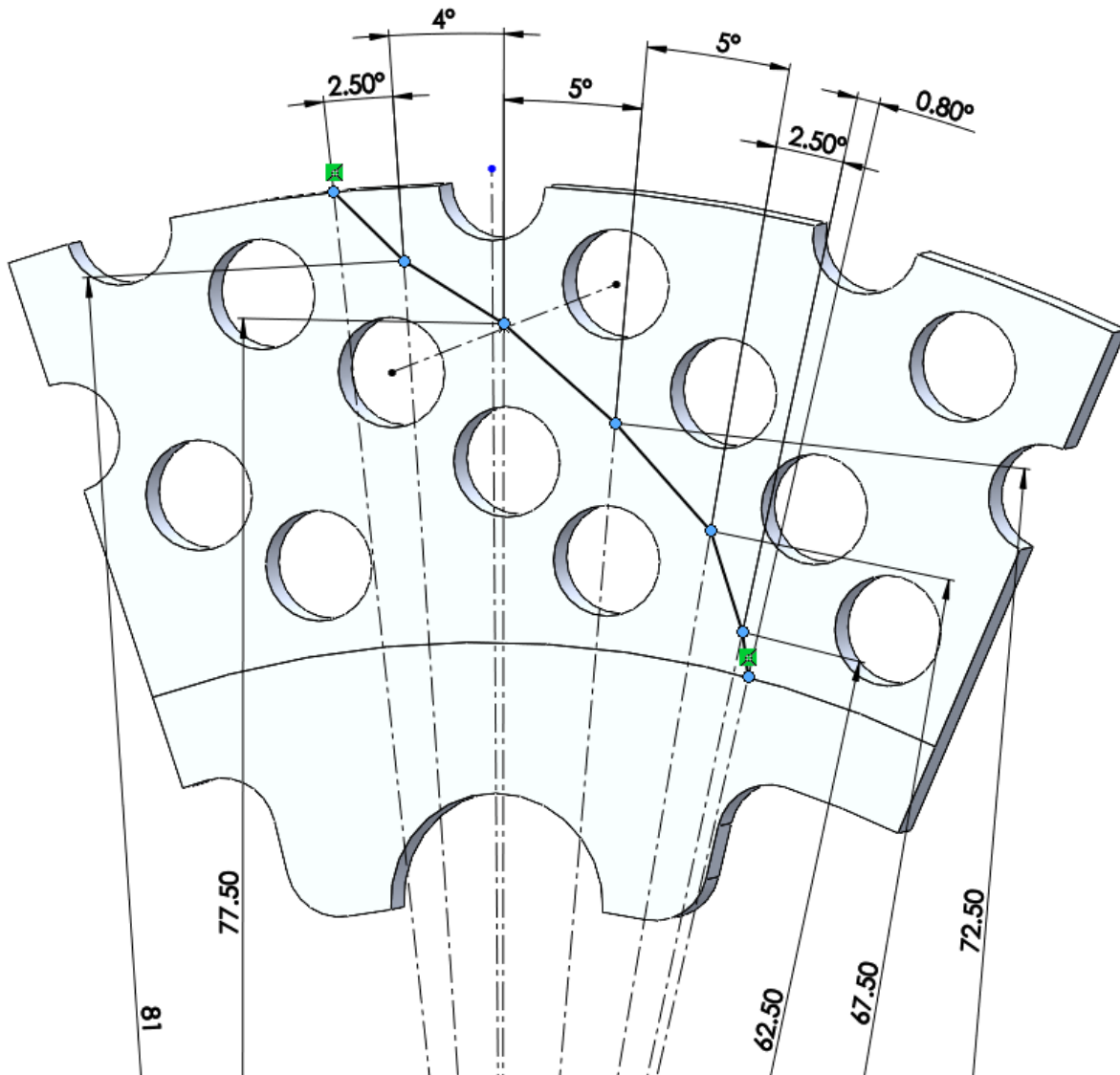
Slika 32. Logotip programskog paketa SIMULIA Abaqus FEA [24]

5.1. Osnovne postavke modela

Za rješavanje ovog problema, korišten je modul Heat transfer – Transient iz Abaqus-ove lepeze opcija. U principu, problem zagrijavanja kočnih diskova, kad se rješava na ovaj način, kombinacija je problema toka topline kroz krutinu i analitičkih jednačbi za interakciju s okolinom.

5.1.1. Unos geometrije

Geometrija je pripremljena u programskom paketu Dassault Systèmes SOLIDWORKS. U njemu je također napravljeno particioniranje lica diska (Slika 33.), budući da je daleko jednostavnije nego učiniti to u Abaqus-u.

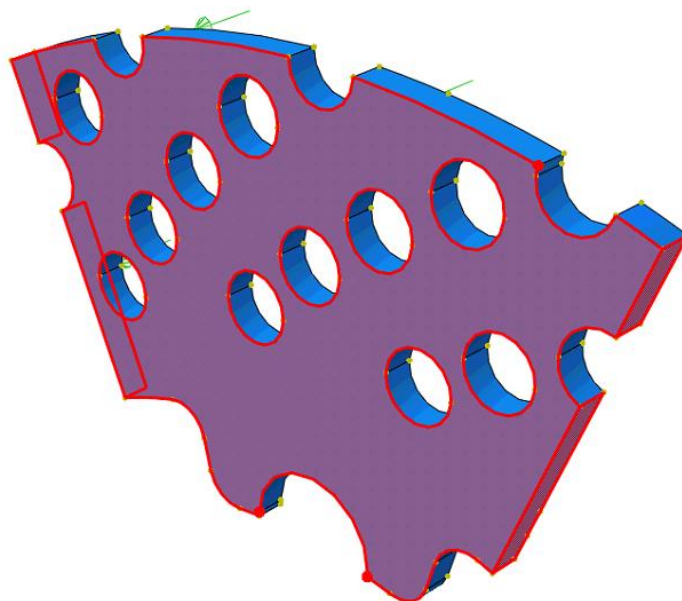


Slika 33. Partitioniranje lica prednjeg diska u SOLIDWORKS-u

Lice diska partitionirano je na ovaj način kako bi se osiguralo da se u različitim mrežama konačnih elemenata mogu birati iste točke za koje se izvoze rješenja simulacije i međusobno uspoređivati. Mjerne točke smještane su po kočenoj površini što je moguće dalje od rupa za hlađenje, budući da je bilo očekivano da će IC senzori mjeriti temperaturu točno tih mjesta. Particija linijama također omogućuje kvalitetniju kontrolu gustoće mreže oko mjernih točaka. Iz SOLIDWORKS-a se pripremljeni CAD model izvozi u STEP formatu i unosi u Abaqus. Po potrebi, daljnje partitioniranje može se obaviti u Abaqus-u.

5.1.2. Zadavanje rubnih uvjeta

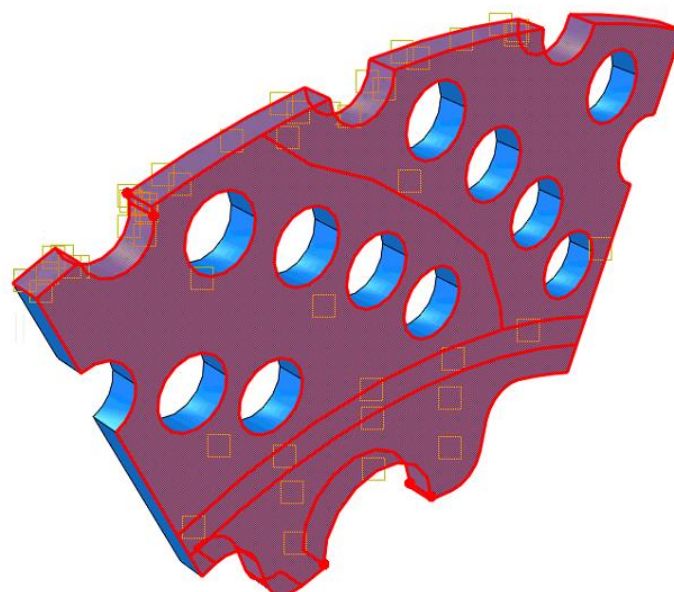
Nakon unosa geometrije, unose se svojstva materijala i prelazi se na zadavanje rubnih uvjeta. Ovdje se zadaje rubni uvjet izolacije (toplinski tok okomit na površinu jednak je nuli) na ravnine simetrije, prikazane na Slici 34.



Slika 34. Rubni uvjeti izolacije stavljeni na ravnine simetrije

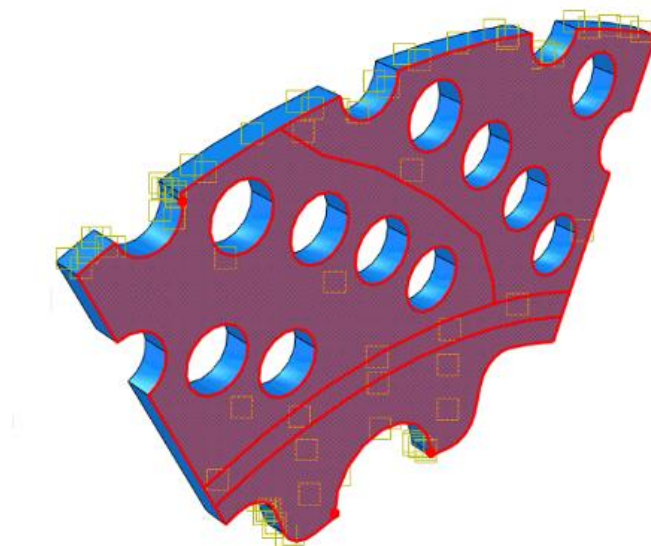
5.1.3. Zadavanje interakcija

U Abaqusu se konvektivni prijenos topline i emitirano zračenje zadaju u odjeljku Interakcije. Emitirano zračenje zadano je na sve površine koje su okrenute prema okolini, dakle na lice diska te unutarnje i vanjske površine diska okomite na lice diska (Slika 35.). Okolišna temperatura se za simulacije ispitnih procedura namješta na 16 °C, a za simulacije FS staza na 40 °C.



Slika 35. Površine s kojih se emitira toplina diska

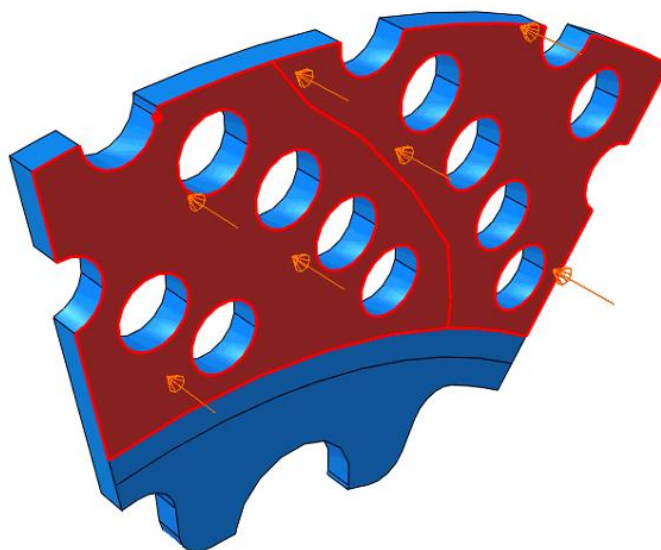
Zadaju se 2 različite konvekcije, jedna samo na lice diska (s koeficijentom prijelaza topline α_1), a druga na sve površine okomite na lice diska, a da nisu već pod uvjetom izolacije (s koeficijentom prijelaza topline α_2). Pretpostavka je da se na okomitim površinama javlja veći koeficijent prijelaza topline zbog turbulentnijeg strujanja. Površine su vidljive na (Slici 36.).



Slika 36. Površine s konvekcijom s koeficijentom prijelaza topline α_1

5.1.4. Zadavanje opterećenja

Jedini preostali vanjski utjecaj na disk koji se razmatra u ovoj analizi je i onaj najbitniji, toplinski tok kočenja. On se dodaje na površinu particioniranu koristeći SOLIDWORKS, kao što je vidljivo na Slici 37.

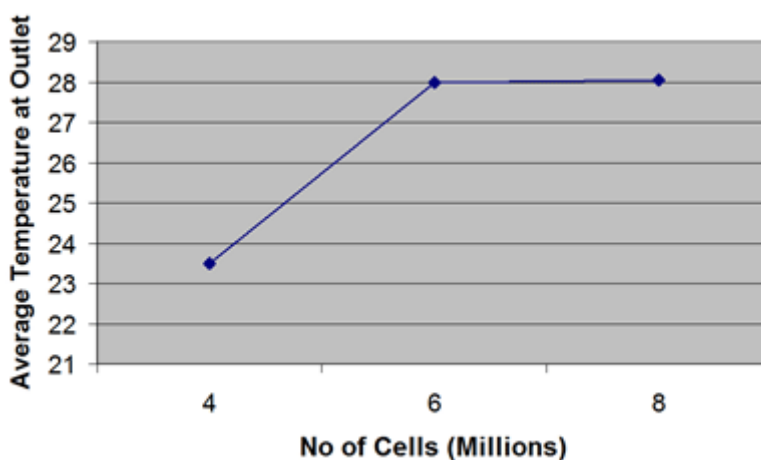


Slika 37. Površine na koje toplinski tok kočenja ulazi u disk

5.2. Odabir vremenskog koraka i gustoće mreže

5.2.1. Provjera konvergencije rezultata u ovisnosti o gustoći mreže

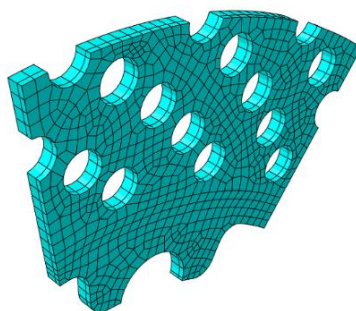
Stvaranje mreže konačnih elemenata najbitniji je dio većine simulacija. Za protok fluida i mehanička naprezanja, primjerice, gustoća mreže definira pogrešku dobivenog rješenja (Slika 38.). Rješenje konvergira prema točnom rješenju s povećanjem broja stupnjeva slobode u mreži, ali nikada ne dođe potpuno do te vrijednosti. Cilj je koristiti mrežu dovoljne gustoće da se dobiju zadovoljavajući rezultati, ali ne toliko gustu da se nepotrebno produljuje trajanje svake simulacije.



Slika 38. Primjer konvergencije rezultata u ovisnosti o broju stupnjeva slobode [25]

Toplinske simulacije nisu jako osjetljive na gustoću mreže, osobito slične ovoj na bazi čvrstog tijela. Stoga je moguće odabrati relativno rijetku mrežu i moći učinkovito iterirati simulacije i parametre.

U ovom radu korištena je diskretizacija s 9000 stupnjeva slobode i 1628 elemenata (Slika 39.) , što je rezultiralo najvećom razlikom od 1.36 °C od rezultata mreže s 50827 stupnjeva slobode i 10095 elemenata (Tablica 4.). Jedna iteracija simulacije s odabranom mrežom traje samo 21 % trajanja simulacije s gustom mrežom, što pokazuje ekonomičnost toplinskih simulacija čvrstih tijela.



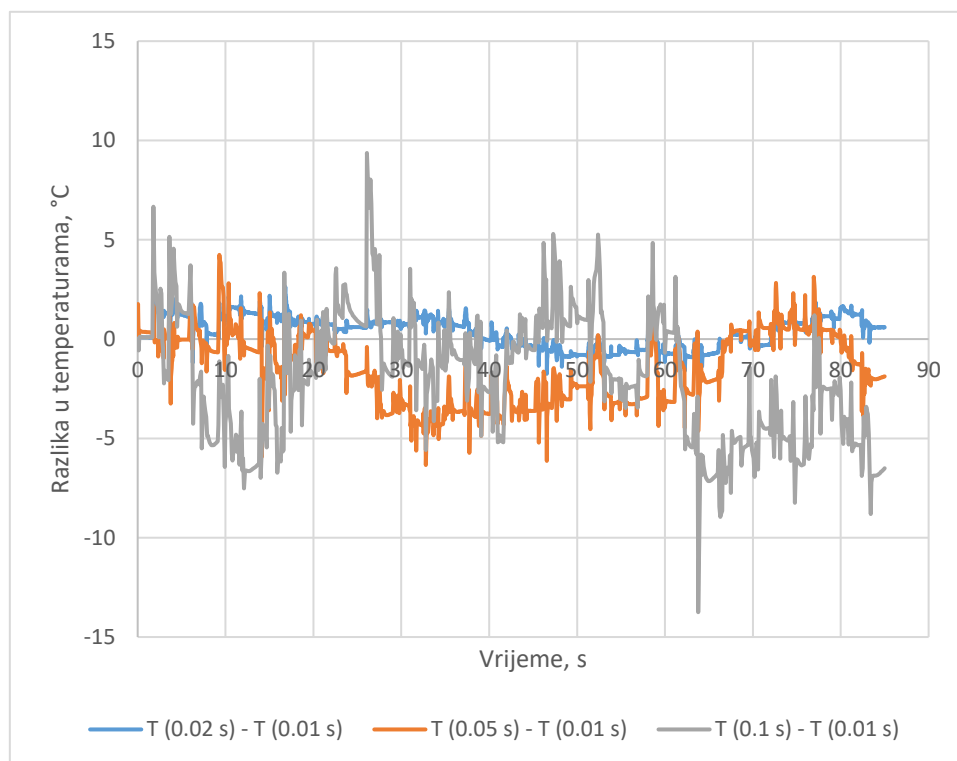
Slika 39. Mreža elemenata odabrana za korištenje u analizi.

