



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut  
Tootearenduse õppetool

MES70LT

*Tõnis Väli*

**FORMULA STUDENT KLASSI VORMELAUTO  
AERODÜNAAMIKA PAKETI PROJEKTEERIMINE**

Autor taotleb  
tehnikateaduse magistri  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2015

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....” .....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....” .....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....201... a.

..... allkiri

## **MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**

2015 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Tõnis Väli, 132635 (nimi, üliõpilaskood)  
Õppekava: MATM02/11 - Tootearendus ja tootmistehnika  
Eriala: Tootearendus ja tootmistehnika  
Juhendaja: Teadur, Henrik Herranen (amet, nimi)  
Konsultandid: (nimi, amet, telefon)

### **MAGISTRITÖÖ TEEMA:**

(eesti keeles) Formula student klassi vormelauto aerodünaamika paketi projekteerimine  
(inglise keeles) Designing aerodynamic package for Formula Student class racecar

### **Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

<b>Nr</b>	<b>Ülesande kirjeldus</b>	<b>Täitmise tähtaeg</b>
<b>1</b>	<b>Lõputöö kava koostamine</b>	<b>01.01.2015</b>
<b>2.</b>	<b>Analüüside teostamine</b>	<b>01.03.2015</b>
<b>3.</b>	<b>Dokumenteerimine</b>	<b>01.04.2015</b>
<b>4.</b>	<b>Vormistamine</b>	<b>20.05.2015</b>
<b>5.</b>		

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** Lõputöö käigus projekteeritakse tudengivormeli FEST15 aerodünaamika pakett. Lõputöö põhiosa moodustavad voolavusanalüüsid. Lisaks kirjutatakse lahti võistlusreeglid, analüüsitakse eelnevat lahendust ja teostatakse ringiajasimulatsioon optimaalsete aerodünaamiliste parameetrite leidmiseks.

**Täiendavad märkused ja nõuded:**.....

**Töö keel:** Eesti keel

Kaitsmistootlus esitada hiljemalt: 12.05.2015

**Töö esitamise tähtaeg:** 25.05.2015

**Üliõpilane:** Tõnis Väli /allkiri/ ..... kuupäev.....

**Juhendaja:** Henrik Herranen /allkiri/ ..... kuupäev.....

# SISUKORD

SELEDE LOETELU .....	6
GRAAFIKUTE LOETELU .....	7
EESSÕNA.....	8
SISSEJUHATUS.....	9
1. TÖÖ ÜLESEHITUS JA EESMÄRK.....	12
1.1. Eesmärgid .....	13
2. TEOREETILINE TAUST TIIBADEST.....	14
3. REEGLISTIK .....	17
3.1. Reeglite võrdlus eelmises aastaga .....	20
4. EELNEVA LAHENDUSE ANALÜÜS .....	22
4.1. Voolavusanalüüsid.....	24
4.2. Voolavusanalüüside valideerimine.....	25
5. RINGIAJASIMULATSIOON .....	28
6. VOOLAVUSANALÜÜSID .....	32
6.1. Analüüsi ülesehitus.....	32
6.1.1. CAD mudel.....	33
6.1.2. Elementideks jaotamine .....	34
6.1.3. Rajatingimused.....	37
6.1.4. Füüsikaline mudel .....	38
6.2. Aerodünaamilised parameetrid sõites sirgel.....	40
6.3. Reguleerimisvõimalused .....	44
6.3.1. Esitiiva reguleerimine .....	44
6.3.2. Tagatiiva reguleerimine.....	46
6.4. Aerodünaamilised parameetrid kurvis sõites.....	48
6.4.1. Suunamuutus .....	49

6.4.2. Külgakaldumine .....	53
6.4.3. Pikinookumine .....	55
6.5. Aerodünaamilised parameetrid sõites teise vormeli hoovuses .....	57
KOKKUVÕTE.....	63
SUMMARY .....	65
KASUTATUD KIRJANDUS .....	67
LISA 1. TEHNILISED JOONISED.....	69

## SELEDE LOETELU

Sele 1. Plokkdiagramm aerodünaamika paketi projekteerimisest, roheline kastiga on märgitud antud töös kästletud etapid .....	12
Sele 2. Õhuvool ümber tiivaprofiili [3] .....	15
Sele 3. Piirikiht tiival [4] .....	15
Sele 4. Rohelisega on märgitud alad kuhu ei tohi aerodünaamilisi detaile projekteerida [6] ..	18
Sele 5. Aerodünaamiliste elementide reeglite visualne esitus, rohelisega on märgitud keelatud alad [6].....	19
Sele 6. 2014 ja 2015 reeglitega lubatud aerodünaamiliste elementide ruumala võrdlus .....	21
Sele 7. Hooaja 2013/2014 vormel FEST14.....	22
Sele 8. FEST14 õhuvoolude visualiseerimine eksperimentaalselt ja <i>CFD</i> analüüsis .....	27
Sele 9. <i>CFD</i> analüüsis kasutatav <i>CAD</i> mudel koos kohandatud õhukehaga .....	33
Sele 10. Regionide kasutamine erinevate elementide tiheduse saavutamiseks.....	34
Sele 11. Piirikihi elemendid .....	35
Sele 12. <i>CFD</i> mudeli rajatingimused .....	38
Sele 13. Staatile rōhk baasmudelil .....	40
Sele 14. Staatile rōhk rajaseadistuses mudelil.....	40
Sele 15. Staatile rōhk kiirendusseadistuses mudelil.....	41
Sele 16. Õhuvoolud läbi velgede.....	43
Sele 17. Õhuvoolud läbi radiaatori.....	44
Sele 18. Esitiiva kõrguse muutmine, vaheflantsid on märgitud punasega .....	45
Sele 19. Tagatiiva kohtumisnurga seadistamine, reglueerimisavadega detail on märgitud punasega .....	47
Sele 20. Sõiduki rotatsiooni suunad [19] .....	48
Sele 21. Staatile rōhk ja voolujooned 0°, 10° ja 30° siirdenurga juures.....	49
Sele 22. Staatile rōhk külgekaldumisnurga 0°, 1° ja 2° juures. ....	54
Sele 23, Staatile rōhk 1,5°, 0° ja -1,5° pikinookumisnurkade juures. ....	56
Sele 24. Voolujooned esitiiva alla sõites teise vormeli hoovuses .....	59
Sele 25. Voolujooned tagatiiva alla sõites teise vormeli hoovuses.....	60

## GRAAFIKUTE LOETELU

Graafik 1. FEST14 surve- ja takistusjõud .....	23
Graafik 2. Sirgetesti tulemused kiirusel 90 km/h.....	26
Graafik 3. FEST14 ringiajasimulatsioon.....	28
Graafik 4. Uuritavad parameetrid vs. ringigaeg .....	29
Graafik 5. Elementide arvu mõju surve- ja takistusjõule .....	36
Graafik 6. Elementide arvu mõju analüüsi kestvusele .....	37
Graafik 7. Esitiiva kõrguse mõju aerodünaamilistele parameetritele.....	46
Graafik 8. Tagatiiva nurga mõju aerodünaamilistele parameetritele .....	47
Graafik 9. Siirdenurk vs. aerodünaamilised koefitsiendid .....	50
Graafik 10. Siirdenurk vs. aerodünaamilised koefitsiendid .....	51
Graafik 11. Siirdenurk vs. elementide surve- ja takistusjõud.....	52
Graafik 12. Siirdenurk vs. %ees .....	53
Graafik 13. Külgekaldusnurg vs. aerodünaamilised jõud.....	54
Graafik 14. Külgekaldumisnurk vs. survejõud.....	55
Graafik 15. Pikinookumine vs. aerodünaamilised jõud.....	56
Graafik 16. Pikinookumine vs. %ees .....	57
Graafik 17. Aerodünaamilised jõud sõites teise vormeli hoovuses. ....	60
Graafik 18. Survejõud sõites teise vormeli hoovuses.....	61
Graafik 19. Aerodünaamiline balanss sõites teise vormeli hoovuses .....	62

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on valitud autori enda algatusel. Teema põhineb Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli ühise tudengiorganisatsiooni FS Team Tallinna vajadusel tagada pidev tootearendus ja projekteerida igal aastal uus aerodünaamika pakett.

Autor soovib tänada juhendajat Henrik Herraneni, retsensent Risto Kõivu ja FS Team Tallinnat meeldiva koostöö ja võimaluse eest osaleda tiimi tegevuses.



## SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö teemaks on Formula Student Team Tallinna poolt projekteeritava ning ehitatava vormelauto FEST15 aerodünaamika paketi projekteerimine. Tulenevalt uuenenud võistlusreeglitest on uue aerodünaamika paketi väljatöötamine suureks väljakutseks tiimile ja antud töö autorile.

Lõputöö eesmärgiks on projekteerida aerodünaamika pakett FS Team Tallinna 2014/2015 hooaja võistlusautole FEST15. Aerodünaamika pakett mõjutab oluliselt vormeli juhitavust ja stabiilsust. Erinevalt rehvitakistusest, mis on konstantne, kasvavad aerodünaamilised jõud kiiruse suurenedes väga kiiresti. Aerodünaamiline takistusjõud mõjutab auto kiirust, kiirendust, maksimaalset kiirust ja energiakulu. Aerodünaamiline survejõud mõjutab oluliselt vormeli stabiilsust ja kurvi läbimise kiirust, ning üldkokkuvõttes ringi läbimise aega.

Käesoleval hooajal ehitab FS Team Tallinn oma esimest elektriliste rummumootoriga nelikveolist vormelit. Igat mootorit juhitakse eraldi vastava matemaatilise algoritmi alusel, mille sisendandmeteks on ka vormeli aerodünaamilised parameetrid. Vastavate parameetrite leidmiseks teostatakse antud töö käigus erinevaid analüüse, mida pole eelnevatel aastatel aerodünaamika paketi projekteerimisel tehtud.

FS Team Tallinn on üks paljudest meeskondadest, kes osaleb Formula Student võistlussarjas. Tootearendusvõistlus Formula Student kujutab endast väikese üheistmelise vormelauto projekteerimist, ehitamist ja hiljem auto tutvustamist, sellega erinevate katsete läbimist ning võidusõitmist ringrajal. Projektis osalemine annab tudengile reaalse kogemuse auto projekteerimises ja valmistamises ning tutvustab noorele insenerile autotööstuse majanduslikku poolt. Lisaks annab projektis osalemine tudengile praktilise kogemuse tootearenduse protsessist.

Esimene Formula Student võistlus peeti Ameerika Ühendriikides 1970ndate lõpul. Nüüdseks on võistlused levinud üle kogu maailma. Euroopas korraldati esimene võistlus Inglismaal 1998 aastal. Praeguse seisuga on maailmas üle 500 aktiivse meeskonna.

Eestis hakkas Formula Studenti idee levima 2005. aasta alguses. Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli ühismeeskonna FS Team Tallinn loomiseni jõuti 2006. aasta sügiseks. Juba 2007. aasta juulis osaleti Inglismaal Formula Student võistlusel vormeli virtuaalse mudeliga. Järgmisel aastal osaleti aga samal võistlusel juba täiesti töötava vormeliga ja saavutati 13. koht 72 osaleja seast ning parima uustulnuka tiitel. Sellest ajast alates on igal järgneval aastal ehitatud uus vormel, mis on eelmisest kergem ja kiirem olnud. Viimaste aastate jooksul on üha enam tiime hakanud kasutama aerodünaamilisi elemente oma vormelitel. Ühena esimestest tiimidest Euroopas otsustas seda teha ka FS Team Tallinn. Käesolevaks hooajaks projekteeritav aerodünaamika pakett on FS Team Tallinna ajaloos neljas.

Aerodünaamiliste elementide projekteerimine on võimalikuks saanud tänu kiiresti arenevatele arvutitele ning programmidele, mis võimaldavad simuleerida õhu liikumist ümber auto. Antud töö eesmärkide saavutamiseks teostatakse voolavusanalüüsi programmiga Autodesk Simulation CFD. Lisaks voolavusanalüüsile on vormeli aerodünaamilisi omadusi võimalik hinnata tuuletunnelis ja rajal testides.

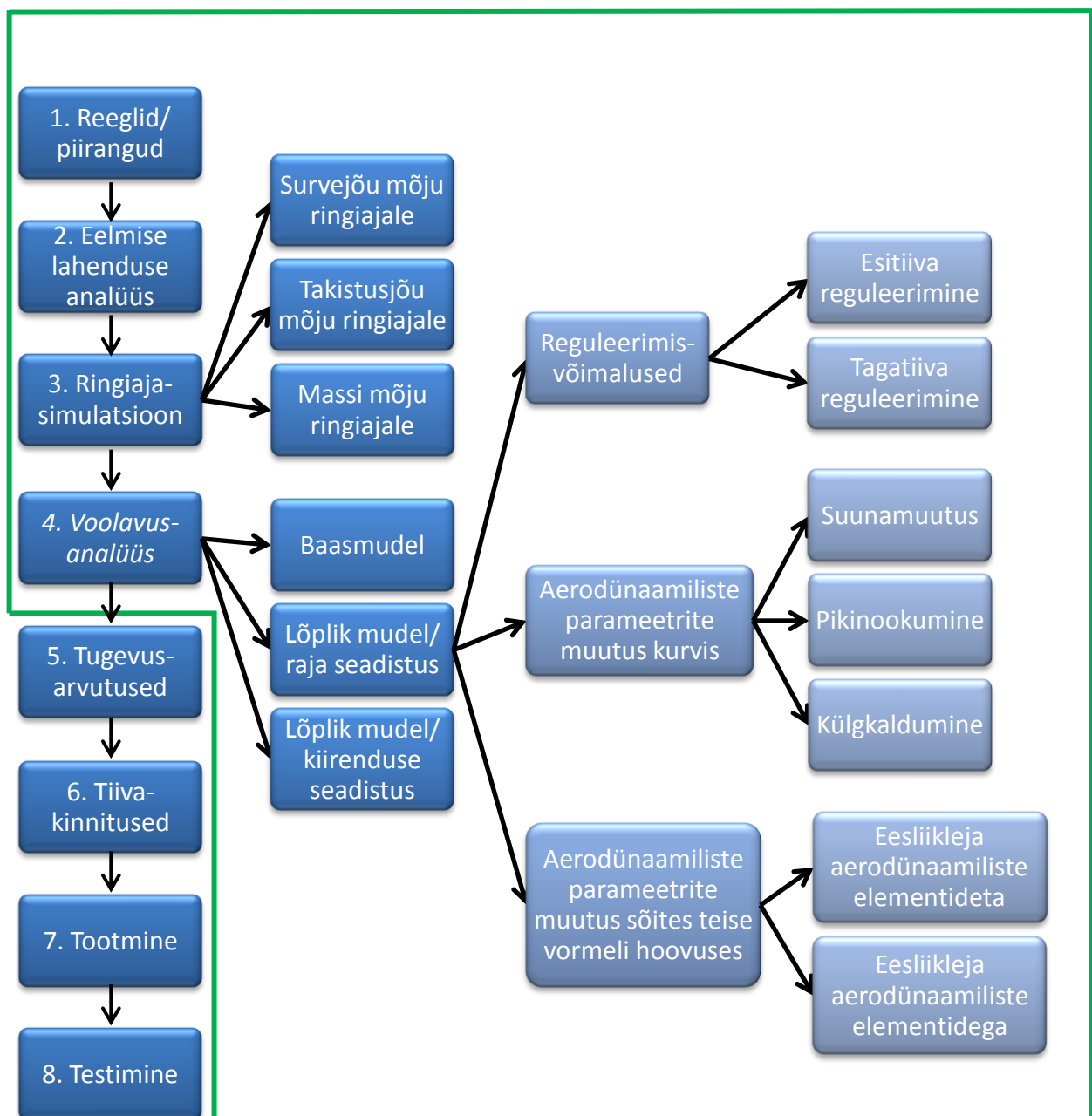
Aerodünaamika paketi projekteerimise võib jaotada kaheksaks suureks etapiks. Esimeste sammudena tuleb läbi töödelda reeglistik ja analüüsida eelnevaid lahendusi. Optimaalseima aerodünaamika paketi väljatöötamisel on tähtis teostada põhjalik ringiajasimulatsioon ja leida piirväärtused mis tuleb saavutada. Optimaalsete aerodünaamiliste parameetrite leidmine on üheks antud töö eesmärkidest. Järgnevalt tuleb, leitud parameetreid silmas pidades, teostada voolavusanalüüsid. Voolavusanalüüsile kulub suurem osa ajast aerodünaamika paketi projekteerimisest ja ühtlasi on see ka antud lõputöö põhiteematikaks. Tööst on välja jäetud aerodünaamika paketi projekteerimise järgnevad etapid milleks on aerodünaamiliste elementide tugevusarvutused, tiivakinnitused, tootmine ja testimine.

Lõputöö põhiosa alguses kirjutatakse lahti antud lõputöö täpne sisu ja eesmärgid igal etapil aerodünaamika paketi projekteerimisel. Sellele järgneb sissejuhatav peatükk tiibade füüsikalisest mehhanismist ehk sellest kuidas tõste- või survejõud tekib. Sealt suundutakse edasi aerodünaamika paketi projekteerimise esimese etapi juurde ehk tutvustatakse aerodünaamikat puudutavaid reegleid ja piiranguid. Järgmise etapina analüüsitakse eelmise aasta lahendust ja leitakse kohad, mida tuleb käesoleval aastal parandada. Edasi teostatakse ringiajasimulatsioon, mille käigus selgitatakse välja aerodünaamilised parameetrid, mida on

vaja saavutada, et tagada maksimaalne võit ringiajas. Töö põhiosa moodustavad voolavusanalüüsid erinevate raja olukordade kirjeldamiseks. Esimese alampunktina kirjutatakse lahti voolavusanalüüsi ülesehitus ja füüsikaline taust. Teostatakse tundlikusanalüüs mudeli elementideks jaotamise kohta. Järgnevalt analüüsitakse kolme erinevat mudelit, milleks on baasmudel ehk ilma aerodünaamiliste elementideta vormel, lõplikke aerodünaamiliste elementidega mudelit ehk rajaseadistuses mudelit ning kiirendusseadistuses vormeli mudelit. Lisaks tuuakse välja aerodünaamika paketi reguleerimisvõimalused. Viimase punktina analüüsitakse rajaseadistuses vormeli käitumist erinevates raja situatsioonides ja sõitmisel teise vormeli hoovuses.

# 1. TÖÖ ÜLESEHITUS JA EESMÄRK

Aerodünaamika paketi projekteerimine koosneb paljudest etappidest. Projekteerimise võib jagada 8 suuremaks etapiks, mis on näidatud alloleval plokkiagrammil. Antud töös on käsitletud esimest nelja etappi. Kuna suurem osa projekteerimise ajast kulub voolavusanalüüsidele, on see ka antud töö põhiteemaks. Alloleval plokkiagrammil on määratletud antud töös käsitletavat teemat rohelise kastiga (sele 1).



Sele 1. Plokkiagramm aerodünaamika paketi projekteerimisest, rohelise kastiga on märgitud antud töös käsitletud etapid

## 1.1. Eesmärgid

Antud lõputöö põhiliseks eesmärgiks on projekteerida aerodünaamika pakett FS Team Tallinna võistlusautole FEST15. Parima lõpplahenduse saavutamiseks tuleb seada konkreetset eesmärgid igale etapile. Järgnevalt on esitatud iga sammu eesmärgid.

### 1. Reeglid/ piirangud:

- Analüüsida reegleid ja piiranguid.
- Leida reeglimuudatuste mõju aerodünaamilistele parameetritele.

### 2. Eelmise lahenduse analüüs:

- Analüüsida eelmist lahendust.
- Leida eelmise lahenduse nõrgad küljed.

### 3. Ringiajasimulatsioon:

- Leida kuidas muudavad aerodünaamilised parameetrid ringiaega.
- Leida optimaalseimad aerodünaamilised parameetrid.
- Leida aerodünaamilised parameetrid millest madalamad väärtused ei paranda ringiaega.
- Leida kuidas muudab mass ringiaega.

### 4. Voolavusanalüüsid:

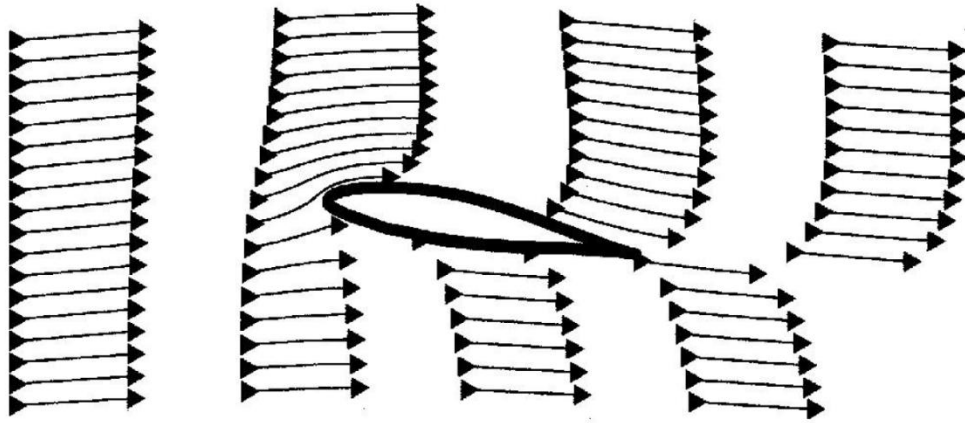
- Analüüsida baasmudelit.
- Leida optimaalseim aerodünaamiliste elementide geometria.
- Leida aerodünaamiliste parameetrite muutus kurvi olukorras.
- Leida aerodünaamiliste parameetrite muutus sõites teise vormeli hoovuses.
- Tagada aerodünaamiliste elementide piisav reguleerimisvõimalus.

## 2. TEOREETILINE TAUST TIIBADEST

Võidusõiduautode puhul on kasutusel, vastavalt reeglitele, ühe-, kahe- või rohkemaelemendilised tiivad. Võidusõiduautode tiibade tööpõhimõte jääb samaks nagu seda on lennukite tiibadel. Ainsaks erinevuseks on see, et tekitatud jõud on suunatud maa poole. Järgnevalt seletatakse lähemalt kuidas tiivad töötavad lennuki tiiva näitel.

