



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# NÁVRH KONSTRUKCE ELEMENTŮ PŘEDNÍHO KŘÍDLA FORMULE STUDENT

DESIGN OF FORMULA STUDENT FRONT WING ELEMENTS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Edmund Havran

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Popela, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Edmund Havran**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Robert Popela, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh konstrukce elementů předního křídla Formule Student

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Elementy na předním křídle závodních automobilů s otevřenými koly mají vícero funkcí. V první řadě vytvářejí další přitlak, ale taktéž vytvářejí prostor s nízkým tlakem před kolem a můžou pomáhat vytvořit energetické víry, které pak působí dále na celý automobil. V soutěži Formula Student jsou pravidla na rozdíl od jiných disciplín relativně otevřená, což umožňuje zajímavé koncepty soustavy předního křídla. Na druhou stranu se Formule Student pohybuje v mnohem menších rychlostech, a tedy komplikované soustavy elementů nejsou přínosné.

### Cíle bakalářské práce:

Posouzení různých soustav a výběr nejvhodnějších elementů předního křídla, které umožní zvýšit konkurenceschopnost formule. Nashromáždění znalostí o chování proudění v okolí předního křídla s možným využitím v nadcházejících sezónách. Úkolem bude, vycházející ze současné existující koncepce, pomocí CFD simulací, posoudit různé koncepty (jedno-, dvoj- nebo trojelementové křídlo, dělené nebo celé elementy, atd.) a vytvořit zdokonalený design elementů předního křídla s ohledem na jednoduchost výroby a spolehlivost nutnou pro účast na soutěžích Formule Student, přičemž budou všechny tyto prvky splňovat pravidla soutěže.

### Seznam doporučené literatury:

KATZ, J., Race Car Aerodynamics: Designing for Speed (Engineering and Performance), Robert Bentley, Inc., ISBN 9780837601427.

HUCHO, W., Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering, Butterworth-Heinemann, ISBN 0768000297.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

.....  
doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.

ředitel ústavu

.....  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Hlavný zámer práce je navrhnutie novej generácie predného prítlačného krídla na monopost Formule Student. Zo začiatku práca analyzuje pravidlá súťaže, význam predného krídla a jeho použitie v rámci súťaže. Nasleduje koncepčný návrh novej generácie krídla, ktorá je potom optimalizovaná pomocou CFD simulácií v programe Ansys Fluent. Výpočtové zdroje niektorých simulácií boli poskytnuté projektom „e-Infrastruktura CZ“ (e-INFRA LM2018140) financovaných z programu MŠMT Projekty veľkých infraštruktúr pro VaVaI a projektom ELIXIR-CZ (LM2015047), časťou medzinárodnej infraštruktúry ELIXIR.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Aerodynamika, CFD, Formula Student, Predné krídla, Prítlačné krídla

## **ABSTRACT**

The main objective of this thesis is the design of a new front wing for the Formula Student competition. The beginning of the thesis deals with competition rules, significance of front wings and their usage in the competition. A new conceptual design of the front wing follows, concluded by its CFD optimisation in Ansys Fluent software. Some of the computations were done on computational resources supplied by the project „e-Infrastruktura CZ“ (e-INFRA LM2018140) provided within the program Projects of Large Research, Development and Innovations Infrastructures. Computational resources were provided by the ELIXIR-CZ project (LM2015047), part of the international ELIXIR infrastructure.

## **KEYWORDS**

Aerodynamics, CFD, Formula Student, Front wings, Inverted wings

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

HAVRAN, Edmund. *Návrh konstrukce elementů předního křídla Formule Student*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121507>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. 60 s. Vedoucí práce Robert Popela.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že túto prácu som vypracoval samostatne pod odborným vedením Ing. Roberta Popelu, Ph.D. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

V Brne dňa 26.6. 2020

.....

Edmund Havran

## **POĎAKOVANIE**

Týmto chcem poďakovať vedúcemu práce pánovi Ing. Robertovi Popelovi, Ph.D. za odborné vedenie práce a rady pri vypracovaní. Zároveň patrí moja vďaka kolektívu TU Brno Racing za možnosť realizácie témy a všetkým ostatným, ktorí sa zaslúžili o výpomoc pri vytváraní práce.



# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Súťaž Formula Student</b> .....	<b>11</b>
2.1 Prehľad súťaže.....	11
2.2 Pravidlá súťaže .....	12
<b>3 Predné krídlo na závodnom vozidle</b> .....	<b>14</b>
3.1 Význam predného krídla na závodnom vozidle .....	14
3.2 Predné krídlo v súťaži Formula Student .....	16
3.3 Konceptný návrh krídla .....	23
<b>4 CFD</b> .....	<b>27</b>
4.1 Využitie CFD .....	27
4.2 Kalibrácia výpočtového modelu.....	28
<b>5 Optimalizácia</b> .....	<b>34</b>
5.1 Optimalizačný algoritmus .....	35
5.2 Optimalizácia hlavnej časti krídla .....	37
5.3 Optimalizácia štvrtého elementu krídla .....	44
<b>6 Posúdenie výsledku</b> .....	<b>47</b>
<b>7 Záver</b> .....	<b>48</b>
<b>Zoznam použitých zdrojov</b> .....	<b>49</b>
<b>Zoznam použitých skratiek a symbolov</b> .....	<b>51</b>
<b>Zoznam obrázkov</b> .....	<b>52</b>
<b>Zoznam tabuliek</b> .....	<b>54</b>
<b>Zoznam grafov</b> .....	<b>55</b>
<b>Zoznam príloh</b> .....	<b>56</b>
A Hodnoty optimalizácie použité v grafoch konvergencie.....	57
A.1 Hodnoty maximálneho prítlaku 2 elementov .....	57
A.2 Hodnoty priemerného prítlaku 2 elementov .....	58
A.3 Hodnoty maximálneho prítlaku 3 elementov .....	59
A.4 Hodnoty priemerného prítlaku 3 elementov .....	60

# 1 Úvod

Aerodynamika je dnes neoddeliteľnou súčasťou motoristického športu a v mnohých súťažiach je to obor, ktorý dokáže najviac zrýchliť vozidlo na trati. Vo Formule Student sa posledné roky tento trend prejavuje stále viac a preto je prínosné zvyšovať úsilie venované návrhu aerodynamiky vozidla. Hľadanie najprínosnejšieho konceptu sprevádza veľký počet simulácií prúdenia vzduchu, preto je prínosné tento proces automatizovať a používať rôzne optimalizačné algoritmy na nájdenie najlepšej geometrie aerodynamických prvkov vozidla.

Cieľom práce je po nazhromaždení cieľov návrhu vytvoriť nový dizajn predného krídla pre vozidlo Dragon X, v poradí 10. monopost tímu TU Brno Racing a pomocou optimalizačných algoritmov tento koncept vylepšiť na čo najvyššiu hodnotu prítlaku a najmenšiu hodnotu odporu vzduchu, pričom sa bude dbať na splnenie pravidiel súťaže a synergiu so zvyšnými časťami vozidla, aby bolo dosiahnuté najlepšie využitie obmedzených prostriedkov dostupných závodnému tímu počas jednej závodnej sezóny.

## 2 Súťaž Formula Student

### 2.1 Prehľad súťaže

Formula Student (ďalej len FS) je európskou časťou pôvodne americkej celosvetovej súťaže Formula SAE. Jedná sa o súťaž univerzitných tímov zložených zo študentov bakalárskeho a magisterského štúdia. Počiatky súťaže siahajú do roku 1981, kedy bola založená v USA. V Európe sa prvá súťaž konala až o 17 rokov neskôr, v roku 1998. Okrem Európy a USA sa súťaže konajú aj na ostatných kontinentoch, napríklad Brazília, Japonsko, Austrália alebo India [1]. Celkovo sa zúčastňuje cez 800 tímov z celého sveta v troch kategóriách:

Combustion – vozidlo kategórie formula poháňané spaľovacím pohonom

Electric – vozidlo kategórie formula poháňané elektromotorom

Driverless – vozidlo kategórie formula schopné jazdy bez vodiča

Cieľ súťaže je každý rok rovnaký, okrem získavania skúseností účastníkov a nadväzovania kontaktov s kolegami zo zahraničia je hlavným cieľom postaviť nové jednomiestne závodné vozidlo, ktoré musí byť dobre ovládateľné, výkonné, spoľahlivé a zároveň bezpečné. Musí zároveň spĺňať pravidlá súťaže, ktoré sa každý rok menia. Každý tím si prostriedky na stavbu musí zohnať sám. Víťazný tím každej súťaže je určený na základe bodového hodnotenia zo statických aj dynamických disciplín [2].

Tieto disciplíny sú:

Business presentation - tím predstavuje svoj plán na predaj formule, poprípade nejakého iného podnikania za účelom zisku.

Cost and Manufacturing - tím obhaja vypracovaný „Cost report“, dokument obsahujúci zoznam dielov použitých na výrobu vozidla a ich cenu. Zároveň sa hodnotí znalosť výrobného procesu a technológií.

Engineering Design Event - hodnotí sa návrh vozidla kategórie formula, inžiniersky prístup, originalita a pod. Zároveň sa testuje odborná znalosť členov tímu.

Acceleration - meria sa akcelerácia z pevného štartu na 75 metrovej rovinke.

Skid Pad - auto jazdí po trati v tvare číslice osem, dvakrát v každom smere a meria sa maximálna laterálna akcelerácia.

Autocross - jedno kolo na trati dlhej 1km s rovinkami, zákrutami a šikanami. Čas kola zároveň slúži ako kvalifikácia na disciplínu Endurance.

Endurance - disciplína s najväčším počtom bodov. Vozidlá jazdia na trati podobnej disciplíne Autocross na vzdialenosť 22km s výmenou vodiča v polovici.

Efficiency - počas disciplíny Endurance sa meria spotreba paliva (Combustion) alebo energie (Electric). Následne sa vyrátava pomer spotrebovaného paliva a rýchlosti na trati [3].

Tím TU Brno Racing pôsobí na pôde Vysokého učení technického v Brně od roku 2010, pričom zahŕňa zväčša študentov strojníckej fakulty. Tím v roku 2020 vyvíja v poradí 10. vozidlo so spaľovacím motorom a prvé vozidlo na elektrický pohon. V celosvetovom rebríčku tímov sa posledné roky umiestňuje v prvej päťdesiatke v kategórii Combustion, pričom najvyššie umiestnenie dosiahol monopost Dragon 7 v roku 2017- piate miesto. V čase písania práce je tím umiestnený na 9. mieste rebríčku [4].

## 2.2 Pravidlá súťaže

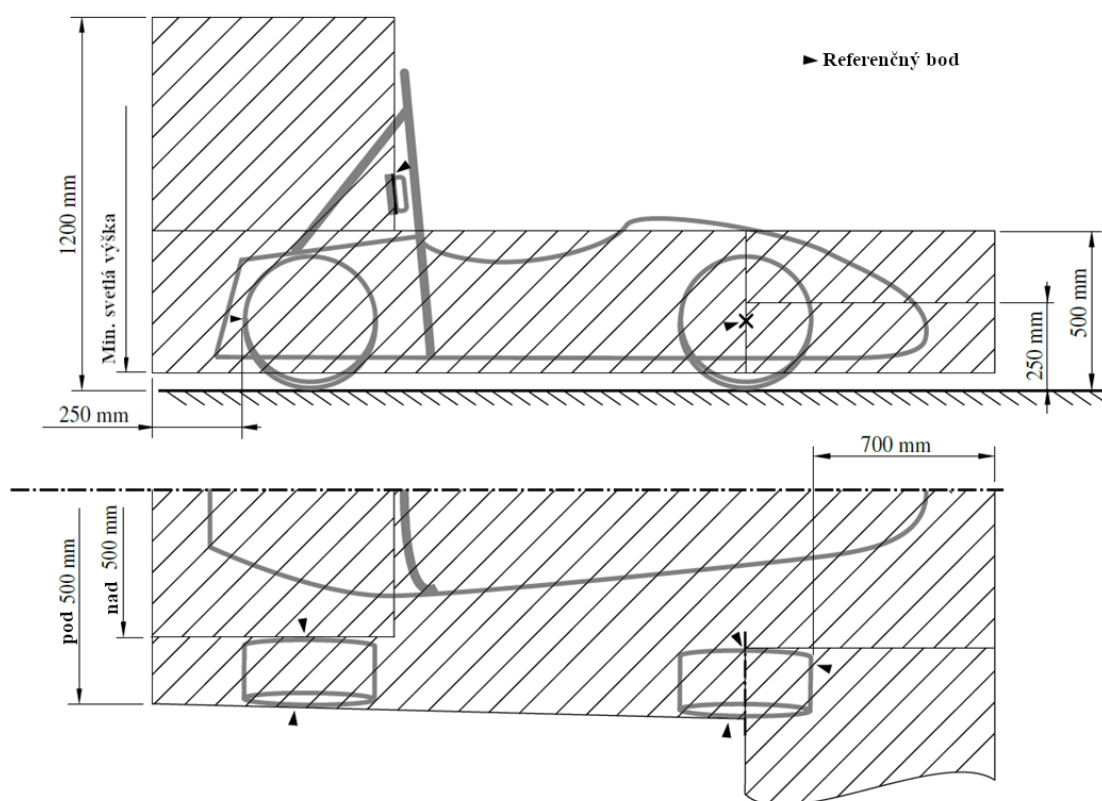
Pravidlá sa každoročne uverejňujú na stránke závodu Formula Student Germany (FSG), ktorý funguje ako neoficiálne majstrovstvá sveta a tieto pravidlá používa väčšina závodov v Európe. Pravidlá FSG sa mierne líšia od pravidiel FSAE, ktoré sa používajú hlavne v zámorí. Obsahujú regulácie hlavne bezpečnostného charakteru, pričom však jasne definujú ako súťažné vozidlo vyzerat' a zároveň nechávajú dostatok priestoru na vývoj. Témy tejto práce sa bližšie týkajú len pravidiel obmedzujúce celkové rozmery vozidla a aerodynamického balenia (ďalej ako aeropaket) a okrajovo aj pravidlá bezpečnosti ostrých hrán.