Tablica 4. Konvergencija rezultata po gustoći mreže za prednji kočni disk

Broj stupnjeva slobode	Najveća razlika, %	Trajanje simulacije, s
50827	-	1661
21705	0.230912	793
9000	0.346369	352
7680	0.484171	337
1857	1.249534	171
1299	3.20298	156
1047	9.880819	150

5.2.2. Provjera konvergencije rezultata u ovisnosti o veličini vremenskog koraka

Kod tranzijentnih toplinskih simulacija sa skokovitim toplinskim tokovima kao što je ova, bitno je da je vremenski korak dovoljno malen da se nagle promjene jasno razlikuju. Isto kao gustoća mreže i vremenski korak trebao bi biti dovoljno malen da se dobiju dovoljno točni rezultati, a što veći kako bi se vrijeme potrebno za provedbu simulacije minimiziralo. Usporedba rezultata simulacije koristeći različite vremenske korake vidljiva je na Slici 40. i u Tablici 5.

**Slika 40. Razlike u temperaturama korištenjem različitih veličina vremenskog koraka**

Tablica 5. Konvergencija rezultata po gustoći mreže za prednji kočni disk

Veličina vremenskog koraka, s	Najveća razlika, %	Trajanje simulacije, s
0.01	-	1902
0.02	0.489321	906
0.05	1.179579	352
0.1	2.581226	185

Budući da je potrebno obaviti puno iteracija parametara za podešavanje simulacijskog modela, a na temelju rezultata odlučivati o promjeni parametara za daljnje iteracije, odabran je vremenski korak od 0,05 s kao obećavajući omjer trajanja simulacije i preciznosti. Kad su određene završne vrijednosti parametara iteriranjem, obavljena je provjera provođenjem simulacije s manjim vremenskim korakom kako bi se potvrdile vrijednosti parametara.

6. DEFINIRANJE NEPOZNATIH ULAZNIH PODATAKA ZA SIMULACIJSKI MODEL

6.1. Ulazna gustoća toplinskog toka q

Toplinski tok koji zagrijava diskove tijekom kočenja dobiva se korištenjem MS Excela iz profila brzine vozila. Može se reći da je proces kočenja smanjenje kinetičke energije bolida:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{J \cdot \omega^2}{2} = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{J \cdot v^2}{2r^2}, \quad (4)$$

$$\Delta E_k = \frac{m \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2} + \frac{J \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2r^2}, \quad (5)$$

pri čemu su:

m – ukupna masa bolida, uključujući i vozača [kg],

v – trenutna brzina bolida [m/s],

J – ukupni moment inercije rotirajućih elemenata koji se moraju usporediti s bolidom reduciran na brzinu vrtnje kotača [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],

ω – kutna brzina rotirajućih elemenata bolida, reducirana na brzinu kotača [rad/s],

r – dinamički radijus kotača [m],

indeks 1 – veličina na početku vremenskog intervala Δt ,

indeks 2 – veličina na kraju vremenskog intervala Δt .

U kočnicama se disipira dio kinetičke energije, a gubitak ostatka kinetičke energije posljedica je otpora vožnje:

$$\Phi_{uk} = \left(\frac{\Delta E_k}{\Delta t} - P_{otp} \right) \quad (6)$$

pri čemu su:

Φ_{uk} – toplinski tok koji prima sustav kočenja [W],

$\frac{\Delta E_k}{\Delta t}$ – brzina smanjenja kinetičke energije bolida [W],

Δt – vremenski interval [s],

P_{otp} – ukupna snaga otpora vožnje [W],

Sve gore navedene veličine izražene su kao apsolutne vrijednosti da se izbjegne zabuna s pozitivnim i negativnim predznacima veličina.

Kočnica pojedinog kotača prima toplinski tok:

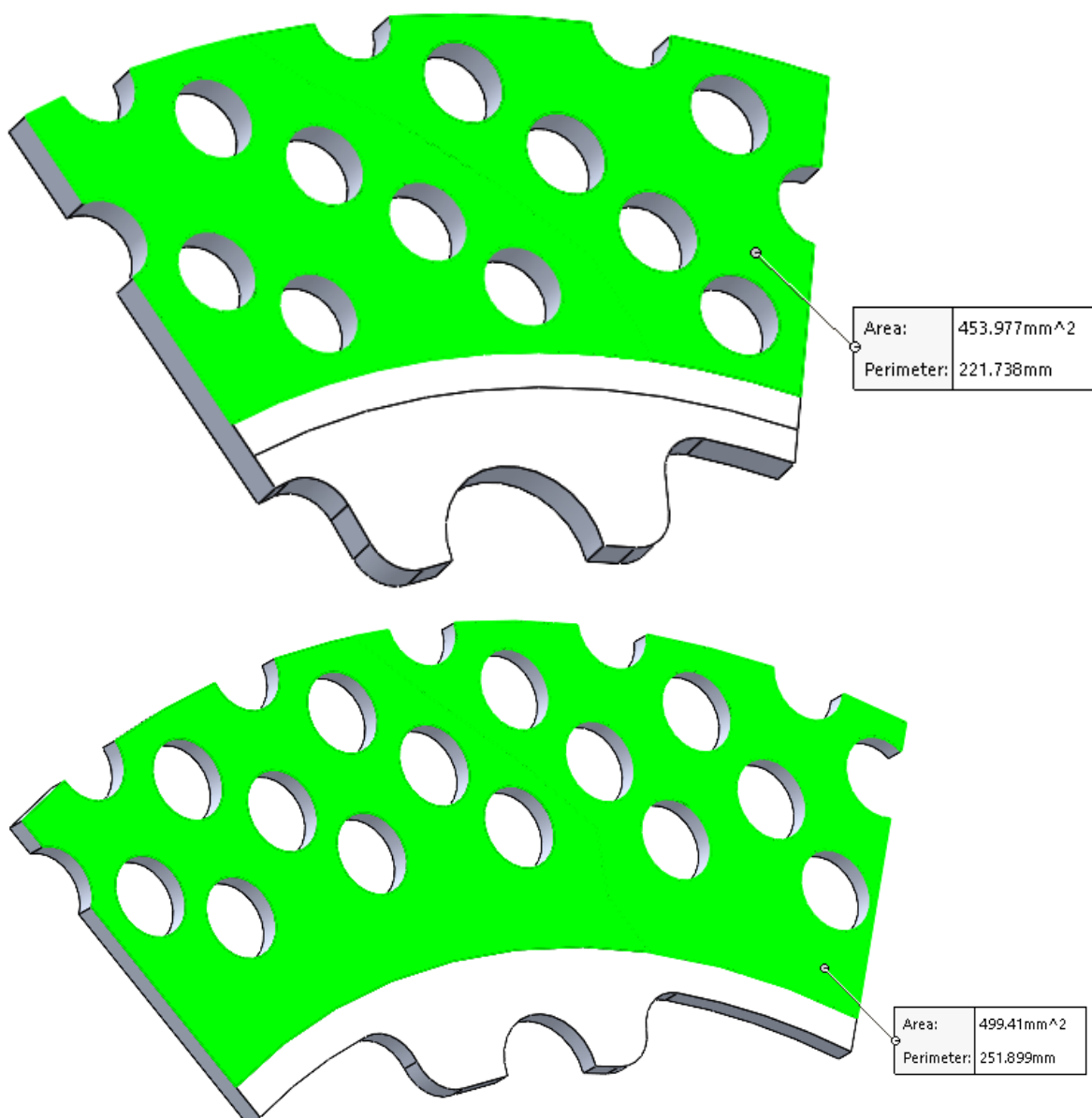
$$\Phi_{kodač,prednji} = \frac{\Phi_{uk}}{2} \cdot b. b. , \quad (7)$$

$$\Phi_{koda\check{s},\text{stra\check{z}nji}} = \frac{\Phi_{uk}}{2} \cdot (1 - b. b.), \quad (8)$$

pri čemu je:

b. b. – omjer kočenja (brake bias) [-].

U simulacijskom modelu koristi se samo dio diska odabran uvjetom rotacijske simetrije, kako bi se smanjilo vrijeme potrebno za provođenje iteracije simulacije. Taj dio diska dodatno je prepolovljen po debljini, čime se dodatno smanjila zahtjevnost simulacijskog modela uz pretpostavku da su toplinski uvjeti nasuprotnih lica diska simetrični.



Slika 41. Dijelovi prednjeg (gore) i stražnjeg (dolje) diska korišteni u simulacijskom modelu

Toplinski tokovi koje primaju površine prema Slici 41. računaju se prema:

$$\Phi_{prednji} = \frac{\Phi_{kotač,prednji}}{2} \cdot \frac{\alpha_{prednji}}{360^\circ}, \quad (9)$$

$$\Phi_{stražnji} = \frac{\Phi_{kotač,stražnji}}{2} \cdot \frac{\alpha_{stražnji}}{360^\circ}, \quad (10)$$

pri čemu su:

$$\alpha_{prednji} = 43,2^\circ - \text{kut dijela prednjeg diska } [^\circ],$$

$$\alpha_{stražnji} = 60^\circ - \text{kut dijela stražnjeg diska } [^\circ].$$

Konačno, kao ulazni podatci za simulacijske modele koriste se profili gustoće toplinskog toka:

$$q_{prednji} = \frac{\Phi_{prednji}}{A_{prednji}} \cdot p, \quad (11)$$

$$q_{stražnji} = \frac{\Phi_{stražnji}}{A_{stražnji}} \cdot p, \quad (12)$$

pri čemu su:

$$A_{prednji} - \text{kočeni dio površine dijela prednjeg diska prema Slici 41. [m}^2\text{]},$$

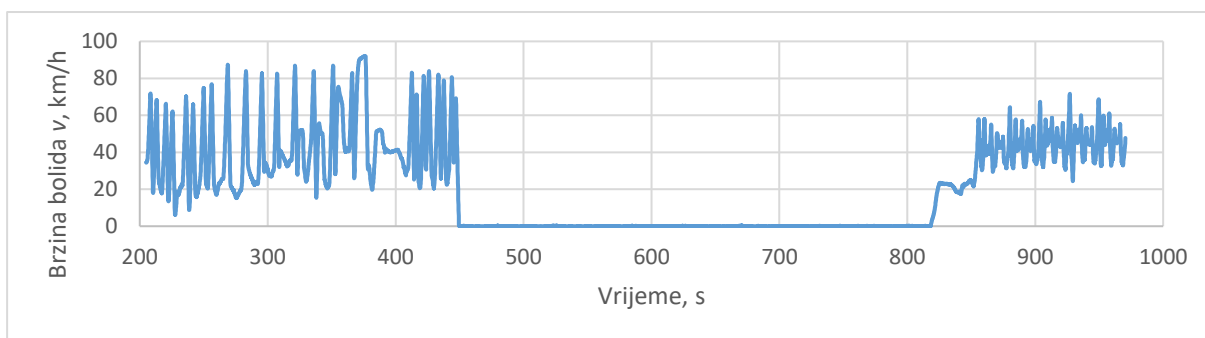
$$A_{stražnji} - \text{kočeni dio površine dijela prednjeg diska prema Slici 41. [m}^2\text{]},$$

$$p - \text{udio topline koji prime kočni diskovi [-].}$$

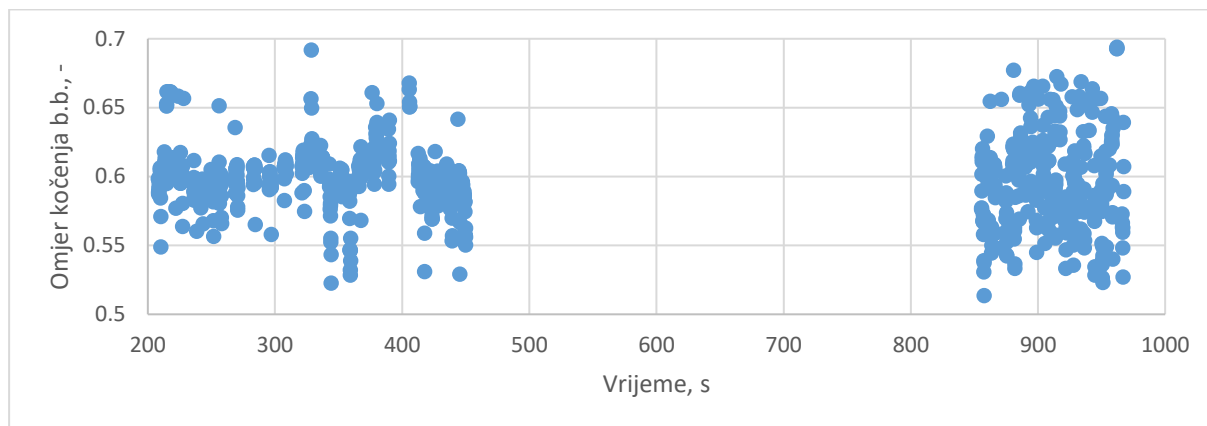
Koeficijent p u literaturi se najčešće navodi kao $p = 0,9$ [1], no simulacijski model postavljen je na način da se i on može po potrebi koristiti kao parametar za podešavanje modela. Ostatak topline primaju kočne pločice.

6.2. Određivanje omjera kočenja tijekom vožnje ispitnih procedura

Omjer kočenja određuje se kao omjer momenta kočenja koji proizvode prednje kočnice u odnosu na ukupni moment kočenja svih kočnica. *VulpesR* u sustavu kočenja ima senzore tlaka preko kojih je moguće uz ostale dimenzije izračunati ostvareni omjer kočenja u bilo kojem trenutku. Uzevši u obzir osrednjeni radijus kočenja na prednjim i stražnjim diskovima te broj klipova, za profil brzine prema Slici 42. dobiju se omjeri kočenja vidljivi na Slici 43.



Slika 42. Profil brzine tijekom ispitne procedure mjerenja temperature stražnjih kočnica



Slika 43. Omjeri kočenja tijekom ispitne procedure mjerenja temperature stražnjih kočnica

Trenutna postavka omjera kočenja uzeta je kao konstantna veličina, izračunata kao prosjek omjera kočenja sa Slike 43. Stoga je omjer kočenja jednak:

$$b.b. = 0,6. \quad (13)$$

6.3. Profil koeficijenata prijelaza topline

Prema brzini vozila, određuju se i profili koeficijenata prijelaza topline α s kočnog diska na okolni zrak. Kočni disk opisujemo kao vertikalnu površinu koja se grije toplinom proizvedenom tijekom kočenja i hladi prisilnom konvekcijom (turbulentnim strujanjem zraka). Toplinski tok izračunat je pomoću brzine bolida koristeći jednadžbe (14) i (15), uz dopunu da je brzina strujanja zraka pomnožena s koeficijentom c_1 za lica (bočne strane) diska, a površine diska okomite na lice diska (Slika 44.) umnoškom koeficijenata $c_1 \cdot c_2$.

$$\alpha_1 = 0,029 \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot Re^{0,8} = 0,029 \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot \left(\frac{v \cdot c_1 \cdot L}{\nu} \right)^{0,8}, \quad (14)$$

$$\alpha_2 = 0,029 \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot Re^{0,8} = 0,029 \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot \left(\frac{v \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot L}{\nu} \right)^{0,8} \quad (15)$$

pri čemu su:

α_1 – koeficijent prijenosa topline 1 [W/(m²·K)],

α_2 – koeficijent prijenosa topline 2 [W/(m²·K)],

λ – toplinska provodnost zraka [W/m·K],

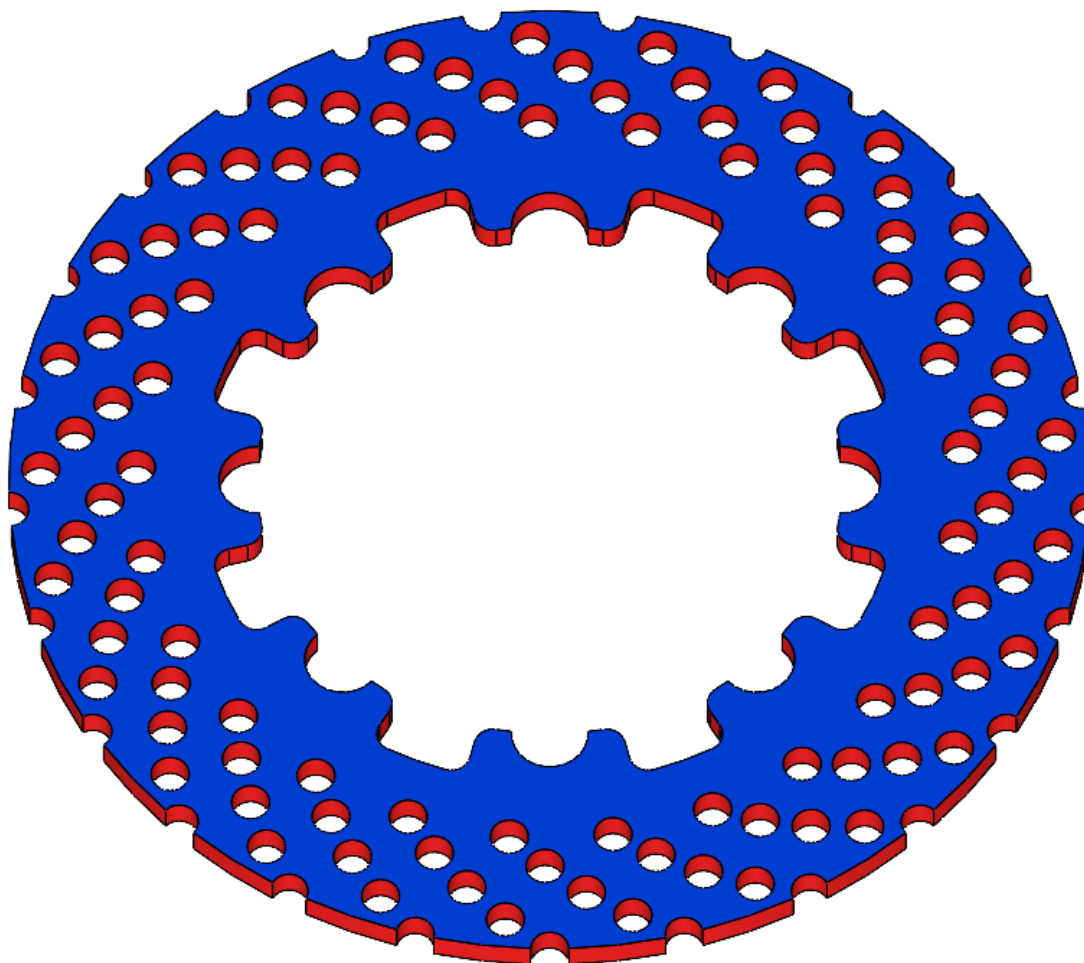
L – duljina hlađene površine [m],

v – brzina bolida [m/s],

c_1 – multiplikator brzine strujanja zraka preko lica diska [-],

c_2 – multiplikator brzine strujanja zraka preko poprečnih površina diska [-],

ν – dinamička viskoznost zraka [Pa·s].



Slika 44. Lice diska (plavo) i površine okomite na lice diska (crveno)

Duljina hladene površine izračunata je kao opseg srednjeg radijusa kočene površine diska umanjena za duljinu dijela opsega prekrivenog kočnim pločicama. λ i v preuzeti su iz Toplinskih tablica [2].

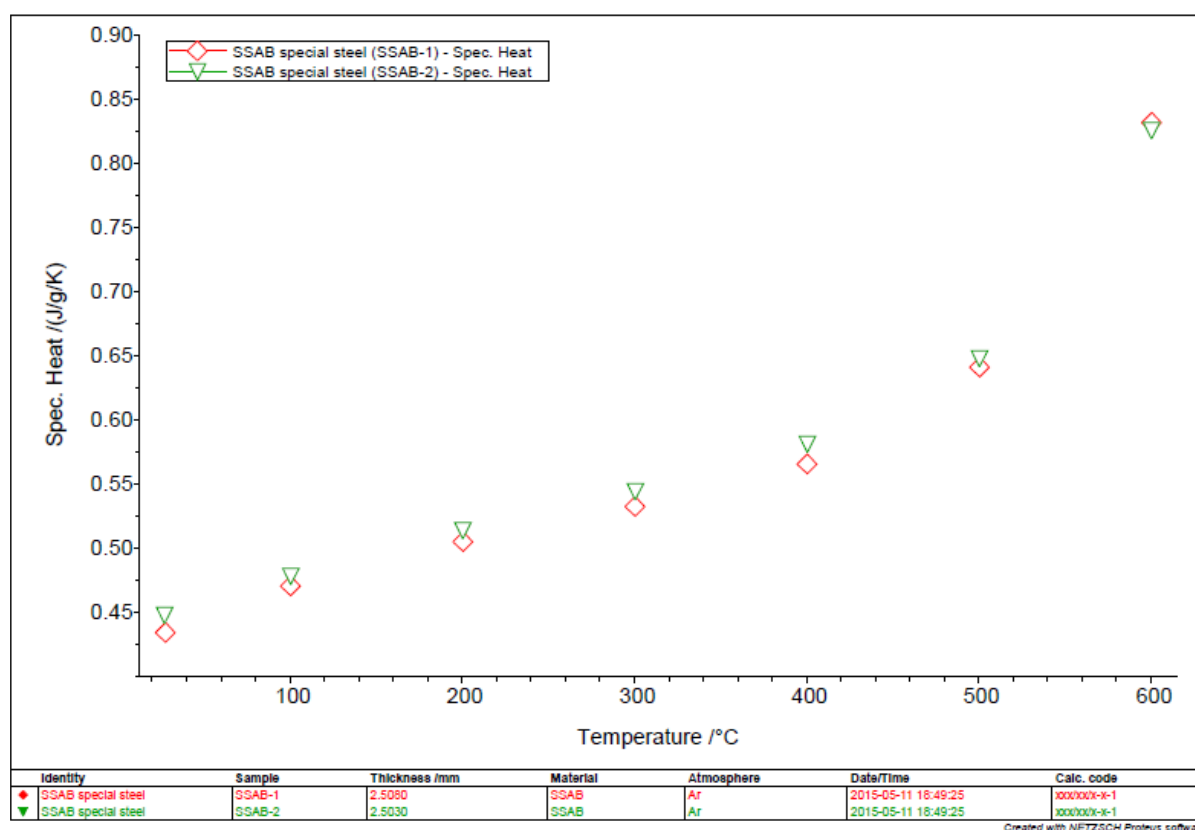
6.4. Podatci o materijalu

Kočni diskovi *VulpesR*-a izrađeni su od Tooloxa 44, rezanjem laserom iz ploče debljine 6 mm te brušeni na debljinu od 5 mm (prednji diskovi) i 3 mm (stražnji diskovi). Podatci o materijalu mogu se pronaći na stranicama proizvođača, SSAB-a [26], a ispisani su u Tablicu 6.

Tablica 6. Svojstva Tooloxa 44

Vlačna čvrstoća R_m	Pri 20 °C	1450 N/mm ²
Vlačna čvrstoća R_m	Pri 200 °C	1380 N/mm ²
Granica tečenja $R_{p0,2}$	Pri 20 °C	1300 N/mm ²
Granica tečenja $R_{p0,2}$	Pri 200 °C	1200 N/mm ²
Tvrdoća po Rockwellu	Pri 20 °C	45 HRC
Toplinska provodnost λ	Pri 20 °C	34 W/(m·K)
Toplinska provodnost λ	Pri 200 °C	32 W/(m·K)
Toplinska provodnost λ	Pri 400 °C	31 W/(m·K)

Među njima se ne nalaze podatci o specifičnom toplinskom kapacitetu ključni za provođenje simulacija. Putem e-maila od dobavljača tog materijala dobiven je dijagram na Slici 45.



Slika 45. Specifični toplinski kapacitet Tooloxa 44

Podatci su ispisani u Tablicu 7.

Tablica 7. Specifični toplinski kapacitet Tooloxa 44

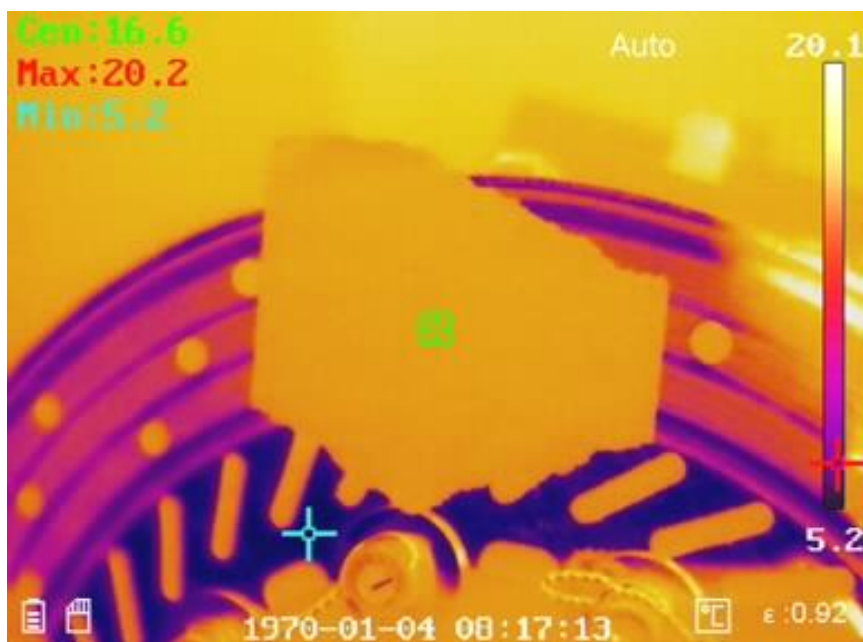
Temperatura, °C	Specifični toplinski kapacitet c , J/kg·K
25	430
100	470
200	505
300	530
400	570
500	640
600	830

Toplinska provodnost se gotovo i ne mijenja s porastom temperature, pa je zbog jednostavnosti korištena konstantna vrijednost $\lambda = 32 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Materijal određuje i ograničenje maksimalne temperature diska. Budući da su čelični, diskovi su toplinski ograničeni, a ne mehaničkom čvrstoćom, čak i pri visokim temperaturama zadovoljavaju zahtjeve čvrstoće. Stoga je za ograničenje temperature odabrana temperatura od 580 °C, što je temperatura popuštanja ovog materijala [26].

6.5. Mjerenje emisijskog faktora ε kočene površine diska

Kako bi se izmjerio nepoznati emisijski faktor kočnog diska, izveden je eksperiment mjerenja temperature površine diska termalnom kamerom uz postavljanje hladnijih i toplijih objekata poznate temperature u odraz površine diska. Krep traka postavljena je na disk i ostavljena dovoljno dugo da i ona dostigne temperaturu diska (Slika 46.). Poznati emisijski koeficijent krep trake od 0,92 mnogo olakšava ovo mjerenje. Na taj način stvarna temperatura diska može lako izmjeriti termalnom kamerom. Objekti postavljeni u odraz površine bile su plastične kutije, budući da plastika grube površine također ima visok emisijski faktor.



Slika 46. Mjerenje temperature diska pomoću termalne kamere i krep trake

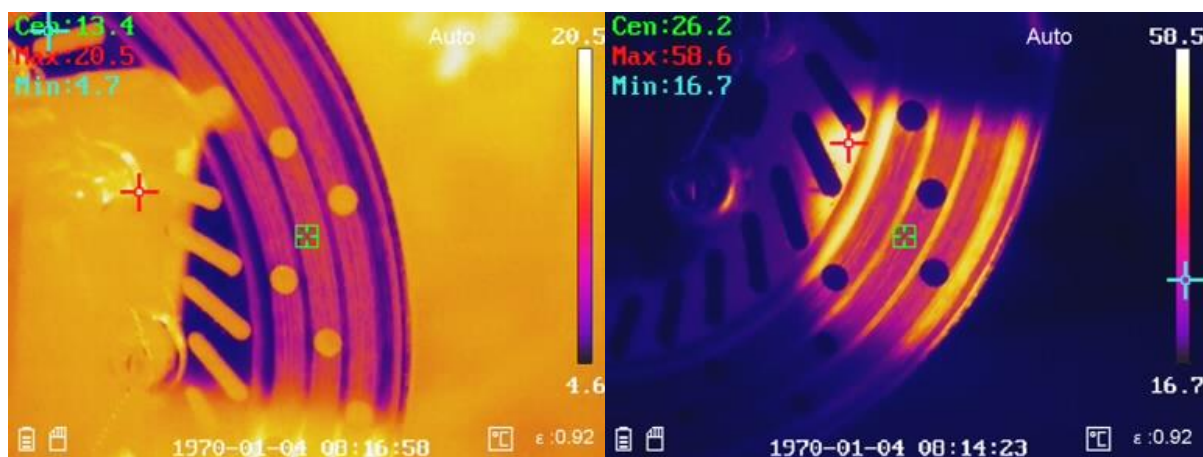
Emisijski faktor kočnog diska *Vulpesa* izmjeren je na kočenim površinama koje po obodu imaju rupe za hlađenje (Slika 47.). Razlog tome je što sve kočene površine *VulpesR*-a imaju rupe po obodu. Izračunato je:

$\varepsilon = 0,7$ – za topao objekt u refleksiji,

$\varepsilon = 0,8$ – za hladan objekt u refleksiji,

(16)

$\varepsilon = 0,75$ – odabrano za daljnje proračune.



Slika 47. Mjerenje temperature kočnog diska s hladnim i toplim objektom u odrazu

6.6. Koeficijent prijelaza topline za prirodnu konvekciju

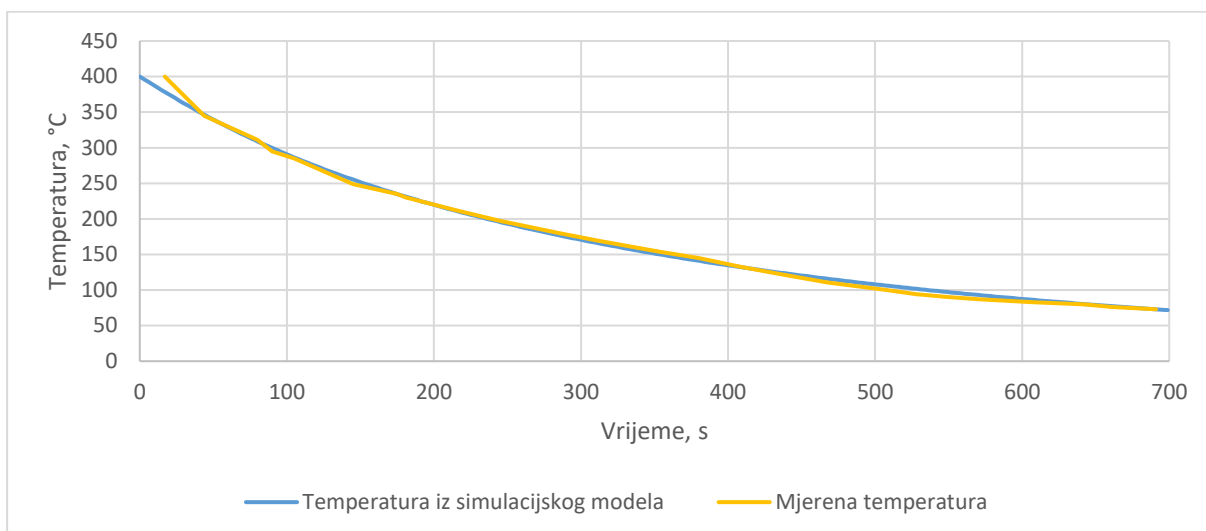
Budući da su postojali periodi u kojima je bolid zaustavljen na oko 45 sekundi tijekom testiranja kad se provodila ova analiza 2020. godine, bilo je potrebno saznati koeficijent prijelaza topline

konvekcijom za prirodnu konvekciju. To je bilo mjereno na način da se disk zagrijavao u pećnici na 400 °C i promatrao nekoliko minuta dok se hladio na mirujućem zraku bez strujanja (Slika 48.). Za taj eksperiment korišten je rezervni disk *Vulpes*-a (s krep trakom zagrijanom s diskom).



Slika 48. Mjerenje temperature diska dok se hladi na mirujućem zraku bez vjetra

Za usporedbu, također su napravljene simulacije u programskom paketu Abaqus i temperature se poklapaju koristeći vrijednost $11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, kao što se može vidjeti iz Slike 49.