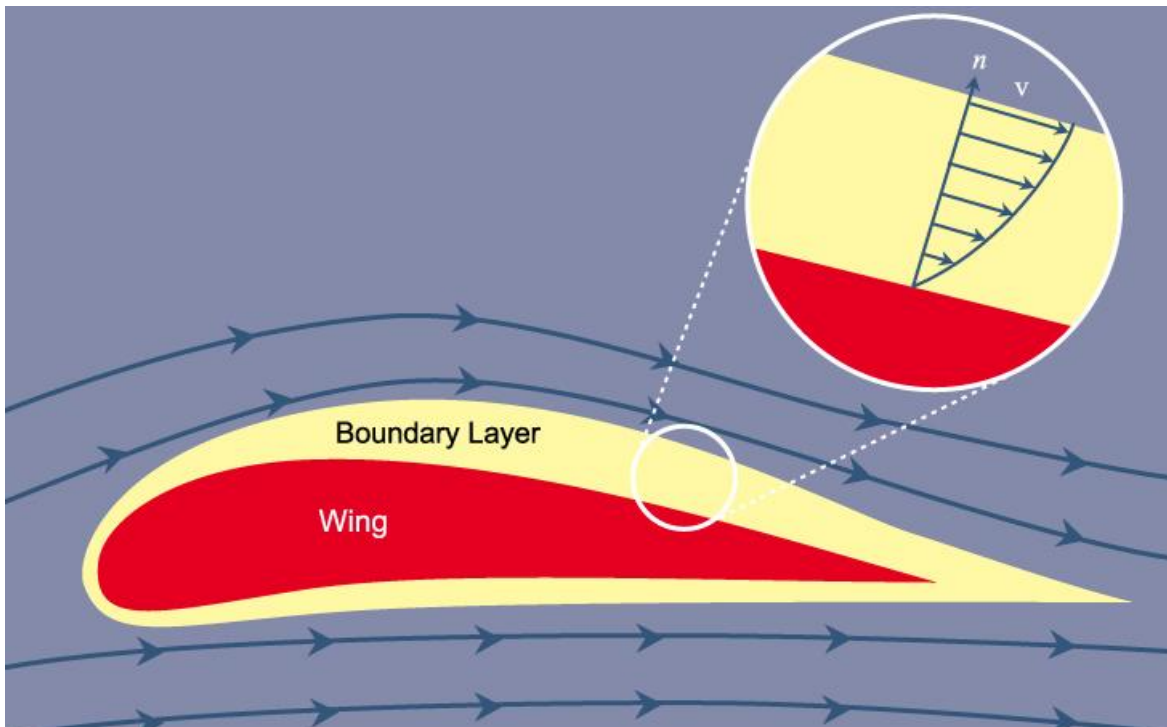
Enimlevinud selgitus tõstejõu tekkimise kohta põhineb Bernoulli teorial. Selle teooria põhjal tekib tõstejõud, kui tiiva peal on õhu liikumise kiirus suurem kui tiiva all, ning selle tõttu tekib tiiva peale madalama rõhuga ala. Antud teooria ebakorrektsus tuleb välja küsimusega, miks liigub õhk kiiremini tiiva peal. Enamasti seletatakse seda geomeetriselt, ehk õhu kiirus on sõltuvuses distantisiga, mida ta peab läbima. Sellele teooriale tuginedes peaks ühe väikelennuki õhkutõusmiseks vajamineva tõstejõu tekitamiseks olema tiiva pealmise külje pikkus 50% suurem kui alumise külje pikkus. Enamasti on lennukite puhul kasutatavatel tiibadel ülemine külg pikem kõigest 1,5-2,5%. Siit võib järeldada, et antud teooria ei käsitle kõiki füüsikalisi tegureid survejõu tekkimisest. Kuigi Bernoulli valem on igati õige, ei arvestata sellises tõlgenduses Newtoni seadusi. [1,2]

Newtoni kolmas seadus väidab, et kaks keha mõjutavad teineteist jõududega, mis on suuruselt võrdsed ja suunalt vastupidised. Ehk siis tiib peab muutma õhu liikumise suunda ja kiirust, et tekitada tõstejõudu. Tõstejõu tekitamiseks peab tiib õhku enne suunama ülesse üle tiiva ja alles siis suunama alla, teisisõnu võib tiiba vaadelda kui ühte suurt õhusuunajat (sele 2). Newtoni teise seadus põhjal, mis väidab, et kehale mõjuv resultantjõud on võrdne keha massi ja kiirenduse korrutisega, võib leida et, tõstejõud on võrdeline allapoole suunatud õhu massi ja antud õhu massi kiirusega. Suurema tõstejõu tekitamiseks peab suurendama õhu kogust, mida suunatakse alla või suurendama alla suunatud õhu liikumise kiirust. [1]



Sele 2. Õhuvool ümber tiivaprofiili [3]

Lisaks Newtoni seadustele tuleb arvestada vedelike viskoossust ja Coanda efekti, mis tagab selle, et õhk jälgib tiiva pinda ega eraldu sellelt. Vedelike viskoossusest tulenevalt kleepuvad õhu osakesed pinnale ning õhuosakeste kiirus pinnal on null. Piiri, kus õhu kiirus hakkab kasvama ja saavutab globaalse kiiruse, nimetatakse piirikihiks (ingl. k. *boundary layer*). Piirikiht on äärmiselt õhuke, olenevalt turbulentsusest, kuni mõned millimeetrid (sele 3). [1]



Sele 3. Piirikiht tiival [4]

Difuusori ja esitiiva kasutegurit suurendab nähtus, mida nimetatakse maaefektiks. Selle nähtuse tulemusena suureneb aerodünaamiliste elementide kasutegur olles maapinnale väga lähedal. Nagu eelnevalt mainitud peab tiib alguses õhku ülesse poole suunama ja alles peale seda saab tiib õhku alla poole suunata. Visuaalselt võiks asja ette kujutada selliselt, et ümber tiiva tekib õhu ringliikumine. Maapinna läheduses aga ringliikumine katkestatakse ja ülesse poole suunatud õhk saab tulla ainult edasi liikumise suunast. Sedasi suureneb õhu energia ja õhku on võimalik kiirendada suuremate kiirusteni. [1,5]



### **3. REEGLISTIK**

Aerodünaamiline disain peab täielikult vastama Formula Society of Automotive Engineers (edaspidi FSAE) 2015 reeglitele. Kohtunikud kontrollivad vormeli reeglitele vastavust enne igat võistlust. Reeglitele mittevastavavaid lahendusi võistlema ei lubata. Võrreldes eelnevate aastatega on aerodünaamiliste elementide kohta oluliselt rohkem reegleid. Järgnevalt tuuakse välja aerodünaamilist disaini puudutavad reeglid.

#### **FSAE Reeglid 2015 [6]**

##### **Artikkel 2: Disaini üldised nõudmised**

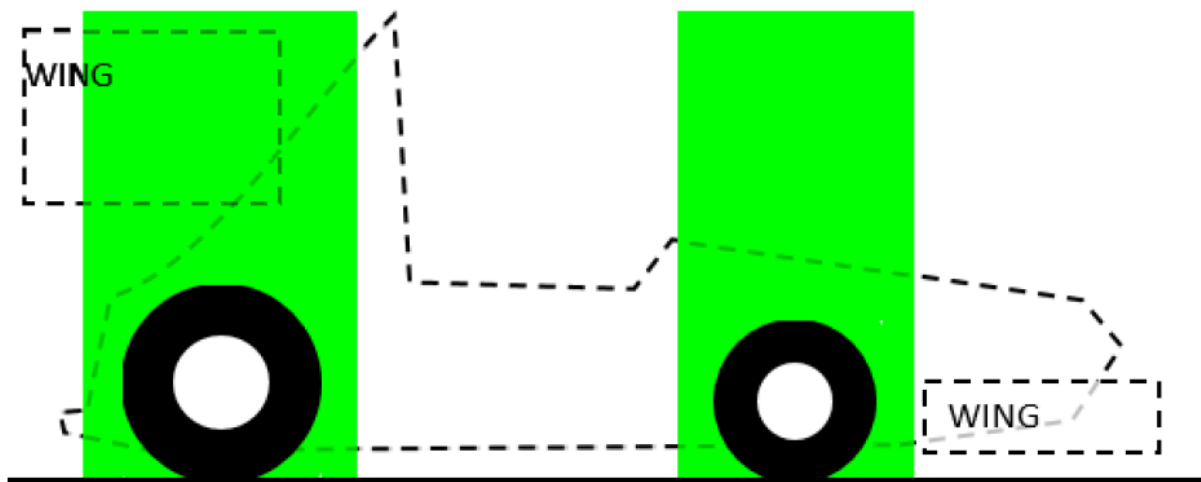
###### **T2.1 Sõiduki konfiguratsioon**

Sõiduk peab olema avatud rataste ja avatud sõitjaruumiga (vormeli tüüpi kere) nelja rattaga, mis ei asetse ühel joonel.

Avatud rataste definitsioon – avatud ratastega sõiduk peab vastama järgnevatele tingimustele (sele 4):

- a. Rehvi ülemine osa peab olema 180 kraadi ulatuses avatud.
- b. Rehvi/velje külg peab olema avatud.
- c. Sõiduki ükski detail ei tohi olla alas, mis on defineeritud kahe vertikaalse joonega. Jooned asetsevad rehvide välisläbimõõdust 75 mm ees- ja tagapool. Antud pind ulatub rehvi sisepinnast välispinnani.
- d. Eelnevalt esitatud reeglid peavad olema vastavuses Artikkel 9: Aerodünaamilised elemendid reeglitega.

Märkus: Mõõtmisi teostatakse kuiva ilma rehvidega.



**Sele 4.** Rohelisega on märgitud alad kuhu ei tohi aerodünaamilisi detaile projekteerida [6]

## **Artikkel 9: Aerodünaamilised elemendid**

T9.1 Kõik aerodünaamilised elemendid peavad vastama järgnevatele reeglitele.

### **T9.2 Asukoht - Eest kinnitatud elemendid**

T9.2.1 Pealtvaates ei tohi ükski aerodünaamiline element olla (sele 5):

- a. Rohkem eespool kui 700 mm mõõdetuna esirehvi esipinnast.
- b. Laiem kui esirehvide välispind.

T9.2.2 Eestvaates peab esirehv olema nähtav alates 250 mm-st maapinnast. Erandiks on otsaplaadid, mille paksus on väiksem kui 25 mm.

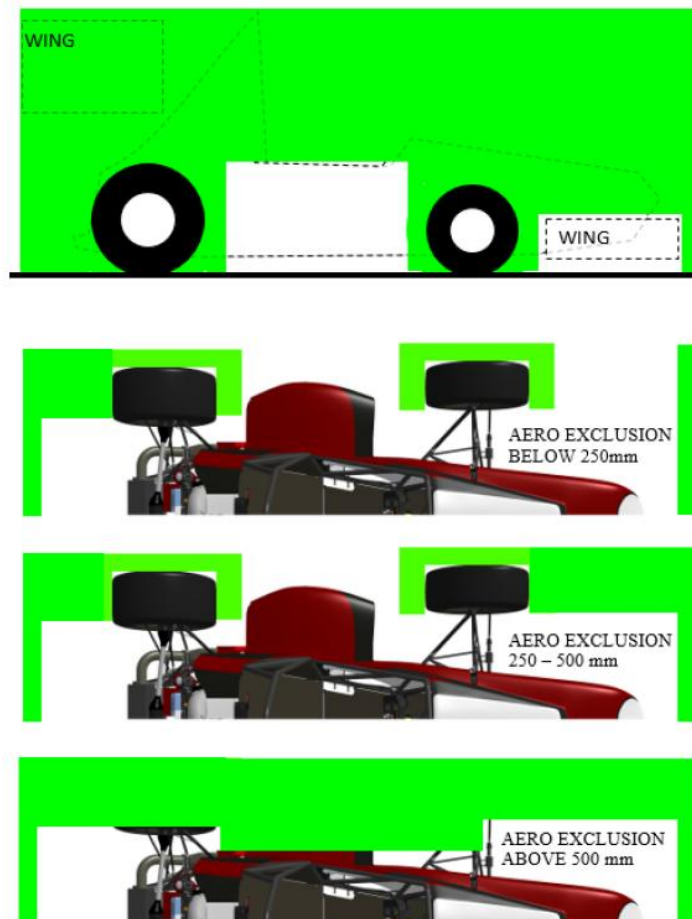
### **T9.3 Asukoht - Tagant kinnitatud elemendid**

T9.3.1 Pealtvaates ei tohi ükski aerodünaamiline element olla (sele 5):

- a. Rohkem tagapool kui 250 mm mõõdetuna tagarehvi tagapinnast.

- b. Rohkem eespool kui vertikaalsest tasapinnast, mis on defineeritud peatoe kinnituse tagumise osaga.
- c. Laiem kui tagarehvide sisepind.

T9.3.2 Külgvaates ei tohi ükski aerodünaamiline element olla kõrgem kui 1,2 m mõõdetuna maapinnast.



Sele 5. Aerodünaamiliste elementide reeglite visualne esitus, rohelisega on märgitud keelatud alad [6]

#### T9.4 Asukoht - Üldine

T9.4.1 Ratta telgedevahelised aerodünaamilised elemendid võivad pealtvaates ulatuda rehvide välispinnani.

T9.4.2 Ratta telgede vahelised aerodünaamilised elemendid ei tohi olla kõrgemad kui 500 mm mõõdetuna maapinnast. Erandiks on elemendid mis on sätestatud punktis T9.3.1.

### **T9.5 Minimaalsed raadiused aerodünaamilistele elementidele**

T.9.5.1 Kõik ette poole suunatud servad, mis võivad kokku puutuda pealtvaatajatega, peavad omama raadiust 5 mm horisontaalsetel servadel ja 3 mm vertikaalsetel servadel. Raadiused peavad olema saavutatud püsivate detailidega ja esialgne disain peab seda arvestama.

### **T9.6 Motoriseeritud maaefekti kasutamine**

Motoriseeritud maaefekti kasutamine on keelatud. Erandiks on jahutussüsteemis kasutatavad ventilaatorid.

### **T9.7 Aerodünaamiliste elementide stabiilsus ja tugevus**

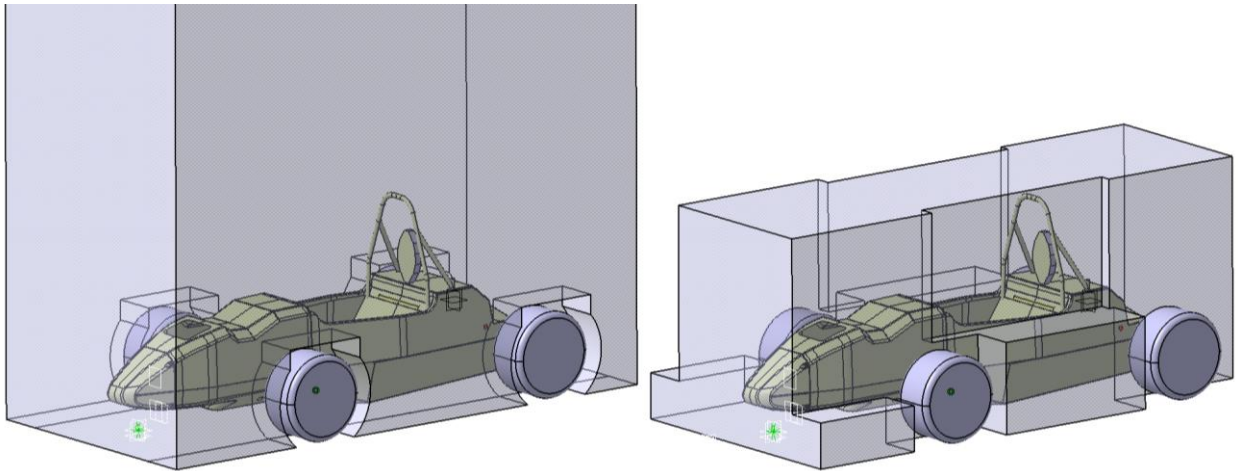
T9.7.1 Kõikide aerodünaamiliste elementide kinnitused peavad tagama piisava jäikuse sõiduki staatilises ja dünaamilises olekus. Tehnilises kontrollis jälgitakse aerodünaamiliste elementide jäikust visuaalsel vaatlusel ja käega jõu avaldamisel aerodünaamilistele elementidele.

Märkus: Järgnevad punktid on juhiseks piisava jäikuse tagamiseks:

1. Rakendades aerodünaamilisele elemendile jõudu (umbes 200 N) ei tohi deformatsioon olla suurem kui 25 mm või jääv deformatsioon suurem kui 5 mm.
2. Kui rajal ilmneb aerodünaamiliste elementide suur liikumine ja läbipaine, on kohtunikul õigus sõiduk võistlusest kõrvaldada.

## **3.1. Reeglite võrdlus eelmises aastaga**

Võrreldes eelmise aastaga on käesoleva aasta reeglid oluliselt rangemad. Seel 6 on välja toodud ruumala, mille sisse on lubatud aerodünaamilisi elemente paigutada. Üheks olulisimaks muudatuseks on see, et käesolevast aastat kehtib kõrgusepiirang 1,2 m. Selle tulemusena peab tagatiib asetsema oluliselt madalamal ja töötama turbulentsemas õhus. Lisaks mõjutab oluliselt tagatiiva disaini ka reegel, et see ei tohi olla laiem kui tagumiste rehvide sisepinnad. Selle tulemusena on tiiva ulatus ligikaudu 30% väiksem, mis omakorda tähendab ka tagatiiva survejõu 30%-st vähenemist. Esitiiba mõjutavatest reeglitest avaldab kõige suuremat mõju reegel, mis sätestab, et esirehv peab olema eestvaates nähtav alates 250 mm-st maapinnast. Difuusorit piiravad reeglid on jäänud suurtes piirides samasugusteks.



**Sele 6. 2014 ja 2015 reeglitega lubatud aerodünaamiliste elementide ruumala võrdlus**

Arvestades kõiki reeglimuudatusi on sellel aastal tagatiiva reeglid kõige rangemad. Selle tulemusena tuleb projekteerimisel lähtuda eelkõige tagatiivast saadavast survejõust, et vormel säilitaks õige aerodünaamilise balansi, peab esitiib saavutama tagatiivaga võrdse koguse survejõudu. Difuusori projekteerimisel tuleb lähtuda sellest, et antud elemendi enda aerodünaamiline kese jääks kaalukeskme lähedale.

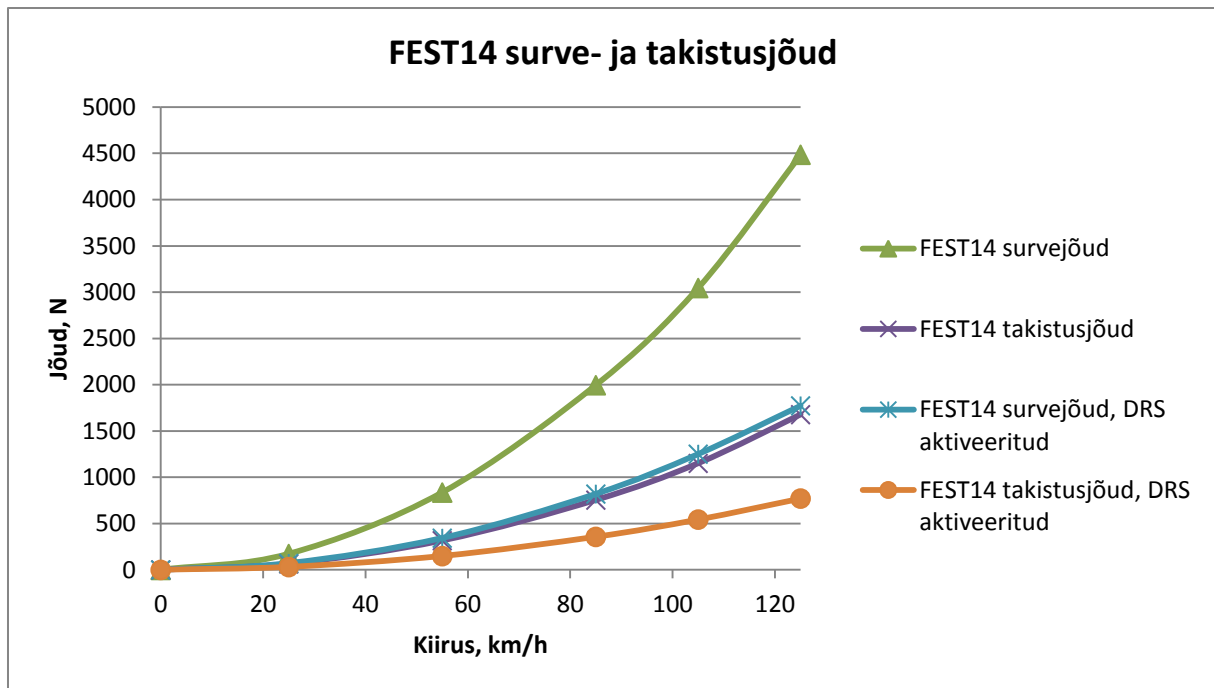
## 4. EELNEVA LAHENDUSE ANALÜÜS

Esimese sammuna uue aerodünaamika paketi projekteerimisel tuleb alustada eelmise aasta lahenduse analüüsimisega ja võimalike kitsaskohtade leidmisega. Kuigi reeglid on selleks aastaks märgatavalt muutunud on mõistlik võtta aluseks eelmise aasta lahendus ja selgitada välja muutmist ja edasiarendamist vajavad kohad. Seel 7 on näha eelmise aasta vormel FEST14.



Sele 7. Hooaja 2013/2014 vormel FEST14

Eelmisel aastal projekteeritud tiivad olid vastavalt reeglitele võimalikult suured, et tekitada võimalikult palju survejõudu. Suurte tiibade tõttu oli eelmisel aastal kasutusel *DRS* (ingl. k. *drag reduction system*) ehk õhutakistuse vähendamise süsteem. *DRS*-i aktiveerimisel liigutati esi- ja tagatiiva ülemised profiilid asendisse, mis tagas tiibade minimaalse õhutakistuse. Antud süsteem töötas pneumosilindritega, mille aktiveerimiseks pidi juht vajutama roolil asetsevat nuppu. Süsteemi eesmärk oli õhutakistuse vähendamine sirgel ja sirgekiiruste tõstmine. Graafikul 1 on välja toodud FEST14 surve- ja takistusjõud.



Graafik 1. FEST14 surge- ja takistusjõud

Lihtsustamaks hilisemat analüüsi esitame eelnevad andmed dimensioonitutes suurustes. Surgejõu kirjeldamiseks kasutatakse dimensioonitut koefitsienti  $-C_l$ , mis arvutatakse välja valemiga 1.

$$-C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1)$$

kus  $F_l$  - surgejõud,  $\rho$  - õhu tihedus,  $V$  - sõiduki kiirus,  $A$  - sõiduki lauppindala. [7]

Takistusjõu kirjeldamiseks kasutatakse dimensioonitut koefitsienti  $C_d$ .  $C_d$  arvutatakse välja valemiga 2.

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2)$$

kus  $F_d$  - takistusjõud,  $\rho$  - õhu tihedus,  $V$  - sõiduki kiirus,  $A$  - sõiduki lauppindala. [7]

Lisaks kasutatakse hilisemas analüüsis vormelile mõjuvat külgsuunalist jõudu. Külgsuunalise jõu kirjeldamiseks kasutatakse dimensioonitut koefitsienti  $C_s$ .  $C_s$  arvutatakse välja valemiga 3.

$$C_s = \frac{F_s}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (3)$$

kus  $F_s$  - külgsuunaline jõud,  $\rho$  - õhu tihedus,  $V$  - sõiduki kiirus,  $A$  - sõiduki lauppindala. [7]

Aerodünaamilise balansi kirjeldamiseks kasutatakse antud töös suurust %ees, mis näitab mitu protsenti surgejõust mõjub vormeli esiteljele. Aerodünaamiline balanss peaks jääma veidi taha

poole massikeskmest, et tagada vormeli stabiilsus suurematel kiirustel. Vormeli projekteerimisel on eesmärgiks võetud kaalujaotus 50:50. Sellest lähtudes oli eelmise aasta vormelil 49,78% survejõust esiteljel (tabel 1).

**Tabel 1. FEST14 aerodünaamilised näitajad**

<b>FEST14 konfiguratsioon</b>	<b>-C<sub>l</sub></b>	<b>C<sub>d</sub></b>	<b>-C<sub>l</sub>/C<sub>d</sub></b>	<b>%ees, %</b>	<b>A, m<sup>2</sup></b>
FEST14 aerodünaamiliste elementideta	-0,21	0,49	-0,43	-	0,62
FEST14 aerodünaamiliste elementidega	3,88	1,47	2,64	49,78	1,43
FEST14 aktiveeritud <i>DRS</i> -ga	2,00	0,87	3,12	-	1,14

## 4.1. Voolavusanalüüsid

Aerodünaamika paketi projekteerimise tähtsaim etapp on voolavusanalüüsid ehk *CFD* (ingl. k. *Computational fluid dynamics*) analüüsid. Kuna tegemist on prototüübiga, siis õnnestub *CFD* tulemusi valideerida alles lõpliku lahenduse testimisel ringrajal. Seetõttu tuleb suurt rõhku panna *CFD* analüüside õigsusele. Eelneval aastal teostati ligikaudu 140 analüüsi terve vormeli kohta. Põhiliseks analüüsitüübiks oli sirgeanalüüsid, kus uuriti aerodünaamilisi näitajaid vormeli otseliikumisel kiirusel 55 km/h. Lisaks teostati analüüse kurvi olukorrale ehk situatsioonile, kus muutuvaks suuruseks oli siirdenurk ehk nurk vormeli suuna ja kesktelje vahel. Täiendavalt uuriti ka vormeli aerodünaamiliste parameetrite muutumist sõites teise vormeli hoovuses.

Voolavusanalüüsid kasutati poolt mudelit ehk kasutati ära vormeli sümmeetriat. Lisaks oli mudeli juures tehtud mitmeid lihtsustusi. Suurimateks lihtsustusteks olid statsionaarsed rattad ja vedrustus komponentide puudumine analüüsis. Terve mudel oli jaotatud ligikaudu 3-ks miljoniks elemendiks, mis oli antud hetkel maksimaalne elementide arv tulenevalt arvutusvõimsuse piirangust. Rajatingimusteks oli määratud õhu sisenkiiruseks 55 km/h ja väljundrõhuks 0 Pa. Ühtlasi oli tee liikumise kiiruseks määratud 55 km/h. Ülejäänud õhukeha tahud olid määratud sümmeetriatasapinnaks ja hõõrdevabaks pinnaks. Füüsikalise mudelina kasutati turbulentset voolamist ja turbulentsuse mudelina kasutati k-epsilon mudelit, millest



tuleb juttu antud lõputöö hilisemates peatükkides. Iteratsioonide arvuks oli määratud 1000 iteratsiooni.

Vormeli mootorite juhtimiseks kasutatakse sellel aastal vektorjuhtimist ehk igale mootorile ja rattale omistatakse vastavalt raja situatsioonile matemaatilise mudeli põhjal erinev kiirus. Antud matemaatilise mudeli sisendandmeteks on ka aerodünaamilised parameetrid. Seetõttu on vaja teada täpselt aerodünaamiliste suuruste muutumist erinevates rajatingimustes. Mõistmaks paremini vormeli käitumist erinevastes tingimustes on vaja uue aerodünaamika paketi projekteerimisel teostada ka analüüsid sõiduki suunamuutuse kohta ümber iga telje.