Pravidlá vytyčujú priestor v prednej časti vozidla, ktorý môže obsahovať aerodynamické prvky, zvyčajne predné krídlo. Pre potreby práce sa konkrétne jedná o priestor pred predným kolesom, vzdialenom od kolesa minimálne 80mm a maximálne 700mm. Od vozovky môže byť vzdialený minimálne 30mm a maximálne 250mm. Pravidlá ďalej obmedzujú polomer hrán (ktoré by mohli prísť ku kontaktu s chodcom) na 5mm pre horizontálne a 3mm pre vertikálne hrany. Toto pravidlo sa v praxi týka nábežnej hrany prvého elementu krídla.

Posledné pravidlo priamo súvisiace s témou práce sa zaoberá pevnosťou

aerodynamických prvkov- musia vydržať silu 200N, pôsobiacu na minimálnu plochu  $225\text{cm}^2$ , ktorá nesmie spôsobovať deformáciu väčšiu ako 10mm v smere jej pôsobenia (v praxi vektor pôsobiacej sily smeruje kolmo k zemi, ale v pravidlách toto nie je jasne definované). Zároveň musia vydržať silu 50N pôsobiacu v ktoromkoľvek smere a odolať deformácii veľkej viac ako 25mm [5]. Vzhľadom na charakter práce, sa ďalej bude uvažovať o krídle ako nedeformovateľnom, avšak pevnosť konštrukcie bude braná na vedomie pri návrhu.

Obr. 2.1 – Rozmerové pravidlá súťaže



### 3 Predné krídlo na závodnom vozidle

Rovnako ako keď lietadlo letí atmosférou a generuje svojim tvarom vztlak, vozidlá pohybujúce sa na zemi tiež vytvárajú sily. Obdobne ako v letectve, hlavnými silami sú odpor a vztlak. Aerodynamický odpor priamo ovplyvňuje maximálnu rýchlosť, akceleráciu a spotrebu paliva vozidla, čo sú všetko dôležité vlastnosti pri návrhu vozidla. Vztlak naopak pôsobí negatívne na stabilitu vozidla, pretože znižuje silu ktorá pôsobí na vozovku skrz kolesá a tým pádom znižuje koeficient trenia. Toto platí dvojnásobne v motoristickom športe, kde sa vozidlá pohybujú na hranici priľnavosti pneumatík [6]. Koncom 60tych rokov sa začali experimenty s generovaním prítlaku návrhom krídiel s opačne tvarovanými aerodynamickými profilmi ako na lietadlách. Dnes je použitie geometrie vozidla na generovanie prítlaku samozrejmosťou až dokonca požiadavkou na zachovanie dobrých výsledkov v súťaži.

#### 3.1 Význam predného krídla na závodnom vozidle

Prítlak generovaný vozidlom vytvára dodatočnú silu k hmotnosti vozidla, ktorá pôsobí na pneumatiky pri jazde a zvyšuje ich koeficient trenia, čo sa hlavne prejavuje neskoršou stratou adhézie v zákrutách [7]. Generovanie aerodynamického prítlaku sa neobíde bez vytvorenia odpovedajúcej hodnoty aerodynamického odporu, ktorá potom obmedzuje rýchlosť vozidla. Navrhnutie aeropaketu vozidla je preto kompromis medzi dobrou adhéziou v zákrutách a vysokej rýchlosti na rovnej trati.

Dôležitá hodnota pri návrhu je aerodynamický stred vozidla (ďalej CoP, z anglického Centre of Pressure). Jeho poloha priamo ovplyvňuje stabilitu a jazdné vlastnosti vozidla. V súčasnosti sa aeropaket zvyčajne rozdeľuje na tri hlavné súčasti - predné krídlo, zadné krídlo a podlaha. Mnohé vozidlá obsahujú ďalšie prvky ako napríklad sidepod- kryt chladienia pri vozidle typu formula, bargeboard - súčasť regulujúca úplav od kolesa a podobne.

Predné krídlo sa nachádza pred prednou nápravou vozidla a je ako prvé v kontakte s prúdením vzduchu. Z tohto dôvodu má dôležitú funkciu navádzať prúdenie vzduchu na zvyšné časti aeropaketu vozidla, k chladičom a podobne. Táto úloha predného krídla môže dokonca prevyšovať jeho prvotnú funkciu - generovanie prítlaku. Najextrémnejším príkladom je predné krídlo v súťaži Formula 1 (ďalej ako F1) z roku 2018. Takéto krídlo

generuje prítlak len na malej časti svojho rozpätia a zvyšok priestoru je venovaný usmerneniu prúdenia a tvorbe vírov [8].

Obr. 3.1 - Predné krídlo v súťaži Formula 1 zo sezóny 2018



Predné krídlo však existuje aj v iných, menej jasných podobách. Napríklad v súťaži World Endurance Championship (WEC) je skryté pod kapotážou. Tvar predného krídla vozidla vždy určujú primárne pravidlá a charakteristika súťaže. V prípade WEC je preto pravdepodobne prínosnejšie krídlo znižujúce aerodynamický odpor a teda spotrebu paliva, naopak v prípade F1 sa kladie dôraz na lepšie ovplyvnenie úplavu vzduchu od kolesa vozidla.

Obr. 3.2 - Predné krídlo v súťaži WEC v roku 2016



### 3.2 Predné krídlo v súťaži Formula Student

FS je špecifická súťaž oproti iným kategóriám motoristického športu. Monoposty sú typu formula, ich rozmery sú ale oveľa menšie ako plnohodnotné formule. Trate sa skladajú v prevažnej miere (dokonca až 90%) zo zákrut, čo znamená malý dôraz na maximálnu rýchlosť a vysoký dôraz na schopnosť zatáčania a akcelerácie. Priemerná rýchlosť sa pohybuje okolo 60km/h, aerodynamické prvky preto pracujú pri nízkych hodnotách Reynoldsovho čísla ( $Re$ ). Výhodné je preto použitie veľkých krídiel s aerodynamickými profilmi vyvinutými pre nízke  $Re$ . Malé rozmery a rýchlosti obmedzujú možnosť ovplyvňovania prúdenia vzduchu pomocou vírov, ako je to bežné napríklad v F1.

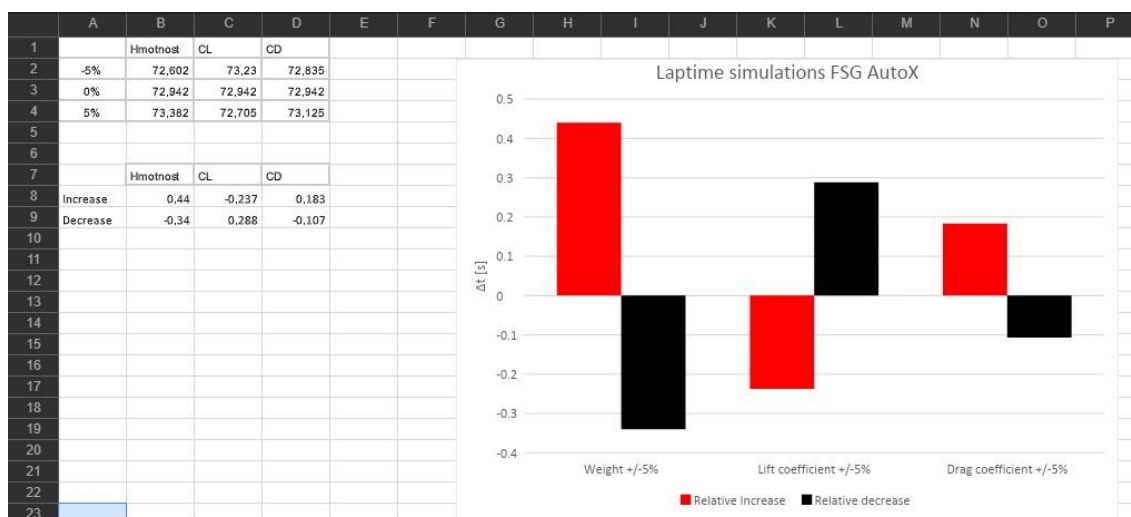
Malé rýchlosti tiež znamenajú menší dôraz na aerodynamický odpor a väčší dôraz na prítlak. V minulých sezónach v tíme prebehol výpočet zistenia závislosti zmeny hodnôt hmotnosti, aerodynamického prítlaku a aerodynamického odporu. Výpočet prebiehal ako simulácia jedného závodného kola na trati závodu Formula Student Germany a merala sa zmena času, za ktoré vozidlo prešlo jedno kolo. Ako vidno z výsledkov na obrázku 3.3, prídanie 5% počiatočnej hodnoty aerodynamického prítlaku je prínosnejšie ako odobratie 5% hodnoty aerodynamického odporu.

Vo všeobecnosti pre aerodynamické profily platí, že hodnota aerodynamického odporu



je omnoho menšia, ako hodnota aerodynamického prítlaku pri uvažovaní príľnutého prúdenia vzduchu. Z týchto dôvodov je zrejmé, že návrh aeropaketu sa riadi skôr zvýšením aerodynamického prítlaku a zníženie aerodynamického odporu sa považuje za sekundárny cieľ [9].

Obr. 3.3- Výsledky simulácie času na kolo



V tíme TU Brno Racing bol prvý aeropaket vyvinutý pre monopost Dragon 4.

Obr. 3.4 - Monopost Dragon 4



Pravidlá boli v tých dobách výrazne odlišné. Koncepcia sa prikláňala ku generovaniu prítlaku veľkými krídlami a používala sa jednoduchá podlaha vozidla. Vývoj pokračoval monopostami Dragon 5 a Dragon 6 pridaním difúzora na podlahe, optimalizáciou krídiel a podobne. V sezóne vozidla Dragon 6 sa zmenili pravidlá rozmeru aeropaketu na rozmery podobné dnešným.

Obr. 3.5 - Monopost Dragon 6



Počnúc monopostom Dragon 7 sa zvyšovala spolupráca pri návrhu aeropaketu s podvozkovou sekciou tímu a hodnota CoP sa posúvala k hodnote 45% prítlaku na prednej náprave vozidla. Zlepšenie jazdných vlastností sa prejavilo na umiestení tímu, ktorý sa od sezóny Dragon 7 pohybuje v celosvetovej top 30 [4]. Postupne sa úloha predného krídla rozširovala aj na tvarovanie prúdenia vzduchu okolo predného kolesa, do podlahy a na chladenie bŕzd. V sezóne Dragon 9 sa prvý krát vyskúšala koncepcia komplikovanej bočnice predného krídla, s pozitívnym efektom.