Slika 49. Usporedba rezultata simulacije i mjerene temperature tijekom ispitivanja hlađenja diska prirodnom konvekcijom

6.7. Određivanje otpora vožnje

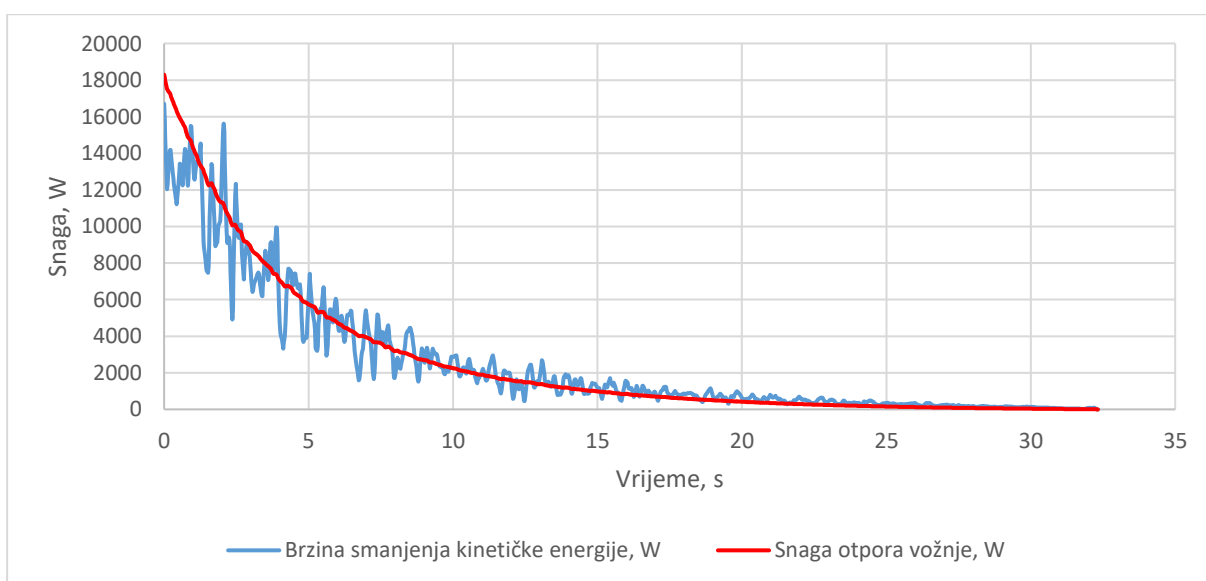
Za precizno određivanje koliki udio kinetičke energije prime kočni diskovi u obliku topline, a koliko se disipira u obliku otpora vožnje, na testiranju bolida provedena je ispitna procedura za njihovo mjerenje. Za potrebe proračuna, aproksimiran je izraz koji opisuje snagu ukupnih otpora u ovisnosti o brzini vožnje (Slika 50.):

$$P_{otp} = 1,026 \cdot v^3 + 6,82 \cdot v^2 + 26,625 \cdot v, \quad (17)$$

pri čemu su:

P_{otp} – ukupna snaga otpora vožnje [W],

v – trenutna brzina bolida [m/s].



Slika 50. Ukupna snaga otpora vožnje u ovisnosti o brzini bolida

7. KALIBRIRANJE SIMULACIJSKOG MODELA PREMA IZMJERENIM TEMPERATURAMA DISKOVA

Glavni cilj ovog simulacijskog modela je da se jako dobro podudara s realnim temperaturama, izmjerenima testiranjem bolida. Razni efekti poput refleksije, rupa na diskovima i šuma u signalu sprječavaju izravnu i jednostavnu usporedbu – mjerenja se prvo trebaju detaljno proučiti i pripremiti za usporedbu s rezultatima simulacijskog modela.

7.1. Pregled mjerenja različitih kanala IC senzora

Temperaturni senzori smješteni su na sva 4 kotača. Mjerali su sa svih raspoloživih 16 kanala frekvencijom od 50 Hz. Zbog sigurnosti senzora, a i raspoloživog prostora u gusto popunjenom sklopu kotača bolida, senzori su smješteni oko 40 mm udaljeni od diskova. Time samo mali broj kanala od 16 zapravo je usmjeren u disk.

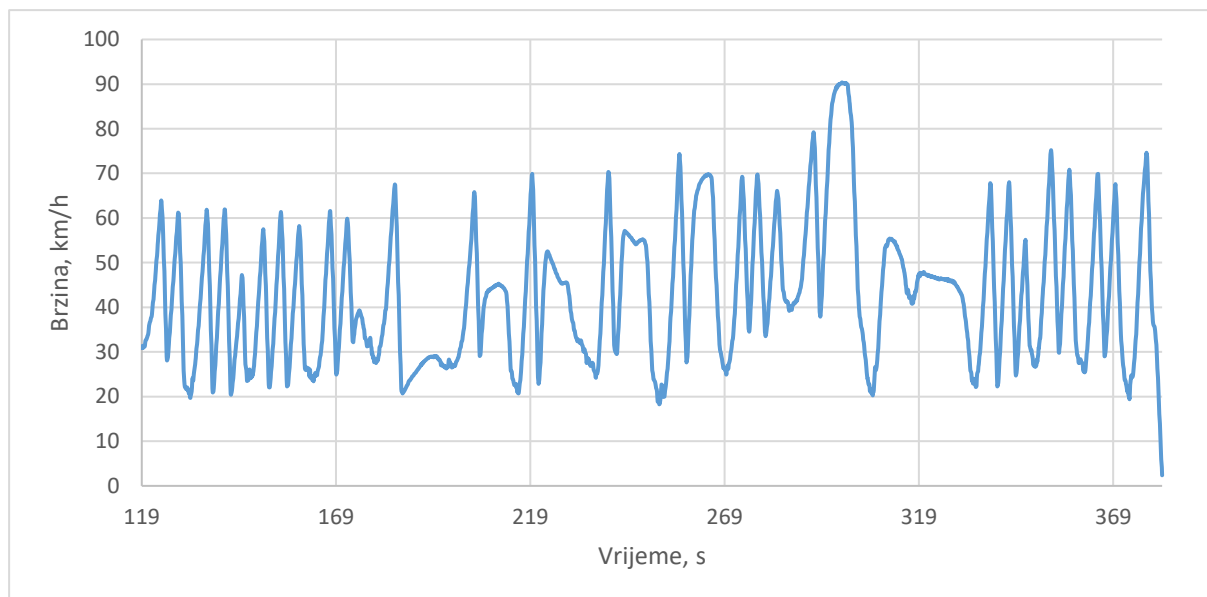
Uz nepreciznosti pri montaži i u samim sensorima, nije moguće iz CAD modela sa sigurnošću odrediti koji kanal senzora mjeri koji dio diska. Za to je potrebno proučiti mjerenje svakog kanala i donijeti zaključke. Popisi kanala i informacije jesu li bili usmjereni u diskove nalaze se u Tablici 8. Na stražnjem lijevom disku, kanal 5 je točno na granici kočene i nekočene površine. Mjerena mu je blago viša temperatura nego kanalima na disku. Na prednjem lijevom disku, kanal 9 pada na unutrašnju stranu diska bez rupa, ali mjerenje se ne razlikuje. Kod stražnjeg desnog diska, kanal 15 ima malo nižu temperaturu od 14, što znači da ne pogađa disk u potpunosti.

Tablica 8. Popis kanala IC senzora prema usmjerenosti prema diskovima

Prednji lijevi disk		Prednji desni disk	
Kočena površina diska izvana prema unutra	Kanali 14, 13, 12, 11, 10, 9	Kočena površina diska izvana prema unutra	Kanali 2, 3, 4, 5, 6
Unutarnja strana diska – bez rupa	-	Unutarnja strana diska – bez rupa	Kanal 7
Stražnji lijevi disk		Stražnji desni disk	
Kočena površina diska izvana prema unutra	Kanali 2, 3, 4, (5)	Kočena površina diska izvana prema unutra	Kanali (15), 14, 13, 12
Unutarnja strana diska – bez rupa	Kanal (5), 6	Unutarnja strana diska – bez rupa	Kanal 11, 10

Kao primjer, prikazana su mjerenja kanala prednjeg desnog diska. Za početak, potrebno je znati profil brzine promatrane procedure, kako bi se smanjenja brzine mogla povezati s povećanjem

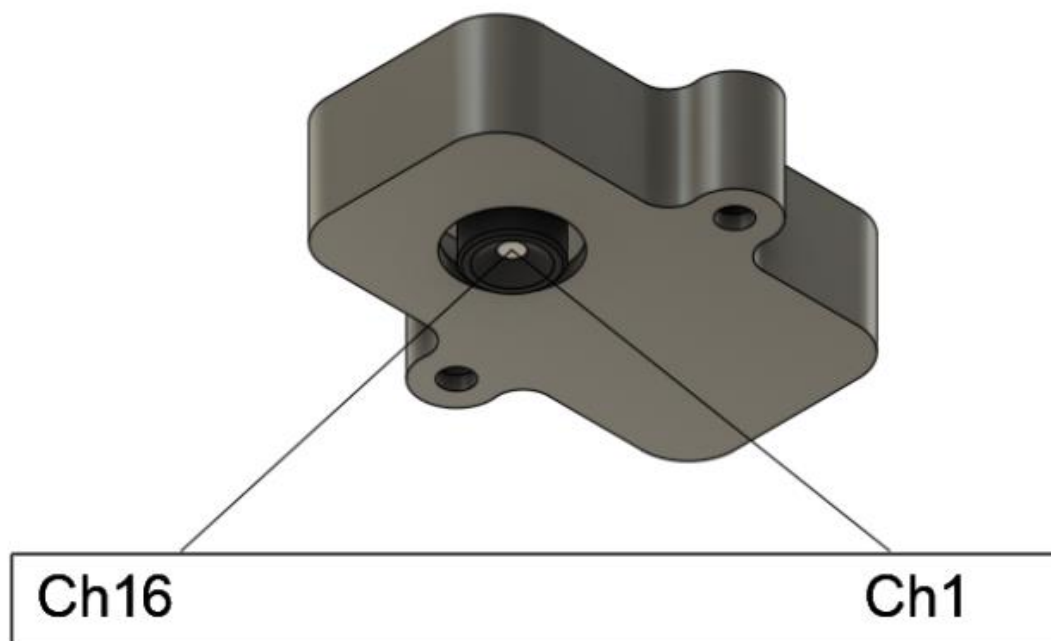
mjerenih temperatura na diskovima. Kao primjer, raščlamba kanala provedena je za ispitnu proceduru 4.1.3 za mjerenje temperature prednjih kočnica, s profilom brzine prema Slici 51.



Slika 51. Profil brzine s ispitne procedure 4.1.3 za mjerenje temperature prednjih kočnica

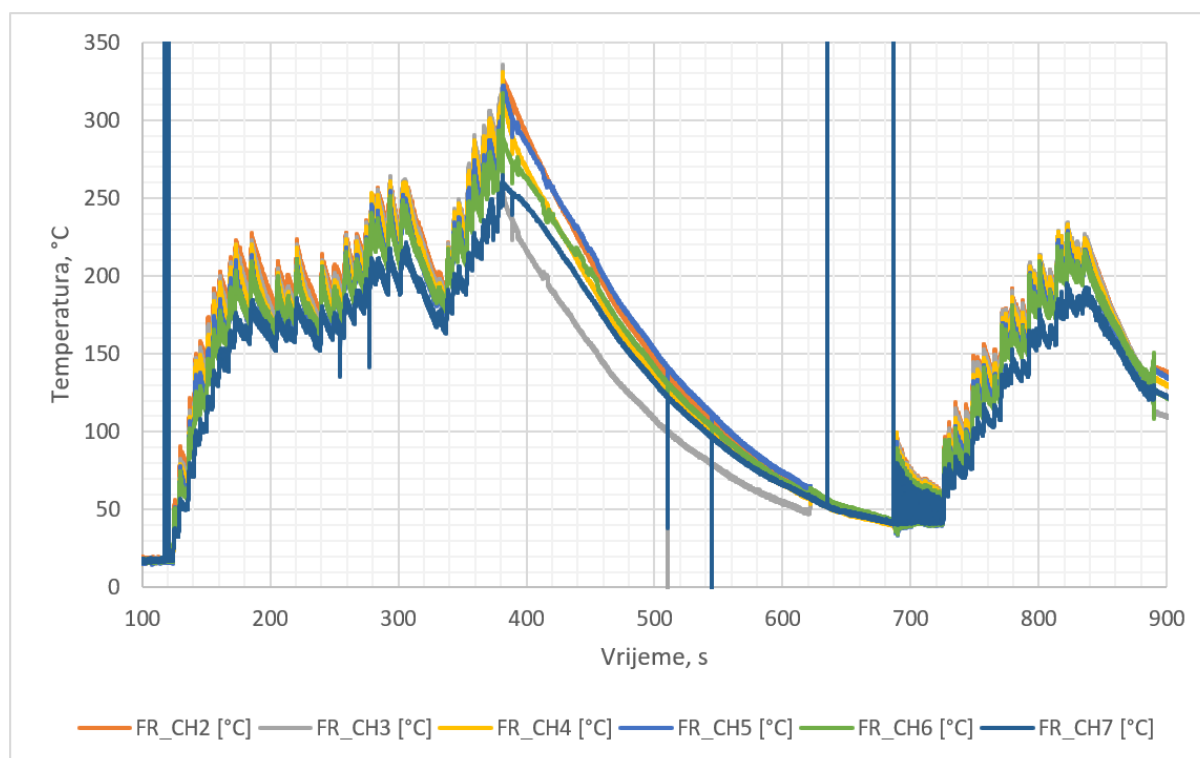
Iz CAD modela sklopa kotača (Slika 25.) i poznavanja raspodjele kanali na IC senzoru (Slika 52.) može se grubo procijeniti koji kanali su usmjereni u disk. Dakle, očekivano je da se mjerenja temperature diska nalaze otprilike na kanalima od 3 do 8. Dijagrami temperatura koje su mjerili ti kanali prikazani su u nastavku. Mjerenja kanala 2 prikazana su na svakom dijagramu kako bi se mogao vidjeti razmjer.

Povremeno su se događale greške u mjerenju zbog kojih se mjerenje naglo promijeni na nerealne vrijednosti (vertikalne linije na dijagramu). Budući da nijedna nije trajala duže od desetinke sekunde, one su zanemarene.



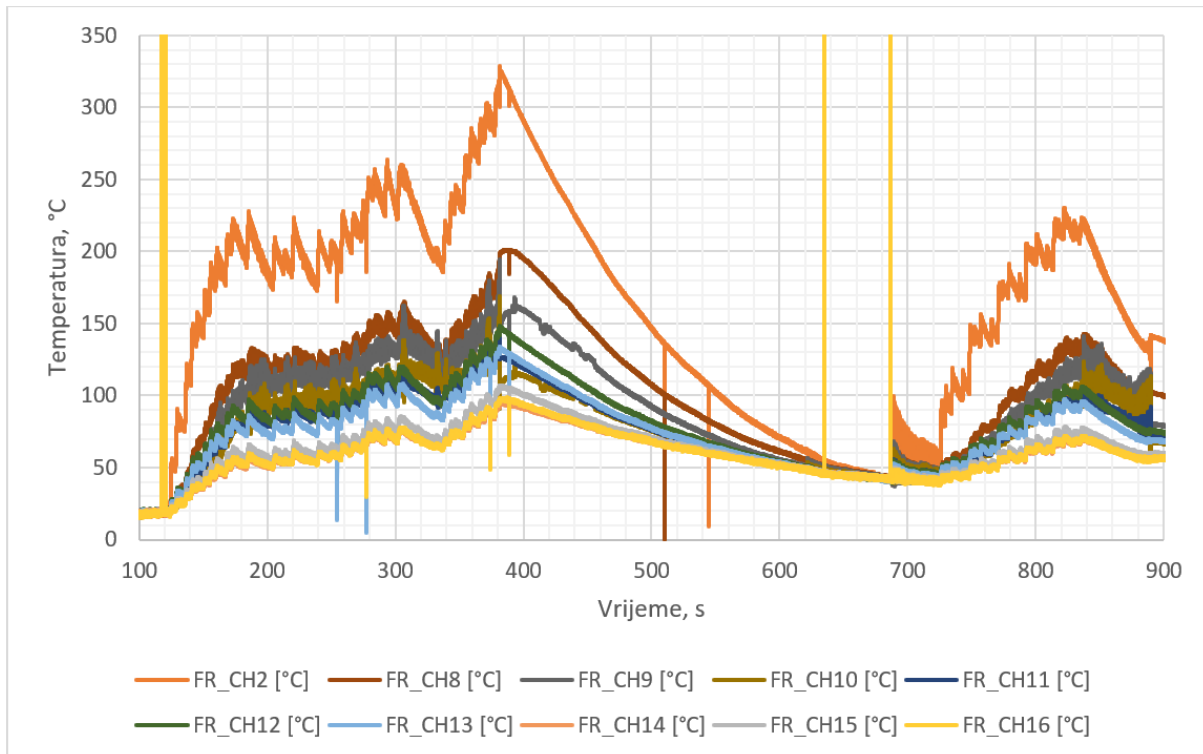
Slika 52. Raspored kanala na IC senzoru [23]

Slika 53. prikazuje kanale 2-7 koji mjere temperature kočenog dijela površine diska.