## 4.2. Voolavusanalüüside valideerimine

*CFD* tulemusi valideeriti sirgetestidega. Sirgetestid kujutavad endast eksperimentaalset katset, kus sõidetaks vormeliga konstantse kiirusega mööda sirget ja mõõdetakse aerodünaamilisi jõude. Sirgetestid on kõige odavam meetod *CFD* tulemuste valideerimiseks. Üheks kõige suuremaks miinuseks rajal testimisel on see, et katsetingimused on pidevalt muutumises ja konstantsete tingimuste loomine on praktiliselt võimatu. Kõige rohkem mõjutab tulemusi tuul, mille tõttu tuleb eksperimentaalne katse teostada mõlemas suunas, nii vastutuult kui ka pärituult. Tuule mõju välistamiseks kasutatakse Pitot toru, mis mõõdab õhukiirust igal hetkel, ehk läbi selle on võimalik teada saada millisel kiirusel tegelikult survejõudu mõõdetakse. Kõrge maksumuse tõttu pole tudengivormelis eksperimentaalsete katsetuste läbiviimisel Pitot toru kasutatud. [7]

Survejõu mõõtmiseks salvestatakse vedrustuse käigu muutus sõites sirgel, nii aerodünaamiliste elementidega kui ka ilma. Antud meetodi miinuseks võib välja tuua selle, et tulenevalt aerodünaamilisest survejõust muutub ka sõiduki kõrgus maapinna suhtes. Seetõttu pole võimalik täpselt kokku viia sõiduki kõrgust simulatsioonis kasutatud kõrgusega. Teades vedrustuse ülekandetegurit (antud juhul võrdne 1-ga) ja amortisaatori jäikust on võimalik Hooke'i seadusega välja arvutada elastsusjõud, mis võrdub antud juhul survejõuga. [7]

$$F_e = -k\Delta x \quad (4)$$

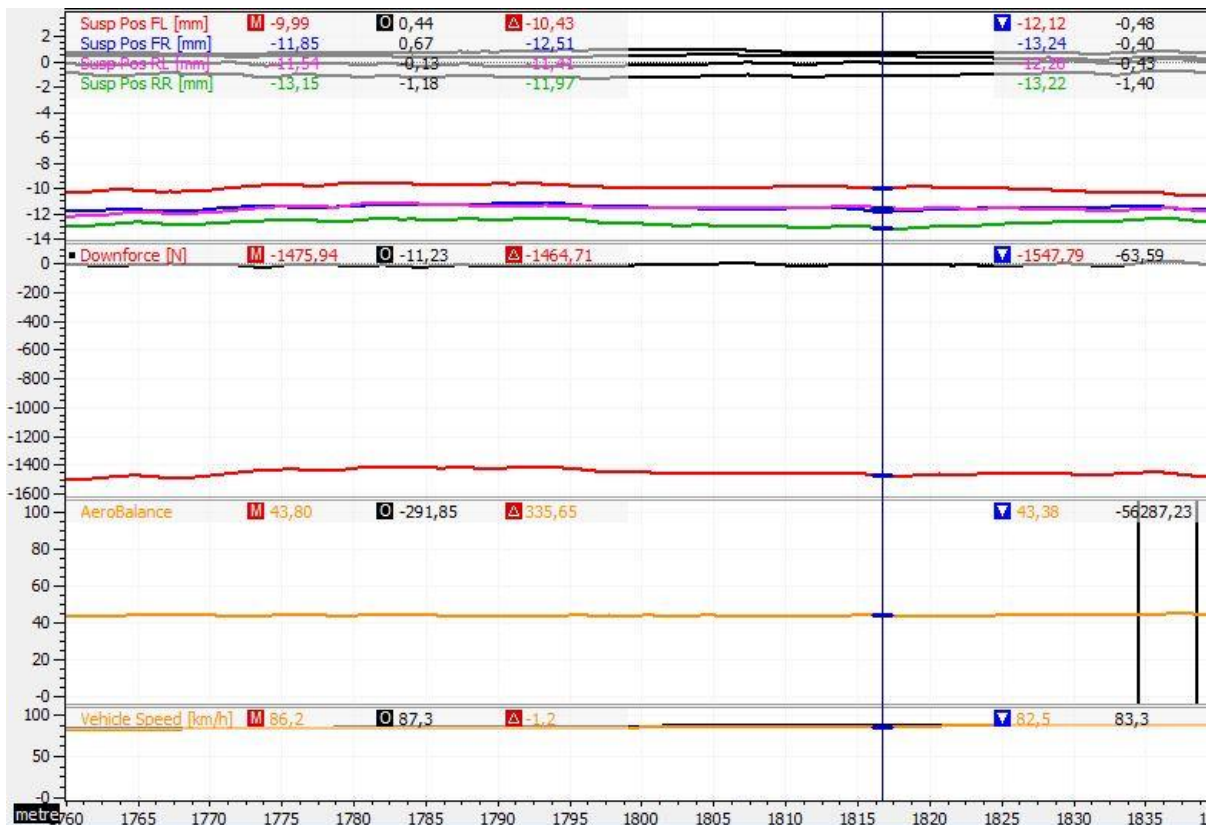
kus  $F_e$ - elastsusjõud,  $-k$ - deformeerunud keha jäikus,  $\Delta x$ -keha lineaarmõõdme muut. [8]

Informatsiooni salvestamiseks ja töötlemiseks kasutati tarkvara MoTeC i2 Standard. Läbi vedrustuse käigu mõõtmise on välja arvatud survejõud esi- ja tagateljel. Millest omakorda on välja arvatud aerodünaamiline balanss valemiga 5.

$$\%ees = \frac{F_f}{F_f + F_r} * 100 \quad (5)$$

kus  $F_f$  - survejõud esiteljel ja  $F_r$  - survejõud tagateljel. [9]

Sirgetesti tulemused kiirusel 90 km/h on välja toodud graafikul 2, kus musta joonega on esitatud aerodünaamiliste elementideta vormeli informatsioon ja värviliste joontega aerodünaamiliste elementidega vormeli informatsioon. Graafikult on näha, et ilma aerodünaamiliste elementideta vormeli survejõud on võrdne nulliga ja aerodünaamiliste elementidega vormeli survejõud umbes 1470 N. Kuna ilma tiibadeta vormeli puhul puudub survejõud, siis ei ole võimalik aerodünaamilist balansi välja arvutada.

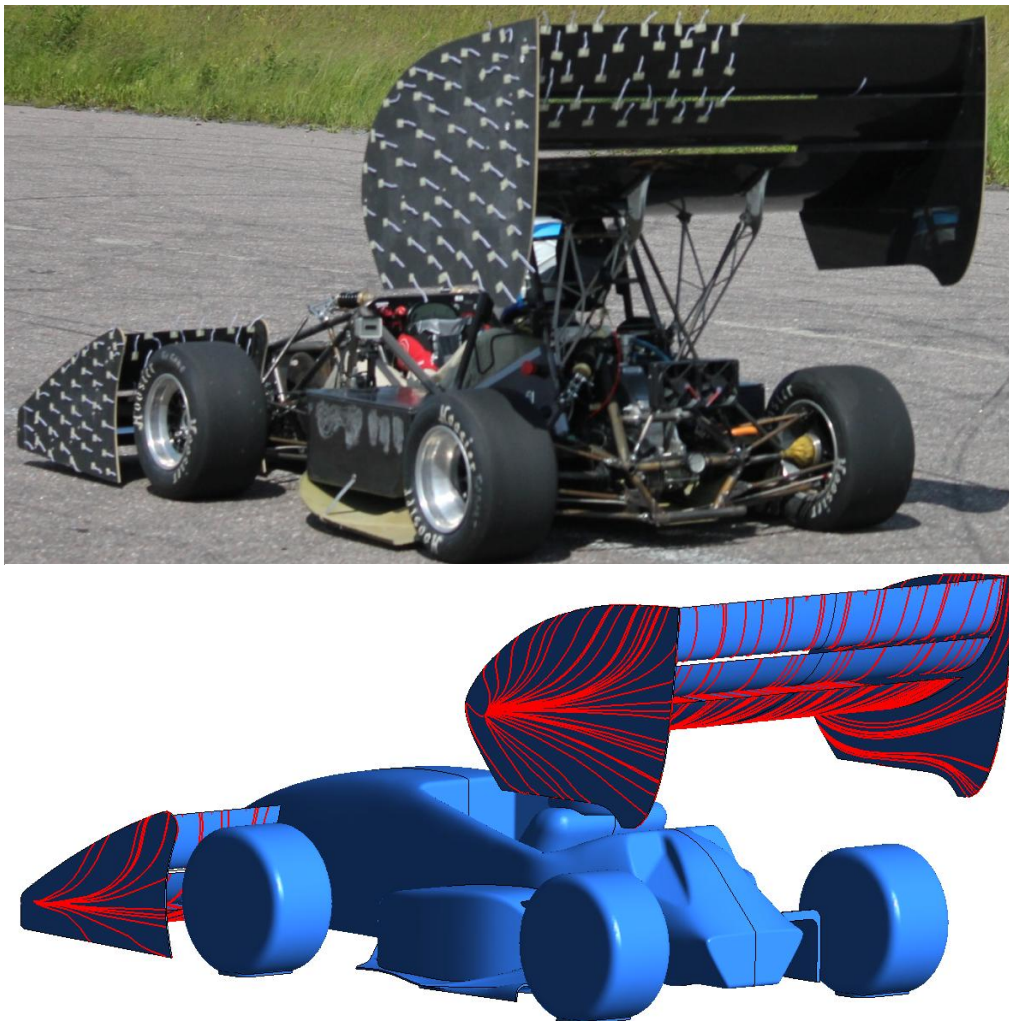


Graafik 2. Sirgetesti tulemused kiirusel 90 km/h

Sirgetesti tulemuseana saavutas aerodünaamiliste elementidega vormel 1470 N survejõudu. Võrreldes CFD tulemusi eksperimentaalse katsetustega selgub, et CFD analüüsid ülehindasid

survejõudu ligikaudu 22%. *CFD* analüüsi täpsuse tõstmine on käesoleval aastal üheks prioriteediks.

Lisaks survejõu mõõtmisele visualiseeriti sirgetestide käigus õhuvoolusid vormeli pinnal. Õhuvoolude visualiseerimiseks kasutati lühikestest lõngajupidest koosnevaid markereid. Markerid paigutati kõige olulisematele pindadel: otsaplaatidele ja tiiva profiilide alumistele külgedele. Saadud õhuvoolude piltide võrdlus on esitatud seel 8. [5]



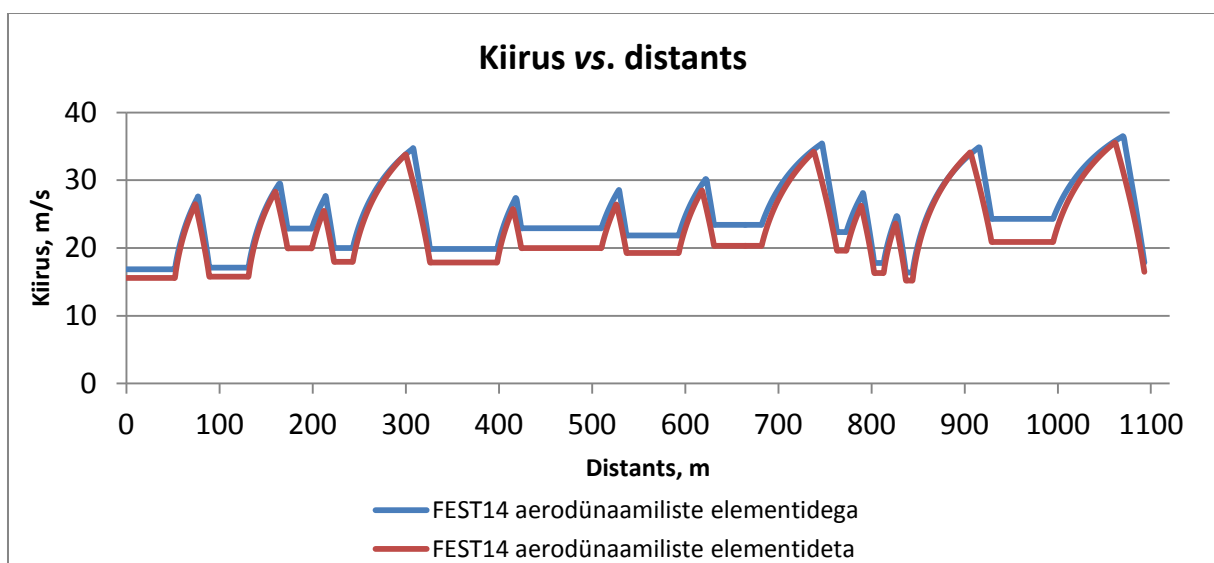
**Sele 8. FEST14 õhuvoolude visualiseerimine eksperimentaalselt ja *CFD* analüüsis**

*CFD* analüüsi ja eksperimentaalse katsetuse tulemused ühtisid küllaltki täpselt. Oodatult püsisid õhuvoolud tiiva all ega toimunud õhuvoolude eraldumist profiili pinnalt. Eksperimentaalses katses võis näha *CFD* analüüsisides prognoositud keerised otsaplaatide ülemistel servadel. Lisaks on hästi nähtavad õhuvoolud, mis keeravad ennast üle otsaplaadi alumise serva tiiva alla.

## 5. RINGIAJASIMULATSIOON

Teiseks sammuks aerodünaamika paketi projekteerimisel on ringiajasimulatsioon. Ringiajasimulaatorina kasutatakse autori poolt kirjutatud programmi, mis tugineb James Hakewilli lõputööl „Lap Time Simulation“ [10]. Ringiajasimulaator on küllaltki lihtne ja tugineb punktmassi teorial. Antud programm võimaldab lihtsalt muuta vormeli põhikarakteristikuid, näiteks: mass, võimsus, survejõud ja takistusjõud. Suurtest reeglmuudatustest tingituna tuleb paika panna optimaalseimad aerodünaamilised parameetrid. Käesoleva aasta aerodünaamiliste elementide füüsilised mõõtmed on oluliselt väiksemad ja seeläbi saavutatav võit ka väiksem. Lähtudes sellest, on vaja esimese asjana välja selgitada minimaalsed aerodünaamilised näitajad, millest väiksemad väärtused ei annaks enam rajalist võitu. Lisaks tuleb leida erinevate aerodünaamiliste näitajate mõju vormelile ja optimaalseimad parameetrid tagamaks suurimat efektiivsust.

Antud programm on kirjutatud Rapla kardiraja kohta, kus toimub enamus tudengivormeli testidest. Väljundandmeteks on ringiaeg ja keskmine, minimaalne ja maksimaalne kiirus. Eelmise aasta tulemuste põhjal hindas ringiajasimulaator ringiaega mõne sekundi võrra kiiremaks kui seda olid eksperimentaalsed katsetused. Viga tuleneb suuresti sellest, et simulaator arvutab igas situatsioonis maksimaalse kiiruse, ega arvesta piloodi eksimusi. Lisaks on võimalik genereerida erinevaid graafikuid, näitena on välja toodud FEST14 ühe ringi kiiruste erinevused aerodünaamiliste elementidega ja ilma.

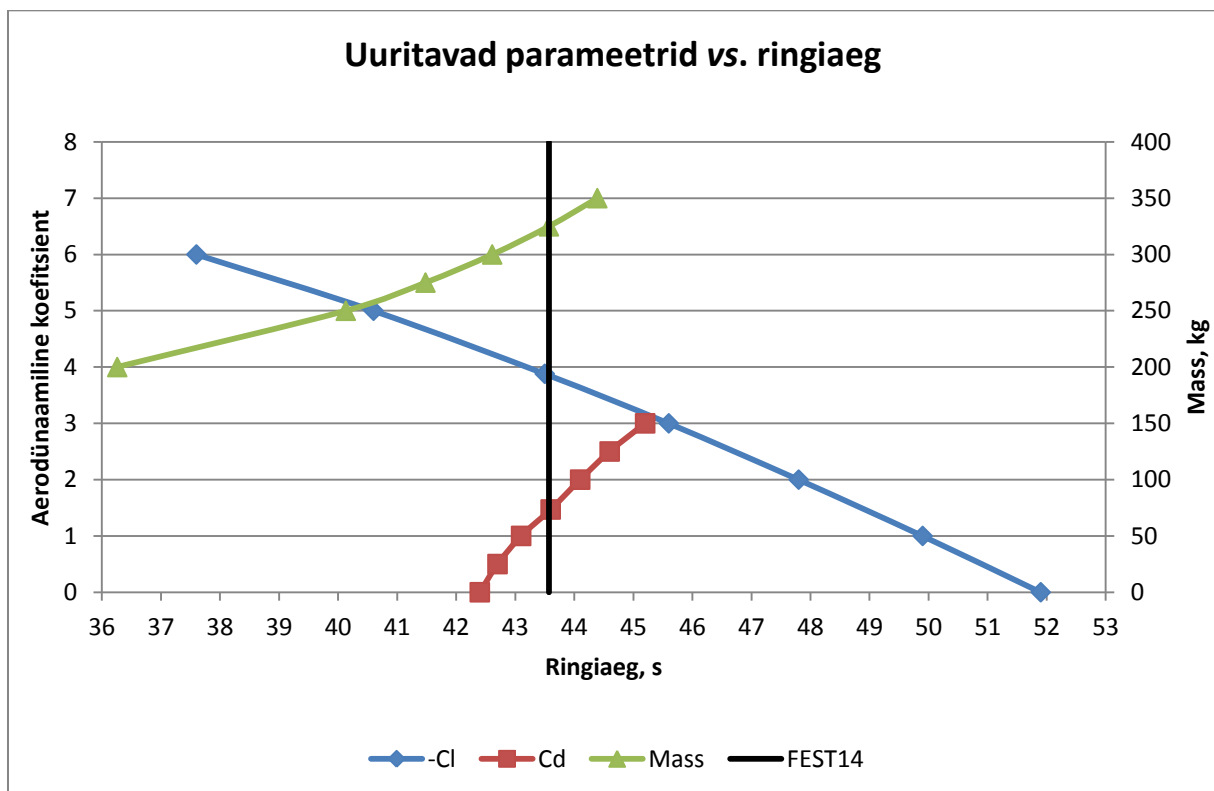


Graafik 3. FEST14 ringiajasimulatsioon

Lähtemudeli parameetritena kasutatakse eelmise aasta vormeli näitajaid:

- Rehvi pidavuse koefitsient: 1,4
- Vormeli mass koos juhiga: 325 kg
- Vormeli lauppindala: 1,43 m<sup>2</sup>
- Survejõu koefitsient: 3,88
- Takistusjõu koefitsient: 1,47
- Mootori võimsus: 80 kW
- Ülekande efektiivsus: 95%

Aerodünaamilist disaini mõjutavateks suurusteks on surve- ja takistusjõu koefitsiendid ning mass. Saamaks teada iga parameetri mõju ringiajale muudetakse iga parameetrit eraldi ja jättes teised väärtused muutumatuna. Graafik 4 illustreerib uuritud parameetrite mõju ringiajale.



Graafik 4. Uuritavad parameetrid vs. ringigaeg

Esimese punktina vaadeldakse survejõu mõju ringiajale. Graafikult on näha, et survejõud mõjutab oluliselt ringiaega ja omab suurt rolli vormeli dünaamikas. Näiteks ilma aerodünaamiliste elementideta vormeli ja eelmise aasta vormeli ajaline vahe on ligikaudu 6 sekundit. Küll aga tulenevalt uutest reeglitest on selle aasta maksimaalne saavutatav survejõu koefitsient väiksem. Saadud seose põhjal võib teha järelduse, et aerodünaamika paketi projekteerimisel tuleks püüelda maksimaalse survejõu poole.

Järgnevalt vaadeldakse takistusjõu mõju ringiajale. Graafikult võib leida, et võrreldes survejõuga mõjutab takistusjõud oluliselt vähem ringiaega. Eelmisel aastal oli vastav näitaja 1,47 ja ilma aerodünaamiliste elementidega vormelil 0,7 ehk ajaline kaotus takistusjõu tõttu on umbes 1 sekund. Kuna takistusjõud oleneb suuresti lauppindalast, mis sellel aastal on reeglitest tulenevalt oluliselt väiksem, on oodata takistusjõu vähenemist. Järeldusena võib välja tuua, et projekteerimise faasis tuleks eelistada survejõu suurendamist üle takistusjõu vähendamise, kuna takistusjõud omab oluliselt väiksemat rolli ringiajale.

Kuigi eelmises lõigus leiti, et takistusjõud ei mõjuta suurel määral vormeli ringiaega tuleb siiski jälgida, et takistusjõud ei hakkaks piirama vormeli maksimaalset kiirust ringrajal. Takistusjõu poolt neelatud võimsuse ja vormeli maksimaalse kiiruse vahele on järgnev matemaatiline seos:

$$kW_{neeldunud} = \frac{C_d A v^3}{1,633} \quad (6)$$

kus  $C_d$  - takistusjõu koefitsient,  $A$  - vormeli lauppindala ja  $v$  - kiirus. [11]

Arvutamaks välja maksimaalset takistusjõu koefitsienti, mille juures ei oleks piiratud vormeli tippkiirus rajal, peame leidma maksimaalse kiiruse, mis võistlusrajal saavutatakse. Maksimaalseks kiiruseks võistlusrajal on umbes 120 km/h ehk 33,3 m/s, vormeli lauppindalaks loetakse eelmise aasta pindala 1,43 m<sup>2</sup> ja maksimaalselt neelatav võimsus 80 kW. Teisendades valemit on võimalik välja arvutada maksimaalne  $C_d$ .

$$C_d = \frac{kW_{neeldunud} * 1,633}{A v^3} = \frac{80 * 1,633}{1,43 * 33,3^3} = 2,52 \quad (7)$$

Saadud tulemus 2,52 on oluliselt suurem eelmise aasta takistusjõu koefitsiendist ja tulenevalt reeglimuudatustest on oodata uue vormeli takistusjõu vähenemist, mis omakorda tagab vormelile piisava maksimaalse kiiruse. Küll aga tasub märkimist, et antud arvutuse puhul ei ole arvestatud veeretakistust, seega tegelikkuses peaks maksimaalne takistusjõu koefitsient

olema veidi väiksem. Tehes arvutuse eelmise aasta takistusjõu kohta leiame, et kiirusel 120 km/h on neeldunud umbes 50 kW, mis tagab piisava võimsuse varu edasi kiirendamiseks.

Viimase punktina vaadeldakse vormeli massi mõju ringiajale. Graafikult on näha, et mass mängib sarnaselt survejõule väga suurt rolli ringi läbimise ajas. FEST14-ne aerodünaamika pakett kaalus ligikaudu 25 kg, mis ajaliselt tähendas umbes sekundilist kaotust. Graafikult võime leida, et massi vähendamine alates 250 kg-st vähendab drastiliselt ringiaega. Aerodünaamika pakett peab ringiaja vähendamiseks esmalt ületama enda massist tingitud lisasekundid ja alles siis on näha võitu ringiajas. Graafikult saame minimaalseks survejõu koefitsiendiks 0,4. Alla selle väärtuse ei ole mõtet tiibu projekteerida, kuna sellisel juhul ei tasu tiivad ennast lisamassi tõttu ära. Aerodünaamika paketi massi vähendamiseks tuleks projekteerimisel lähtuda sellest, et saavutada maksimaalne survejõud võimalikult väikeste kabariitmõõtmega aerodünaamiliste elementidega.

Kokkuvõtvalt võib aerodünaamika paketi projekteerimiseks välja tuua järgmised põhimõtted:

- Maksimaliseerida survejõudu
- Minimaalne survejõu koefitsient on 0,4
- Minimaliseerida takistusjõudu, kuid siiski eelistada suurema survejõuga lahendust
- Maksimaalne takistusjõu koefitsient, mida ei tohi ületada on 2,52
- Minimaliseerida massi ehk eelistada väiksemate kabariitmõõtmega lahendust

## 6. VOOLAVUSANALÜÜSID

Aerodünaamika paketi väljatöötamiseks on võimalik kasutada kolme erinevat meetodit:

- Voolavusanalüüs ehk *CFD*
- Tuuletunnel
- Ringrajal testimine

Igal meetodil on omad plussid ja miinused. Kõige esimeseks meetodiks uue aerodünaamika paketi väljatöötamisel on voolavusanalüüs ehk *CFD*. *CFD* meetodi eeliseks on kindlasti tema odavus ja katsete piiramatuse. Katsete tegemiseks ei ole vaja füüsilist keha. Pärast esialgse lahenduse väljatöötamist kasutatakse *CFD* tulemuste valideerimiseks tuuletunnelit. Tuuletunneli eeliseks on kontrollitava keskkonna kasutamine ja põhiliseks miinuseks eksperimendi kõrge hind ja füüsilise mudeli olemasolu vajadus. Just kõrge maksumuse tõttu ei ole tudengivormeli tiim seda meetodit kasutanud. Peale parima lahenduse väljavalimist ja ehitamist testitakse valminud lahendust ringrajal. [7]

Järgnevas peatükis seletatakse lahti *CFD* simulatsiooni tegemiseks vajalikud etapid ja teostatakse vajalikud analüüsid vormeli aerodünaamiliste parameetrite leidmiseks erinevates rajatingimustes. Ringiajasimulatsiooni tulemuste põhjal on *CFD* analüüside eesmärgiks seatud maksimaalse survejõu saavutamist minimaalse takistusjõu juures. Minimaalse massi saavutamiseks tuleb proovida saavutada maksimaalne survejõud võimalikult väikeste tiibadega.