Obr. 3.6 - Monopost Dragon 9, najnovší monopost z dielne TU Brno Racing



Spomedzi konkurencie vyše 700 tímov na svete sa najlepšie tímy nachádzajú na špici vývoja aerodynamiky v súťaži. Malá špecifickosť pravidiel znamená veľké množstvo filozofií návrhu predného krídla vozidiel, ktoré sa líši v závislosti konkrétneho tímu. Najjednoduchšia koncepcia pozostáva z hlavného elementu rozpínajúceho sa cez celé krídlo a niekoľkých menších elementov pred kolesom a/alebo medzi kolesom a trupom vozidla. Táto koncepcia sa používala v tíme TU Brno Racing v minulých sezónach a jej výhodami je hlavne jednoduchosť návrhu, pevnosť a ľahká modifikácia. V súčasnej

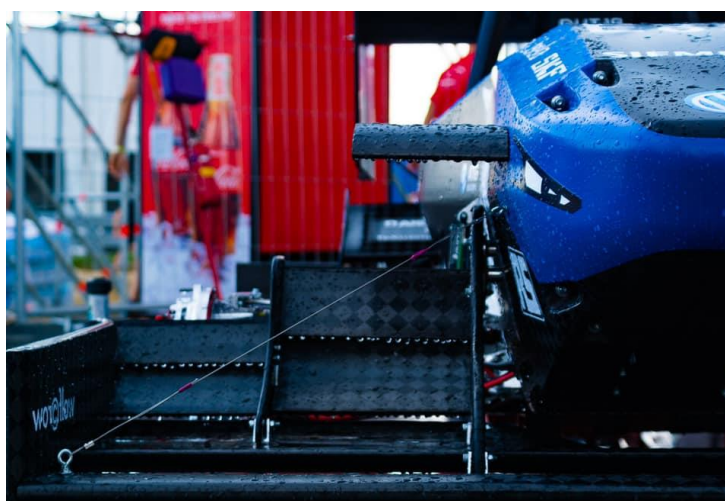
podobe už v tíme dosiahla vrchol svojho potenciálu. Vo svete je to najčastejšia koncepcia a z blízkych tímov ju používa napríklad CTU Cartech z ČVUT v Prahe.

Obr. 3.7 - Monopost tímu CTU Cartech z ČVUT



Nadstavba na tejto koncepcii krídla spočíva v pridávaní ďalších elementov, pričom vzniká krídlo so štyrmi až v niektorých prípadoch ôsmimi elementami. Takéto krídlo vytvára veľké množstvo prítlaku, avšak za cenu veľkého odporu a ovplyvnenia prúdenia vzduchu. Jeho návrh je veľmi citlivý na odtrhnutie prúdenia vzduchu, hlavne pri nižších rýchlostiach. Mnohé špičkové tímy používajú krídla s viacerými elementami vcelku úspešne, preto sa zdá, že tento koncept funguje dobre.

Obr. 3.8 - Detail na sústavu elementov predného krídla na monoposte tímu Formula Student Team Delft z Technickej univerzity v Delfte v Holandsku



Nevýhoda takéhoto riešenia je nemožnosť ovplyvňovania prúdenia vzduchu okolo kolies iným spôsobom ako tvarom bočnice krídla, alebo pridávaním malých elementov. Napríklad tím TUW Racing z Technickej univerzity vo Viedni v Rakúsku používa sústavu malých elementov vytvárajúcich vírenie vzduchu v prednej časti krídla. Podobné

sústavy elementov vytvárajú dodatočné víry, ktoré regulujú úplav vznikajúci za rotujúcim kolesom a zároveň prispievajú k tvorbe aerodynamického prítlaku.

Obr. 3.9 - Záber na predné krídlo TUW Racing, s jasne viditeľnými elementami generujúcich vírenie na koncoch krídla

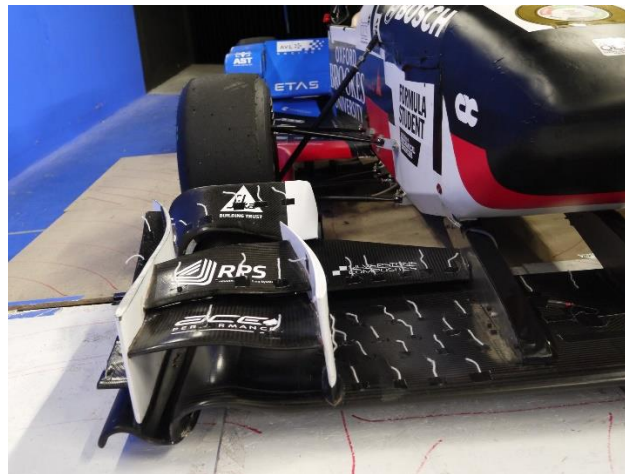


Filozofia generovania vírenia sa do FS dostala pravdepodobne inšpiráciou z F1 a vyznačuje sa veľkým využitím vírov pri kontrole úplavu od kolesa, izolácii oblastí nízkeho tlaku pod vozidlom a iných menej zrejmych efektov. Príkladom takejto filozofie môže byť najnovší monopost tímu Dynamis PRC z Technickej univerzity v Miláne, Taliansku, alebo Oxford Brooks Racing z univerzity Oxford Brooks v Anglicku.

Obr. 3.10 - Monopost Dynamis PRC



Obr. 3.11 - Detail na predné krídlo monopostu Oxford Brooks Racing vo veternom tuneli



Posledné roky sa vyvinula nová filozofia, rozdelenie krídla na niekoľko častí a ovplyvňovanie prúdenia vzduchu vlastným tvarom krídla. Táto filozofia sa vyvinula postupným zlepšovaním krídla s viacerými elementami, ako vidno na krídlach tímov GreenTeam Uni Stuttgart z Nemecka alebo FS Team Tallinn z Estónska. Výhoda oproti filozofii generovania vírenia je v stabilite prúdenia vzduchu nezávisle na rýchlosti vozidla. Krídlo sa tu rozdeľuje na niekoľko oblastí, každá s inou úlohou.

Obr. 3.12 - Monopost GreenTeam Uni Stuttgart



Obr. 3.13 - Monopost FS Team Tallinn so zjavným zakrivením krídla



Najviac aerodynamicky vyvinuté krídla sa posledné roky objavujú na monopostoch TUfast Racing Team z Technickej univerzity v Mníchove v Nemecku alebo Ecurie Aix-Formula Student Team RWTH Aachen e.V. z Aachenu v Nemecku. Tieto tímy využívajú v plnej miere počítačové simulácie a zvyčajne kombinujú viacero návrhových filozofií do jedného konceptu.

Obr. 3.14 - Monopost tímu Ecurie Aix



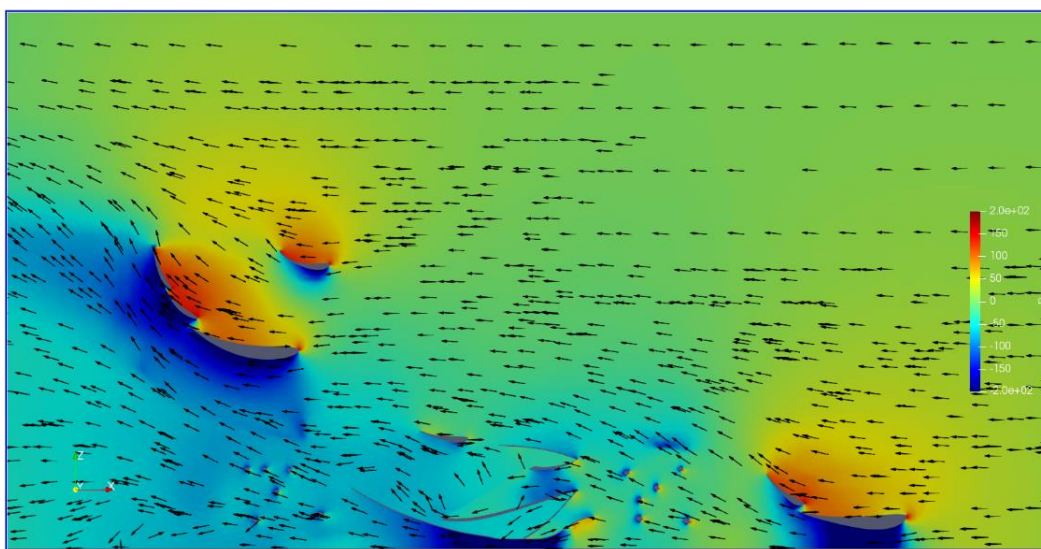
Koncepcia predných krídiel sa každým rokom súťaže zdokonaľuje a tím, ktorý chce byť konkurencieschopný musí venovať značné úsilie navádzaniu prúdenia na ostatné časti vozidla, tvorbe aerodynamického prítlaku, znižovaniu odporu, aerodynamickej stabilite vozidla a znižovaniu celkovej hmotnosti.

### 3.3 Konceptný návrh krídla

Ciele monopostu Dragon X, vyvíjaného v sezóne 2019/2020 sú z aerodynamickej časti: stabilizácia polohy CoP, zvýšenie aerodynamického prítlaku a zníženie aerodynamického odporu.

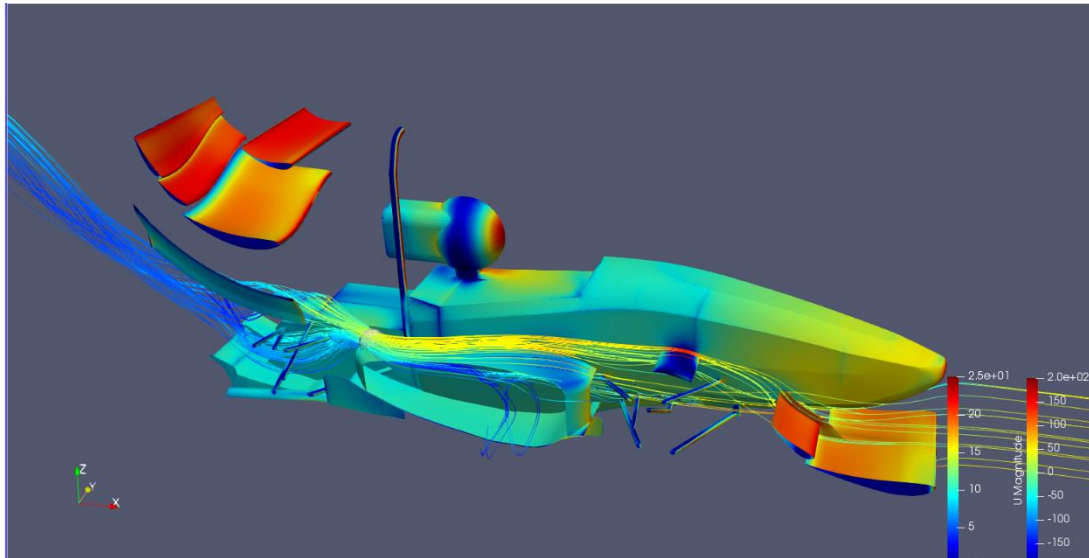
Ako vidno na obrázkoch, vypočítanými v simulačnom programe Simscale a znázornených v programe ParaView počas sezóny 2018/2019, použitie krídla monopostu Dragon 9 generujúceho veľké množstvo prítlaku znamená výrazné ovplyvnenie prúdenia vzduchu do oblasti chladičov v sidepodoch na bokoch monopostu a do oblasti zadného krídla. Tento efekt sa exponenciálne zvyšuje s rýchlosťou vozidla a výrazne ovplyvňuje polohu CoP pri vyšších rýchlostiach [9].

Obr. 3.15 - Simulácia prúdenia na monoposte Dragon 9 - pozdĺžny rez



Znížiť mieru ovplyvňovania bez zníženia aerodynamického prítlaku na prednom krídle nie je jednoduché, niektoré tímy to vyriešili použitím aktívnych aerodynamických prvkov na krídle, ktoré so zvyšujúcou sa rýchlosťou znižujú uhol nábehu niektorých elementov krídla- napríklad RennTeam Uni Stuttgart z Nemecka. Jednoduchším riešením je pridanie malého elementu na trup vozidla, ktorý pôsobí proti prúdu vzduchu z krídla a reguluje jeho pohyb vo vertikálnej rovine. Takéto riešenie sa použilo na predchádzajúcom vozidle.