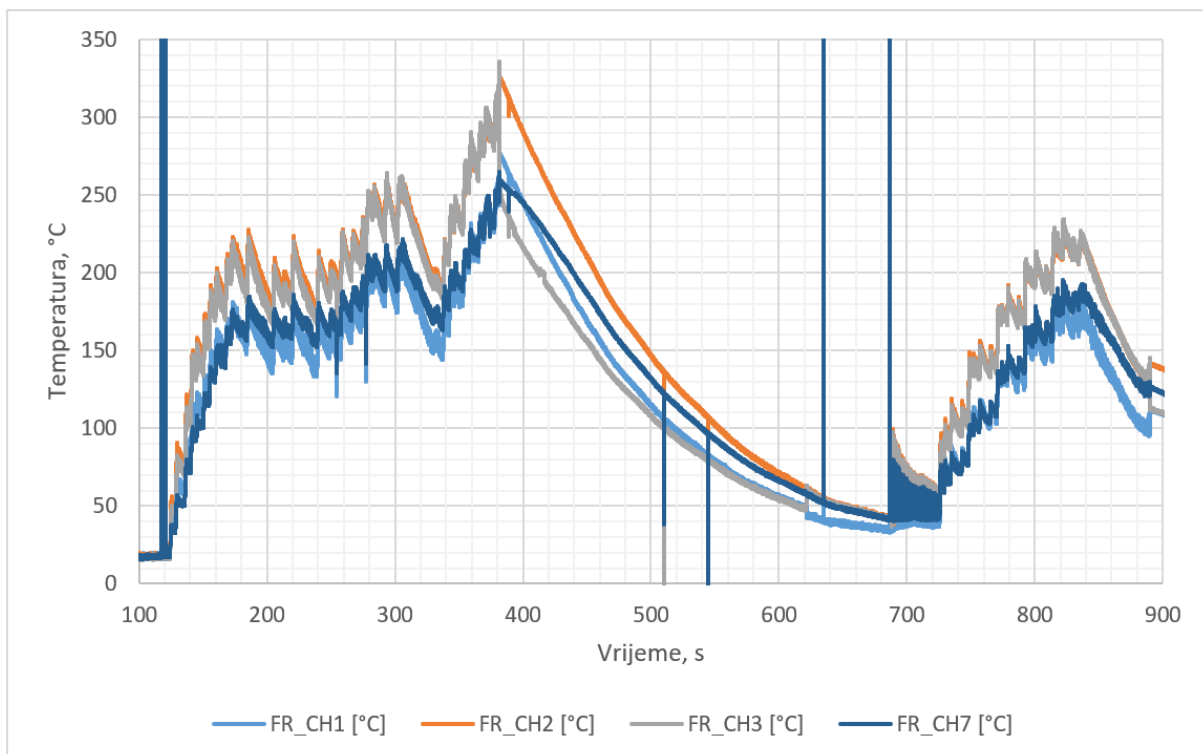
Slika 53. Temperature mjerene kanalima 2-7 na prednjem desnom disku

Kanali 8-16 imaju mnogo manje izmjerene temperature od 2-7 (Slika 54.), što znači da ne mjere kočeni dio površine diska ili ne mjere površinu diska uopće.



Slika 54. Temperature mjerene kanalima 2 i 8-16 na prednjem desnom disku

Kanal 1 bi prema svom položaju iz CAD modela trebao potpuno promašivati disk, ali sudeći po magnitudi mjerenja tog kanala, dio površine koju mjeri zahvaća disk (Slika 55.). Budući da je nemoguće odrediti koliki je to dio, njegova mjerenja ne mogu se iskoristiti.



Slika 55. Temperature mjerene kanalima 1, 2, 3 i 7 na prednjem desnom disku

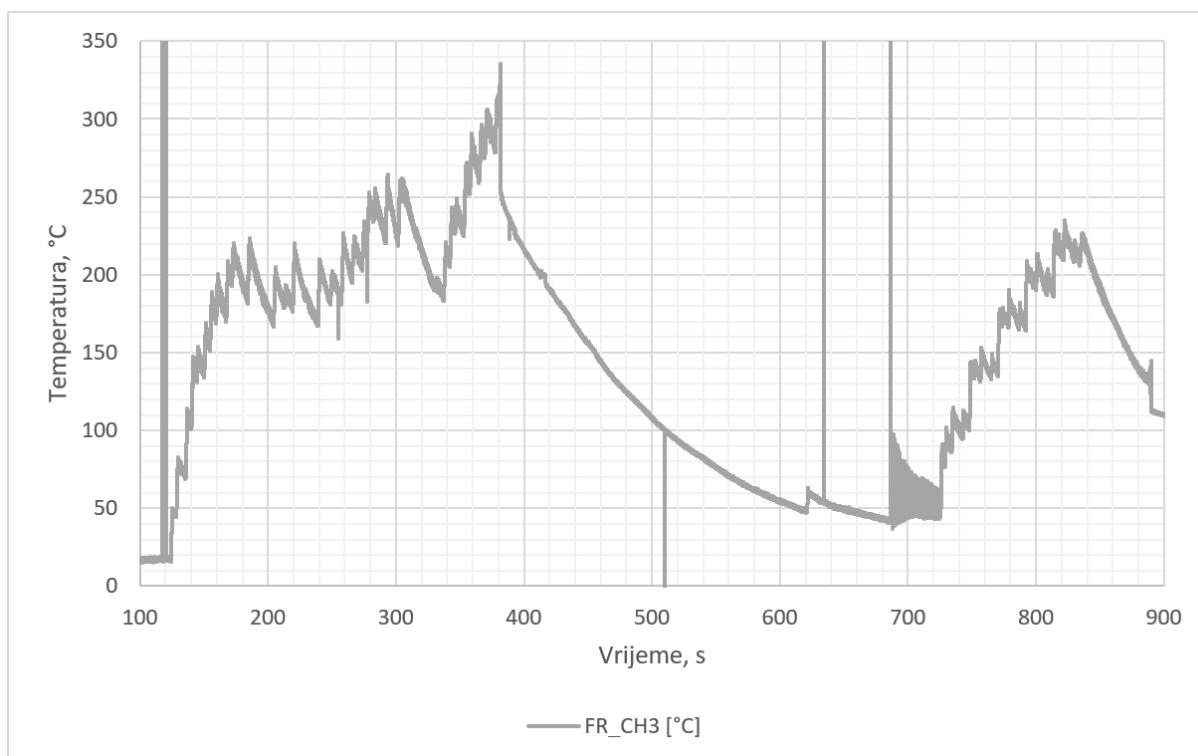
Kanal 7 prema svom položaju u CAD modelu i profilu temperature ukazuje da mjeri rub kočene površine i vjerojatno cijelim vidnim poljem mjeri dio diska koji nema izrezane rupe (Slika 55.). To se može zaključiti prema, u odnosu na ostale kanale koji mjere temperaturu diska, sporije hlađenje nakon zaustavljanja bolida na 380 s – promatrani dio diska prima toplinu od toplijih dijelova diska.

7.2. Utjecaj rupa u disku na izmjerene temperature

Pri detaljnom promatranju mjerenih temperatura, uočene su neke anomalije, za koje je zaključeno da su povezane s rupama koje su izrezane u disku.

7.2.1. Pokazatelji značajnog utjecaja rupa u disku na mjerenje

Kanal 3 IC senzora na stražnjem desnom kotaču pokazuje anomaliju zbog koje mu mjerena temperatura u trenutku zaustavljanja bolida padne s 335 °C na 255 °C, za čak 80 °C (Slika 56.). Zaključeno je da je određeni dio njegovog vidnog polja pri zaustavljanju bolida popunila rupa u disku. Time senzor u tom trenutku dijelom mjeri temperaturu diska, a dijelom temperaturu pozadine.

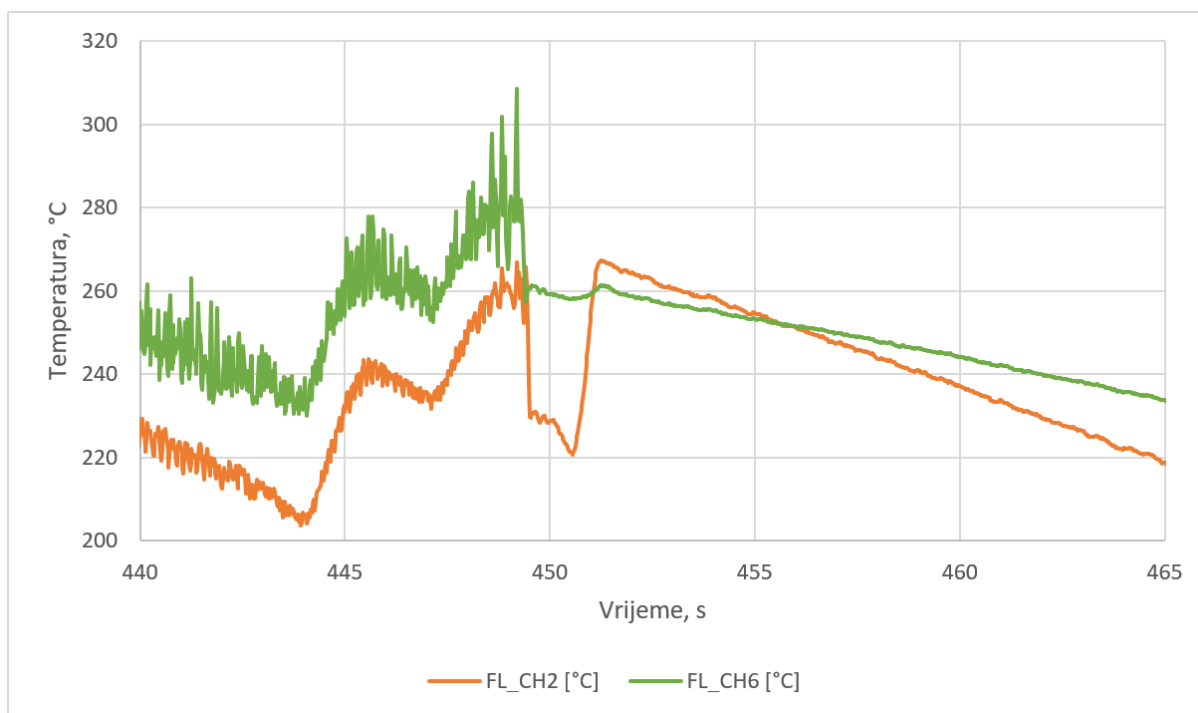


Slika 56. Nagli pad temperature nakon zaustavljanja bolida na 380 s mjeren na kanalu 3 prednjeg desnog IC senzora

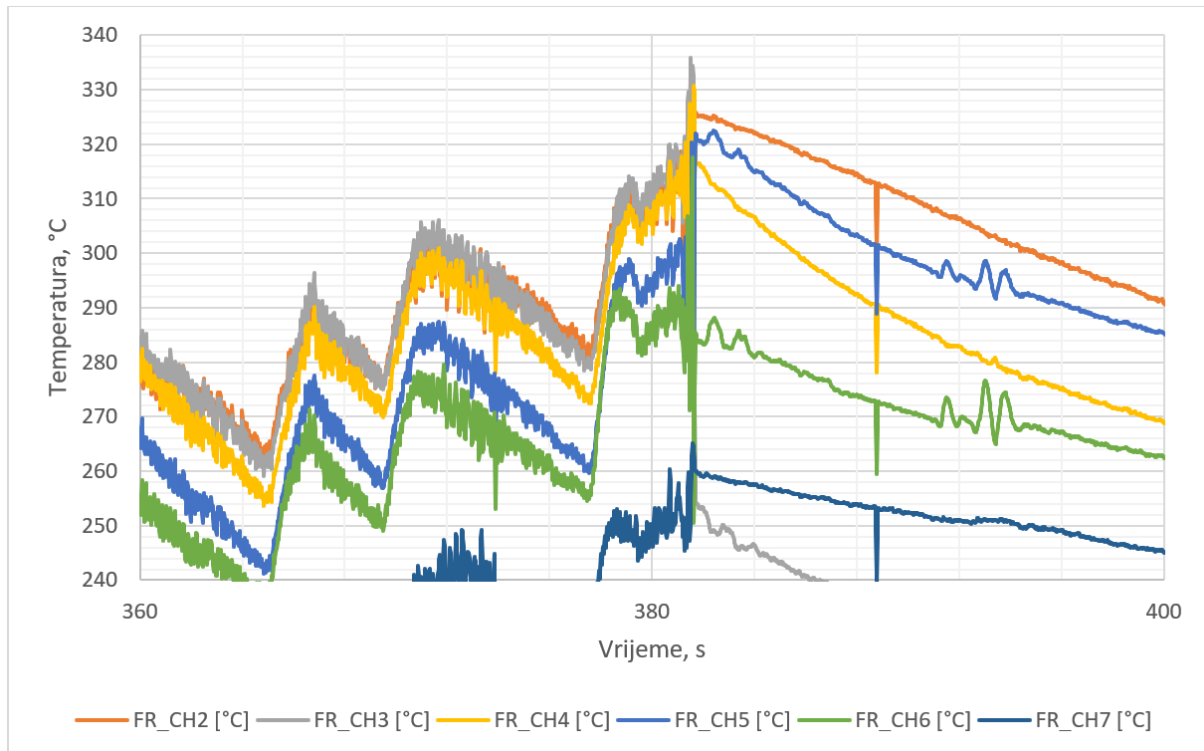
Druga anomalija primijećena je na mjerenju temperature stražnjeg lijevog diska i vidljiva je na Slici 57. Kanal 2 bi prema svom položaju morao u svakom trenutku biti topliji od kanala 6. No

vidimo značajan pad u temperaturi koju mjeri kanal 2, sličan kao na Slici 56., i nakon toga ponovni skok kao reakciju na polagano pomicanje bolida i rotaciju diska u drugačiji položaj. Osim toga, vidimo da senzor nakon zaustavljanja bolida nakon 449 s očitava da se prividno toplija površina diska, koju mjeri kanal 6, zagrijava, a prividno hladnija površina, koju mjeri kanal 2, hladi. Zapravo kanal 6 mjeri površinu diska koja nema na sebi rupe, a kanal 2 mjeri površinu koja ima. Kad bi se rupe uzele u obzir i tijekom vožnje bolida, kanal 2 bi svakako pokazao višu temperaturu nego 6.

Posljednji dokaz da rupe utječu na mjerenje je pojava snažnih oscilacija u mjerenjima pri niskim brzinama vožnje. Kad frekvencija vrtnje kotača postane dovoljno mala u odnosu na frekvenciju mjerenja senzora od 50 Hz, senzor više ne pokazuje „prosječnu“ temperaturu rupa i diska, nego počne prikazivati i temperaturu diska i rupe zasebno u uzastopnim mjerenjima, što se očituje kao oscilacija relativno velike amplitude, vidljiva na Slici 58.



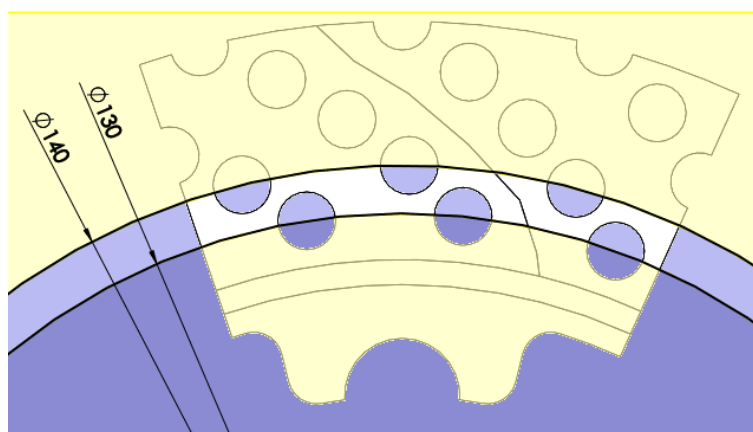
Slika 57. Anomalija na mjerenjima temperatura stražnjeg lijevog diska gdje se temperatura „najtoplijeg“ mjerenja kanala 6 dodatno zagrijava



Slika 58. Pojava oscilacija u mjerenjima temperatura pri niskim brzinama vrtnje kotača

7.2.2. Eksperiment procjene utjecaja rupa na mjerene temperature

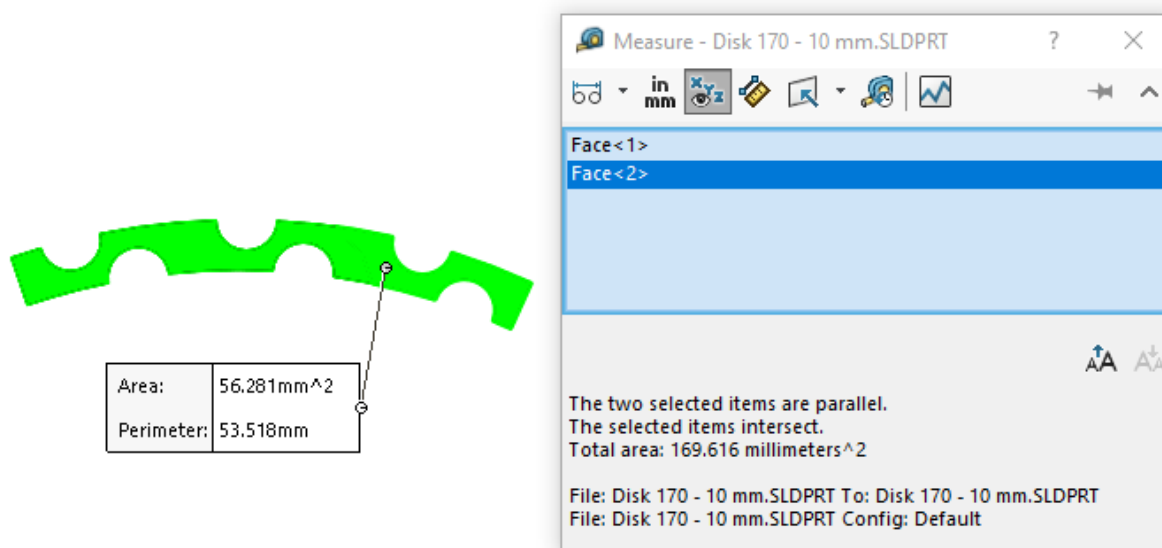
U CAD modelu diskova napravljeni su odrezi u obliku kružnih vijenaca, koji odgovaraju dijelovima diska koje mjeri pojedini kanal senzora. Na odrezanim kružnim vijencima izmjeren je udio površine rupa u mjerenoj površini diska y , kako bi se mogao postaviti izraz za izračun mjerenih temperatura diskova kad ne bi rupe utjecale na mjerenje. Rezultati su na Slikama 59. i 60. te u Tablici 9.