### 6.1. Analüüsi ülesehitus

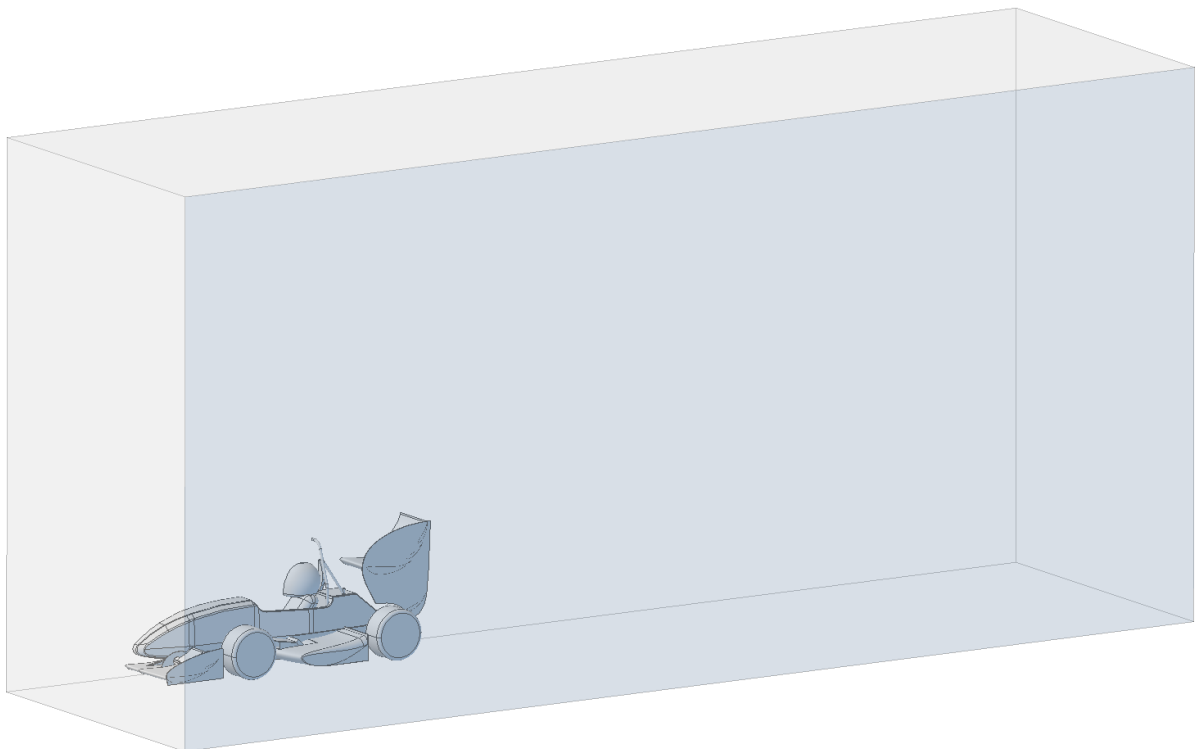
*CFD* simulatsiooni esimeseks etapiks on mudeli projekteerimine *CAD* tarkvaras, mida on analüüsiaja vähendamiseks võimalikult palju lihtsustatud. Järgmise etapina sisestatakse mudel *CFD* programmi, kus toimub mudeli geomeetria kontrollimine, puhastamine ja elementideks jaotamine. Peale lähteandmete sisestamist ja füüsilise mudeli seadistamist teostatakse analüüs. Analüüsi tüübiks on *steady state* analüüs ja turbulentsuse mudelina on kasutatud  $k-\epsilon$  mudelit. Etteantud interatsioonide täitumise järel toimub tulemuste visualiseerimine ja analüüs. Antud töös kasutati *CAD* programmina CATIA V5R21 ja *CFD* analüüside teostamiseks tarkvara Autodesk Simulation CFD. Lõpliku lahenduse saavutamiseks teostati ligikaudu 200 analüüsi.



Järgnevate etappide visualiseerimiseks ja analüüsimiseks on kasutatud analüüside parimat ja ühtlasi ka lõplikku lahendust.

### 6.1.1. CAD mudel

Nagu eelnevalt mainitud on *CFD* jaoks *CAD* mudelit oluliselt lihtsustatud. Vormeli küljest on ära jäätud kõik väiksemad detailid ja lisaks on kasutatud sümmeetriatasandina vormeli kesktelge ehk simulatsioonis kasutatakse poolt vormelit. Poole vormeli kasutamine *CFD* analüüsidest võimaldab vähendada oluliselt analüüsiks kuluvat aega ja andmemahtu. Selel 9 on näha projekteerimisfaasi lõpptulemusena valminud *CAD* mudelit *CFD* jaoks. *CFD* analüüsi teostamiseks on vormeli ümber projekteeritud õhukeha, mille piires teostatakse arvutused. Rusikareeglina peaks õhukeha ulatuma 2 vormeli pikkuse võrra ette poole, küljele ja kõrgusesse ning minimaalselt 5 vormeli pikkuse võrra taha poole. [12]

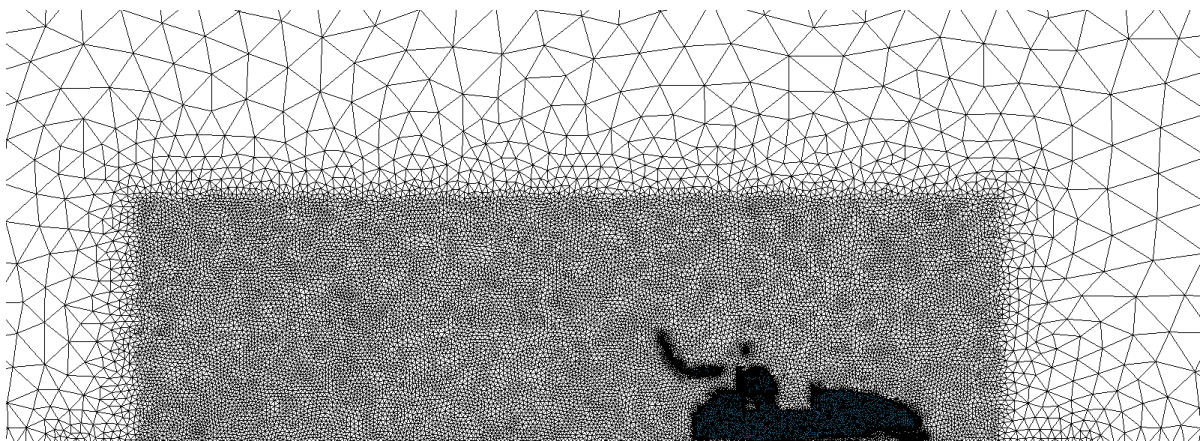


Selel 9. *CFD* analüüsis kasutatav *CAD* mudel koos kohandatud õhukehaga

## 6.1.2. Elementideks jaotamine

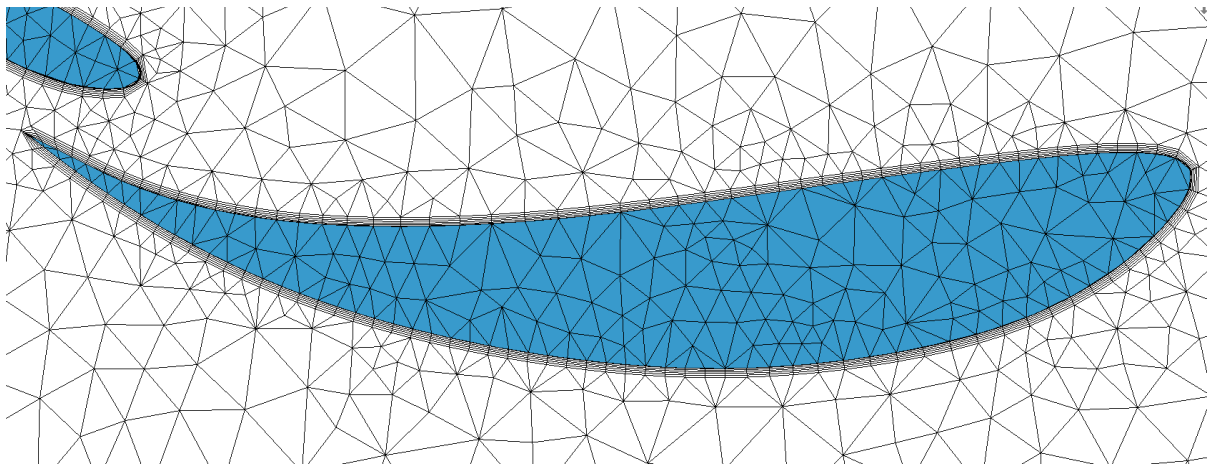
*CFD* simulatsiooni teostamiseks jaotatakse *CAD* mudel väikesteks elementideks, mille tihedusest ja kvaliteedist oleneb analüüsi täpsus ning stabiilsus. Üldreeglina tagab elementide suurem arv analüüsi suurema täpsuse. Samas suureneb elementide arvu suurendamisega analüüsi teostamiseks kuluv aeg. Arvestades tudengivormeli tihedat graafikut on analüüside teostamise aeg oluliseks faktoriks lõpptulemusele. Tulenevalt arvuti võimsuse piirangutest on eelnevatel aastatel kasutatud võrku suurusega umbes 3 miljonit elementi. Elementide kujuks on kasutatud tetraeedrilisi elemente. Saamaks teada optimaalse võrgustiku suurust on järgnevalt teostatud tundlikusanalüüs.

Eelnevate aastate jooksul on kasutatud väga erinevaid lähenemisviise mudeli elementideks jaotamisel. Eelmisest aastast alates on kasutusel tihedamate elementidega regioonid. Regioonide põhimõtte seisneb selles, et kui vormelist kaugel asuvad elemendid on võimalik jaotada küllaltki suurteks elementideks ilma, et see tulemust muudaks, siis regioonide kasutamisega on võimalik vormeli lähedal olevad elemendid jaotada väga väikesteks osadeks. Regioonide kasutamise eelis seisneb selles, et kohad kus kiiruse ja rõhu gradiendid on suuremad, on võimalik kasutada väiksemaid elemente ja saavutada suurem täpsus. Seejuures vormelist kaugemal alal on võimalik kasutada suhteliselt suuri elemente. Selle tulemusena on võimalik hoida elementide arv väiksemana tagades siiski analüüsi täpsuse. Seel 10 on näha vormelit ümbritsev tihedamate elementidega regioon.



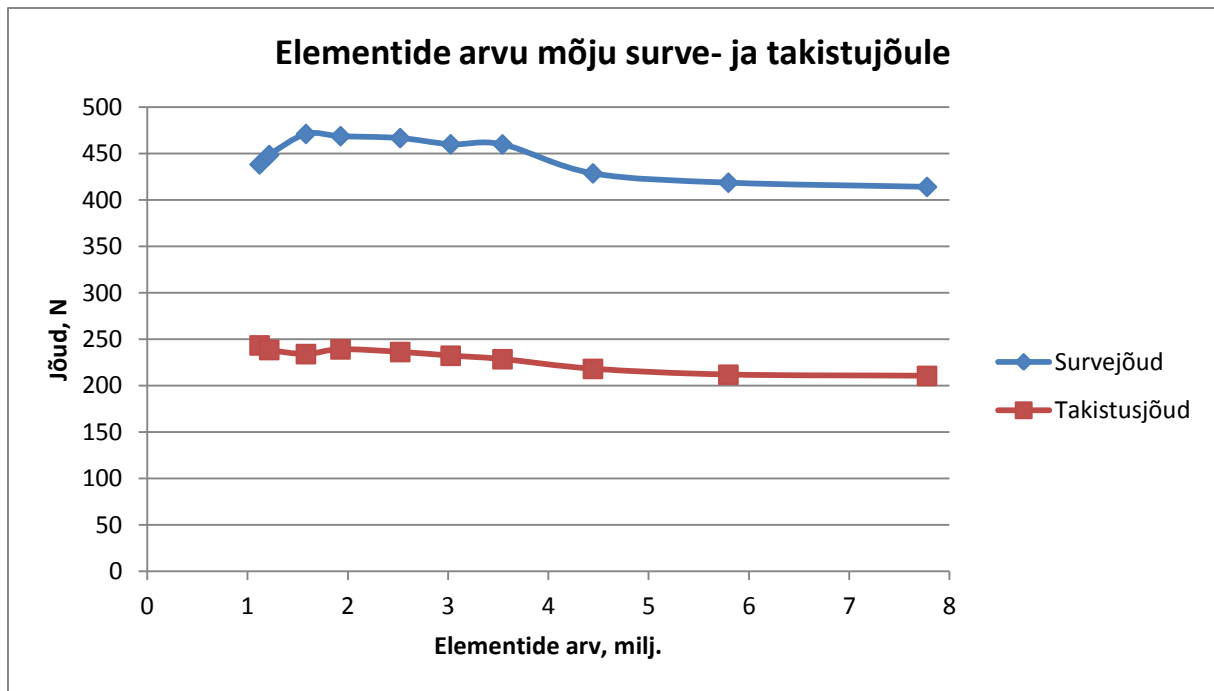
**Sele 10. Regioonide kasutamine erinevate elementide tiheduse saavutamiseks**

Õhuvoolude täpseks kirjeldamiseks pinna vahetus läheduses kaustatakse tihedamate elementidega piirikihti. Kuna õhu kiirus pinnal on null ja vastavalt pinnalt eemaldumise kaugusega kasvab kiirus kuni globaalse voolukiiruseni. Antud voolukiiruse muutuse täpseks analüüsimiseks ongi vajalik kasutada piirikihte. Piirikihi elementide täpsusest sõltub millisel hetkel hakkavad õhuvoolud tiiva pinnalt eralduma. Piirikihid tekitatakse igale pinnale, mis on analüüsis ja omab hõõret. Piirikihti ei tekitata sümmeetriapindadele. Igale pinnale on kokku tekitatud 5 piirikihti. Esimese kihi paksuse suhe elemendi külje pikkusega on 5 ja kihtide paksuse kasvuk on määratud 20%. [13]



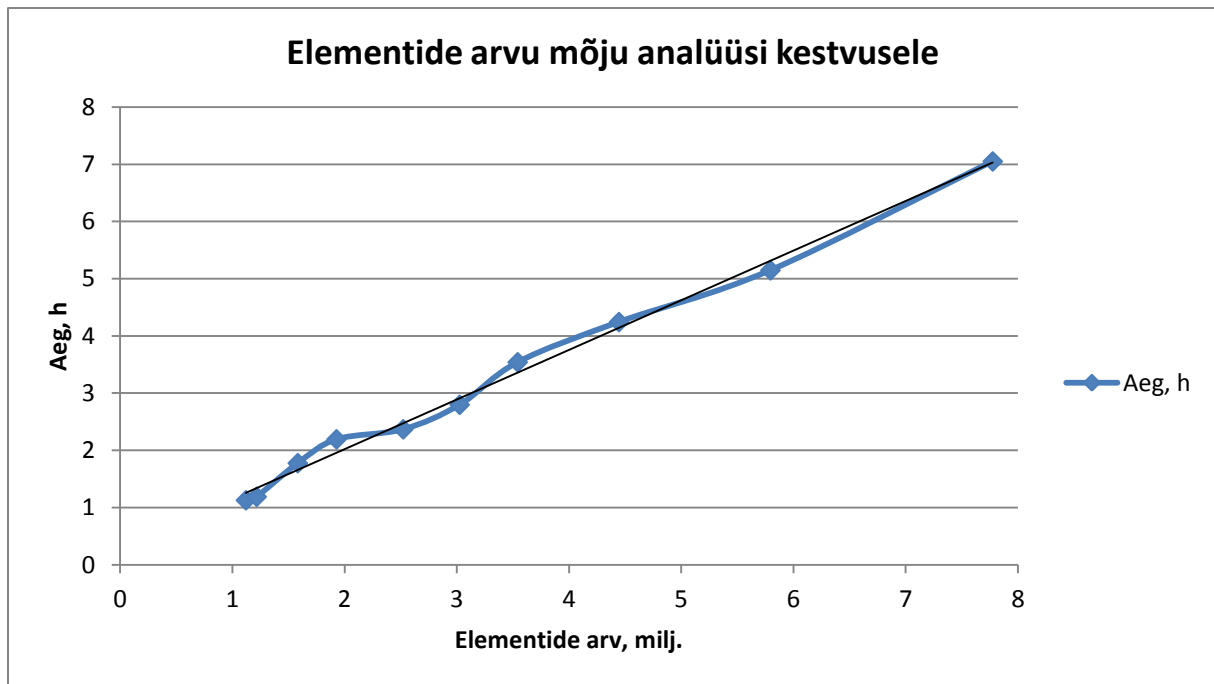
**Sele 11. Piirikihi elemendid**

Uurimaks elementide arvu mõju tulemustele on seatud ette piirang, et vormelist kaugemal alas olevad elemendid võivad olla 10 korda suuremad vormeli läheduses olevatest elementidest. Elementide arvu muutmiseks on muudetud parameetrit, mis muudab vormeli läheduses oleva elemendi suurust. Graafikul 5 on välja toodud vormelile mõjuvate aerodünaamiliste jõudude suurused erinevate elementide arvu korral.



**Graafik 5. Elementide arvu mõju surve- ja takistusjõule**

Graafikult on näha, et analüüsi tulemused on ebastabiilsed kuni 5 miljoni elemendini, peale seda tulemused stabiliseeruvad ja omandavad küllaltki konstantse väärtuse. Siit võib järeldada, et eelmise aasta analüüside suur erinevus eksperimentaalsete katsetustega oli suuresti tingitud elementide ebapiisavast arvust. Antud analüüs näitab, et sõltuvalt võrgu suurusest võivad survejõu tulemused varieeruda kuni 12%. Lisaks on graafikult näha, et survejõu väärtused kõiguvad rohkem ja on ebastabiilsemad kui seda on takistusjõu väärtused. See tuleneb sellest, et takistusjõud oleneb rohkem sõiduki lauppindalast ja survejõud geomeetria täpsusest. Järgnevalt on toodud välja eelmiste analüüside teostamiseks kulunud aeg.



**Graafik 6. Elementide arvu mõju analüüsi kestvusele**

Võrgustiku suuruse ja analüüsi kestvuse vahel on tugev lineaarne seos. Mida rohkem on elemente, seda kauem võtab analüüs aega. Eelnevalt leidsime, et analüüsid alla 4 miljoni elemendiga on ebatäpsed ja tuleks kasutada sellest suuremat võrgustikku.

Arvestades ajalist kulu on optimaalseks võrgustiku suuruseks 6 miljonit elementi. Sellise võrgustiku suurusega on teostatud ka järgnevad analüüsid. Elemendi serva pikkuseks teeb see kuni 50 mm vormeli läheduses olevale elemendile ja umbes 500 mm vormelist kaugemates alades.

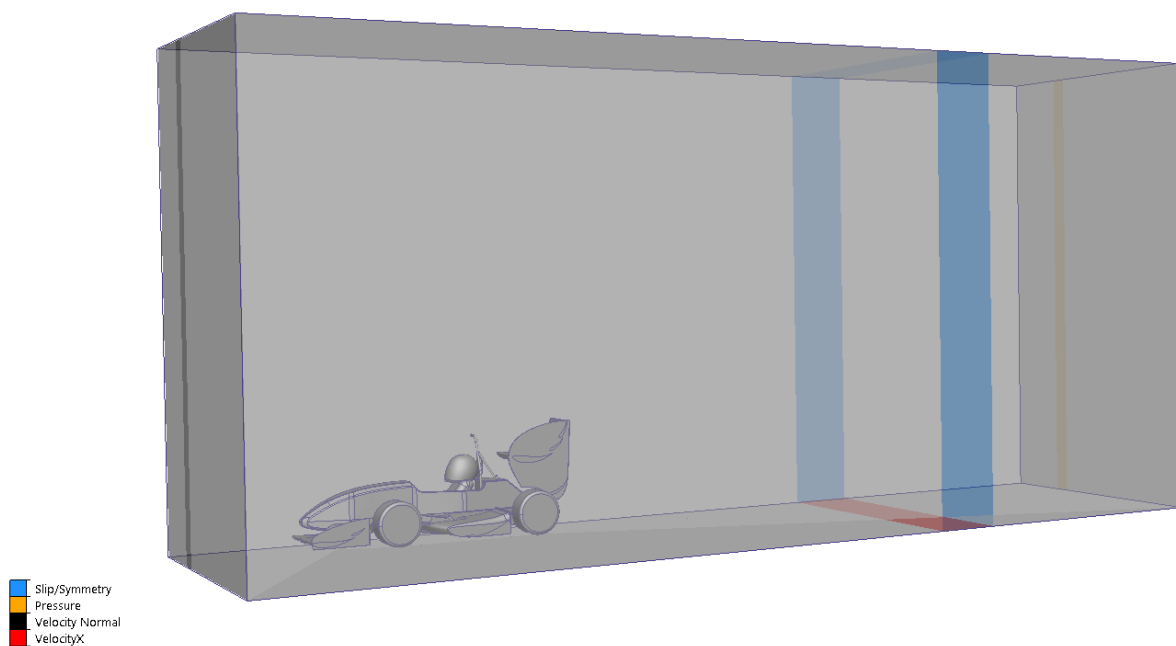
### 6.1.3. Rajatingimused

Voolavusanalüüsi tulemused sõltuvad olulisel määral etteantud rajatingimustest. Üldjoontes kasutatakse antud töös kolme erinevat tingimust. Töös kasutatavad rajatingimused on näidatud seel 12. Õhukeha tahkudele on omistatud järgnevad rajatingimused:

- Esimesele tahule omistati õhu sisendkiiruseks 55 km/h ehk õhu liikumise kiirus. Kiirus on valitud võistluste keskmise kiiruse järgi.
- Tagumisele tahule omistati õhu väljundi rõhu väärtuseks 0 Pa.

- Tee veeremise simuleerimiseks omistati alumisele pinnale kiirus 55 km/h, õhuvooluga samas sihis.
- Ülejäänud tahkudele on antud hõõrdeta pinna omadused. Praktikas on seda vaja ainult sümmeetriatasandi hõõrdevabaks pinnaks tegemiseks. Kaks külgmist tahku võib jätta ka ilma piiritingimusteta.

Suuremate lihtsustustena võib välja tuua selle, et vormeli rattad ei pöörle. Antud tingimus on kõrvale jäetud eelkõige seetõttu, et dünaamilise võrgu tegemine on oluliselt andmemahu ja aja mahukam. Selle lihtsustuse tulemusena on rataste arvutuslik takistus mõnevõrra väiksem kui tegelikkuses. Lisaks eelnevatele tingimustele on vormeli pinnale omistatud hõõrdetegur, mis simuleerib komposiitmaterjalide pinnakaredust.



**Sele 12. CFD mudeli rajatingimused**

#### **6.1.4. Füüsikaline mudel**

Sarnaselt elementideks jaotamisega on füüsikalise mudeli õige seadistamine korrektsete tulemuste saamiseks väga oluline. Järgnevalt esitatakse simulatsioonis kasutatava füüsikalise mudeli seadistused.