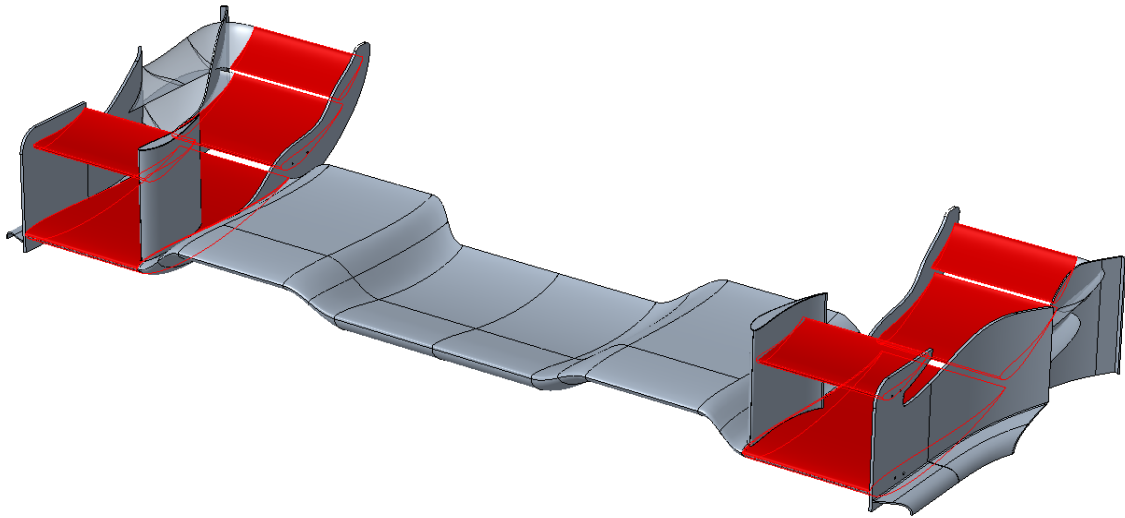
Obr. 3.16 - Analýza prúdenia okolo malého obráteného elementu na monoposte  
Dragon 9



Tento malý element reguluje vertikálny smer prúdenia vzduchu od predného krídla a otáča ho nižšie, mimo smeru zadného krídla. Na svojom konci tiež generuje malý indukovaný vír, ktorý izoluje časť úplavu spôsobeného predným kolesom od zadného krídla a pomáha tým znižovať šancu odtrhnutia prúdu vzduchu na zadnom krídle. Miera ovplyvnenia prúdenia vzduchu od predného krídla závisí od rýchlosti vozidla. Pri vyšších rýchlostiach prúdenia element neovplyvňuje dostatočné množstvo prúdenia a stáva sa menej efektívnym. Ak by však predné krídlo negenerovalo vysoké hodnoty aerodynamického prítlaku v oblasti medzi kolesom a monokokom, miera ovplyvnenia prúdenia predným krídlom by bola pri vyšších rýchlostiach zvládnuteľnejšia spomínaným elementom. Najnižšiu hodnotu  $C_l$  majú symetrické aerodynamické profily, ich použitie v priestore medzi monokokom a kolesom usmerní prúdenie namiesto vzostupného smeru na horizontálny priamo do oblasti konfúzora podlahy a náfuku chladiča. Nárast neovplyvneného prúdu do týchto častí výrazne zlepši ich efektívnosť. Použitie symetrického profilu však zníži celkový prítlak na prednom krídle, preto, aby krídlo generovalo aspoň rovnaké množstvo aerodynamického prítlaku ako na monoposte Dragon 9, musia iné časti krídla túto stratu dorovnať. Existujú dve časti predného krídla s priestorom na navýšenie prítlaku, oblasť pod nosom trupu a oblasť pred kolesami prednej nápravy. Presunutie veľkej časti prítlaku na pravidlami vymedzenú malú oblasť pred kolesami sa môže udiť len pri optimalizovanom návrhu krídla s viacerými elementami, preto bola optimalizácia sústavy elementov pred kolesom vybratá ako téma tejto práce.

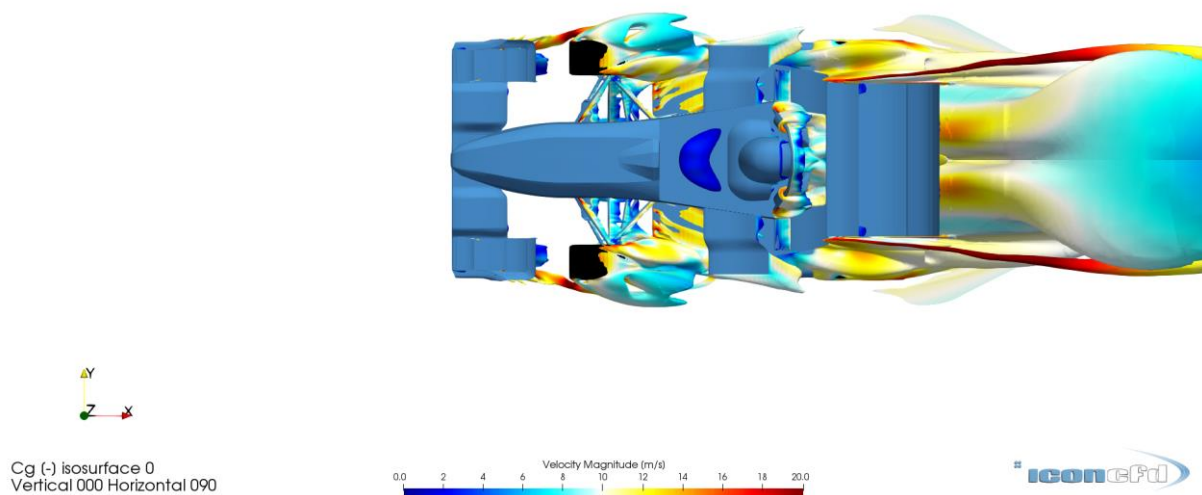


Obr. 3.17 - Konceptný návrh krídla pre monopost Dragon X



Na obrázku 3.17 vidno konceptný návrh predného krídla, po zahrnutí všetkých týchto poznatkov. Časť krídla nachádzajúca sa pred kolesami je červene zvýraznená. Spolu s generovaním prítlaku na relatívne malej časti krídla je pri návrhu daný zreteľ na odvedenie prúdenia vzduchu okolo predných kolies do strán vozidla, čo vytvára priestor nízkeho tlaku za kolesom, kam má tendenciu sa posúvať úplav od kola a znížiť tým úbytok prítlaku na zadnej časti vozidla. Aby bola otestovaná účinnosť novej koncepcie, prebehli vo virtuálnom aerodynamickom tuneli poskytnutom firmou IconCFD cez sponzora Škoda Auto a.s. Mladá Boleslav počiatočné simulácie prúdenia vzduchu.

Obr. 3.18 - Simulácia prúdenia na koncepčnom návrhu Dragon X, zvýraznené sú oblasti vírenia vzduchu



Prvotné simulácie ukázali, že ďalšou výhodou odstránenia elementov v strednej časti krídla je zosilnenie prúdenia vzduchu v oblasti medzi kolesom a monokokom, vďaka čomu sa úplav izoluje od konfúzora podlahy a posúva sa ďalej od zadného krídla. Návrh bol v tíme prijatý a v súčasnosti prebieha jeho vývoj.

## 4 CFD

CFD - Computational Fluid Dynamics je vetvou oboru mechaniky tekutín, ktorá na riešenie úloh prúdení tekutín používa počítačové programy, algoritmy a analýzy. Tieto simulácie sú definované okrajovými podmienkami stien omáčanými prúdením. Výsledky sa zvyčajne znázorňujú na rôznych vizualizáciách [10].

### 4.1 Využitie CFD

CFD od svojho vzniku nabralo na dôležitosť a v motoristickom športe sa premietlo do otázky konkurencieschopnosti tímov. Využitie superpočítačov na komplexné aerodynamické analýzy prúdenia je dnes podmienka úspechu tímov vo všetkých prestížnych súťažiach. Vo FS sa tento trend naplno prejavuje posledných pár rokov, pričom CFD naberá na význame kvôli neexistujúcej možnosti vykonávať merania v aerodynamických tuneloch. Tienistá stránka tohto trendu sa javí v prehnanej dôvere výsledkom meraní CFD a k malému množstvu kalibrácií modelu a validácií výsledkov. Existuje množstvo programov CFD, v tíme TU Brno Racing sa v súčasnosti používa Ansys Fluent. Jednou z jeho výhod je možnosť pracovať v integrovanom systéme Ansys Workbench, ktorý obsahuje mnoho modulov odlišného charakteru ako je CFD. Tento program poskytuje aj možnosť optimalizácie priamo cez skript v jazyku IronPython alebo možnosť prepojenia na externé programy zabezpečujúce optimalizáciu, napríklad MathLab. Pre potreby práce bol vybraný jazyk IronPython, pričom skript bol napísaný externe a výpočet prebehol jeho vložením do rozhrania Ansys Workbench.

## 4.2 Kalibrácia výpočtového modelu

Pred každou simuláciou je potrebné skalibrovať model a zistiť jeho chybu merania voči reálnemu stavu. V prípade tejto práce boli použité merania aerodynamického profilu Selig S1223 vo veternom tuneli, pričom tento profil bol vybratý z dôvodu súčasného použitia v projekte FS. Od začiatku sa počítalo s optimalizáciou v 2D priestore z dôvodu zjednodušenia výpočtu. Aby sa dalo porovnať výsledky medzi 2D a 3D, prípadne aj vylúčiť 2D priestor z dôvodu príliš veľkej chyby merania, boli spravené kalibrácie v 2D aj 3D priestore.

Model profilu bol vymodelovaný pomocou súradníc profilu uvedených v publikácii Low Airspeed Airfoil Data. Priestor virtuálneho tunelu bol vymodelovaný čo najpresnejšie k experimentu. Tieto hodnoty sú uvedené ako prierez tunela 2,8x4,0ft, po prevode a zaokrúhlení na metrické jednotky 850x1220mm; dĺžka tunela 8ft – 2450mm; dĺžka tetivy profilu 12in – 304mm [11]. Rozpätie krídla v 3D kalibrácii je identické so šírkou aerodynamického tunela. V reálnom experimente boli použité tenké dosky z plexiskla na izoláciu medznej vrstvy prúdenia pri bokoch profilu a na oddelenie meracích prístrojov, v kalibrácii je táto stena priamo braná do úvahy ako stena tunela. Uhol nábehu profilu je vymodelovaný ako premenný parameter s centrom otáčania v geometrickom strede testovaného aerodynamického profilu.

Vztlak je v experimente meraný pomocou sily pôsobiacej na protiváhu, v kalibrácii pomocou sily v smere osi  $y$ , teda principiálne identicky. Meranie aerodynamického odporu sa však líši: v reálnom experimente bol odpor vypočítaný z úbytku celkového tlaku za meraným aerodynamickým profilom, metóda výpočtu je v publikácii uvedená na stranách 9 až 13 [11]. V kalibrácii je meraná sila pôsobiaca v ose  $x$ , to znamená v smere prúdenia vzduchu.

Ako turbulentný model pre kalibráciu je vybratý model  $k$ - $\omega$  SST (Shear-Stress Transport), z dôvodu predchádzajúceho použitia v projekte FS. Tento model má niekoľko výhod, v projekte FS bol predchádzajúce sezóny použitý kvôli svojej robustnosti v oblasti medzných vrstiev (na monoposte je veľa jednotlivých plôch, ktoré sa vzájomne ovplyvňujú a sú v relatívne blízkej polohe) a všeobecne dobrému modelovaniu odtrhnutia prúdenia vzduchu [12]. Na rozdiel od štandardného turbulентného modelu  $k$ - $\omega$ , model  $k$ - $\omega$  SST prechádza vo väčšej vzdialenosti od medznej vrstvy z modelu  $k$ - $\omega$  do modelu  $k$ - $\epsilon$  a eliminuje tým veľkú citlivosť modelu  $k$ - $\omega$  na turbulentných

vlastnostiach voľného prúdenia [13]. Pre dobrú simuláciu separácie prúdenia pri stene je nutné vyhnúť sa stenovým funkciám-wall functions, čo sú logaritmické funkcie, ktoré aproximujú chovanie prúdenia tekutiny v tesnej blízkosti steny. Namiesto ich použitia treba dostatočne definovať túto oblasť bunkami siete, aby nedochádzalo k aproximácii, ale k výpočtu prúdenia tekutiny v tejto oblasti. Na definovanie vzdialenosti od steny sa používa bezrozmerná veličina  $y^+$ , kde hodnota  $y^+=0$  označuje stenu. V programe Fluent všeobecne platí, že hodnoty  $y^+<1$  sú dostatočné na definovanie tejto oblasti a  $y^+$  je preto pri tvorbe siete nechávané pod hodnotou 1 [13].

Kalibrácia prebehla v 2D aj 3D priestore. Najskôr prebehla 2D kalibrácia, s počiatočnou sieťou 40 000 buniek a následne sa tento počet zhruba zdvojnásobil až do hodnoty 540 000 buniek. V tabuľke 4.1 sú vypísané presné hodnoty počtu buniek pre každú sieť.