Slika 59. Primjer odreza u obliku kružnog vijenca u CAD modelu diskova za mjerenje udjela površine rupa u mjerenoj površini diska

Tablica 9. Udjeli površine rupa u mjerenoj površini diska za prednji i stražnji disk na kružnim vijencima u vidnom polju IC senzora

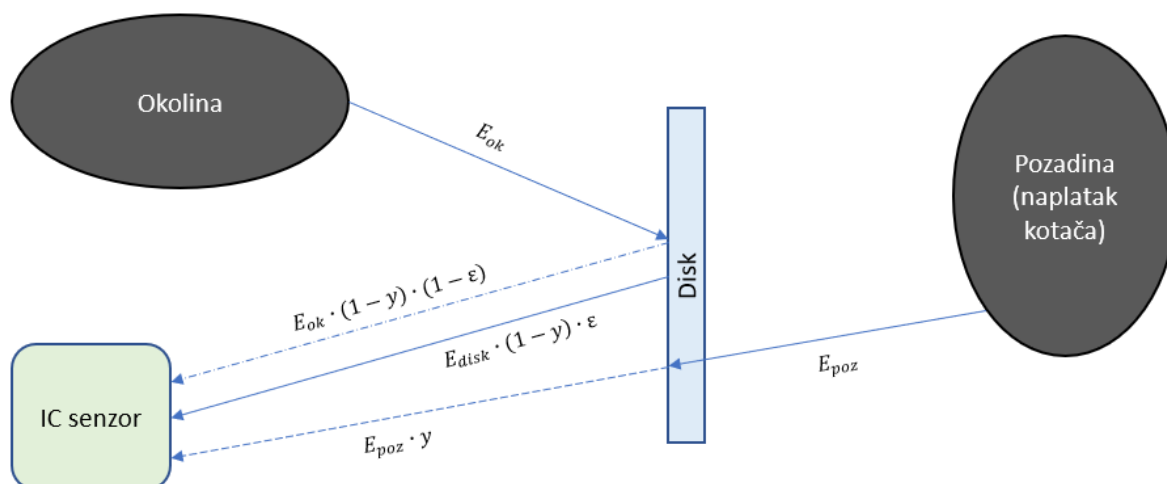
Vanjski promjer diska koji kanal zahvaća	D_v	mm	170	160	150	140
Unutarnji promjer diska koji kanal zahvaća	D_u	mm	160	150	140	130
Površina diska bez rupa na kružnom vijencu	A_{disk}	mm ²	226,2	207,3	188,5	169,6
Udio površine rupa u odnosu na ukupnu površinu vijenca	y	-	0,273	0,290	0,310	0,333
Vanjski promjer diska koji kanal zahvaća	D_v	mm	160	155	150	140
Unutarnji promjer diska koji kanal zahvaća	D_u	mm	150	145	140	130
Površina diska bez rupa na kružnom vijencu	A_{disk}	mm ²	264,4	251,3	238,2	212
Udio površine rupa u odnosu na ukupnu površinu vijenca	y	-	0,348	0,36	0,373	0,4



Slika 60. Primjer mjerenja površine diska na odrezu u obliku kružnog vijenca u CAD modelu diskova za mjerenje udjela površine rupa u mjerenoj površini diska

Zbog jednostavnosti, u daljnjem proračunu korištene su zaokružene prosječne vrijednosti omjera y : 0,3 za prednje diskove i 0,4 za stražnje diskove.

Kako bi se iskoristio odabrani omjer, potrebno je postaviti bilancu energije toplinskog zračenja koju IC senzor primi od sudionika sustava.



Slika 61. Skica sustava za bilancu energije toplinskog zračenja koju primi IC senzor

Iz sheme na Slici 61. vidi se od kojih sudionika i s kojim faktorima IC senzor prima energiju. Postavlja se sustav jednadžbi:

$$E_{senzor} = (E_{disk} \cdot \varepsilon + E_{ok} \cdot (1 - \varepsilon)) \cdot (1 - y) + y \cdot E_{poz}, \quad (18)$$

$$E_i = \sigma \cdot T_i^4, \quad (19)$$

pri čemu su:

ε – emisijski faktor diska, $\varepsilon = 0,75$,

y – udio površine rupa u mjerenoj površini diska [-],

E_i – gustoća toplinskog toka zračenja koju emitira ili primi i -ti sudionik sustava [W/m^2],

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$],

T_i – stvarna temperatura pojedinog sudionika sustava [K],

Uvrštavanjem (19) u (18) i sređivanjem, dobije se:

$$T_{senzor}^4 = (T_{disk}^4 \cdot \varepsilon + T_{ok}^4 \cdot (1 - \varepsilon)) \cdot (1 - y) + y \cdot T_{poz}^4, \quad (20)$$

pri čemu su:

T_{senzor} – temperatura koju mjeri IC senzor [K],

T_{disk} – stvarna temperatura diska [K],

T_{ok} – temperatura okoline, $T_{ok} = 289,15$ K,

T_{poz} – temperatura pozadine [K] – zbog jednostavnosti je pretpostavljeno $T_{poz} = T_{ok}$,

a temperatura T_{senzor} mora se dobiti preračunavanjem izmjerenih temperatura koje je senzor slao kao signale jer u sebi preračunava temperature za jednostavni sustav koristeći emisijski faktor i pretpostavljenu temperaturu pozadine.

$$T_{senzor} = \sqrt[4]{T_{mjerena}^4 + (1 - \varepsilon) \cdot T_{ok,senz}^4}, \quad (21)$$

pri čemu su:

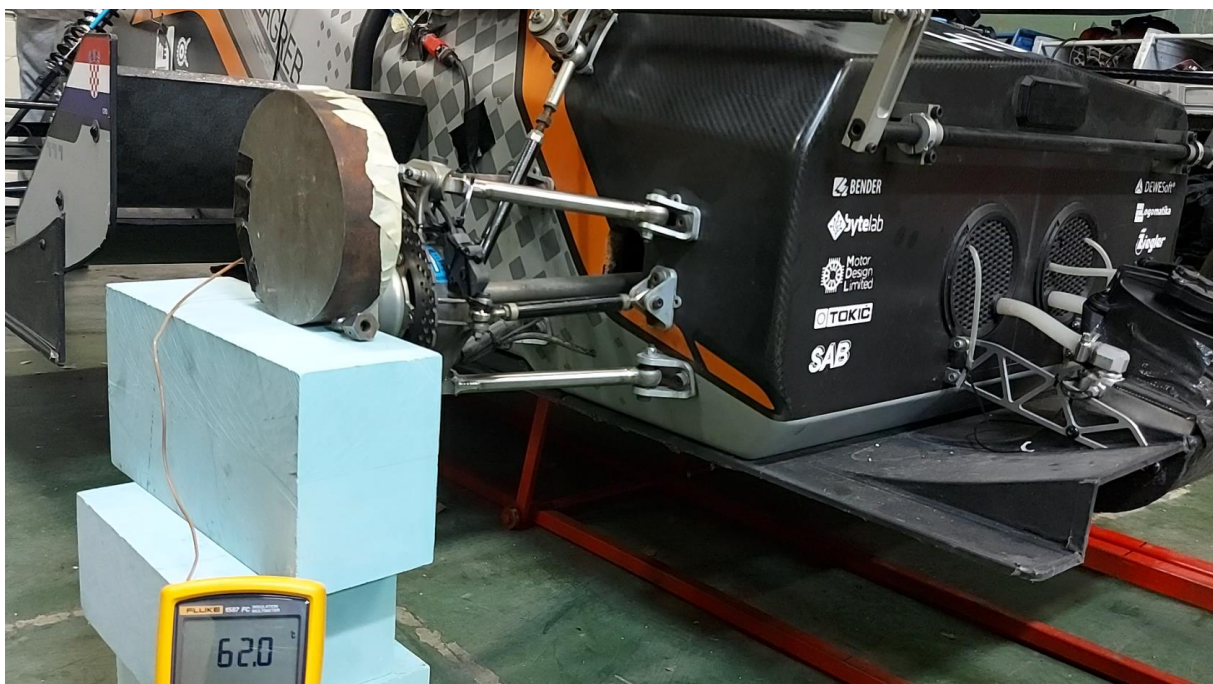
$T_{mjerena}$ – temperatura koju je senzor poslao kao signal, izmjerene temperature [K],

$T_{ok,senz}$ – temperatura okoline koju senzor pretpostavlja [K],

$T_{ok,senz}$ nije napisana u podatcima senzora, ali je iz drugih mjerenja korištenjem termopara zaključeno da je postavljena kao $T_{ok,senz} = 288,15$ K. Konačno, mjerene temperature preračunavaju se u stvarne temperature diska izrazom:

$$T_{disk} = \sqrt[4]{\frac{T_{senzor}^4 - (1 - y) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot T_{ok}^4 - y \cdot T_{ok}^4}{(1 - y) \cdot \varepsilon}}. \quad (22)$$

Kako bi se potvrdio ovaj proračun, izveden je dodatni eksperiment (Slika 62.). Čelični blok zagrijan na 70 °C stavljen je iza diska, dok je IC senzor mjerio temperaturu diska i, kroz rupe u disku, temperaturu zagrijanog čeličnog bloka. Bolid je upaljen i nekoliko puta su se zavrtili kotači na maksimalnu brzinu i pustili da uspore bez kočenja kako bi se dobila potvrda oscilacija viđenima na mjerenjima temperatura diska pri niskim brzinama kotača. Također, tako se temperatura diska zadržala konstantnom tijekom cijelog eksperimenta.



Slika 62. Eksperiment određivanja utjecaja rupa u disku na mjerene temperature

Eksperiment se pokazao iznimno uspješnim jer je dokazao sve pretpostavke:

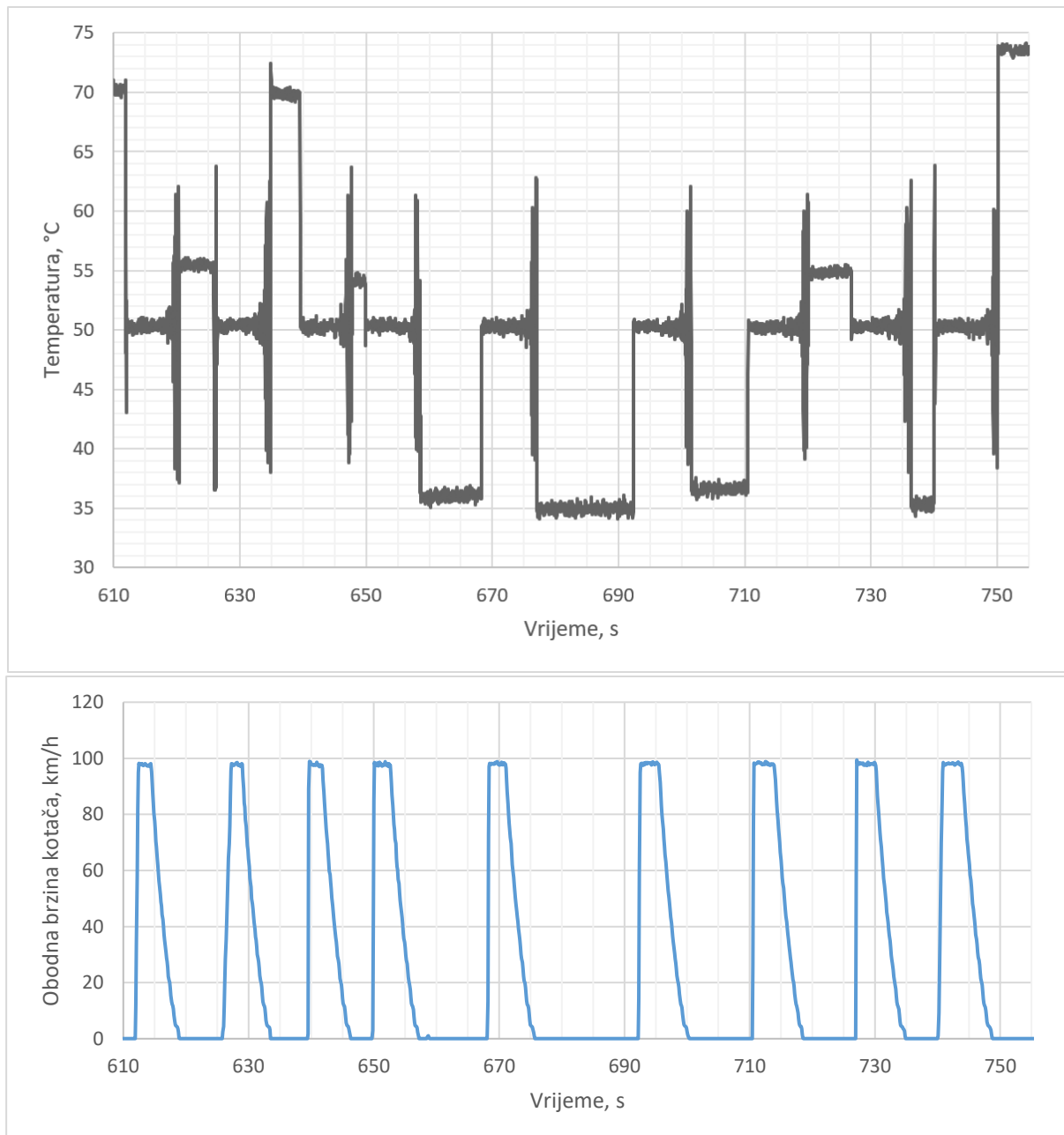
- pojavu oscilacija mjerenih temperatura pri malim brzinama vrtnje kotača,
- ovisnost izmjerenih temperatura o položaju kotača,
- vrijednost faktora y .

Na Slici 63. mogu se vidjeti temperature mjerene tijekom eksperimenta i brzina vrtnje kotača u pojedinom trenutku. Može se vidjeti da pri većim brzinama vrtnje kotača mjerene temperature su stabilne na oko 50 °C (temperatura diska je 23 °C, a bloka oko 60 °C – 50 °C je mjereno jer je senzor preračunavao mjerenje s emisijskim faktorom 0,75). Pri jako malim obodnim brzinama, mjerena temperatura oscilira značajno kako se izmjenjuju u vidnom polju senzora čiste površine diska i površine diska s izrezanim rupama. Kad je brzina vrtnje 0, izmjerene su različite temperature jer se kotač nije uvijek zaustavio u istom položaju.