Esiteks, kuna analüüsid teostatakse konstantse kiiruse juures, siis kaustatakse analüüsis *steady state* režiimi. Kokkusurutavuse režiimi valikuks arvutati välja Mach number järgmise valemiga 8.

$$M = \frac{u}{c} = \frac{55 \text{ km/h}}{1236 \text{ km/h}} = 0,04 \quad (8)$$

kus  $M$ - Mach number,  $u$ - õhu kiirus analüüsis,  $c$ - heli kiirus. [14]

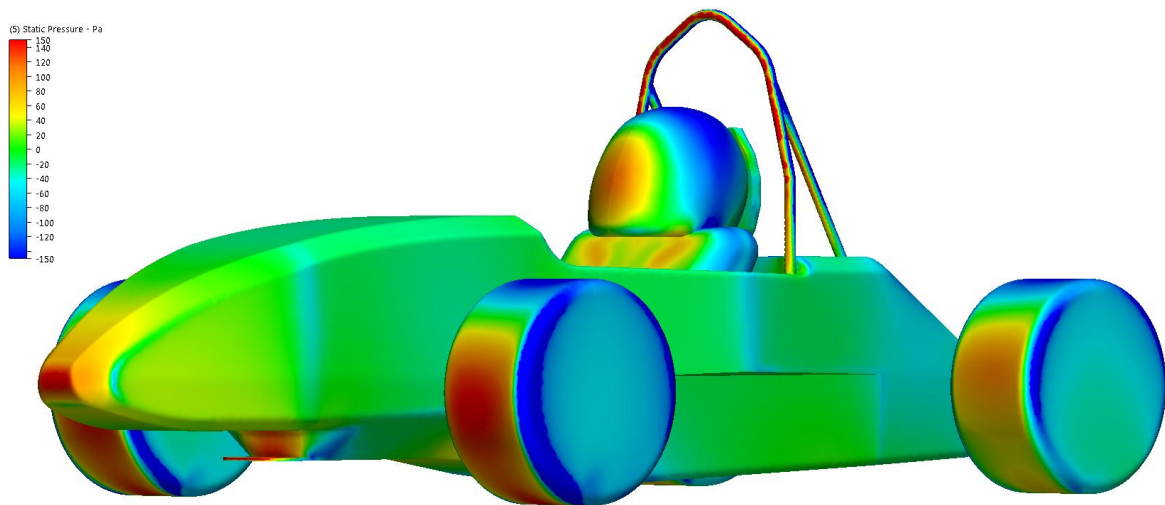
Õhu puhul võib kasutada kokkusurumatu vedeliku võrrandeid juhul kui Mach number on väikse kui 0,3. See tuleneb sellest, et madalamatel kiirustel on õhu kokkusurutavus väga väike ega oma tulemustele suurt rolli. Kuna antud juhul on Mach number 0,04, siis kasutatakse kokkusurumatu vedeliku võrrandeid. Kokkusurumatu vedeliku võrrandite kasutamine tagab analüüsi kiirema ja stabiilsema koonduvuse võrreldes kokkusurutava vedeliku võrranditega. [15]

Turbulentsuse seadistustes on valitud turbulentne voolavus ja turbulentsuse mudeliks  $k$ -epsilon. Antud mudel on laialdaselt kaustatud autotööstuses ja on soovitatav väga erinevate analüüside jaoks. Võrreldes teiste mudelitega on  $k$ -epsilon kiirem ja stabiilsem. Lisaks ei ole  $k$ -epsilon nii riistvara nõudlik kui seda on teised turbulentsuse mudelid ja on sobilik kasutamiseks kui pole võimalik kasutada piisava elementide arvuga võrku. Mudeli  $k$ -epsilon miinuseks on see, et tulenevalt lihtsustustest ja robustsusest ei suuda antud mudel väga hästi arvutada õhuvoolude eraldumist pindadelt. Turbulentsuse iseloomustamiseks lahendatakse kahest võrrandist koosnev süsteem. Milles esimeses tähistab  $k$  turbulentsuse kineetilist energiat ja teises tähistab epsilon turbulentsuse energia hajuvust. Tänu nendele parameetritele on võimalik arvestada turbulentsi energia konvetsiooni ja difusiooni. [15,16]

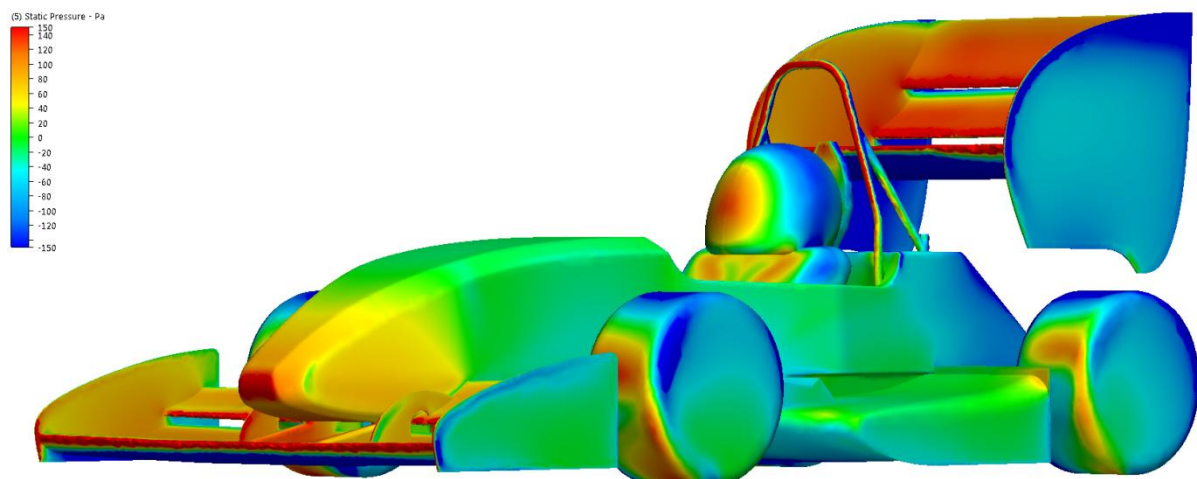
Koonduvuse ja analüüside võrreldavuse tagamiseks on ületatud koonduvuse piir, mis toimub umbes 700 iteratsiooni juures, ja teostatud igal analüüsil 1000 iteratsiooni.

## 6.2. Aerodünaamilised parameetrid sõites sirgel

Järgnevalt esitatakse simulatsiooni tulemused vormeli erinevate konfiguratsioonide korral. Baasmudeliks on võetud vormel aerodünaamiliste elementideta ja sealt edasi liigutud lõpplahenduse juurde ehk rajaseadistuse juurde. Lisaks on välja toodud aerodünaamilised näitajad kiirendusseadistuses tiibadega vormelile ehk tiivad on seadistatud asendisse, kus nad tekitavad võimalikult vähe takistusjõudu. Erinevuste visualiseerimiseks on järgnevalt esitatud iga konfiguratsiooni staatiliste rõhkude pildid.

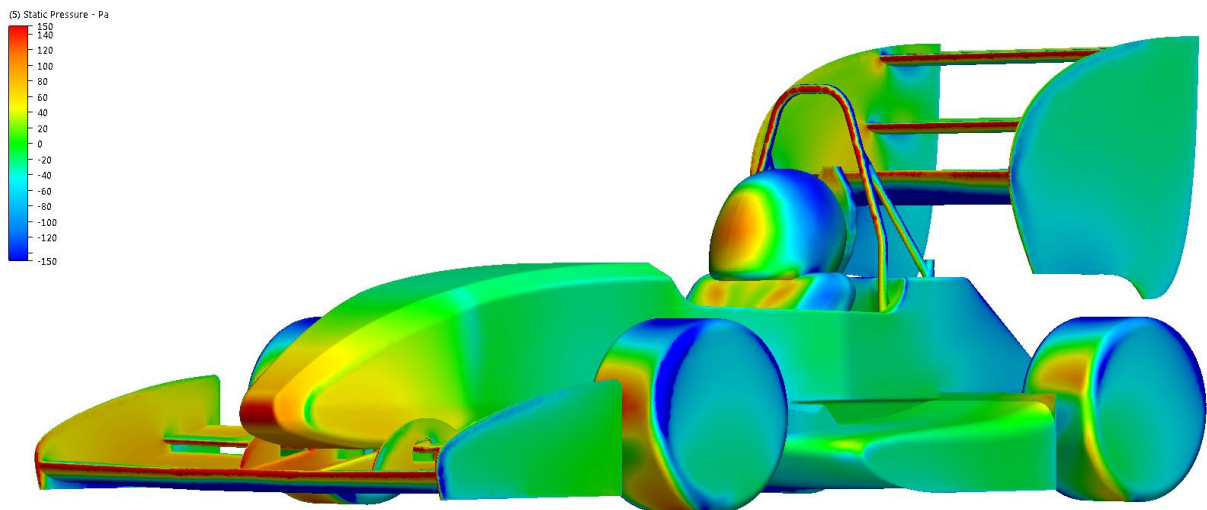


Sele 13. Staatiline rõhk baasmudelil



Sele 14. Staatiline rõhk rajaseadistuses mudelil





**Sele 15. Staatile r hk kiirendusseadistuses mudelil**

Esimese muutusena on näha rõhu muutused rehvide peal. Rehvi lauppinnale tekib aerodünaamiliste elementidega vormelil oluliselt madalam r hk ehk esitiib aitab õhku suunata üle rehvi, mille tulemusena väheneb rehvide takistusjõud. Ühtlasi on esirehvi esine ala üheks kõige efektiivsemaks kohaks kuhu tiib paigutada. Sarnane tendents toimub ka tagarehviiga. Vastavad arvulised v artused on baasmudeli esirehvil 24 N ja tagarehvil 16 N, ning aerodünaamiliste elementidega vormelil 16 ja 14 N. Aerodünaamiliste elementide kasutamine mõjutab oluliselt ka kere aerodünaamilisi omadusi. Nimelt takistab esitiib õhu liikumist ümber nina. Rõhu piltidelt on näha, et aerodünaamiliste elementidega vormelitel on tekkinud nina tippu kõrgenenud r hk. Antud olukorda aitab leevendada võimalikult kõrge ja terava nina disainimine. Kuna tagatiib suunab õhku ülesse poole tekib kere tagumistele pindadele alarõhk, mille tulemusena suureneb kere enda takistusjõud. Baasmudeli kere takistusjõud on 32 N ja rajaseadistuses vormeli kerel 60 N.

Võrreldes raja- ja kiirendusseadistuses vormelit on koheselt näha, et tiibade keeramise tulemusena on tiibadel peal oluliselt madalam ülerõhk ja tiiva all väiksem alarõhk. Selle tulemusena väheneb surve- ja takistusjõud. Survejõud väheneb ligi kaks korda, vastavad numbrid on rajaseadistuses vormelil 460 N ja kiirenduse seadistuse korral 256 N. Eelnev informatsioon on kokku võetud tabelis 2.

**Tabel 2. FEST15 konfiguratsioonid**

Komponent	Baasmudel		Rajaseadistus		Kiirendusseadistus	
	Survejõud, N	Takistusjõud, N	Survejõud, N	Takistusjõud, N	Survejõud, N	Takistusjõud, N
Kere	-10	32	20	60	10	48
Esi rattad	-20	24	-20	16	-20	18
Taga rattad	-16	16	-15	14	-14	10
Esitiib	-	-	202	28	154	12
Tagatiib	-	-	210	92	82	18
Difuusor	-	-	62	18	44	14
Kokku	-46	76	460	228	256	122

Võrdlemaks saavutatud tulemusi eelmise aasta vormeliga on välja arvatud aerodünaamilised koefitsiendid.

**Tabel 3. FEST15 konfiguratsioonid**

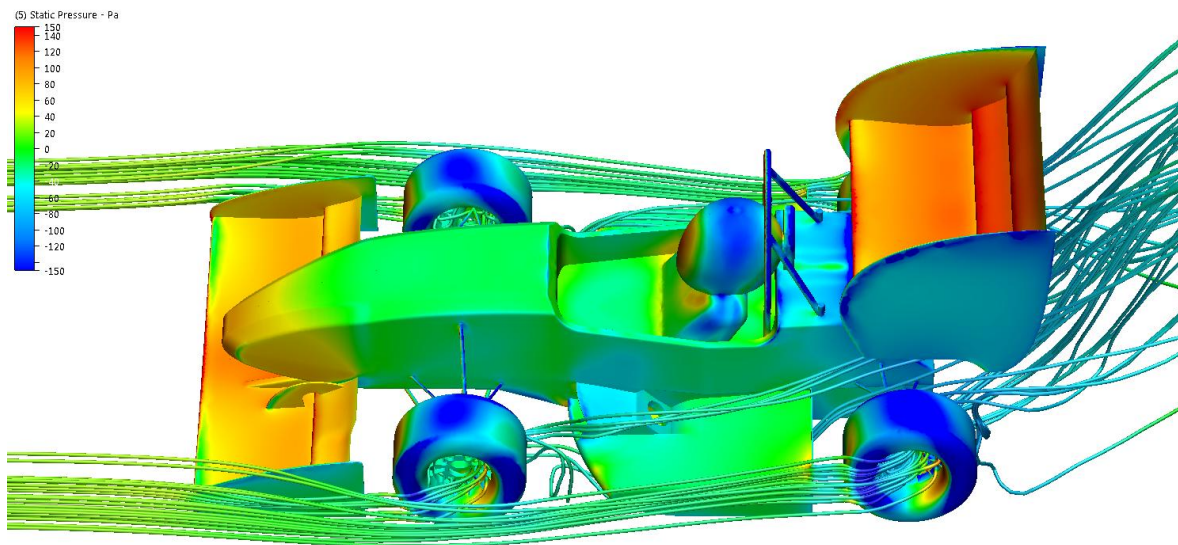
FEST15 konfiguratsioon	$-C_1$	$C_d$	$-C_l/C_d$	%esi, %	A, m <sup>2</sup>
FEST15 ilma aerodünaamikata	-0,26	0,44	-0,60	-	0,62
FEST15 aerodünaamikaga, rajaseadistus	2,72	1,40	1,94	49,62	1,11
FEST15 aerodünaamikaga, kiirendusseadistus	2,01	0,95	2,12	66,67	0,88

Võrreldes eelmise aasta vormeliga on survejõu kadu ligikaudu kahekordne. Ühtlasi on saavutatud efektiivsus väiksem. Kui eelneval aastal oli vastav näitaja 2,64, siis sellel aastal on efektiivsuseks 1,94. See tuleneb uutest reeglitest, mille tulemusena on tagatiib madalamal ja töötab ebaefektiivsemas keskkonnas. Positiivse suunana võib välja tuua vormeli lauppindala vähenemise, mille tulemusena on takistusjõu absoluutväärtus eelmise aastaga võrreldes poole väiksem. Vormeli parima juhitavuse tagamiseks on aerodünaamiline balanss jäetud samasse kohta ehk survejõud jaguneb esi- ja tagateljele ligikaudu võrdselt. Aerodünaamiline tasakaal muutub aga tunduvalt kui vormel on kiirendusseadistuses, sellisel juhul langeb ligikaudu 67% kogu survejõust esiteljele. See tuleneb sellest, et esitiiva poolt genereeritud survejõu kogus on eelkõige seotud tiiva kõrgusega maast ja vähem seotud tiiva nurgaga. Kui tahta säilitada ideaalset aerodünaamilist balanssi tuleks tõsta esitiiba kiirenduse ajaks kõrgemale.

FEST15 genereerib kiirusel 96km/h 1363N survejõudu, mis moodustab ligikaudu 45% vormeli massist, eeldatav vormeli mass koos juhiga on 300kg. Kiirusel 140km/h on survejõud

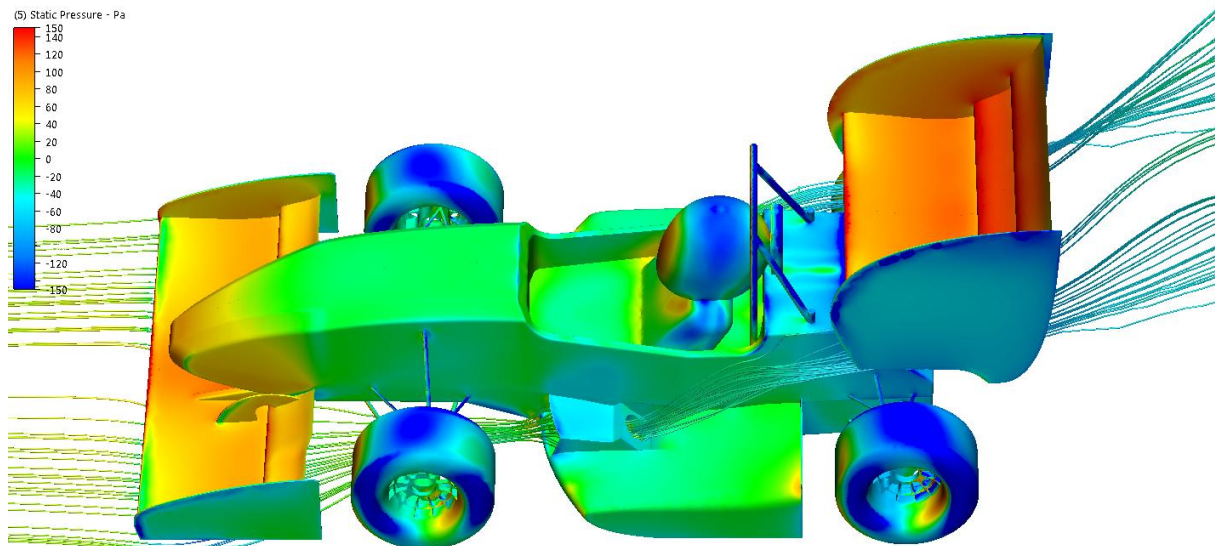
võrdne vormeli massiga. Eelmise aasta vormeli survejõud moodustas juba kiirusel 96 km/h 78% sõiduki massist ja kiirusel 110 km/h on survejõud võrdne vormeli massiga. Võrdluseks võiks tuua F1 vormeli, mille survejõud moodustab kõigest 18% sõiduki massist kiirusel 96 km/h. [17]

Aerodünaamika pakett avaldab mõju ka vormeli teistele sõlmedele. Seetõttu on ülimalt oluline jälgida ka teiste sõlmede funktsionaalsust aerodünaamiliste elementide projekteerimisel. Üks kriitilisemaid sõlmi on pidurisüsteem. Pidurdamisel tekkinud soojus kantakse piduriketastelt minema tänu õhuvoolule läbi veljetsentri. Tavaliselt voolab õhk ratta siseküljest läbi velje väljapoole, siis suurtest tiibadest tingituna tekkib ratta ja kere vahel alarõhk, mis tekitab õhuvoolu läbi veljetsentri ratta välisküljest sisse poole. Esiveljest voolab läbi 0,06 kg õhku sekundis ja tagaveljest voolab läbi 0,23 kg õhku sekundis. Seel 16 on näha õhuvoolud läbi velgede.



**Sele 16. Õhuvoolud läbi velgede**

Teise kriitilise punktina tuleb arvestada õhuvoolu läbi jahutussüsteemi radiaatori. Jahutussüsteemi efektiivsuse tõstmiseks on vaja radiaatorist läbi juhtida võimalikult palju õhku. Radiaatorid on integreeritud difuuseriga ühte ja moodustab ühtse terviku. Tänu sellele on võimalik tagada radiaatorite maksimaalne efektiivsus. Läbi radiaatori voolab 0,08 kg õhku sekundis. Seel 17 on näha õhuvoolu läbi radiaatori.



Sele 17. Õhuvoolud läbi radiaatori

### 6.3. Reguleerimisvõimalused

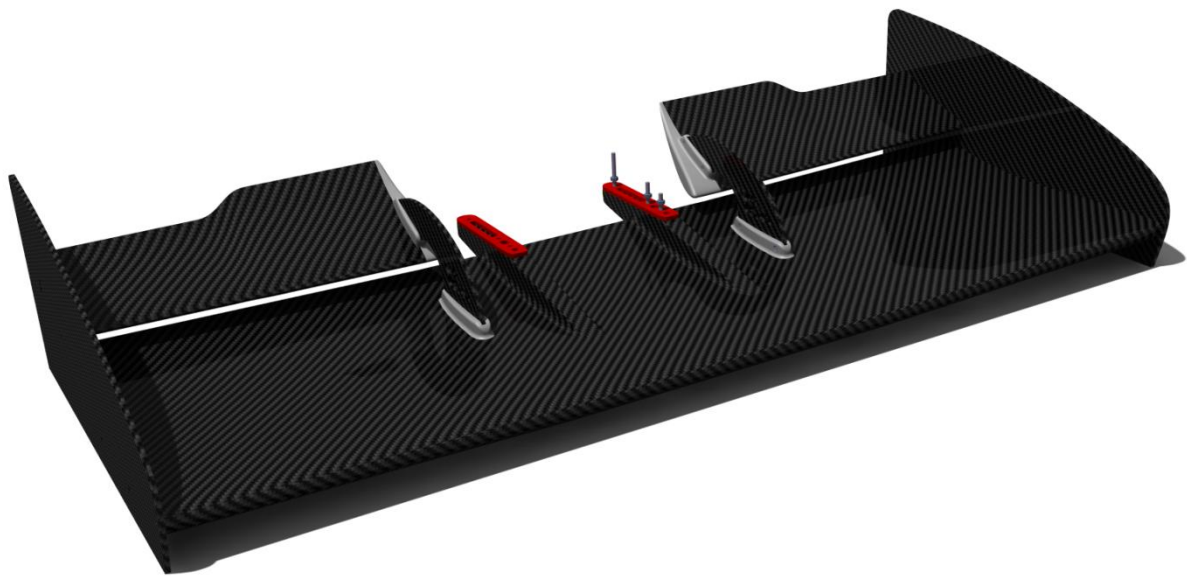
Eelmises punktis toodi välja rajaseadistuses vormeli andmed. Kogu aerodünaamilisest survejõust jagunes 49,63% esiteljele. Antud aerodünaamiline balanss tagab vormeli neutraalse ja stabiilse juhitavuse. Kuna igal sõitjal on erinev sõidustiil ja tulenevalt sõitja soovidest tekib vajadus vormelit üle- või alajuhitavaks seadistada. Selle tõttu peab olema tagatud aerodünaamika paketi piisav seadistatavus. Lisaks aitab reguleeritavus tagada *CFD* simulatsioonide ebatäpsuse kompenseerimist eksperimentaalses katsetuses. Aerodünaamilise balanssi muutmiseks on kõige otstarbekam seadistada esi- ja tagatiiba. Kuna difuusor asetseb vormeli telgede vahel omab difuusorist saadav survejõud aerodünaamilisele balansile minimaalset mõju. Järgnevalt esitatakse esi- ja tagatiiva reguleerimisvõimalused ja selle mõju aerodünaamilisele balansile.

#### 6.3.1. Esitiiva reguleerimine

Esitiiva reguleerimisel on otstarbekas kasutada ära tiiva lähedust maaga ehk maaefekti, mille tulemusena oleneb tiiva survejõud kõrgusest maapinnast. Tiiva kõrguse muutmisega on võimalik muuta survejõudu väga suures vahemikus. Lisaks tiiva kõrguse muutmisele on

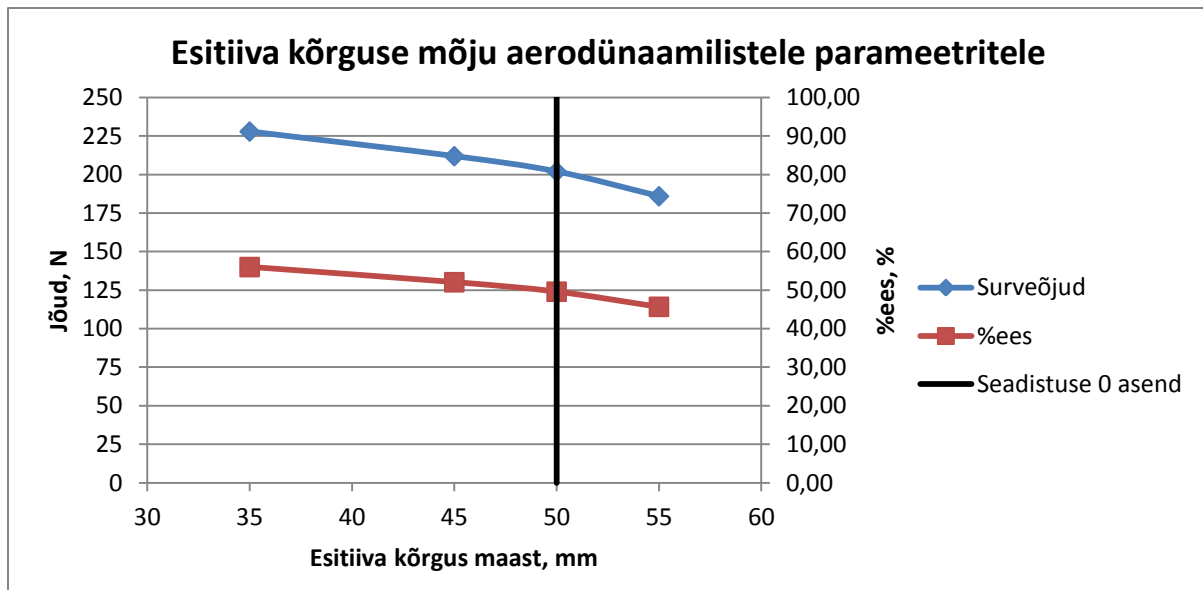
võimalik muuta ülemiste profiilide kohtumisnurka, ehk nurka mille moodustab tiiva kõõl õhuvoolu suunaga [18]. Kohtumisnurga muutus mõjutab kogu tiiva survejõudu oluliselt vähem kui seda teeb tiiva kõrguse muutus. Seetõttu antud töös ei käsitleta väikeste profiilide kohtumisnurga seadistamist lähemalt.

Tiiva kõrguse muutmine toimub läbi vaheflantside lisamisega monokokki ja tiiva kinnituse vahele. Selel 18 on punasega ära märgitud vaheflantsid, mida kasutatakse tiiva kõrguse muutmiseks. Kõrguse muutmine toimub 5 mm sammuga. Tiiva kõrgust on võimalik maksimaalselt tõsta 5 mm ja alandada 15 mm.



**Sele 18. Esitiiva kõrguse muutmine, vaheflantsid on märgitud punasega**

Esitiiva kõrguse muutusest tingitud survejõu ja aerodünaamilise balansi muutused on esitatud graafikus 7. Ühtlasi on ära märgitud eelnevates simulatsioonides kasutatud tiivakõrgus ehk 0 asend.



**Graafik 7. Esitiiva kõrguse mõju aerodünaamilistele parameetritele**

Tiiva kõrguse muutmise vahemikus muutub survejõud 42 N ehk survejõudu on võimalik muuta 20% ulatuses, mis on väga suur muutus. Tiiva tõstmise või langetamisega on võimalik aerodünaamilist balanssi muuta kuni 5% ette või taha poole.