Tab. 4.1- Rozmery siete buniek pri kalibrácii

Názov siete	Počet buniek
2D_1	40 204
2D_2	70 898
2D_3	318 149
2D_4	541 899
3D_1	912 527
3D_2	7 547 542
3D_3	15 740 567

Profil použitý v kalibrácii má inú veľkosť, než akú bude mať na monoposte, preto nemôže byť priamo použitá konštrukčná rýchlosť v návrhu monopostov FS, to jest 60km/h. Aby boli prúdenia v kalibrácii a na vozidle zhodné, musia mať podobnú charakteristiku.

Podobnosť je splnená, ak majú obe prúdenia podobné Reynoldsove číslo.  $Re$  je vyjadrené pomocou vzorca [14]:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu} \quad (1)$$

kde  $\rho$  je hustota kvapaliny,  $v$  rýchlosť prúdenia,  $d$  charakteristický rozmer a  $\mu$  dynamická viskozita. Charakteristický rozmer pre samostatné aerodynamické profily je dĺžka tetivy,

avšak pre vozidlá nie je charakteristický rozmer jednoznačne vyjadrený. Najčastejšie sa používa šírka vozidla kolmá na smer prúdenia vzduchu, pre závodné monoposty s rozdielnou šírkou v rozdielnych výškach je však táto definícia nevyhovujúca. Určenie  $Re$  preto nie je jednoznačné. Rozmery plochy definovanej pravidlami FS sú malé a preto elementy krídla budú mať dĺžku tetivy menšiu než 0,5 metra, bližšie k 0,2 metra. Určenie  $Re$  sa preto v tomto prípade viaže na tieto rozmery. Použitie tejto dĺžky tetivy 0,2 metra vo vyššie uvedenom vzorci:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu} = \frac{1,225 \text{ kgm}^{-3} * 16,6 \text{ ms}^{-1} * 0,2 \text{ m}}{1,7894 * 10^{-5} \text{ kg(ms)}^{-1}} = 227\,283 \quad (2)$$

Hodnoty hustoty vzduchu a dynamickej viskozity sú v programe Fluent v základe nastavené na vzduch pri atmosférickom tlaku a teplote 15°C, tieto hodnoty nie sú v reálnom experimente uvedené, nejedná sa však o špecifické podmienky, preto boli použité. Experimenty v tuneli sa robili pre rôzne hodnoty Reynoldsovho čísla, vrátane  $Re=200\,000$ . Kalibrácia preto prebehne pre toto  $Re$ . Dĺžka tetivy profilu v reálnom experimente je 0,3048 m. Z vyššie uvedeného vzorca sa teda odvodením dá vypočítať rýchlosť prúdenia pre kalibráciu:

$$v = \frac{Re * \mu}{\rho * d} = \frac{200\,000 * 1,7894 * 10^{-5} \text{ kg(ms)}^{-1}}{1,225 \text{ kgm}^{-3} * 0,3048 \text{ m}} = 9,58 \text{ ms}^{-1} \quad (3)$$

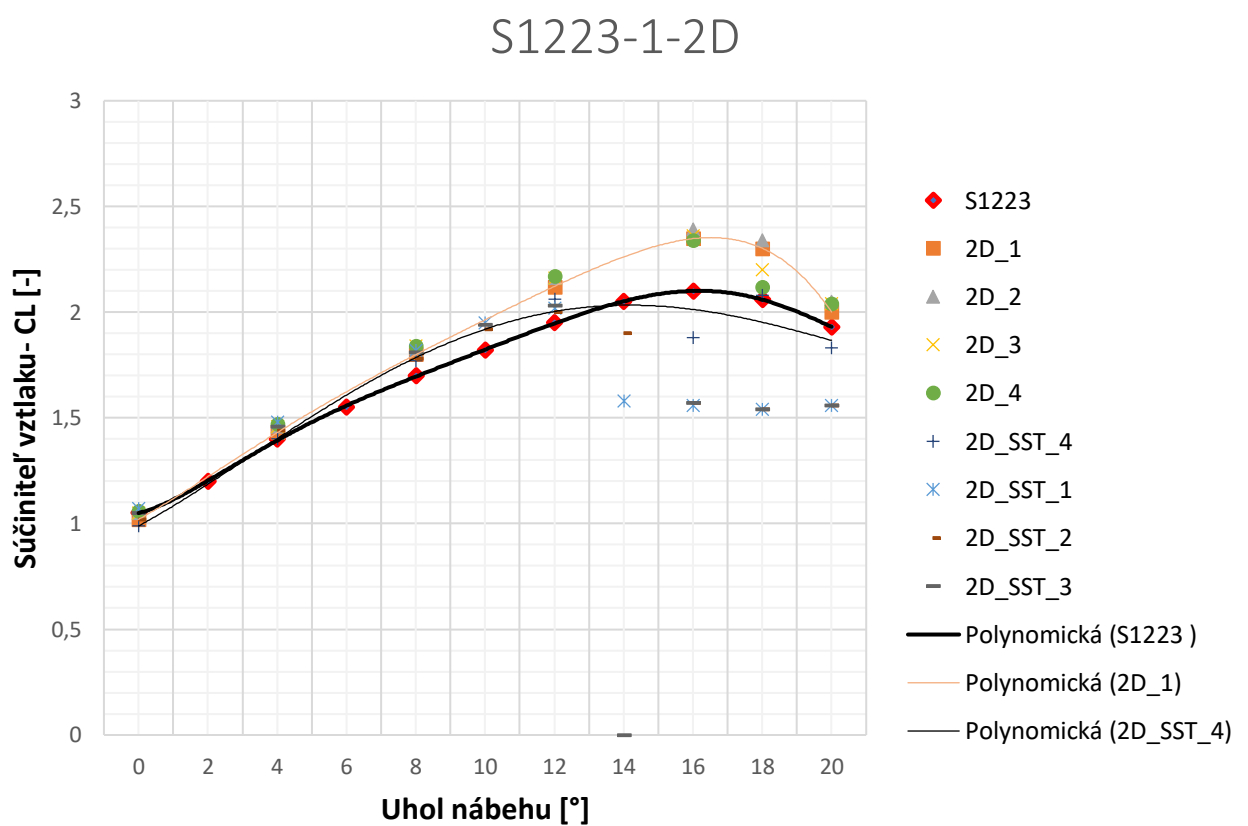
Poslednými hodnotami potrebnými pre výpočet sú intenzita vírenia  $I$  (turbulence intensity) a dĺžka vírenia  $l$  (turbulence length scale). V tuneli bola použitá protiturbulentná clona, ktorá podľa meraní znížila intenzitu vírenia na menej ako 1% [11]. V kalibrácii bola preto vybraná hodnota  $I=0,5\%$ . Ako dĺžka vírenia bola vybraná hodnota  $l=10,16\text{cm}$ , ktorá odpovedá šírke clony v experimente.

Kalibrácia v 3D priestore vyšla v rámci tolerovateľnej chyby merania, zvyšovanie hustoty siete sa prejavilo zvýšením presnosti, ale už aj prvotná sieť dokázala relatívne presne odhadnúť tvar vztlakovej krivky. V 2D priestore bola chyba merania v prvej fáze kalibrácií nevyhovujúca. Prúdenie sa od profilu odtrhávalo pri uhle nábehu menšom o 5° oproti reálnemu experimentu. Takáto chyba merania by bola pre optimalizáciu príliš veľká, pretože by najlepšie hodnoty prítlaku nikdy nedosiahla.

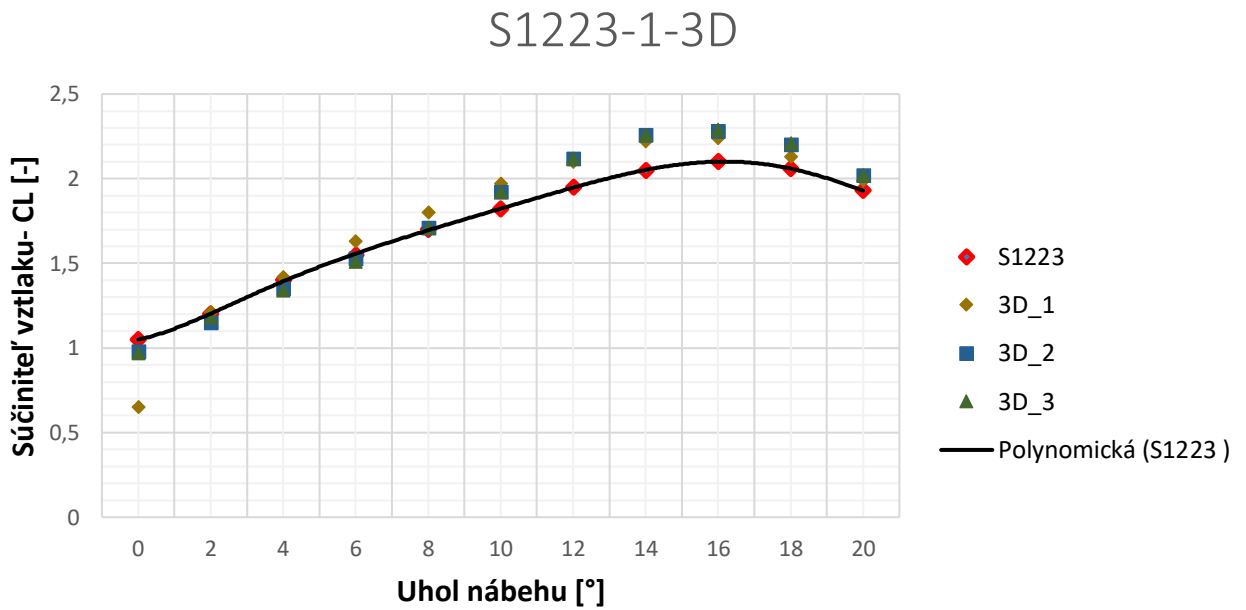
Ako prvé riešenie sa vybrala zmena turbulentného modelu, na model Spalart-Allmaras. Podmienka modelu  $y^+ < 1$  bola splnená už pri k-omega SST, preto neboli potrebné žiadne úpravy siete. Výsledky tohto modelu sú porovnateľné s kalibráciou v 3D priestore,

s odtrhnutím prúdenia v správnom uhle nábehu a absolútnou chybou maximálne 10% v porovnaní s 9% pri 3D priestore. Veľkosť siete neovplyvňuje presnosť výpočtu pre priestor neodtrhnutého prúdenia, s rozdielmi až za kritickým uhlom nábehu. Použitie málo hustej siete by bolo teoreticky možné, ale pri modelovaní krídla s viacerými elementmi by takáto sieť mala problémy s definovaním priestoru medzi elementmi. Z tohto dôvodu je vybratá sieť 2D\_3, ktorá má dostatočnú hustotu a zároveň nie je časovo náročná na výpočet. Jej generácia je zhruba o 2 minúty rýchlejšia ako siete 2D\_4. Výsledky kalibrácie sú uvedené v grafoch 4.1 a 4.2:

Graf 4.1- Hodnoty kalibrácie v 2D priestore

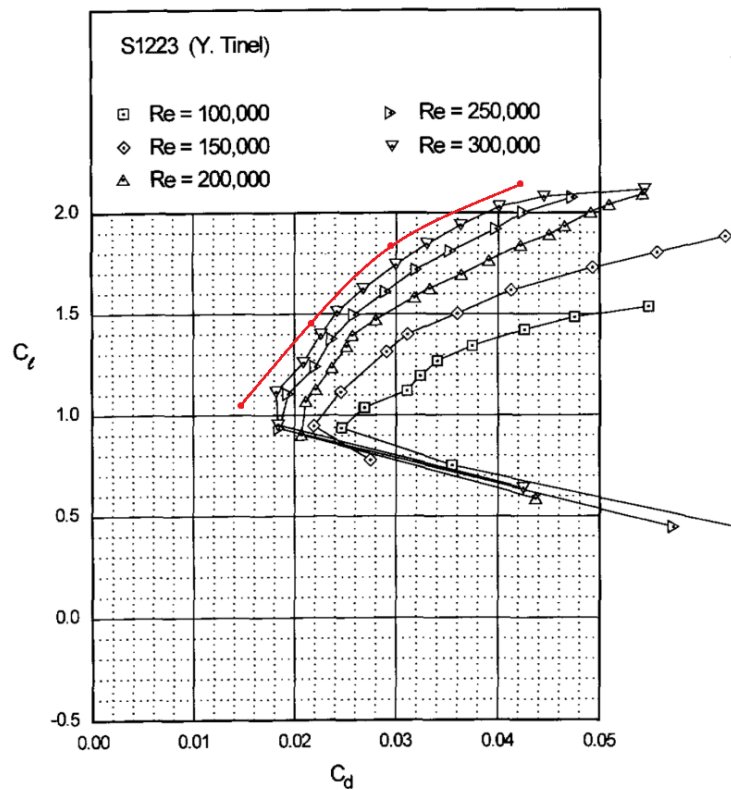


Graf 4.2- Hodnoty kalibrácie v 3D priestore



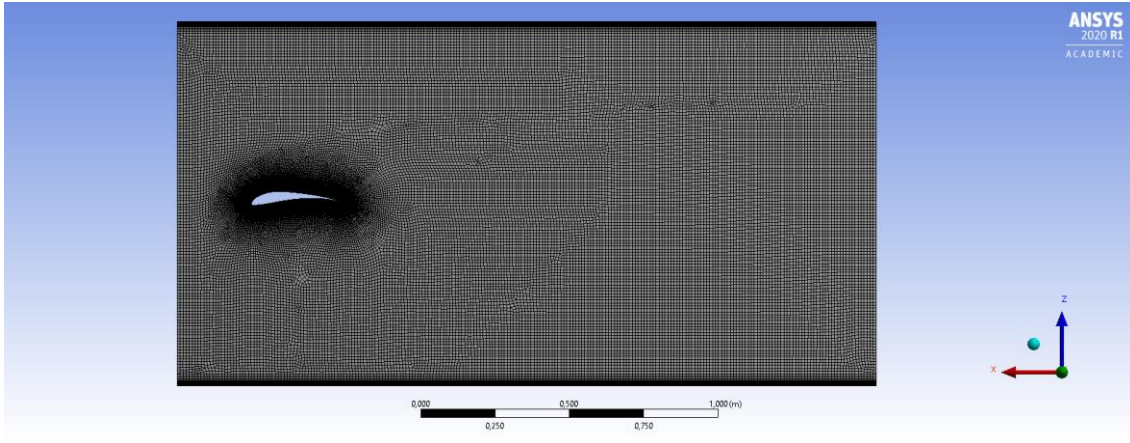
Pre sieť 2D\_3 bol následne spravený aj graf poláry profilu. Pribeh poláry je podobný ako v meraniach. Chyba sa pohybuje okolo 30%, avšak hodnoty odporu sú pre daný profil veľmi malé. Ak sa zoberie do úvahy fakt, že aerodynamický odpor nie je pre optimalizáciu kľúčový, je možné túto chybu tolerovať.

Graf 4.3- Aerodynamická polára siete 2D\_3

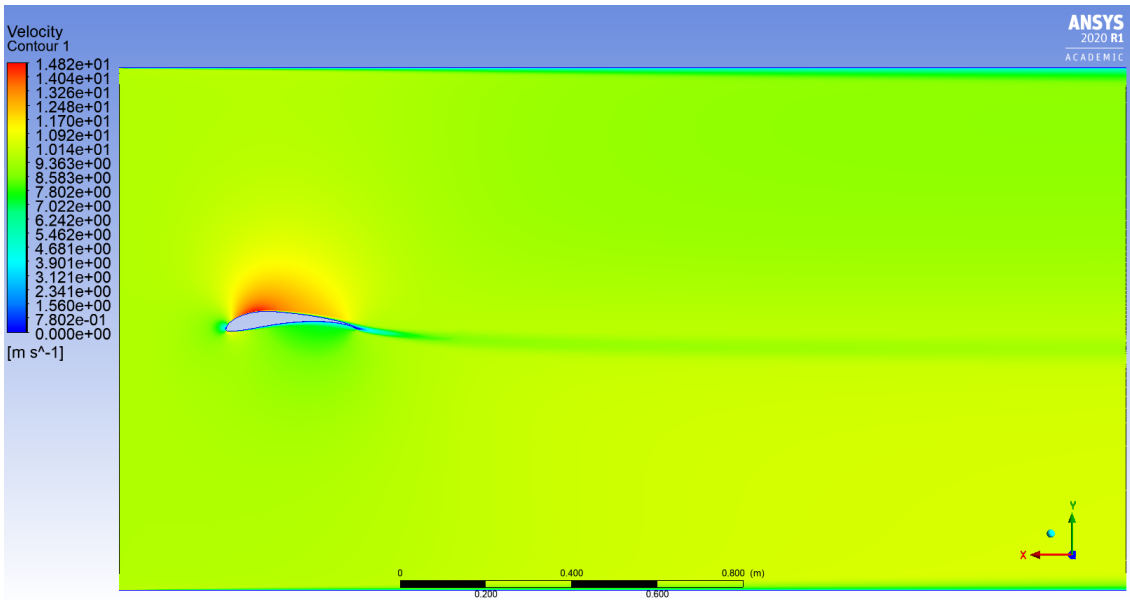




Obr. 4.1 – Sieť kalibračného modelu



Obr. 4.2 – Rýchlostné pole počas kalibrácie (AoA-0°)

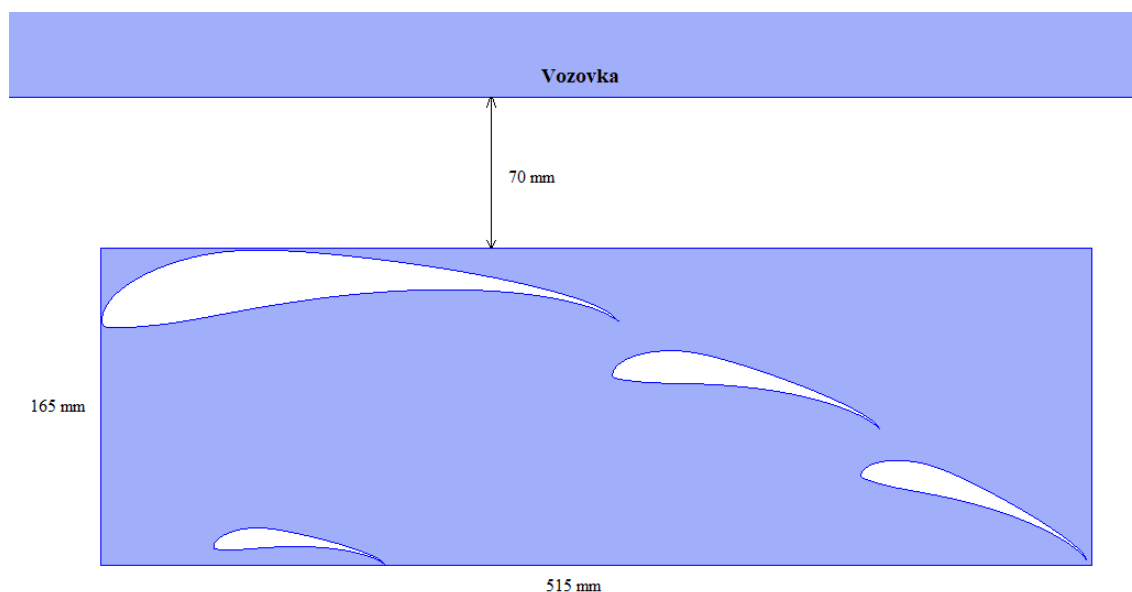


## 5 Optimalizácia

Existuje niekoľko spôsobov na optimalizáciu. Správny spôsob optimalizácie sa vyberie len správnu definíciou problému.

Subjektom optimalizácie má byť časť krídla pred kolesom, s rozmermi ohraničenými pravidlami. Veľkosť tejto plochy po zahrnutí prídavkov pre splnenie pravidiel vo všetkých nastaveniach podvozku vozidla a po zahrnutí výrobných chýb je 515x165mm. Aby bola splnená podmienka pevnosti krídla, hlavne v blízkosti bočnic predného krídla, ktoré sú náchylné na poškodenie, zamedzuje sa použitie mnohopočetných malých krídiel, ktoré nedokážu zabezpečiť krídlu dostatočnú pevnosť. Hlavná časť prenosu síl sa deje v hlavnom elemente krídla, ktoré spája bočnicu s držiakmi krídla. Veľkosť tohto elementu zaberá veľkú časť dĺžky pravidlami vymedzeného priestoru, preto prakticky neexistuje možnosť vytvorenia krídla s viac ako troma elementami pri zachovaní pevnosti a nízkej váhy produktu. Jedna možnosť ako pridať elementy generujúce prítlak je využitie priestoru nad nábežnou hranou hlavného elementu, kde je predpoklad, že oblasť nízkeho tlaku malého elementu nebude zásadne znižovať hodnoty tlaku na povrchu ostatných elementov krídla. Použitie krídiel v tomto priestore tiež poskytuje dodatočné možnosti ako usmerniť prúdenie okolo kolies.

Obr. 5.1 - Konceptný návrh v obálke pravidiel



Dĺžka priestoru zadaného v návrhu nevyplňuje celkovo priestor umožnený

pravidlami, pretože určitá časť priestoru pred kolesom je použitá na otáčanie prúdenia okolo kolesa.

Ďalším krokom je výber parametrov optimalizácie, ktoré sú: tvar aerodynamického profilu, počet, rozmery, poloha a uhol nábehu elementov.

Aerodynamického profil bol vybraný z publikácie Summary of Low Speed Airfoil Data systémom hľadania najvyššej hodnoty  $C_l$ . Ako najlepší profil vyplýval Selig S1223, ktorý je v tíme praxou osvedčený a na monoposte použitý na viacerých miestach. Súradnice profilu sú publikované v článku navrhujúcom tento element [15]. Počet elementov je limitovaný na 2 až 3 v hlavnej časti krídla a 0 až 1 v spomínanom priestore nad nábežnou hranou hlavného elementu. Elementy sa rozmerovo líšia, hlavný element je obmedzený na minimum 250 mm dĺžky tetivy z pevnostných dôvodov, zvyšné elementy sa potom musia prispôbiť veľkosti hlavného, pričom nesmie byť dĺžka ich tetivy menšia než 100 mm z dôvodu uľahčenia manuálnej výroby.

Poloha elementu sa definuje v súradnicovej osi so začiatkom v dolnom ľavom rohu plochy súradnicami nábežnej hrany a uhlom medzi tetivou a osou X globálneho súradnicového systému.

## 5.1 Optimalizačný algoritmus

Najjednoduchší algoritmus má tvar postupného simulovania hodnôt pre celý vymedzený priestor. Pri jednoduchších optimalizáciách to môže byť najschodnejšia cesta, keďže naprogramovanie takéhoto algoritmu je to najschodnejšia cesta a samotný program Ansys obsahuje predprogramované nástroje na takúto optimalizáciu. Problematická je veľká množina možných hodnôt parametrov. V takom prípade sa simuluje veľké množstvo kombinácií a čas výpočtu exponenciálne rastie.

Pre každý element krídla existujú štyri parametre - poloha nábežnej hrany na X a Y ose, rozmery elementu a uhol nábehu. Použitie 2 alebo 3 elementov znamená 8 alebo 12 parametrov. V skúmanej oblasti vymedzenej pravidlami je možná veľká kombinácia parametrov a preto sa predpokladá existencia mnohých lokálnych maxím.