Koristeći jednadžbu (22) i mjerenja skupljena tijekom eksperimenta, izračunata je vrijednost faktora y na stražnjem disku kao:

$$y = 0,3845, \tag{23}$$

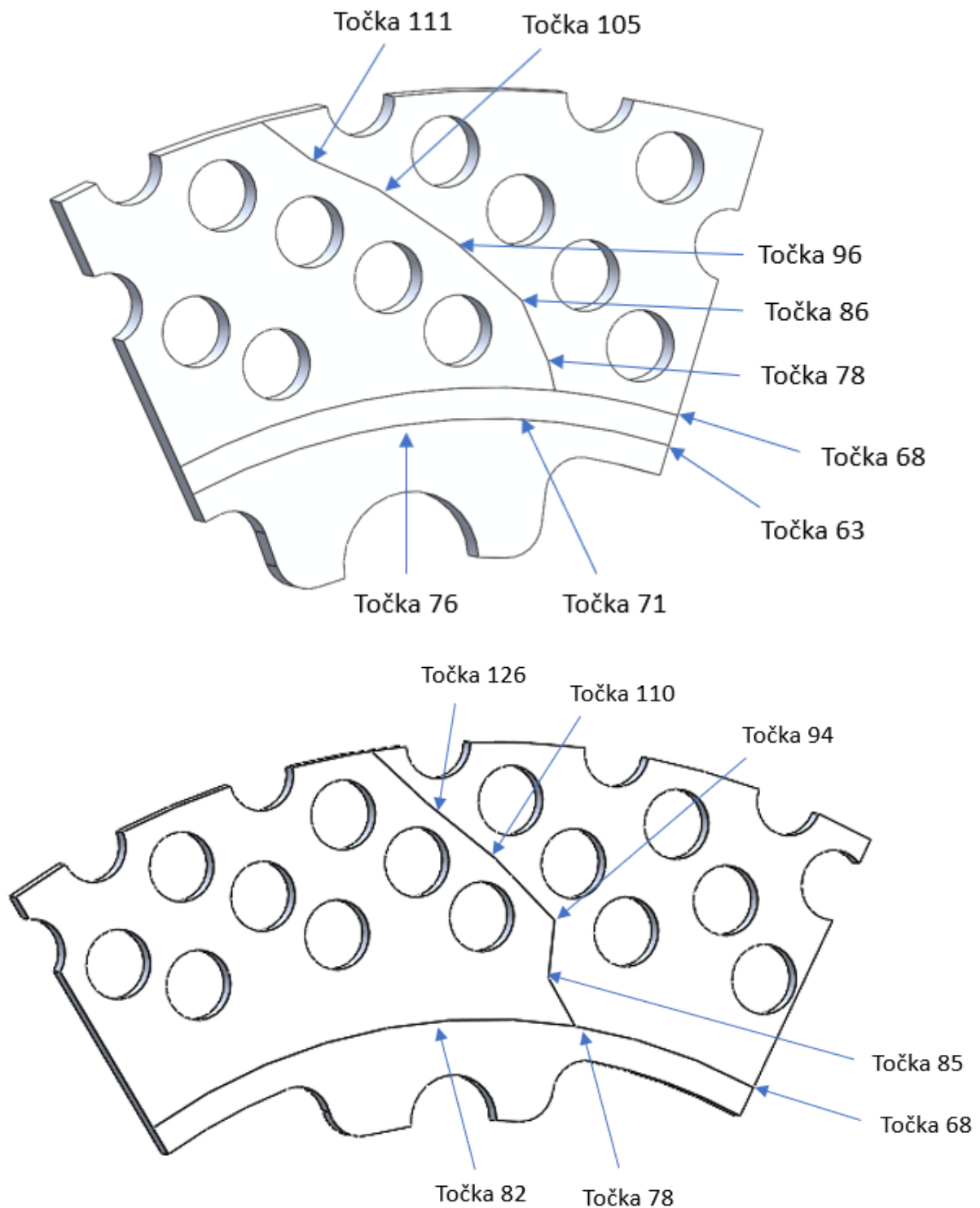
što se poklapa s vrijednostima izračunatim u Tablici 9.



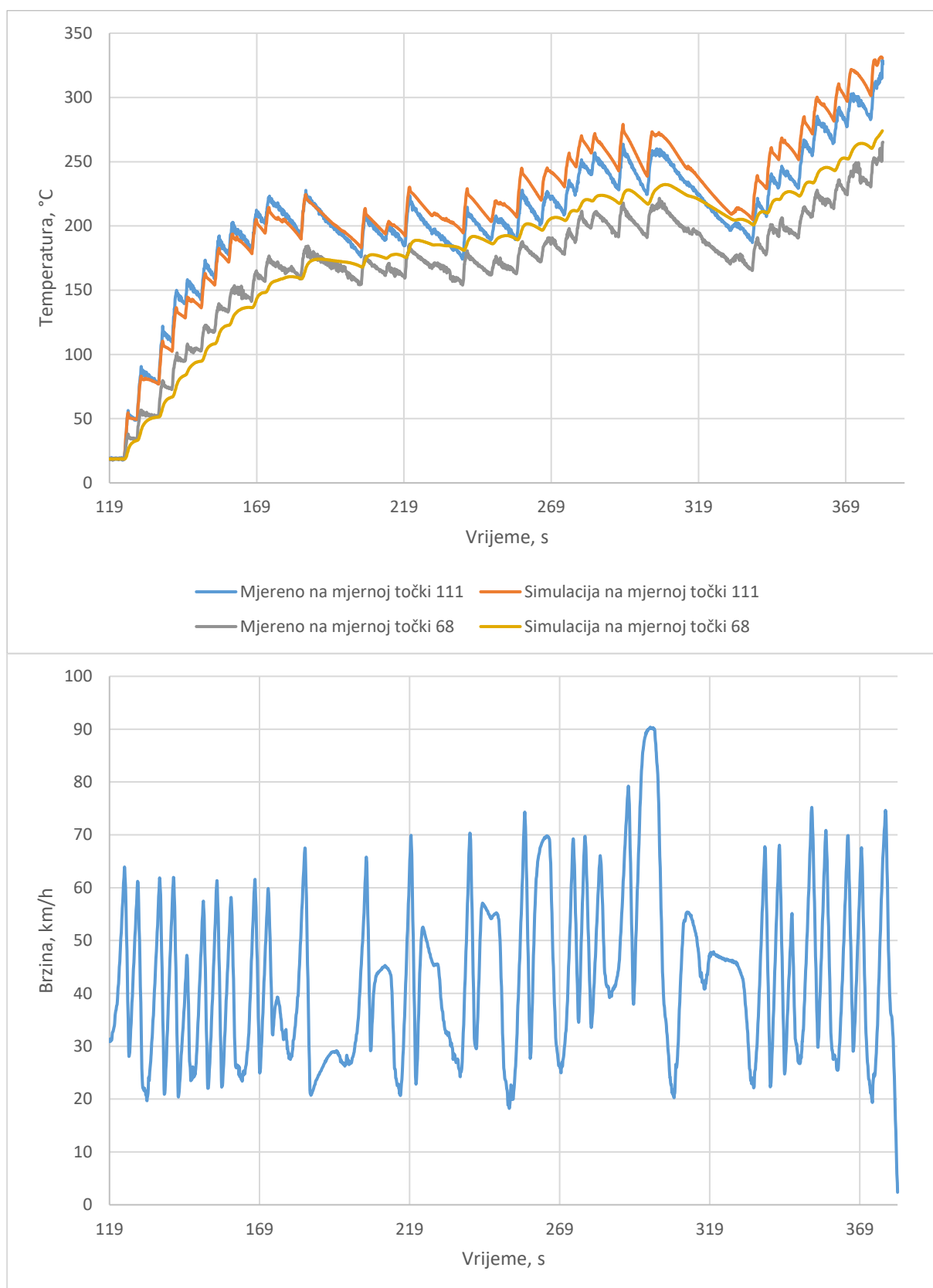
Slika 63. Mjerena temperatura i obodna brzina kotača tijekom eksperimenta određivanja utjecaja rupa u disku na mjerene temperature

7.3. Iteriranje parametara simulacije c_1 , c_2 i p

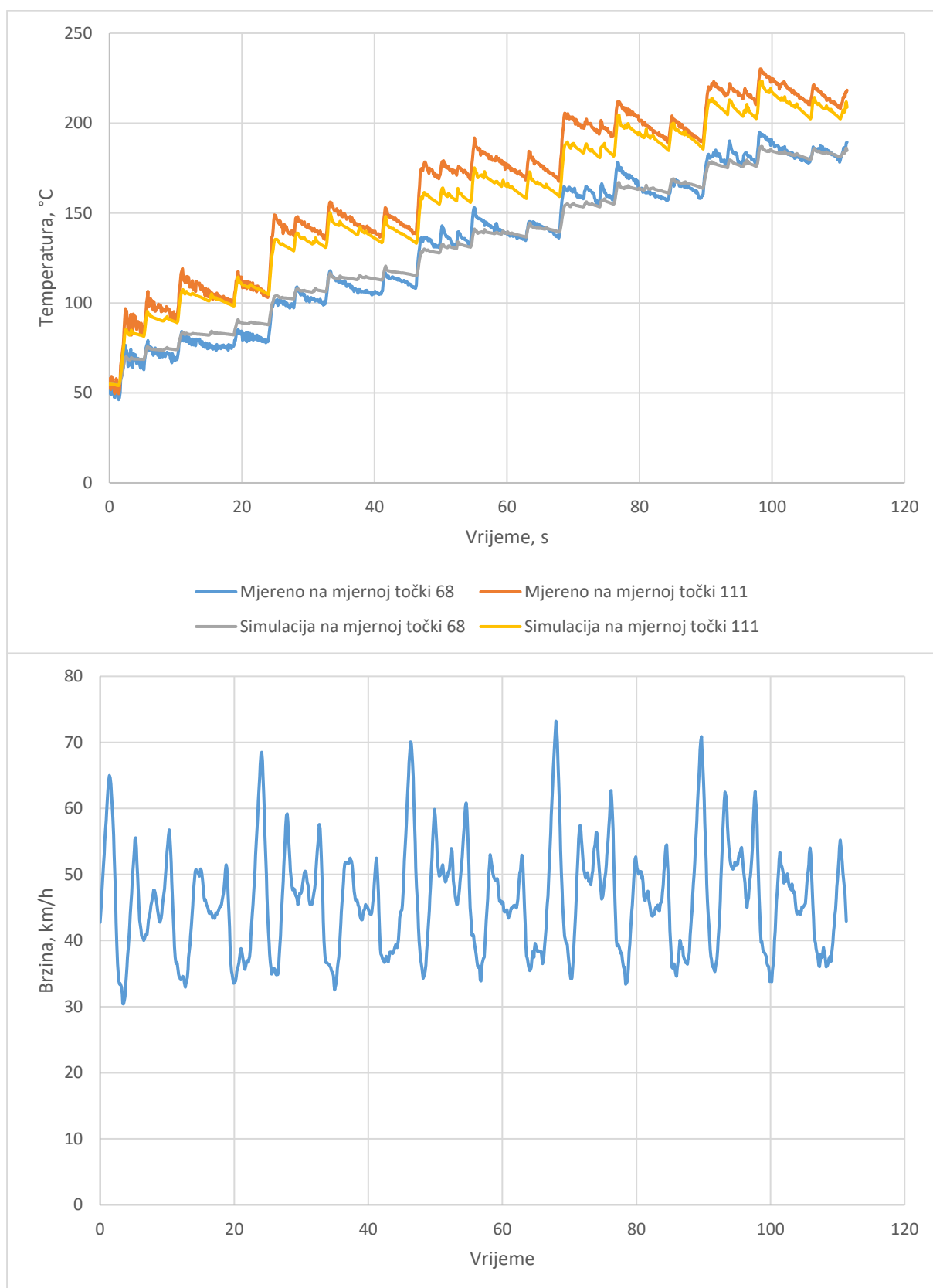
Posljednji nepoznati parametri potrebni za simulacije temperatura diskova prema profilu brzine s bilo koje staze su faktori za množenje brzina strujanja zraka i udio topline sustava kočnja koju primi disk, dok ostatak primaju kočne pločice. Kombinacije koeficijenata iterirane su u simulacijskom modelu dok rezultat nije bio dovoljno blizak mjerenim temperaturama tijekom testiranja bolida. Pritom su se koristile ispitne procedure 4.1.2 i 4.1.3 – Mjerenje temperature stražnjih i prednjih kočnica. U usporedbi, korišteni su nazivi točaka mjerenja prema Slici 64.



Slika 64. Mjerne točke u simulacijskom modelu prednjeg diska (gore) i stražnjeg diska (dolje)
Mjerene temperature i brzine tijekom ispitnih procedura 4.1.3-b) i e) vidljivi su na Slikama 65. i 66. uz temperature dobivene kao rezultate simulacije.



Slika 65. Brzina bolida i podudaranje mjerenih temperatura s rezultatima simulacije ispitne procedure 4.1.3 – Mjerenje temperature prednjih kočnica b) „Kočenje i krstarenje“



Slika 66. Brzina bolida i podudaranje mjerenih temperatura s rezultatima simulacije ispitne procedure 4.1.3 – Mjerenje temperature prednjih kočnica e) „Autocross“

Za prednje kočnice odabrane su vrijednosti koeficijenata kojima su postignuti rezultati na Slikama 65. i 66., a oni iznose:

$$c_1 = 4,$$

$$c_2 = 4, \tag{24}$$

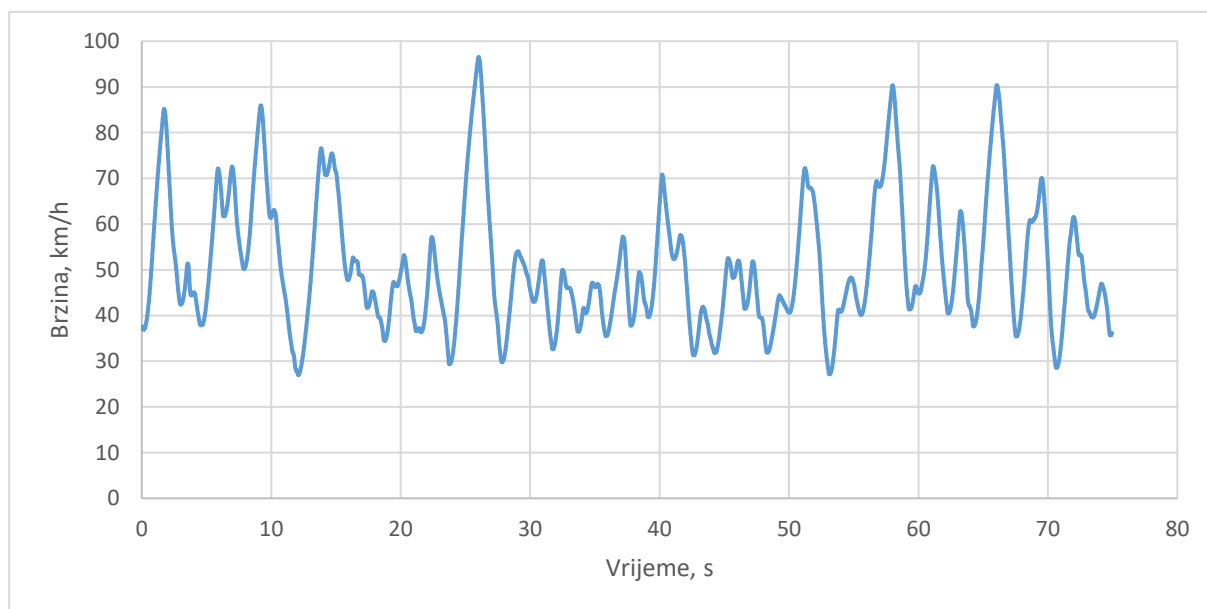
$$p = 0,5.$$

8. TRANZIJENTNA TOPLINSKA SIMULACIJA KOČNIH DISKOVA PREMA PROFILU BRZINE ODABRANE TRKAĆE STAZE

Sad kad su definirani svi ulazni podaci za simulacijski model, mogu se provoditi toplinske simulacije temperatura diskova prema unesenom profilu brzine.

8.1. Određivanje debljine diskova prema simulaciji utrke izdržljivosti

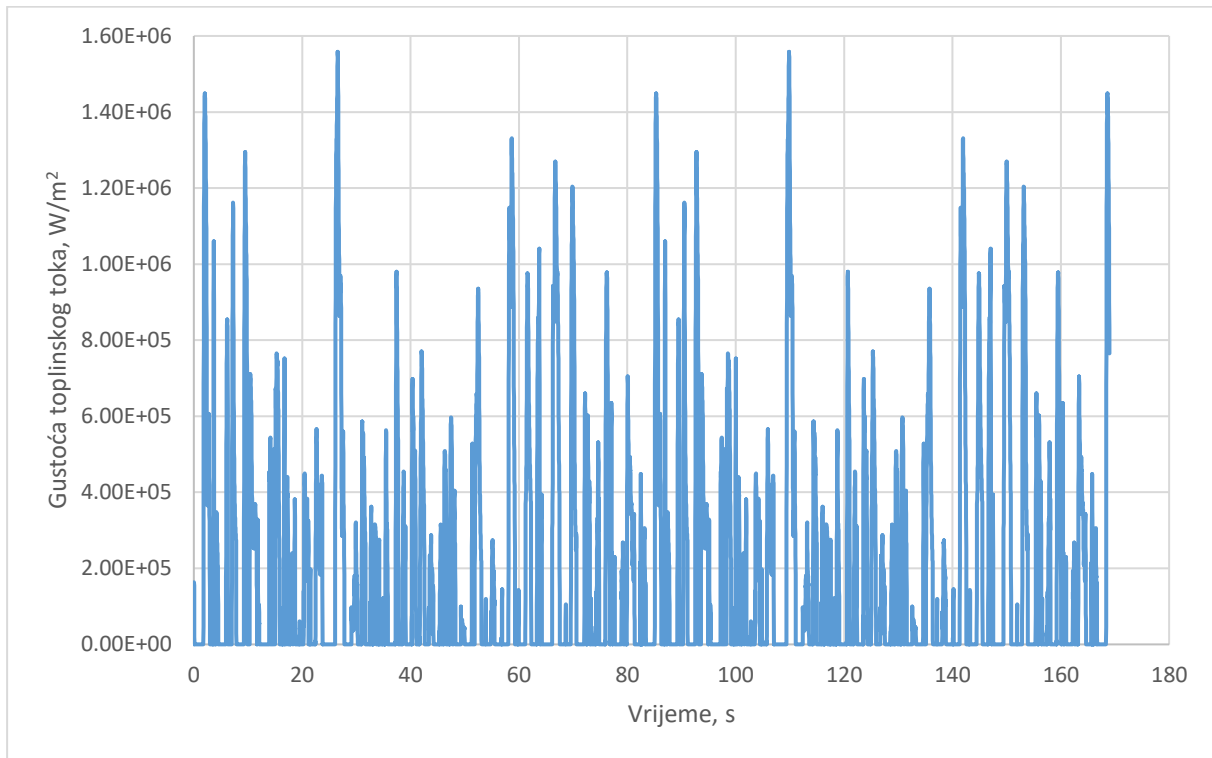
Diskovi bolida FSB-RT07 bit će dimenzionirani prema 2 kruga staze natjecanja FS Germany s tempom Autocrossa (maksimalna snaga). Podaci o brzini tijekom kruga dobiveni su od podtima Dinamika vozila FSB Racing Team-a. Profil brzine Autocross staze FS Germany prikazan je na Slici 67.