### 6.3.2. Tagatiiva reguleerimine

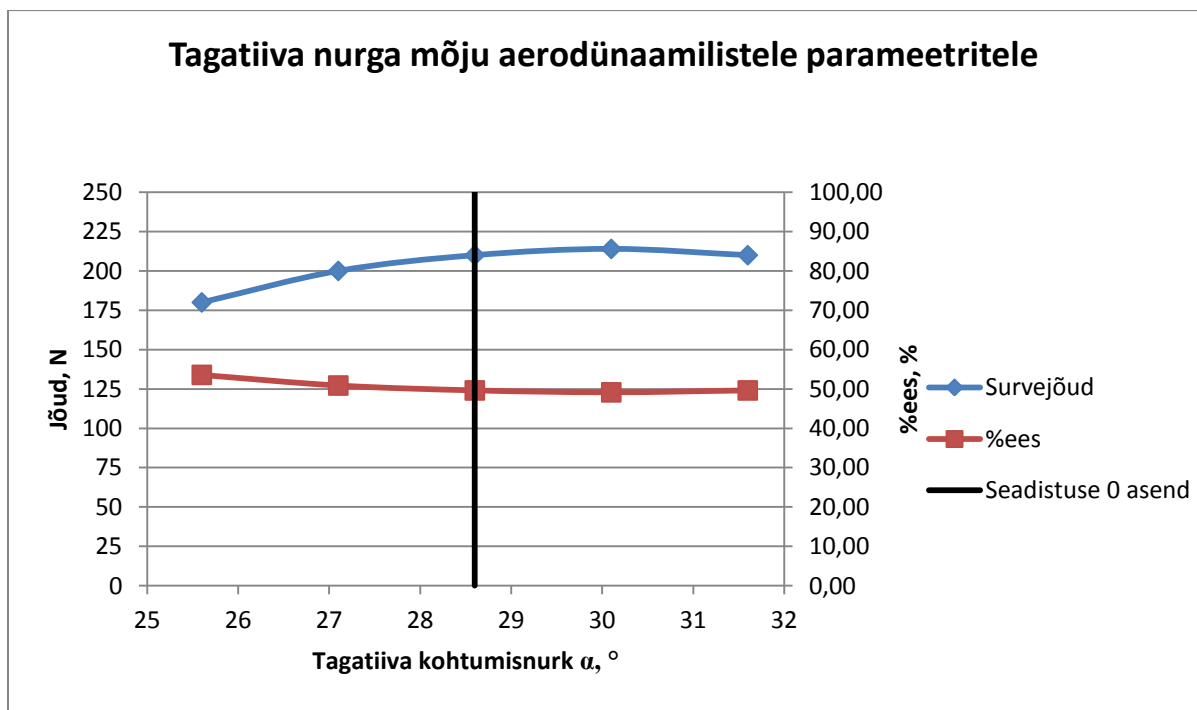
Tagatiiva reguleerimise vahemiku maksimaliseerimiseks seadistatakse terve tiiva kohtumisnurka. Lisaks on jäetud võimalus seadistada ülemise profiili kohtumisnurka. Kuna antud reguleerimisvahemik on küllaltki piiratud ja omab minimaalset efekti aerodünaamilistele parameetritele ei ole antud töös seda täpsemalt analüüsitud.

Terve tiiva kohtumisnurga reguleerimisel on oluline jälgida, et tiib jääks igas asendis reeglitega lubatud piiridesse. Kriitilisteks piiranguteks on kõrgus maapinnast ja kaugus tagarattast. Vältimaks tagatiiva nende sihelist liikumist on, erinevalt eelmisest aastast, reguleerimise avad toodud esimese kinnituse kõrva juurde. Seadistamis vahemikus saab tiiba keerata maksimaalselt 3° peale ja maha, ehk seadistamine toimub 6° vahemikus. Reguleerimise sammuks on 1,5°. Alloleval pildil on punasega märgitud kinnituskõrvad, millega toimub terve tiiva reguleerimine.



**Sele 19.** Tagatiiva kohtumisnurga seadistamine, regleerimisavadega detail on märgitud punasega

Tagatiiva kohtumisnurga muutusest tingitud survejõu ja aerodünaamilise balansi muutused on esitatud graafikul 8. Ühtlasi on ära märgitud eelnevates simulatsioonides kasutatud kohtumisnurk ehk 0 asend.



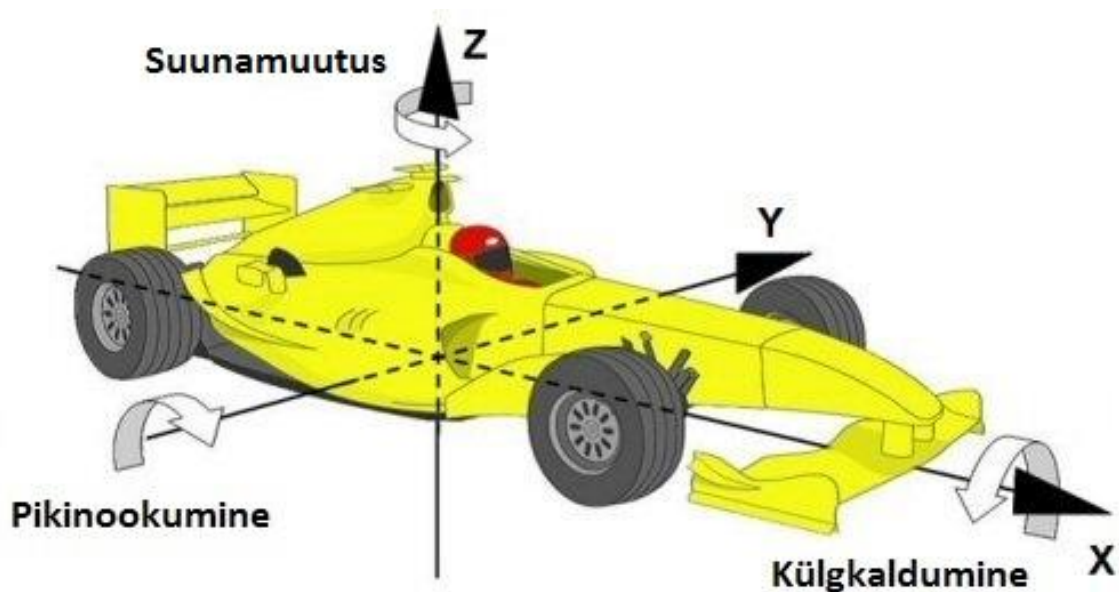
**Graafik 8.** Tagatiiva nurga mõju aerodünaamilistele parameetritele



Graafikult on näha, et kohtumisnurga muutmisel üle  $30^\circ$  hakkab survejõud vähenema. Survejõu vähenemine on seletatav õhuvoolude eraldumisega tiiva pinnalt ja tiib ei tööta enam kõige efektiivsemas alas. Kohtumisnurga vähendamisega miinimumini väheneb tagatiiva survejõud 15% ja aerodünaamilist balanss liigub sellisel juhul 5% ette poole.

#### 6.4. Aerodünaamilised parameetrid kurvis sõites.

Järgnevalt uurime vormeli aerodünaamilisi näitajaid sõitmisel kurvis. Tulenevalt sõidukite dünaamikast saab sõiduk muuta oma suunda ümber enda massikeskme kolmes suunas. Rotatsiooni ümber risttelje nimetatakse sõiduki suunamuutuseks (ingl. k. *yaw*) ehk kuhu on suunatud vormeli nina võrreldes vormeli liikumise suunaga. Nurka pikitelje ja sõiduki suuna vahel nimetatakse siirdenurgaks. Selline olukord esineb näiteks tugeva külgtuule korral, kurvi keerates ja kurvi keskel. Rotatsiooni ümber külgtelje nimetatakse pikinookumiseks (ingl. k. *pitch*) ehk kas vormeli nina on suunatud üles või alla. Selline olukord esineb näiteks tugeval kiirendamisel ja pidurdamisel. Rotatsiooniks ümber pikitelje nimetatakse külgakaldumiseks (ingl. k. *roll*) ehk küljelt-küljele kaldumine. Selline olukord esineb näiteks kurvis, kui vormelile mõjub külgiirendus jõud. Seel 20 on näidatud eelnimetatud suuna muutuse teljed ja suunad. [19]



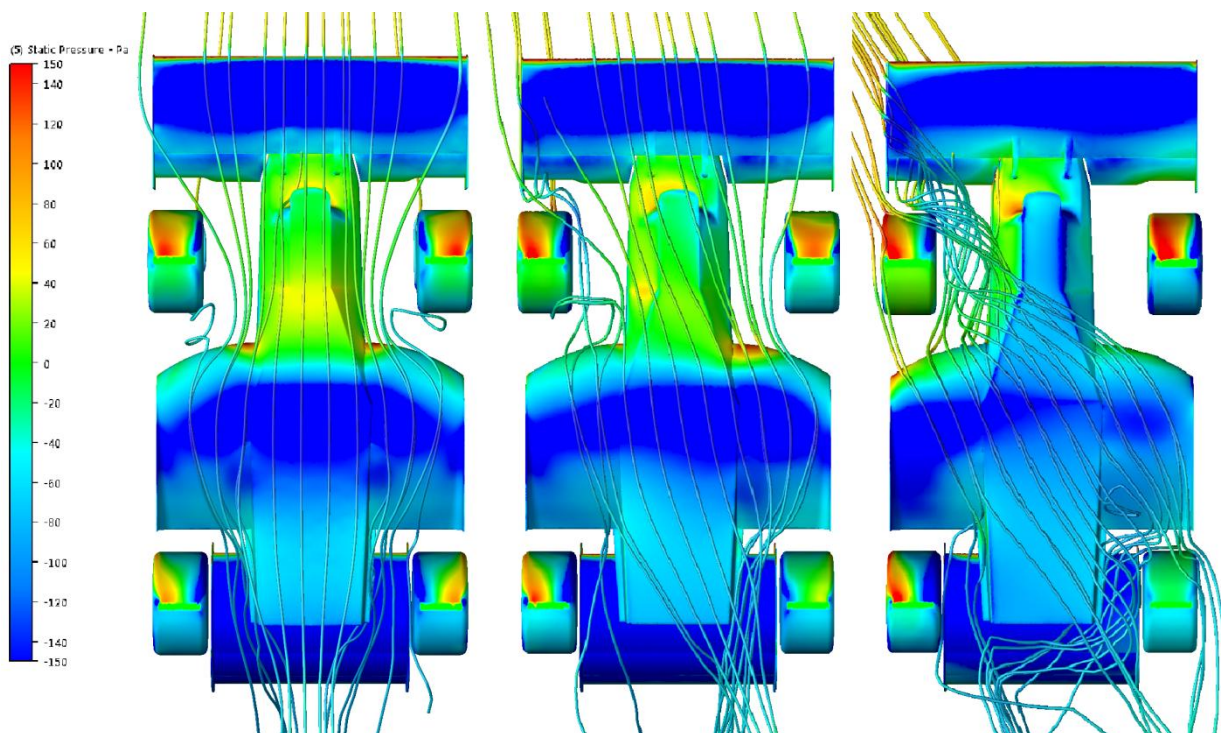
Sele 20. Sõiduki rotatsiooni suunad [19]



Antud töös uuritakse pöörlemist ümber iga telje eraldi. Kuigi ringrajal sõites toimub rotatsioon korraga kõigis suundades, siis lihtsuse mõttes vaadeldakse neid edaspidi eraldi. Selle tulemusena on eristatav iga rotatsiooni suuna mõju aerodünaamilistele parameetritele.

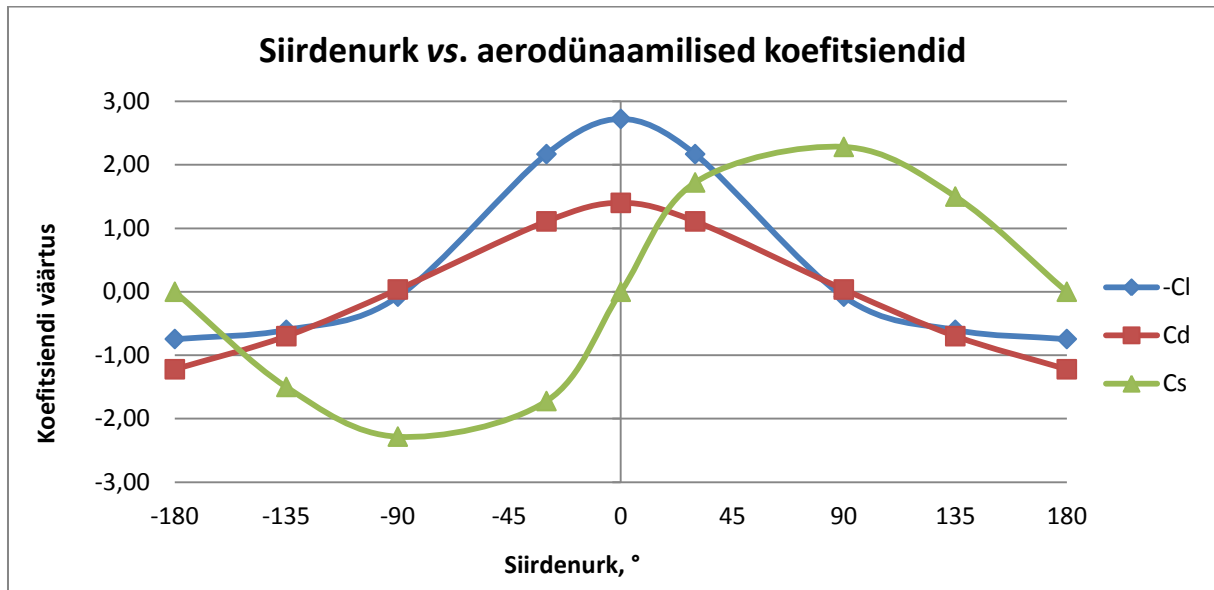
### 6.4.1. Suunamuutus

Esimese punktina vaatleme sõiduki suunamuutust ehk olukorda kus vormel on kurvis. Kuna vormeli juhtimiseks on vaja teada, kuidas aerodünaamilised parameetrid muutuvad igas olukorras rajal on suunamuutuse analüüs teostatud vahemikus 0-180°. Vahemikus 0-30° on analüüside sammuks võetud 5°. Peale seda on tehtud analüüsid 90° ja 180° siirdenurgaga. Esimene vahemik kirjeldab normaalsel kurvi läbimisel saavutatavat siirdenurka. Nurgad 90° ja 180° simuleerivad ekstreemolukordi, kui juht peaks vormeli üle kontrolli kaotama ja vormel hakkab libisema külge ees või liikuma tagurpidi. Kuna antud analüüsid ei ole võimalik mudeli juures sümmeetriat kasutada, on üle mindud terve vormeli mudelile. Seel 21 on näidatud vormelite staatilised rõhud ja voolujooned erinevate siirdenurkade juures.



Sele 21. Staatilise rõhk ja voolujooned 0°, 10° ja 30° siirdenurga juures

Seledelt on näha, et esitiiva ja difuusori rõhud muutuvad oluliselt. Samas tagatiiva rõhud püsivad küllaltki konstantsena. Lisaks muutub oluliselt rehvide mõju aerodünaamilistele elementidele. Kolmandal joonisel on näha, kuidas esimese rehvi tagant liiguvad keerised põhja alla ja vähendavad difuusori efektiivsust. See omakorda toob kaasa aerodünaamilise surve-, takistus- ja külgsuunalise jõu muutuse vastavalt siirdenurgale. Järgnevalt on välja arvatud aerodünaamilised koefitsiendid vastavalt siirdenurgale.



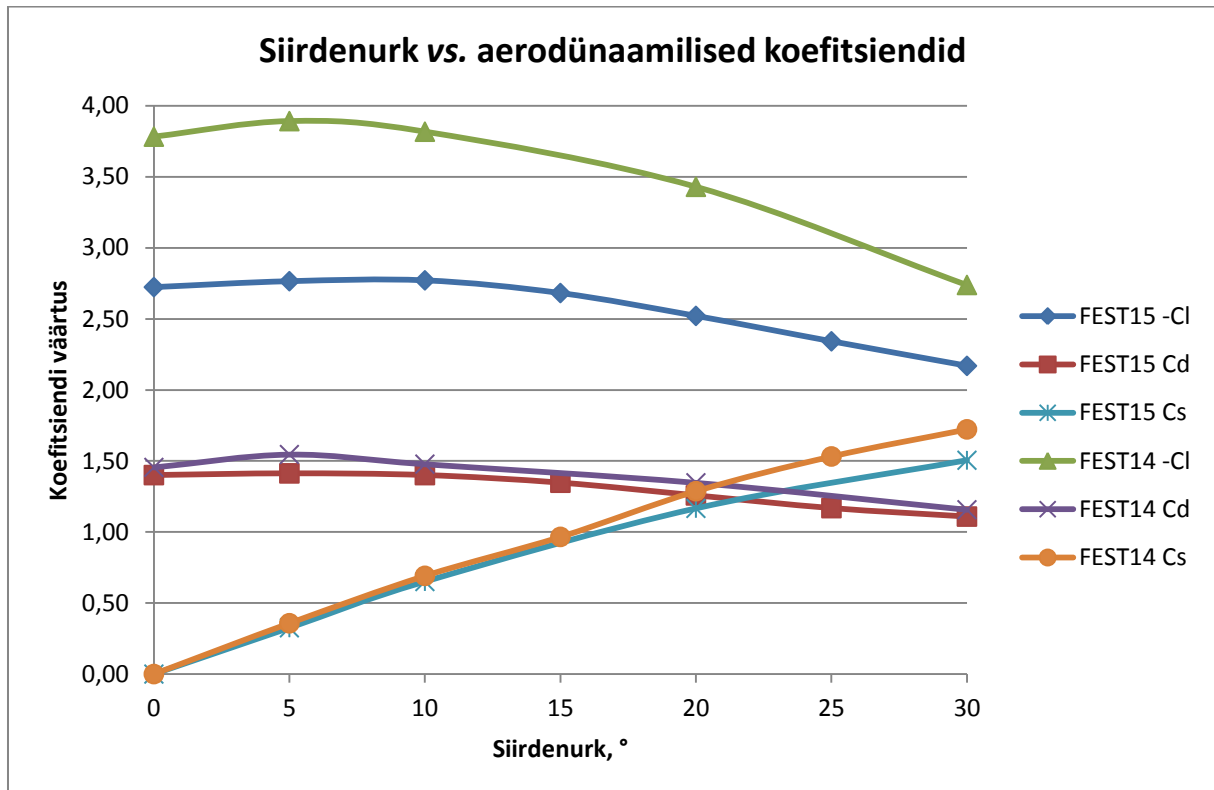
Graafik 9. Siirdenurk vs. aerodünaamilised koefitsiendid

Siirdenurgal on väga suur mõju aerodünaamilistele jõududele. Graafikult on näha, et survejõud hakkab väga kiiresti vähenema siirdenurga suurendamisel. 90° juures hakkavad aerodünaamilised jõud teistpidi mõjuma ja tahavad vormelit maast lahti tõsta. Väga olulise punktina tuleb jälgida aerodünaamilist tõstejõudu tagurpidi sõites, et vormel ei kaotaks stabiilsust ja ei tõuseks maast lahti. Kiirusel 110 km/h hakkab vormelit tagurpidi sõites maast lahti tõstma jõud üle 500 N. Mis moodustab 300 kg vormeli massist ligikaudu 17%.

Lisaks omab vormeli juhtimisel rolli külgsuunaline jõud. Külgejõud saavutab oma maksimaalse väärtuse 90° juures ehk siis kui vormel liigub külge ees. Kiirusel 55 km/h on külgejõu väärtuseks 383 N. Antud jõud on väga suur ja võib, samamoodi vormeli tagurpidi liikumisel tekkinud tõstejõule, hakata vormelit ümber keerama. Külgsuunaline jõud on suur kuna tiiva otsaplaadid on väga suure pindalaga. Väiksemate siirdenurkade juures omab külgsuunaline jõud vormeli juhtimisel aga positiivset mõju, kuna eelkõige mõjub

külgsuunaline jõud vormeli tagatiiva otsaplaadile. Seetõttu tahab külgsuunaline jõud vormelit otseks keerata kui vormel on külglibisemises.

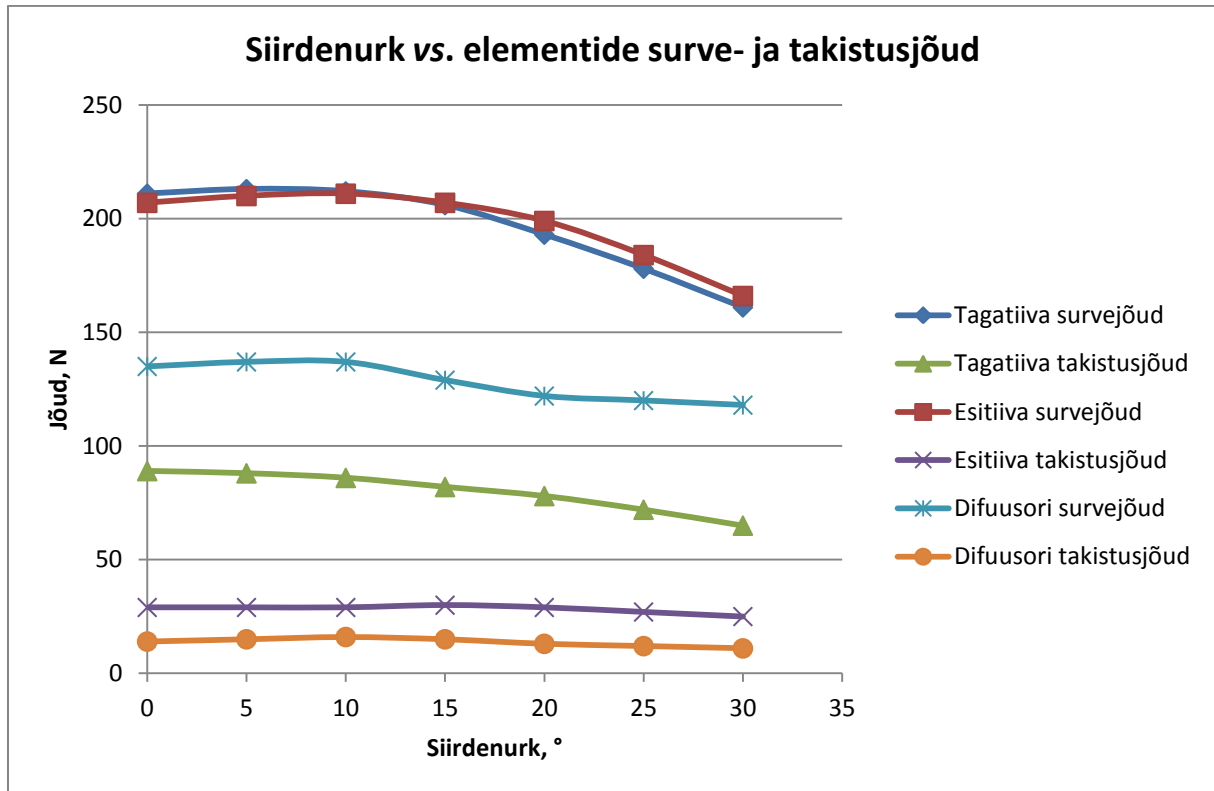
Järgnevalt vaatleme siirdenurga mõju aerodünaamilistele jõududele vahemikus 0-30°, kuna enamasti püsib vormeli siirdenurga muutus esimese 30° sees tuleb seda vahemiku täpsemalt uurida (graafik 10). Järgneval graafikul on välja toodud aerodünaamilised koefitsiendid ka eelmise aasta vormeli jaoks.



Graafik 10. Siirdenurk vs. aerodünaamilised koefitsiendid

Täpsema analüüsi tulemusena selgub, et väiksemate siirdenurkade juures toimub hoopis survejõu kasv ja alles peale 10° hakkab survejõud vähenema. Seda saab seletada asjaoluga, et väiksemate siirdenurkade juures liigub õhk üle tiiva nurga all ja selle tulemusena pikeneb vähesel määral tiiva profiil ja seeläbi toimub ka survejõu kasv. Ühtlasi tekkivad difuusoris keerised, mis suurendab difuusori alla olevat alarõhku ja seeläbi suureneb ka survejõud. Sarnaselt survejõu suurenemisele on nähtav ka takistusjõu kasv. Võrreldes eelmise aastaga on survejõu kasv mõnevõrra väiksem aga hilisem vähenemine ei ole nii drastiline. Selle tulemusena võib väita, et vormeli FEST15 aerodünaamika pakett käitub kurvis stabiilsemalt. Lisaks on tänu väiksematele tiiva otsaplaatidele väiksem ka külgsuunaline jõud.