Genetické algoritmy sú relatívne jednoduché algoritmy, ktoré majú mnoho výhod. Ak by nastala chyba v priebehu výpočtu tak dokážu zachovať poslednú iteráciu populácie, a pri

použití dostatočne rozmanitej počiatkovej populácie sa vedia vyhnúť konvergovaníu k lokálnym maximám. Používajú názvoslovie z biológie, keďže boli inšpirované evolúciou v prírode. Pre genetický algoritmus sa mnohé definície zjednodušujú, v skratke sú to:

Genotyp - súbor všetkých foriem génov v bunke jedinca

Fenotyp - súbor všetkých pozorovateľných vlastností a znakov, ktorý v danom prostredí odpovedá genotypu

Jedinec - jedinečný predstaviteľ populácie, definovaný genotypom

Alela - hodnota, ktorú môže nadobudnúť gén

Gén - reprezentácia parametru jedinca

Chromozóm - nositeľ genetickej informácie jedinca

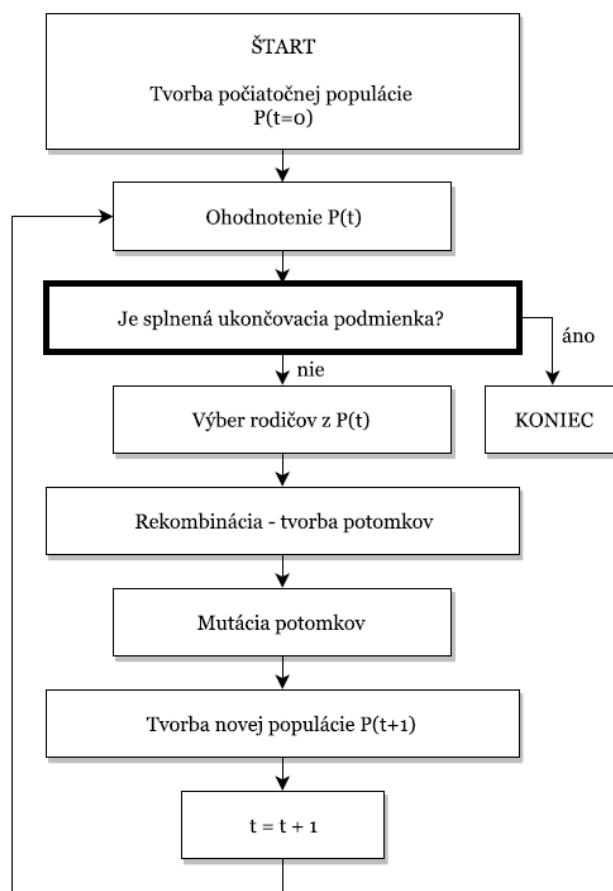
Populácia - množina jedincov, kde každý reprezentuje jedno riešenie daného problému

Generácia - všetci jedinci, s ktorými sa pracuje v jednom čase

Fitness - vyjadruje cenu jedinca z hľadiska evolúcie [16]

Na obrázku 5.2 vidno typický priebeh takéhoto algoritmu.

Obr. 5.2 - Priebeh typického genetického algoritmu



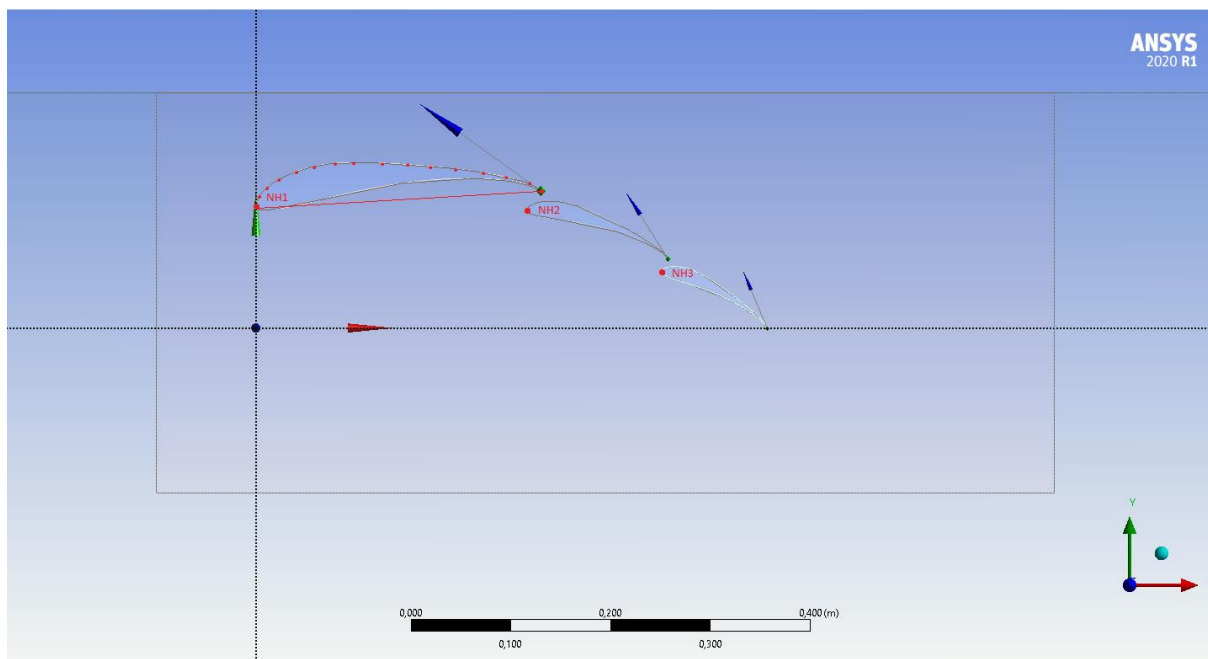
## 5.2 Optimalizácia hlavnej časti krídla

Optimalizácia prebiehala v prostredí Ansys Workbench. Balík programov od Ansys-u obsahuje dva programy na modelovanie geometrie – Spaceclaim a Design Modeler. Design Modeler je pre účely optimalizácie výhodnejší, pretože Spaceclaim neobsahuje možnosť parametrického príkazu Scale, ktorý vie ľahko meniť veľkosť elementu krídla.

Algoritmus je napísaný na základnom genetickom algoritme, čerpaného z internetových stránok [17].

Aby sa znížila komplikovanosť algoritmu, je optimalizácia rozdelená na tri časti. Prvá prebieha optimalizácia pre krídlo s dvomi elementami, potom pre krídlo s tromi elementami a nakoniec prebehla optimalizácia polohy posledného elementu (samostatný element v prednej hornej časti krídla).

Obr. 5.3 - Vytvorenie geometrie v programe Ansys Design Modeler, červenými bodkami sú označené polohy nábežných hrán a názorná ukážka súradníc tvaru profilu, ktoré sa používajú v algoritme



Ako prvé sú definované počiatky súradnicových systémov: počiatku globálneho súradnicového systému v rohu obálky pravidiel (na obrázku 5.3 v spodnom ľavom rohu) a počiatkov lokálnych súradnicových systémov pre každý element, ktoré sú totožné s nábežnými hranami. Ako parametrické súradnice, ktoré sa budú optimalizovať boli určené vzdialenosti:

Y vzdialenosť nábežnej hrany elementu 1 (NH1), X a Y vzdialenosť NH2, X a Y vzdialenosť NH3

Rozmery elementov/dĺžka tetivy elementov: Rozmery elementu 1 (E1Scale), E2Scale, E3Scale. Počiatočná dĺžka tetivy každého elementu je 1 meter, hodnota 0,5 E1Scale je preto obdobná 0,5 metra dlhej tetive elementu.

Uhol nábehu elementov: Uhol nábehu elementu 1 (E1AoA), E2AoA, E3AoA

Počiatočná populácia je vygenerovaná pomocou programu v prvej fáze výpočtu. Pri jej generovaní sa program riadi niektorými smernicami, zadanými užívateľom. Zabráni sa tak generovaniu populácie, ktorá by mala hlavný element mimo spodnej časti obálky, poprípade by mala ďalšie elementy vo väčšej vzdialenosti od predchádzajúceho elementu. Súradnica NH1 X je tiež zadaná ako NH1\_X=0, čím sa nábežná hrana hlavného elementu pripevnila k obálke pravidiel. Tieto obmedzenia sú číselne nasledovné:

Tab. 5.1 - Obmedzenia pri tvorbe počiatocnej populácie

NH1_X	NH1_Y	E1Scale	E1AoA
[m]	[m]	[-]	[°]
0	0,1	0,25	-5,0
	0,16	0,4	10,0

Aby bol každý ďalší element v blízkosti predchádzajúceho, hodnoty tohto elementu sa generujú v rozpätí hodnôt daných odtokovou hranou predchádzajúceho elementu krídla. Ako prvá sa preto vypočíta poloha tohto bodu v globálnom súradnicovom systéme pomocou vektorovej operácie otočenie okolo nábežnej hrany elementu [18]:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ y' &= x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

Kde  $x'$  a  $y'$  vyjadrujú polohu počiatku lokálneho súradnicového systému vzhľadom na počiatok globálneho súradnicového systému,  $x$  a  $y$  sú súradnice odtokovej hrany v lokálnom súradnicovom systéme predchádzajúceho elementu pred otočením a  $\alpha$  je uhol nábehu predchádzajúceho elementu, ktorý sa rovná uhlu otočenia. Pre súradnicu NH2(3)\_X sa vychádza zo vzdialenosti od tohto bodu v rozsahu -0,04 m až +0,005 m. Aby bola NH2(3) v dostatočnej vzdialenosti a nedochádzalo k zbytočnému generovaniu populácie kde by sa dva elementy krídla navzájom prekrývali, súradnica NH2(3)\_Y je generovaná skrz rovnicu kružnice, pričom táto kružnica môže mať minimálny polomer  $r = 0,005$  m a maximálny polomer  $r = 0,041$  m:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (5)$$

Veľkosť elementov E2(3)Scale sa môže pohybovať od 0,1 do 0,25 a uhol E2(3)AoA od +0 do +18 ° vzhľadom na uhol predchádzajúceho elementu krídla.

Na konci generovania každého jedinca prebieha kontrola, či sa elementy neprekrývajú, čo by spôsobilo chybu v generovaní siete výpočtu, alebo či nevychádzajú z obálky pravidiel. Táto kontrola prebieha pomocou súradníc bodov profilu získaných zo zdroja profilu [15]. Sú porovnávané s blízkosťou obálky respektíve blízkosťou iného elementu

krídla, v prvom prípade až po dotyk, v druhom prípade je minimálna možná medzera 1mm.

Následne program uloží hodnoty do Excel tabuľky a postupne priradí jedného jedinca jednému „DesignPoint“-u v programe Ansys Workbench. Po výpočte program zoberie hodnoty prítlaku a odporu vzduchu a vypočíta z nich Fitness funkciu. Ako bolo spomenuté, aerodynamický prítlak je v FS dôležitejší ako aerodynamický odpor, preto funkcia nabrala tvar:

(6)

$$\text{Fitness funkcia} = \text{Prítlak} - 0,3 * \text{Odpor}$$

Výber rodičov prebieha cez zistenie maximálnych hodnôt z množiny výsledkov hodnotiacej funkcie. V klasických genetických algoritmoch sa rodičia pária a vznikajú skrížené jedince. Prebieha to tak, že sa chromozóm rozdelí a vymenia sa jeho časti. V tomto prípade by takýto jedinec obsahoval s vysokou pravdepodobnosťou prekrývajúce sa elementy krídla. Generovanie potomka z jedného rodiča umožňuje vyhnúť sa tomuto problému. Nevýhoda sa môže nachádzať v predčasnej konvergencii k lokálnym maximám. Dochádza k tomu preto, lebo každý jedinec je takto len mutáciou svojho rodiča a preto sa môže stať, že pomyselný genetický priestor medzi dvoma jedincami nebude nikdy vyplnený. Ak sa v tomto priestore nachádza globálne maximum Fitness tak nebude nájdené. Čiastočné zníženie rizika konvergencie k lokálnym maximám sa dosiahne zvýšením populácie v generácii.

#### Obr. 5.4 - Chromozóm jedinca

*[NH1 Y; E1Scale; E1AoA; NH2 X; NH2 Y; E2Scale; E2AoA; (NH3 X; NH3 Y; E3Scale; E3AoA)]*

Po vybratí rodiča z neho vzniká potomok, ktorý má šancu 100% zmutovať práve jeden zo svojich génov. Vzďialenostné a veľkostné gény môžu mutovať v rozmedzí 0,001 m až 0,003 m, uhol buď 0,5° alebo 1°. Použitie takto malých krokov samo o sebe zabráni vytváraniu populácie ktorá by obsahovala jedince s prekrytými elementami krídla. Deje sa tak preto, lebo pri limitnom blížení sa dvoch elementov klesá výsledok Fitness funkcie a takýto jedinec nedostáva možnosť sa množiť. Vysoká miera mutácie je náhradou za odobratie možnosti kríženia génov.