Slika 67. Profil brzine bolida tijekom jednog kruga staze FS Germany

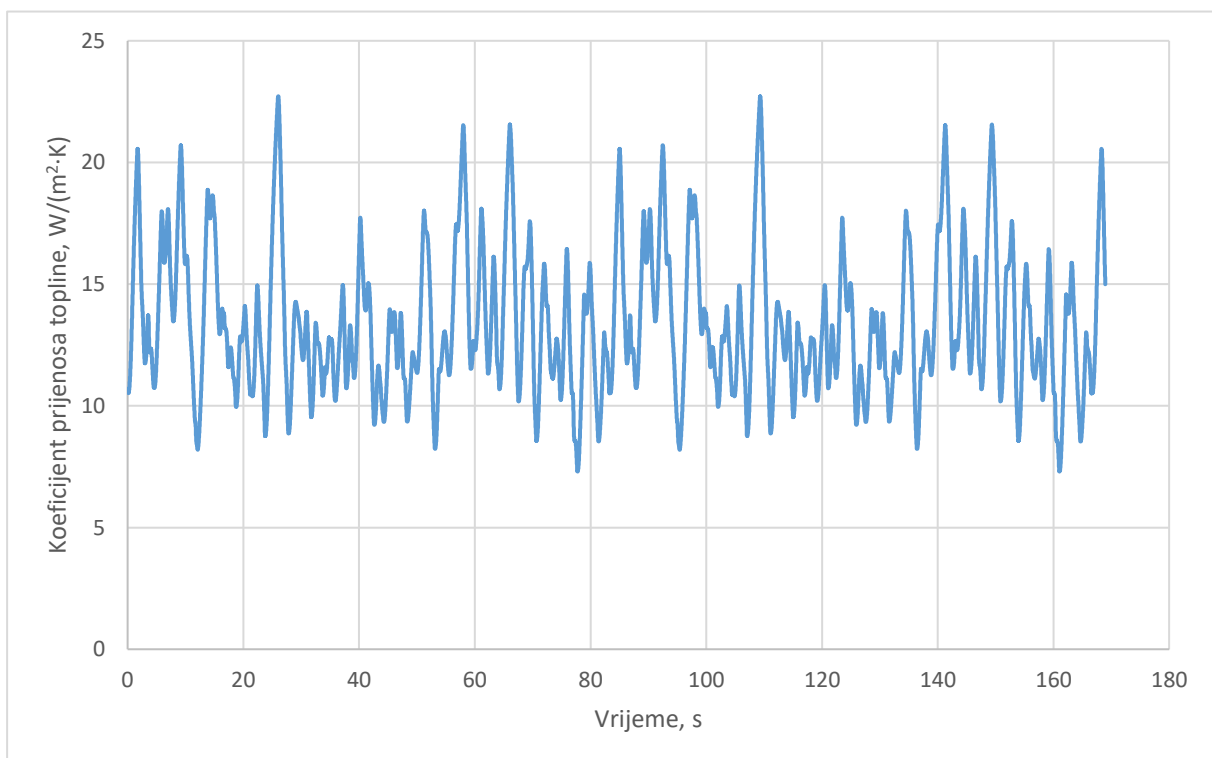
2 kruga su odabrana su jer su dovoljno duga da vršne temperature diskova konvergiraju na bazi kruga – u 3. krugu, vršna temperatura bila bi jednaka.

Gustoća toplinskog toka koja zagrijava diskove, a prije toga množi se s koeficijentom $p = 0,5$ prikazana je na Slici 68.



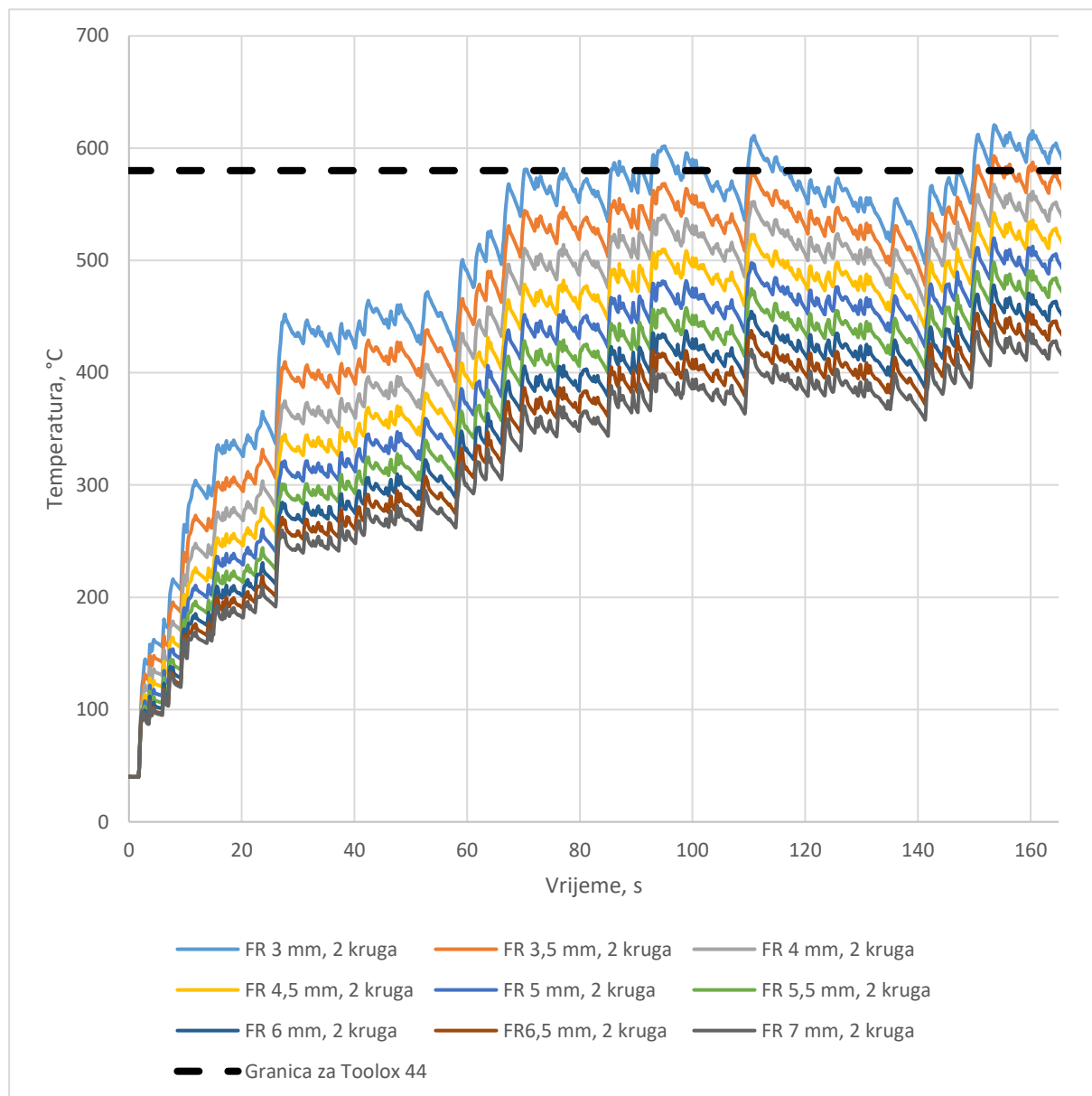
Slika 68. Profil gustoće toplinskog toka prednjih diskova na 2 kruga staze FS Germany

Posljednji ulazni podatak za simulacijski model je profil koeficijenta prijenosa topline, a vidljiv je na Slici 69. Na lice diska djeluje pomnožen koeficijentom $c_1 = 4$, a na sve površine okomite na lice diska pomnožen s $c_1 \cdot c_1 = 4 \cdot 4$.



Slika 69. Profil koeficijenta prijenosa topline na 2 kruga staze FS Germany

U konačnici provedena je analiza osjetljivosti maksimalne temperature prednjih diskova na njihovu debljinu. Na Slici 70. prikazane su maksimalne temperature za simulaciju vožnje 2 kruga s debljinama diskova od 3 do 7 mm, s korakom od 0,5 mm.



Slika 70. Utjecaj debljine diskova na njihovu maksimalnu temperaturu na 2 kruga staze FS Germany

Dodatno je ucrtano ograničenje Tooloxa 44, materijala od kojeg su izrađeni diskovi. Na 580 °C počinje popuštanje, što znači da mu slabe mehanička svojstva. Sa Slike 70. vidimo da diskovi debljine 3 i 3,5 mm u ovom slučaju ne bi zadovoljili, dok bi ostali zadovoljili s većom ili manjom sigurnošću.

9. ZAKLJUČAK

U bilo kojem vozilu, a osobito trkaćem, kočnice su sustav koji mora biti beskompromisno pouzdan. Sigurnost je uvijek prvi prioritet. Nakon što se osigura ispunjenje tog nultog prioriteta, sasvim je u redu posvetiti se sljedećim prioritetima.

Tijekom razvoja trkaćeg vozila, sljedeći prioriteti su često kontradiktorni sa sigurnošću. Za postizanje napretka u takvom području, potrebno je imati pažljiv pristup i obraćati mnogo pozornosti na detalje kako bi postignuti napretci ostali u granicama sigurnosti. Nit vodilja ovog rada upravo je ta: detaljno su analizirani svi efekti i problemi koji su došli ususret da bi se doneseni zaključci mogli primijeniti s pouzdanjem.

Termodinamički uvjeti rada kočnih diskova izuzetno su složeni. Sve pojave su potpuno tranzijentne i nemoguće ih je analitički izračunati ili procijeniti. I numeričkim pristupom teško je doći do pouzdanih rezultata. Zato je najjednostavniji, ali i najpouzdaniji način, osloniti se na eksperimentalna ispitivanja i mjerenje svega potrebnog za analizu.

Mjerenje temperatura već je i samo po sebi složen problem. Kontaktno mjerenje temperature unosi nepreciznost u sustav jer i samo postaje sudionikom sustava. Osim toga, ponekad je i neprimjenjivo. Beskontaktno mjerenje s druge strane može biti izdvojeno iz sustava i prikupljati podatke kao promatrač, no pritom je potrebno imati znanje i iskustvo za suočavanje s preprekama i problemima koji nastaju u pokušaju beskontaktnog mjerenja. Mnogo ih je nastalo tijekom rada na ovom projektu, a da nisu bili na vidiku na početku projekta. Otvorenost prema novim znanjima i iskustvima pogonili su ovaj projekt do završetka, a ustrajnost je bila ključna da ništa ne zakoči postizanje rješenja ijednog problema.

Odabrana kombinacija analitičkog proračuna, mjerenja i računalnih simulacija pokazala se jako učinkovitom za rješavanje ovog problema u relativnom kratkom roku. Efekti koje je teško dobiti računalnom simulacijom, aproksimirani su analitičkim izrazima i sve zajedno kalibrirano je prema realnim mjerenjima. Dobiveni rezultati dobro se poklapaju s mjerenjima i dovoljno su pouzdani da se s povjerenjem mogu primijeniti doneseni zaključci u vidu debljina kočnih diskova odabranih za trkaći automobil u razvoju te donijeti priželjkivane prednosti smanjenjem mase i inercije ove komponente, jedne od mnogih koje čine fascinantnu cjelinu – trkaći automobil.

LITERATURA

- [1] The SIMULIA Blog: Effective Brake Cooling is Critical for Safety (2020.).
URL: <https://blogs.3ds.com/simulia/effective-brake-cooling-critical-safety/>
- [2] The history of car brakes
URL: <https://herthundbuss.com/en/industry-more/the-history-of-car-brakes/>
- [3] Nicolas-Joseph Cugnot
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas-Joseph_Cugnot#First_automobile_accident
- [4] Hitting the Brakes: A History of Automotive Brakes
URL: <http://www.secondchancegarage.com/public/history-of-automotive-brakes-1.cfm>
- [5] Brake Operating Systems (Automobile)
URL: <https://what-when-how.com/automobile/brake-operating-systems-automobile/>
- [6] Facts about Car- First fabrication in the History
URL: <http://firstfactz.blogspot.com/2013/12/facts-about-car-first-fabrication-in.html>
- [7] Proslava 70. rođendana legendarnog modela: Jaguar C-type se pridružuje obitelji Continuation modela
URL: <https://www.tportal.hr/autozona/clanak/foto-video-proslava-70-rodendana-legendarnog-modela-jaguar-c-type-se-pridruzuje-obitelji-continuation-modela-foto-20210128>
- [8] Anti-lock braking system
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Anti-lock_braking_system
- [9] Drum Brakes
https://www.akebono-brake.com/english/product_technology/product/automotive/drum/
- [10] Drum brake
URL: https://www.wikiwand.com/en/Drum_brake
- [11] Tehnika motornih vozila; Pučko otvoreno učilište Zagreb, 2004.
- [12] Disc Brakes
URL: https://www.akebono-brake.com/english/product_technology/product/automotive/disc/
- [13] Konstrukcija vozila – kočnice (prezentacija); Lulić, Šagi, Ormuž

- [14] Skica fiksnih i plutajućih kliješta, URL:
https://www.google.com/search?q=floating+caliper+fixed&tbm=isch&ved=2ahUKEwjnuOWHi671AhVOnKQKHbQoA1wQ2-cCegQIABAA&oq=floating+caliper+fixed&gs_lcp=CgNpbWcQAzIGCAAQCBAeMgYIABAIEB4yBggAEAgQHjoHCCMQ7wMQJzoECAAQEzoICAAQBxAeEBM6BggAEB4QEzoICAAQBRAeEBNQPwJYowtg7gtoAHAAeACAAVGIAacDkgEBNpgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&scient=img&ei=0cTfYaeMLc64kgW00YzgBQ&bih=937&biw=1920&client=ms-android-samsung-ga-rev1#imgrc=ZBUOEQH6n8H1PM
- [15] A Computational Study on the Use of an Aluminium Metal Matrix Composite and Aramid as Alternative Brake Disc and Brake Pad Material (2014.)
URL: <https://www.hindawi.com/journals/je/2014/494697/>
- [16] Infrared
URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>
- [17] Termodinamika II; Antun Galović – Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2007.
- [18] Emission, reflection and transmission
URL: https://www.testo.com/en-IN/Emission%2C+reflection+and+transmission/services_knowledgebase_measuring_parameters_emission_reflection_transmission
- [19] Emissivity Correction for Infrared Radiometer Sensors
URL: <https://www.apogeeinstruments.com/emissivity-correction-for-infrared-radiometer-sensors/>
- [20] Near-infrared measurement of water temperature near micro-magnetic particle layer in a fluidic channel under induction heating
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177719319144>
- [21] Advances in IR Temperature Measurement
URL: <https://www.fierceelectronics.com/components/advances-ir-temperature-measurement>
- [22] Infrared camera angle: the 90° rule
URL: <https://thermohuman.com/2021/07/15/camera-angle-the-90o-rule/>
- [23] ALS Brake Wired
URL: <https://www.alsense.eu/als-brake-wired/>
- [24] SIMULIA Abaqus FEA
URL: <https://access.tufts.edu/simulia-abaqus-fea>

[25] TIPS & TRICKS: CONVERGENCE AND MESH INDEPENDENCE STUDY

URL: <https://www.computationalfluidynamics.com.au/convergence-and-mesh-independent-study/?fbclid=IwAR0I7q5kunPqfVny2iawXfMlc3LFaJ7E3VcUy70IsHKZZDdQ3VyKn6CL94U>

[26] Toolox 44 Datasheet

URL: https://en.stahlnetz.de/files/en/toolox/Toolox_44_Datenblatt.pdf