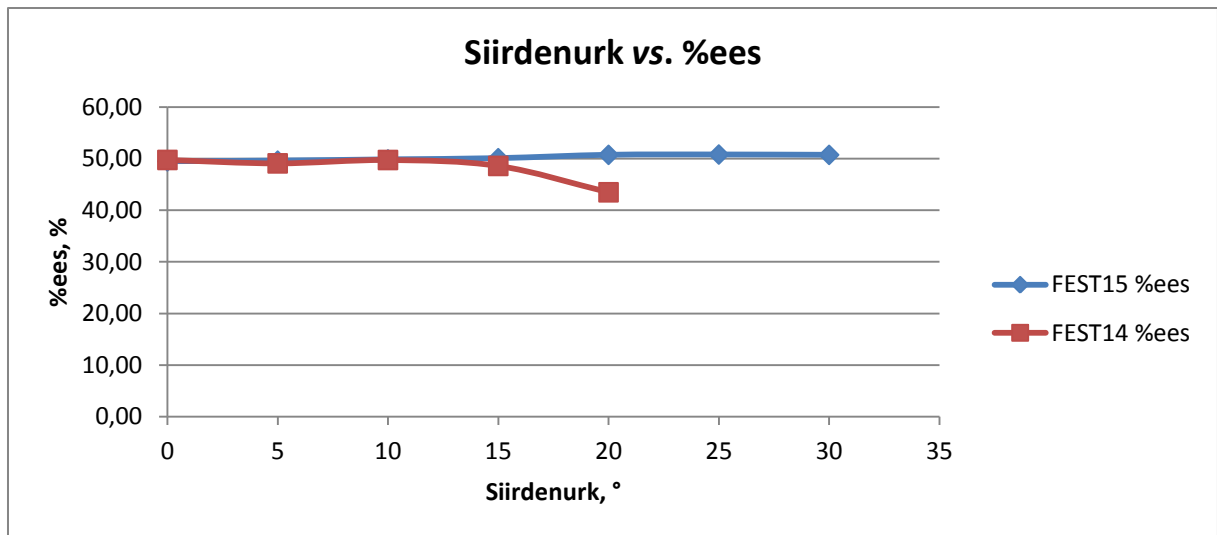
Lisaks survejõule ja takistusjõule on oluline jälgida ka aerodünaamilise balansi asukohta. Selleks on graafikus 11 välja toodud surve- ja takistusjõud igale aerodünaamilisele elemendile.



**Graafik 11. Siirdenurk vs. elementide surve- ja takistusjõud**

Üldjoontes käituvad esi- ja tagatiib siirdenurga suurendamisel ühtemoodi. Kuid esitiib säilitab survejõudu veidi paremini suuremate siirdenurkade juures. See tuleneb sellest, et esitiib koosneb kahest profiilist ja tagatiib kolmest profiilist. Üldreeglina käituvad vähemate profiilidega tiivad stabiilsemalt, seetõttu säilitabki esitiib survejõu suurematel siirdenurkadel. Kuid täiesti teistmoodi käitub difuusor. Difuusori survejõud suureneb kuni 10° kraadini ja peale seda toimub järsk langus 20°-ni ning peale seda stabiliseerub survejõud taaskord.

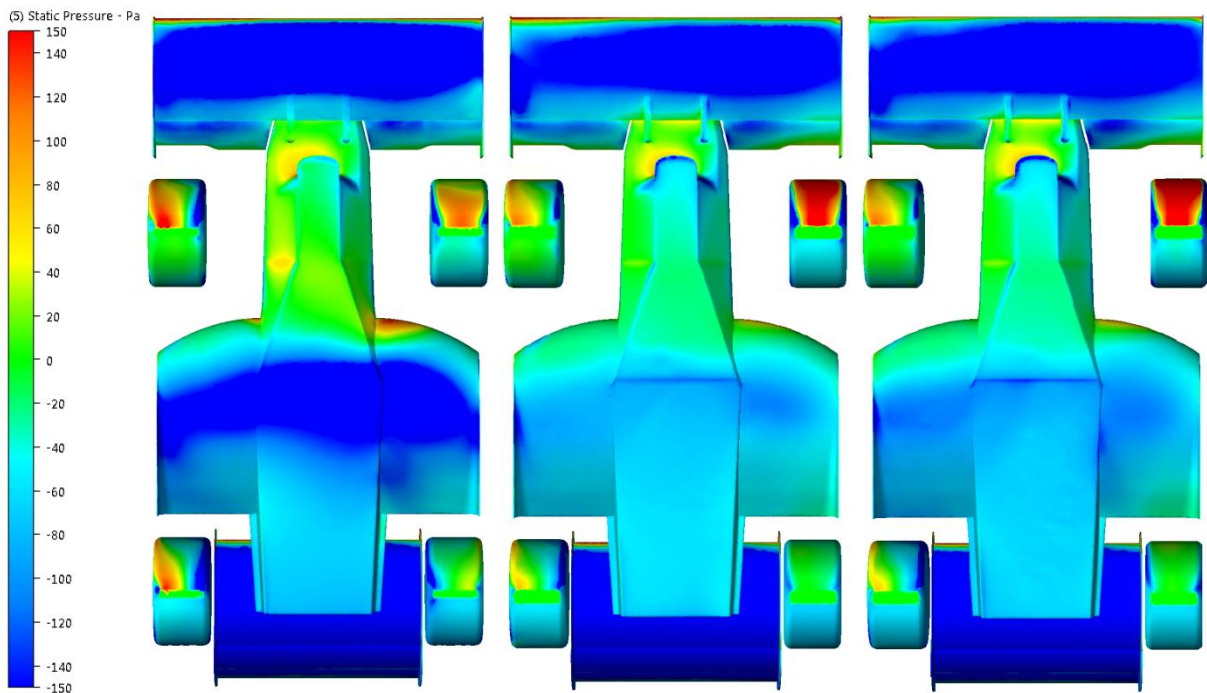
Seoses esi- ja tagatiiva väikesest erinevusest toimub ka aerodünaamilise balansi muutus. Nimelt liigub peale 10° üle poole survejõust esiteljele. Võrreldes eelmise aastaga on balansi muutus oluliselt väiksem ja vormel on seeläbi stabiilsem. Eelmisel aastal toimus drastiline balansi muutus taha poole peale 10°. Aerodünaamiline tasakaal on välja toodud graafikul 12.



Graafik 12. Siirdenurk vs. %ees

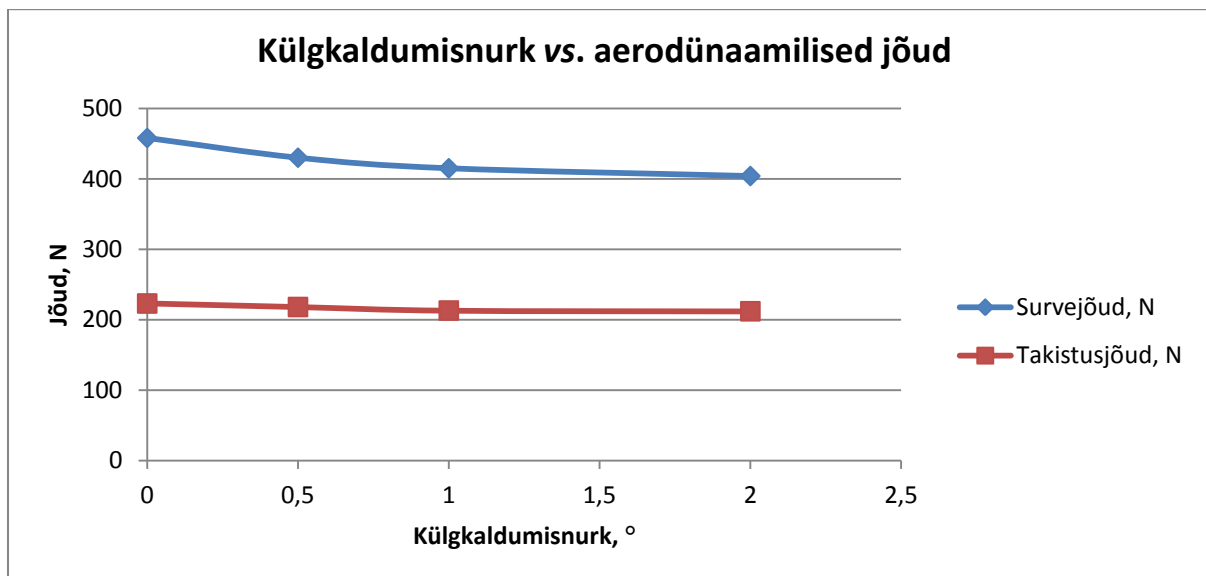
#### 6.4.2. Külgakaldumine

Järgnevalt vaatleme külgakaldumist ehk olukorda kus vormel kaldub küljelt-küljele. Külgakaldumine toimub kurvis tsentrifugaaljõu toimeel. Lähtuvalt vedrustuse seadistusest on kurvis maksimaalne külgakaldumisnurgaks 1,9 G juures  $1^\circ$ . Analüüsid teostatakse kuni  $2^\circ$ -ni ehk olukorrani, kus difuusor läheb vastu maad. Siirdenurgaks kasutatakse nurka, millal esines maksimaalne survejõud ehk  $10^\circ$ . Seel 22 on välja toodud staatilised rõhud erinevate külgakaldumisnurkade korral. Rõhupildilt on näha, et juba väikeste muutuste tulemusena tõuseb rõhk difuusori all märgatavalt. Mõningast alarõhu vähenemist on märgata ka esitiiva all. Sarnaselt suunamuutuse olukorraga püsivad tagatiiva rõhud muutumatuna.



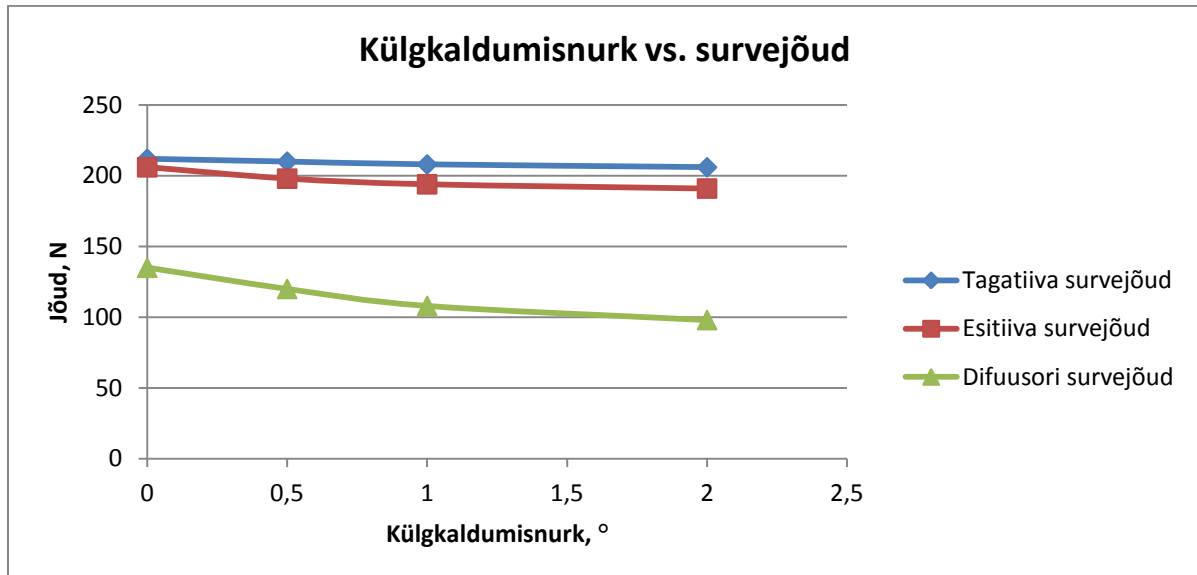
Sele 22. Staatile r hk k lgkaldumisnurga 0°, 1° ja 2° juures.

Rõhu muutusest tingitud survejõu kadu on välja toodud alloleval graafikul. Graafikult 13 on näha, et takistusjõud püsib suhteliselt stabiilsena erinevate k lgkaldumisnurkade korral. Survejõu muutus jäab 10% piiresse ehk võrreldes siirdenurga muutusega mõjutab k lgkaldumine survejõudu vähem. Kuid siiski lähtudes aerod naamilistest parameetritest tuleks k lgkaldumine viia võimalikult väikseks.



Graafik 13. K lgkaldumisnurk vs. aerodünaamilised jõud

Sele 22 juures mainiti ära, et rõhupildis on suurimad muutused difuusori piirkonnas. Graafikul 14 on näha, et suurim muutus survejõus toimubki difuusoriga. Esi- ja tagatiib käitub suhteliselt sarnaselt ja seega püsib ka aerodünaamiline balanss paigal.



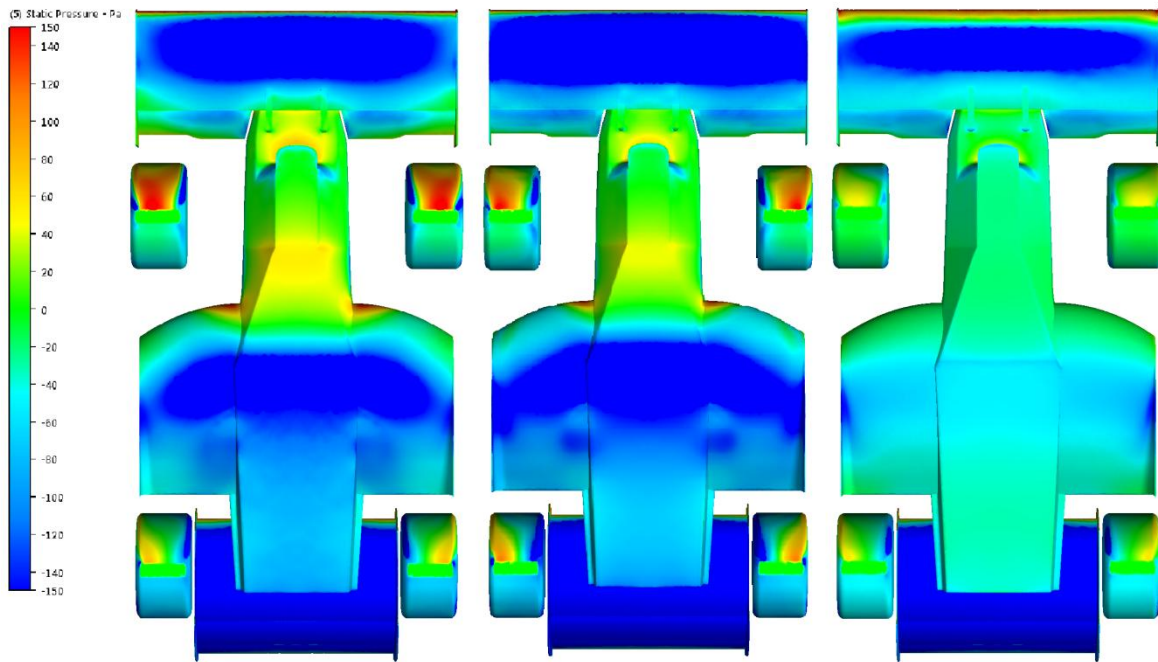
Graafik 14. Külgekaldumisnurk vs. survejõud

### 6.4.3. Pikinookumine

Viimasena vaadeldakse pikinookumist ehk olukorda, kus vormel pidurdab või kiirendab. Tulenevalt vedrustuse seadistusest on pikinookumise vahemikuks mõlemas suunas 1,5°. Pikinookumine mõjutab oluliselt esitiiva kõrgust maast. Reeglina tuleks esitiib paigutada võimalikult madalale, et saavutada maksimaalne survejõud. Pidurdamisel liigub vormeli nina maale lähemale 40 mm võrra 1,5° juures. Sisuliselt ongi see minimaalseks esitiiva kõrguseks, vastasel korral hakkaks pidurdamisel esitiib käima vastu maad.

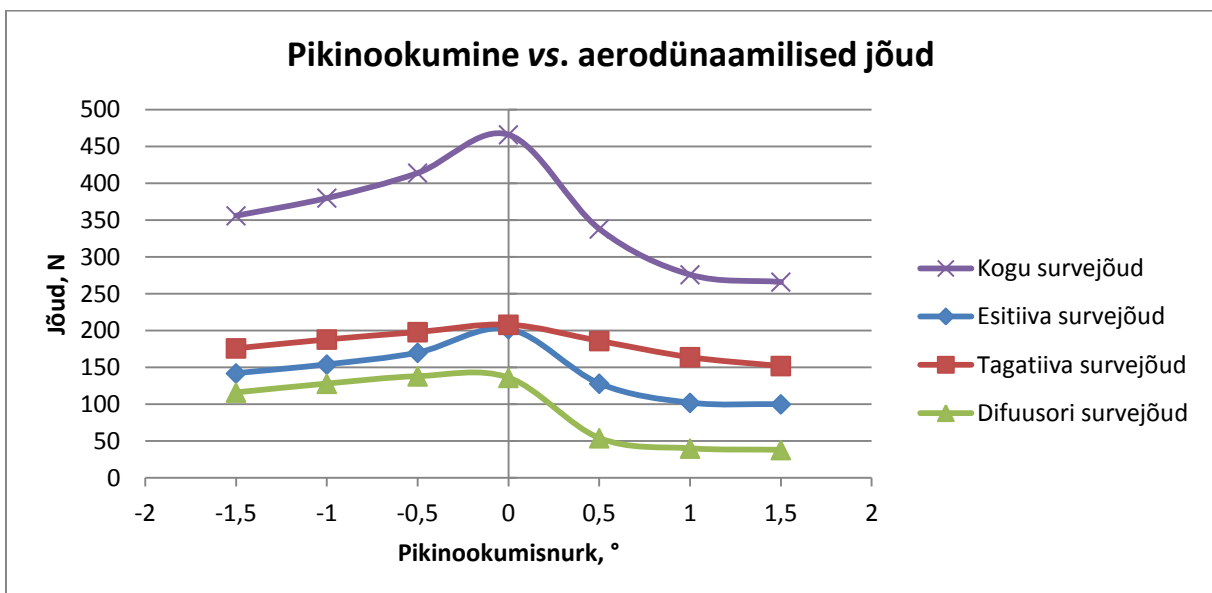
Selel 23 on näidatud vormeli staatilised rõhud ja voolujooned erinevate pikinookumise kraadide juures. Positiivse nurgana on arvestatud pidurdamise olukorda ja negatiivse nurgana kiirendamise olukorda. Kõige rohkem mõjutab pikinookumine esitiiva ja difuusori rõhkusid. See tuleneb sellest, et esitiiva ja difuusori efektiivsus sõltub nende kõrgusest maapinnast. Samas püsivad tagatiiva rõhud küllaltki konstantsena. Rõhupiltide põhjal võib järeldada, et pidurdamise olukorras väheneb survejõud drastilisemalt võrreldes kiirendamise olukorraga.





Sele 23, Staatilise rõhk 1,5°, 0° ja -1,5° pikinookumismurkade juures.

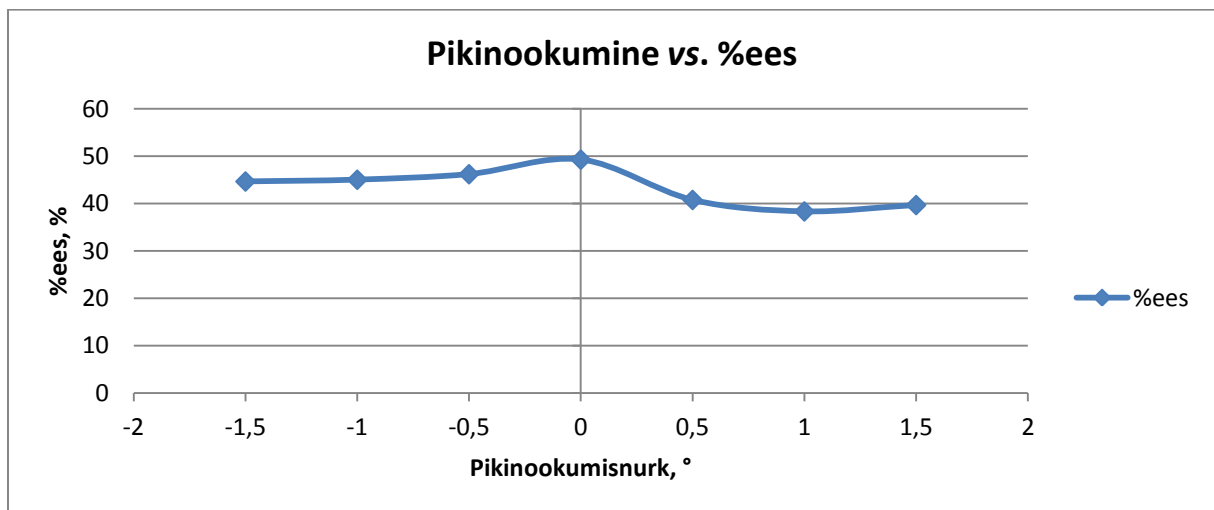
Graafikult 15 on näha pikinookumisel toimuvad survejõu muutused. Pidurdamisel toimub järsk survejõu langus, samas kui kiirendamisel toimub oluliselt ühtlasem survejõu vähenemine. Täpsemaks analüüsiks on esitatud ka survejõu muutused igale aerodünaamilisele elemendile eraldi.



Graafik 15. Pikinookumine vs. aerodünaamilised jõud



Nagu eelnevalt esitatud seledelt võis järeldada, kaotavad kõige rohkem survejõudu esitiib ja difuusor, seda kinnitab ka graafik 15. Eelnimetatud elementide survejõud langeb järsult pidurdamisel. Samal ajal kui tagatiiva survejõud langeb oluliselt sujuvamalt. Siit võib teha järelduse, et pikinookumist tuleks hoida võimalikult väiksena ehk jäigem vedrustuse seadistus tagab paremad aerodünaamilised näitajad. Üldjoontes toimub kiirendamisel survejõu vähenemine küllaltki sujuvalt. Siiski esitiiva survejõud väheneb oluliselt järsemini võrreldes teiste elementidega. Jällegi tuleneb see sellest, et esitiiva survejõud sõltub tiiva kõrgusest maapinna suhtes. Tulenevalt esitiiva erinevast käitumisest võrreldes teiste elementidega muutub pikinookumisel ka aerodünaamiline balanss. Graafikult 16 on näha, et balanss muutub üle 10%, mis on väga suur muutus. Juba väikesel pikinookumisel liigub balanss taha poole ja vormel muutub alajuhitavaks.



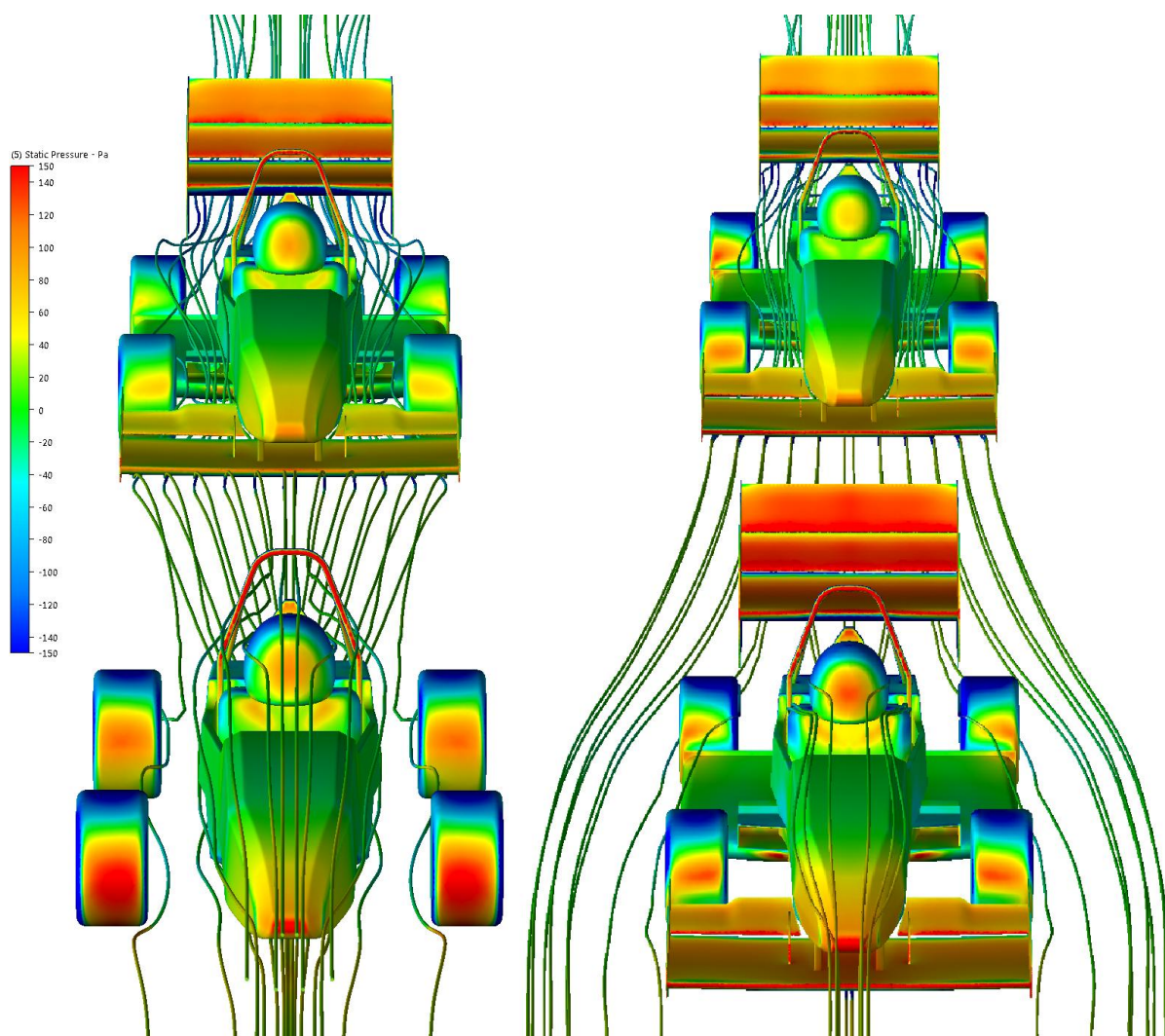
Graafik 16. Pikinookumine vs. %ees

## 6.5. Aerodünaamilised parameetrid sõites teise vormeli hoovuses

Järgnevalt vaadeldakse olukorda kus rajal sõites liigub vormeli ees teine vormel. Eesliiklev sõiduk mõjutab vormelile jõudva õhu turbulentsust ja seeläbi ka järgneva vormeli aerodünaamika paketi efektiivsust. Kuna tudengivormeli reeglistik ei kohusta aerodünaamilisi elemente kasutama, vaatleme kahte olukorda. Ühte kus eesliikleval vormelil on samasugune aerodünaamika pakett nagu hoovuses oleval vormelil. Teiseks vaatleme juhtu kus eesliikleval vormelil ei ole aerodünaamilisi elemente. Tulenevalt arvutusjõudlusest on vormelite

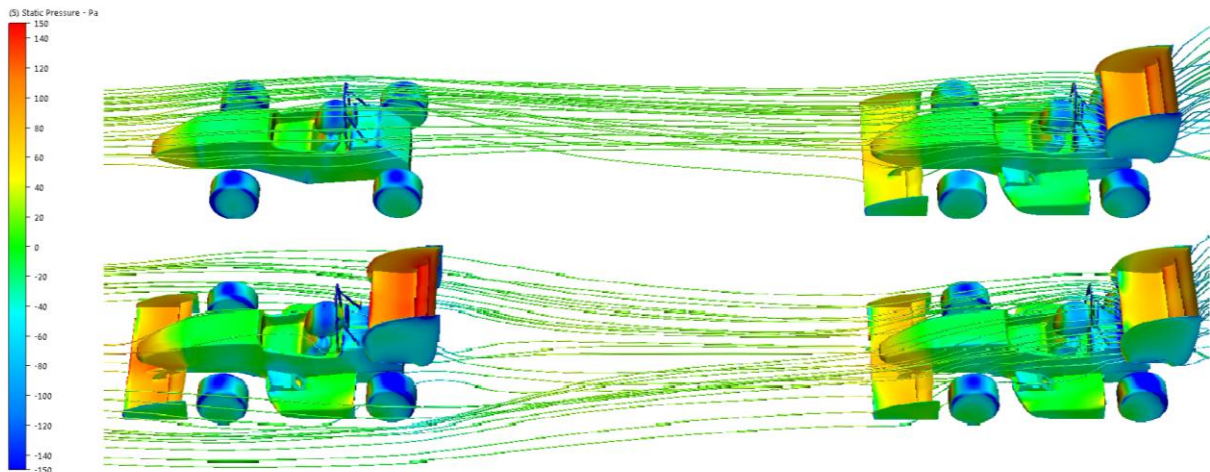
vaheliseks distantsiks maksimaalselt 8 m. Seega teostatakse analüüsid kus vormelite vaheline kaugus muutub vahemikus 1-8 m.

Esiteks vaadeldakse õhuvoolusid vormelile, sõites nii aerodünaamiliste elementidega kui ka aerodünaamiliste elementideta vormeli hoovuses. Järgnevat olukorda vaadeldakse juhul kui vormelite vaheline kaugus on 4 m. Kuna teisele vormelile on kõige lähedamal esitiib, siis esiteks vaatlemegi antud elemendi õhuvoolusid. Seel 24 on välja toodud õhuvoolud esitiiva alla. Seledelt on näha, et kui eesliikleval vormelil ei ole aerodünaamika paketi, jõuab õhuvool hoovuses oleva vormeli esitiiva alla üle teise vormeli. Teisel juhul, kui eesliikleval vormelil on samasugune aerodünaamika pakett, jõuab õhuvool hoovuses oleva vormeli esitiiva all ümber esimese vormeli. Esimesel juhul puuduvad aerodünaamilised elemendid, mis õhku ülesse poole suunaksid ja seeläbi liigub õhk ühtlaselt ümber vormeli. Tiivad suunavad õhu ülesse poole ja vormeli taha tekkiva alarõhu ala täidab külgedelt tulev õhk, mis omakorda jõuabki hoovuses oleva vormeli esitiiva alla.



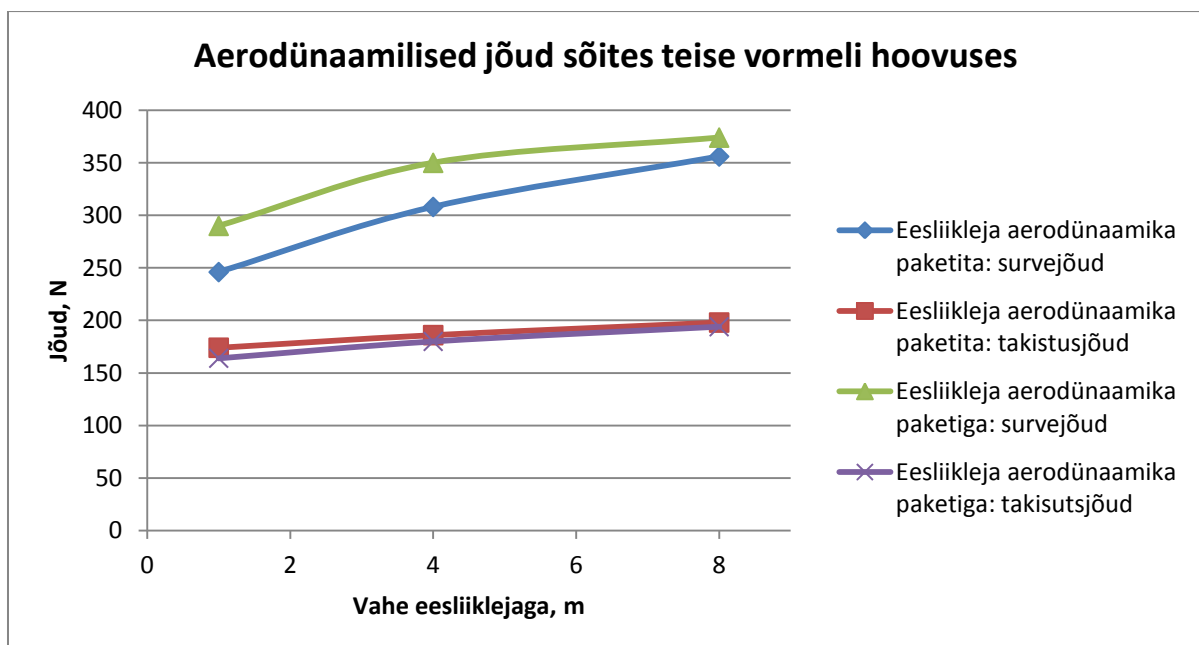
**Sele 24. Voolujooned esitiiva alla sõites teise vormeli hoovuses**

Järgnevalt vaadeldakse õhuvoolusid hoovuses oleva vormeli tagatiiva alla. Sarnaselt esitiivaga liiguvad ilma aerodünaamika paketita vormeli hoovuses oleva vormeli tagatiiva alla õhuvoolud üle eesliikleva vormeli. Selet 25 on näha, et hoovuses liikleva vormeli tagatiivani jõuab küllaltki laminaarne õhk. Aerodünaamiliste elementidega vormeli hoovuses oleva vormeli tagatiiva alla jõuab õhk ümber eesliikleva vormeli.



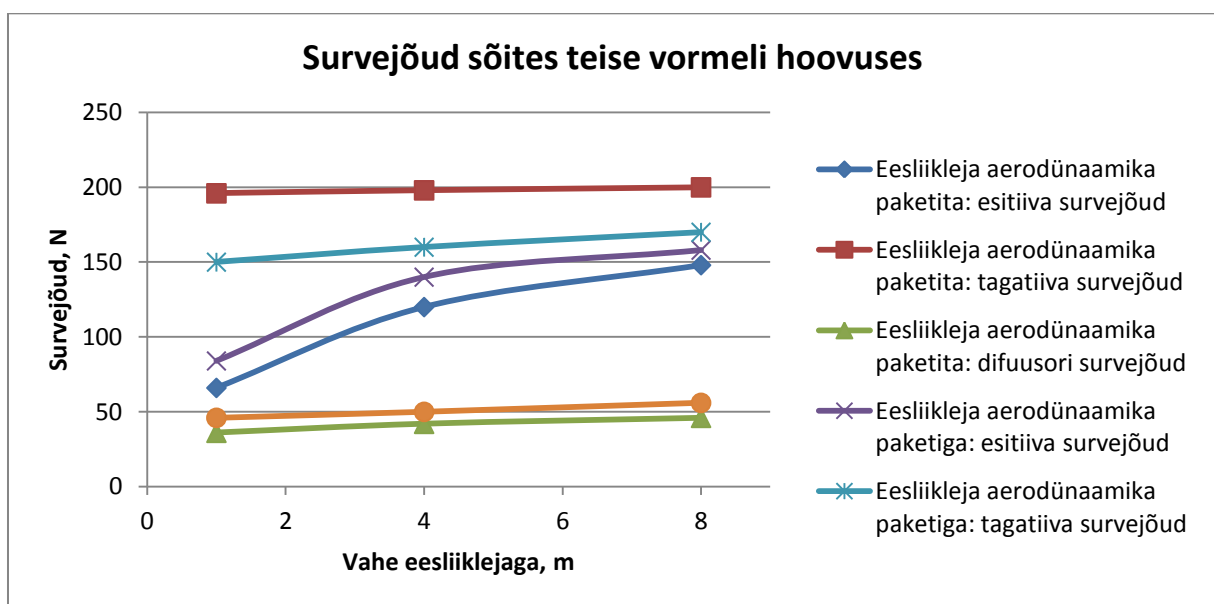
**Sele 25. Voolujooned tagatiiva alla sõites teise vormeli hoovuses**

Eelnevalt mainitud tähelepanekud väljenduvad ka graafikus 17. Graafikult on näha, et ilma aerodünaamiliste elementideta vormeli hoovuses sõites väheneb survejõud vähem kui sõites aerodünaamika paketiga vormeli hoovuses. Huvitava punktina võib välja tuua selle, et kui survejõud olenes väga tugevalt eesliikleja vormeli kaugusest ja konfiguratsioonist, siis takistusjõud püsib peaaegu muutumatuna. Kokkuvõtvalt võib öelda, et sõitmine aerodünaamilise paketiga vormeli hoovuses mõjutab oluliselt rohkem vormelile mõjuvaid aerodünaamilisi jõude.



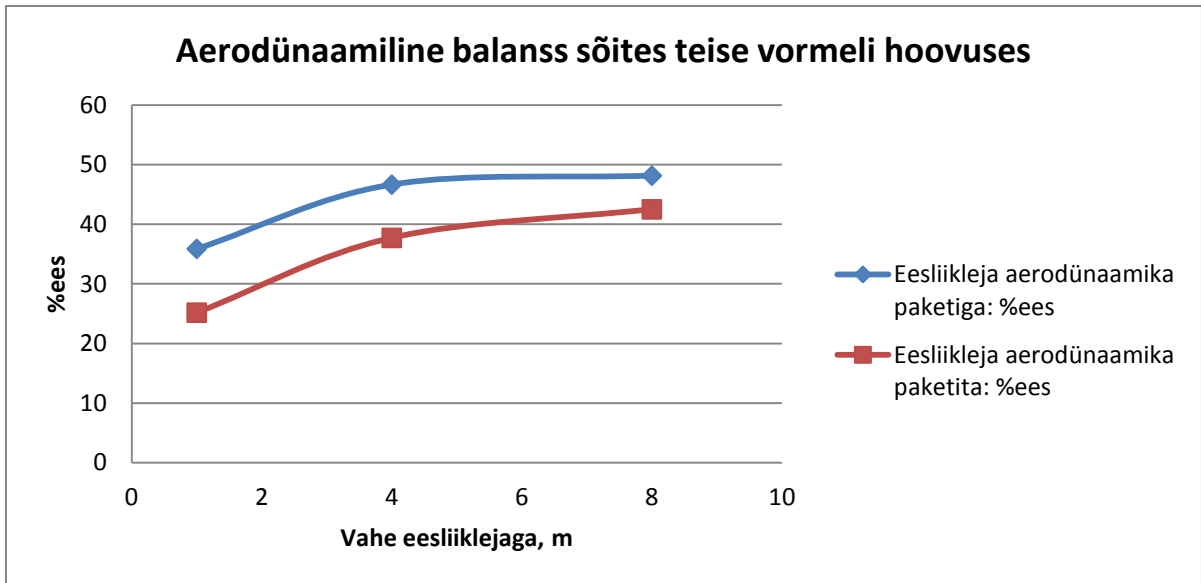
**Graafik 17. Aerodünaamilised jõud sõites teise vormeli hoovuses.**

Täpsemaks analüüsiks vaatleme survejõudu eraldi kõigil aerodünaamilistel elementidel. Esiteks vaatleme esitiiba, graafikult 18 on näha, et esitiiva survejõud jälgib küllaltki sarnast joont sõites mõlema konfiguratsiooniga vormeli hoovuses. Erinevuseks on see, et sõites aerodünaamika paketita vormeli hoovuses omab survejõud mõnevõrra suuremat väärtust. Sarnaselt käitub ka difuusor. Suurem erinevus esineb tagatiiva puhul. Graafikult on näha, et sõites aerodünaamilise paketita vormeli hoovuses püsib tagatiiva survejõud konstantsena. Seevastu väheneb survejõud vähesel määral sõites aerodünaamilise paketiga vormeli hoovuses.



Graafik 18. Survejõud sõites teise vormeli hoovuses

Esitiiva ja tagatiiva survejõu erineva käitumise tõttu muutub ka aerodünaamiline balanss. Kui sõitmine aerodünaamiliste elementidega vormeli hoovuses mõjutab survejõudu vähem, siis graafikult 19 on näha, et just siis muutub aerodünaamiline balanss kõige rohkem. Olles eessõitjale lähemal kui 4 meetrit liigub balanss drastiliselt taha poole ehk vormel muutub alajuhitavaks.



**Graafik 19. Aerodünaamiline balanss sõites teise vormeli hoovuses**

## KOKKUVÕTE

Käesolevas lõputöös käsitletakse FS Team Tallinna poolt arendatava vormelauto FEST15 aerodünaamika paketi projekteerimist. Lõputöö mahu piirangu tõttu käsitletakse aerodünaamika paketi projekteerimise kõige tähtsamaid ja ajamahukamaid punkte. Nendeks punktideks on piirangute ja reeglite analüüs, eelmise lahenduse positiivsete ja negatiivsete külgede väljaselgitamine, ringiajasimuatsioon optimaalsete aerodünaamiliste parameetrite leidmiseks ja voolavusanalüüsid aerodünaamiliste parameetrite uurimiseks erinevates olukordades.

Esimese punktina on lõputöös käsitletud disaini puudutavaid piiranguid ja reegleid. Sellest aastast on aerodünaamilisi elemente puudutavad võistlusreeglid muutunud oluliselt rangemaks ja aerodünaamika paketi tuleb teha suuri muudatusi võrreldes eelmise lahendustega. Reeglite analüüsist selgus, et tagatiiva piirangud on oluliselt rangemad kui esitiiva piirangud. Seetõttu tuleb käesoleval aastal alustada projekteerimist lähtudes tagatiiva survejõust.

Peale piirangute väljaselgitamist uuriti eelmist lahendust. FEST14 aerodünaamilised elemendid olid projekteeritud, vastavalt reeglitele, võimalikult suured. Takistusjõu vähendamiseks sirgetel oli kasutusel *DRS* süsteem, mis võimaldas aktiivselt muuta tiivaprofiilide kohtumisnurka. Eelmise lahenduse voolavusanalüüside valideerimiseks võrreldi tulemusi eksperimentaalsete katsetustega sirgetestidel. *CFD* analüüsid ülehindasid survejõu väärtust 22%.

Järgmise etapina teostati ringiajasimulatsioon ja uuriti aerodünaamilist disaini mõjutavate parameetrite mõju ringiajale. Simulatsiooni tulemusena tehti järeldused, et saavutamaks suurimat võitu aerodünaamilistest elementidest tuleb projekteerimisel saavutada maksimaalne survejõud ja vähendada kogu paketi massi. Lisaks leiti maksimaalne takistusjõu koefitsient 2,52 milles suurema väärtuse korral hakkavad aerodünaamilised elemendid piirama vormeli maksimaalset kiirust ringrajal. Saadud järeldused on aerodünaamiliste elementide projekteerimise aluseks ja suunaks, mida prooviti antud lõputöö käigus saavutada.

Antud lõputöö põhiteematikaks on voolavusanalüüside teostamine erinevate situatsioonide kohta. Esiteks kirjeldati analüüsis kasutatud *CAD* mudelit, selle elementideks jaotamist,

modeli rajatingimused ja füüsikalise mudeli seadistused. Aerodünaamika paketi projekteerimiseks teostati eelkõige simulatsioon, mis kirjeldas vormeli liikumist konstantse kiirusega sirgel. Ligikaudu 200 analüüsi tulemusena saavutati lõplik mudel. FEST15 aerodünaamiline survejõu koefitsient saavutas väärtuse 2,72 ja takistusjõu koefitsient 1,40. Aerodünaamiline balanss on 49,62% esiteljel, mis vastab projekteerimise alguses seatud eesmärgile. Esi- ja tagatiiva reguleerimise tulemusena saab aerodünaamilist balansi liigutada kuni 10% ette poole ja kuni 5% taha poole.

Järgmise sammuna uuriti aerodünaamiliste parameetrite muutumist sõites kurvis. Kurvi läbimise olukorra täpseks analüüsiks vaadeldi rotatsiooni ümber iga telje eraldi. Kõige esimesena analüüsiti pööret ümber ristitelje ehk siirdenurka. Analüüsi tulemusena võis teha järeldused, et selle aasta lahendus on oluliselt stabiilsem ja aerodünaamiline survejõud kasvas siirdenurga kasvades kuni 10°-ni.

Järgnevalt vaadeldi külgekaldumist ja pikinookumist. Mõlemal juhul uuriti surve- ja takistusjõu ja aerodünaamilise balansi muutust. Mõlema rotatsiooni puhul võis tähendada survejõu kadu ja aerodünaamilise balansi muutust juba väikeste pöördnurkade juurde. Järeldusena võib välja tuua, et saavutamaks stabiilsemaid näitajaid tuleks külgekaldumine ja pikinookumine tuleb viia võimalikult väikeseks.

Viimase olukorrana käsitleti antud töös vormeli sõitmist teise vormeli hoovuses. Vaadeldi kahte erinevat juhtu. Esimesel juhul ei olnud eesliikleval vormelil aerodünaamilisi elemente ja teisel juhul oli eesliiklejal samasugune aerodünaamika paket. Kõige enam oli eesliiklevast sõidukist häiritud esitiib ja difusor, mis tõi kaasa aerodünaamilise balansi liikumise taha poole. Seda fakti peab piloot silmas pidama, et sõites teise vormeli hoovuses muutub vormel alajuhitavaks.

Kokkuvõtvalt võib lugeda töös seatud eesmärgid täidetuks. Projekteerimise tulemusena on leitud reeglitele vastav lahendus, mis on eelmisest lahendusest erinevates rajaolukordades stabiilsem. Märgatavalt on tõusnud analüüsides täpsus ja on teostatud väga erinevate olukordade kohta analüüse, mis võimaldavad vormeli vektorjuhtimisel kasutada väga täpseid sisendparameetreid.



## SUMMARY

In this thesis we are focusing to improve performance of Formula Student Team Tallinn racecar. Aerodynamic improvements in automotive racing can have a significant effect on vehicle performance. Recent developments in Formula Student have included the design and implementation of aerodynamic devices to improve performance. Because of the volume limitation of this thesis, only the most important parts of developing the aerodynamic package is subjected in this thesis. These parts are: restrictions and rules, analysis of the previous solution, lap time simulation and running the computational fluid dynamics analyses.

First of all, design restrictions and competition rules were analyzed. Rules regarding aerodynamic devices have changed greatly over the last year. Because of that the design of aerodynamic devices had to be changed a lot.

The next chapter was about analyzing the previous solution. FSTT last racecar FST14 implemented large wings and diffuser. To reduce drag force at the straights the design included a drag reduction system that allowed to reduce angle of attack of the wing profiles. Experimental tests were carried out to validate the results of CFD simulation. As a result it was shown that CFD simulation overestimated the downforce by 22%.

After that, a lap time simulation was carried out to examine the effects of aerodynamical parameters, such as downforce and drag coefficient and mass of the car. As a result to maximize the effect of wings and reduce the lap time one has to increase downforce and decrease drag force. In addition the drag coefficient should not exceed the value of 2,52 because value over that will limit the maximum speed of the racecar.

The last and main chapter in this thesis is about running CFD simulations in different track situations. First it is explained how the simulation has been built up. Running a CFD simulation contains various steps like: building the simulation model in CAD, meshing, setting boundary conditions and physical model. The first simulation type is constant speed straight line simulation. By this the final design of aerodynamical devices were found. Final downforce coefficient is 2,72 and drag coefficient is 1,40. Aerodynamical balance is located 49,6% at front.

Next, simulations about cornering situations were studied. In this thesis rotations around three axes were studied separately. Yaw simulations were done up to  $180^\circ$  of yaw angle. It was found that downforce increased up to  $10^\circ$  and then started to decrease. Roll and pitch simulations showed similar results. In both cases downforce started to decrease rapidly even on small angles. Aerodynamical balance also showed signs of shifting in these situations. To conclude it was clear that it is aerodynamical more beneficial to run stiffer suspension setup on car to minimize roll and pitch.

Last situation was about running two car analyses where racecar was traveling behind another racecar. Two different cases were run. One where first car did not have aerodynamical devices and second case where first car did have aerodynamical devices. It was found that downforce was heavily impacted by this and aerodynamical balance shifted to the rearward.

To conclude all the target that were set at the beginning of this thesis were met. Design meets all the rules and is more stable than the previous solution. Accuracy and number of analyses run have increased significantly. All these different situation that were analyzed is a good ground to start building torque vectoring maps.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. How Airplanes Fly: A Physical Description of lift [WWW]  
<http://www.allstar.fiu.edu/aero/airflylv13.htm> (08.05.2015).
2. Gale M. Stop Abusing Bernoulli! How Airplanes Really Fly. London : Regenerative Press, 1998.
3. A Physical Description of Flight; Revisited [WWW]  
<http://www.allstar.fiu.edu/aero/Flightrevisited.pdf> (08.05.2015).
4. Friction Drag [WWW] <https://howthingsfly.si.edu/aerodynamics/friction-drag> (08.05.2015).
5. McBeath S. Competition Car Aerodynamics: A Practical Handbook. 2nd edition. Sparkford : Haynes Publishing, 2011.
6. 2015 Formula SAE Rules [WWW]  
[http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf) (08.05.2015).
7. Katz J. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Cambridge : Bentley Publisher, 1947.
8. Kulu P. Mehaanikainseneri käsiraamat. Tallinn : TTÜ kirjastus, 2013.
9. Nowlan D. Manual mathematics. - *Racecar Engineering*, 2013, 23(01), 69-72
10. Hakewill J. Lap Time Simulation : 2000.
11. Wordley S., Saunders J. Serodynamis for Formula SAE: Initial design and performance prediction : 2005.
12. External Aerodynamics: Flow Over a Car [WWW]  
<http://www.cfdyna.com/Notes/CarAero.pdf> (08.05.2015).
13. Lanfrit M. Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT : 2005.
14. Mach Number [WWW] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mach.html> (08.05.2015).
15. Autodesk Simulation CFD 2013: Compressible Flow [WWW]  
<http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2013/ENU/?caas=caas/vhelp/help-dev-autodesk-com/v/Simulation-CFD/enu/2013/Help/0407-Learning407/0726-Guidelin726/0761-Compress761.html> (08.05.2015).
16. K-epsilon models [WWW] [http://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon\\_models](http://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models) (08.05.2015).

17. McBeath S. The flying limpet. – *Racecar Engineering: Formula Student*, 2014, 14-16.
18. Keedus Ü. Purilend. Tallinn : Eesti Riiklik Kirjastus, 1962.
19. Heave, Pitch, Roll, Warp and Yaw [WWW] <http://white-smoke.wikifoundry.com/page/Heave,+Pitch,+Roll,+Warp+and+Yaw> (08.05.2015).

## LISA 1. TEHNILISED JOONISED