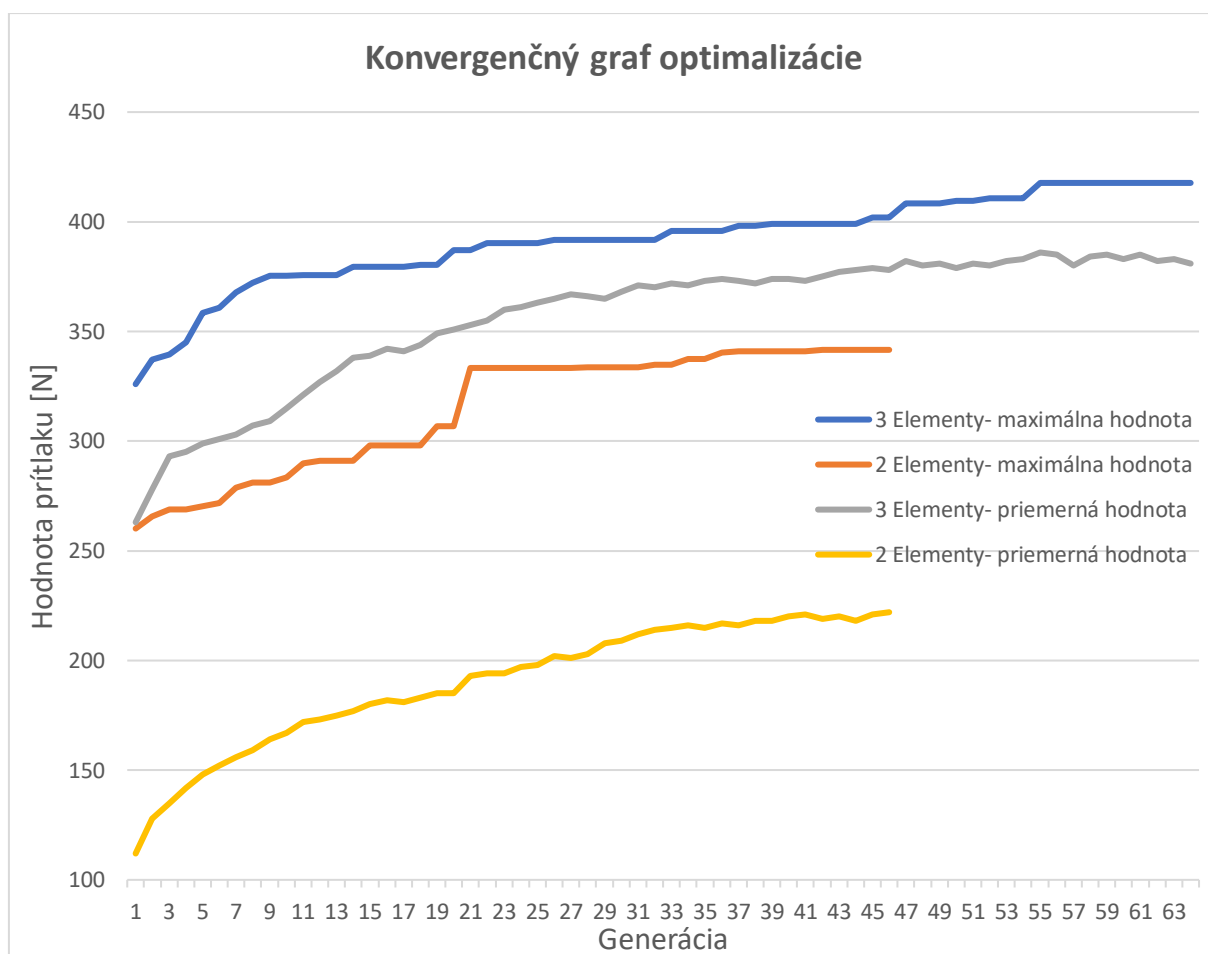
Populácia novej generácie pozostáva z 40% rodičov, 40% potomkov, ktorí nahrádzajú 40% populácie ktorá mala najhorší výsledok Fitness funkcie. Rodičia fungujú ako zdroj náhradných génov, ak by sa potomok mutáciou zhoršil. Zároveň ako poistka funguje aj



zvyšných 20% populácie, ktorá neprešla rozmnožovaním. Dokopy sa zachováva 60% starej populácie a 40% je novej. Celkový počet jedincov v jednej generácii je 250. Tieto počty sú výsledkom experimentovania s mierou mutácie vzhľadom na veľkosť populácie.

Počet generácií závisí od Fitness funkcie. Optimalizácia sa zastaví automaticky, ak v desiatich za sebou idúcich generáciách priemerná hodnota funkcie nevzrastie o viac ako 3, alebo ak sa nezvýši hodnota maximálneho jedinca. Tieto hodnoty sú taktiež zapisované v priebehu optimalizácie do Excel tabuľky a dá sa z nich vytvoriť konvergenčný graf.

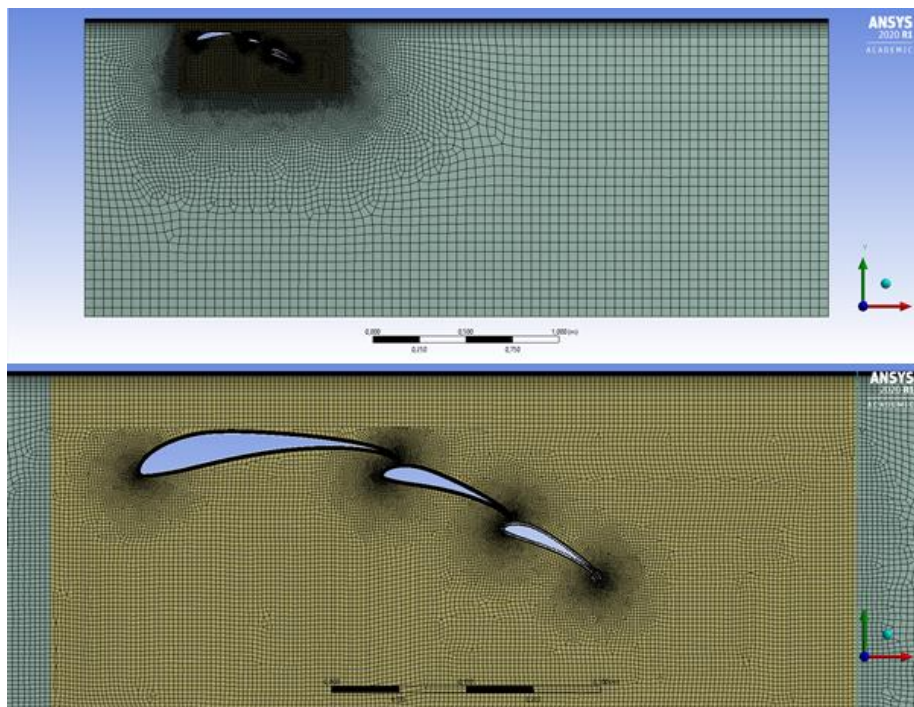
Graf 5.1 - Konvergenčný graf základnej optimalizácie



Optimalizácia krídla pozostávajúceho z dvoch elementov sa zastavila pri 47 generáciách, optimalizácia krídla pozostávajúce z troch elementov pri 64 generáciách. Ako vidno z grafu, na začiatku optimalizácie stúpala hodnota prítlaku rýchlo. Je to z dôvodu eliminácie veľkého počtu menej zdatných jedincov, ktorí vznikli náhodnou generáciou. Zaujímavý je veľký rozdiel medzi priemernou a maximálnou hodnotou pri krídle s dvoma elementami. Táto situácia pravdepodobne nastala preto, že populácia odvodená od jedinca s maximálnou hodnotou sa nestihla dostatočne rozšíriť a je pravdepodobné, že pri ďalšom pokračovaní simulácie existuje priestor na zlepšenie. Ako však vidno z grafu,

hodnoty pre krídlo s dvoma elementami sú konštantne horšie ako pre krídlo s tromi elementami, preto nedošlo k pokračovaniu optimalizácie.

Obr. 5.5 - Výpočtová sieť a jej detail v okolí elementov, ukážka na výslednom jedincovi

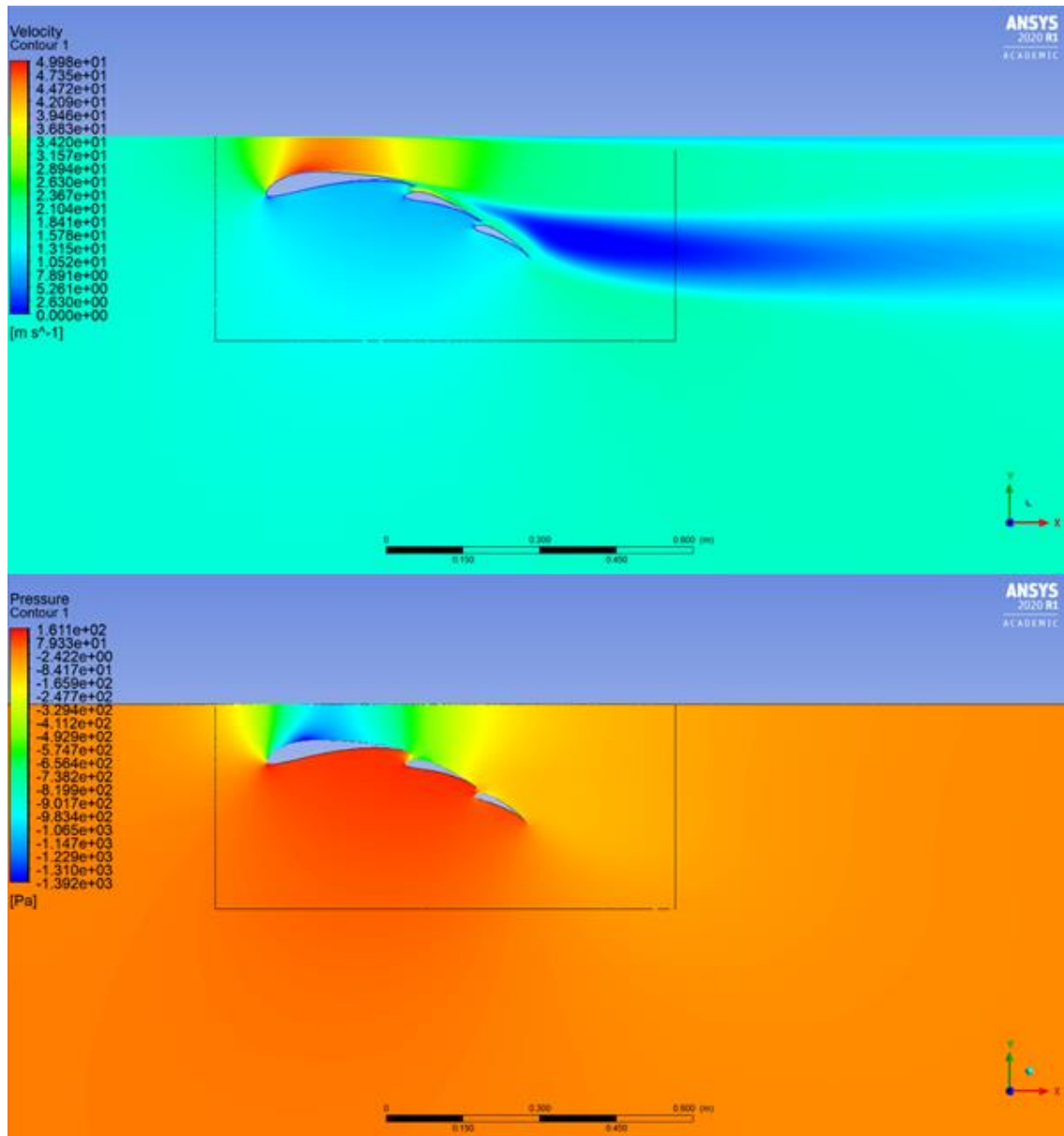


Víťazný jedinec bol vybraný z programu Workbench s hodnotou 418N prítlaku a 19N odporu a jeho hodnoty zapísané nasledovne:

Tab. 5.2- Chromozóm víťazného jedinca

NH1_X [m]	0	NH2_X [m]	0,271	NH3_X [m]	0,406
NH1_Y [m]	0,122	NH2_Y [m]	0,118	NH3_Y [m]	0,057
E1Scale [-]	0,286	E2Scale [-]	0,151	E3Scale [-]	0,121
E1AoA [°]	-3	E2AoA [°]	19	E3AoA [°]	28,5

Obr. 5.6 – Rýchlostné a tlakové pole víťazného jedinca



### 5.3 Optimalizácia štvrtého elementu krídla

Nasleduje optimalizácia štvrtého elementu krídla. Jeho poloha je zadaná do menšieho optimalizačného priestoru, pretože sa dá dobre odhadnúť, ako sa bude správať. Tento element znižuje tlak na hornej strane hlavného elementu krídla a tým znižuje jeho koeficient prítlaku. Rozmer štvrtého elementu preto musí byť dostatočne malý, aby ovplyvnenie zvyšných elementov krídla neprevýšilo nárast prítlaku zo samotného štvrtého elementu. Malý priestor na možnosť zmeny umiestnenia štvrtého elementu krídla a zároveň stále platné obmedzenia polohy a rozmerov elementu znamenajú, že počiatočná populácia jedincov by v prípade použitia rovnakého genetického algoritmu nebola dostatočne veľká. Na optimalizáciu preto viac vyhovuje priama kroková optimalizácia, ktorej nástroje sú zahrnuté v programe Ansys Workbench.

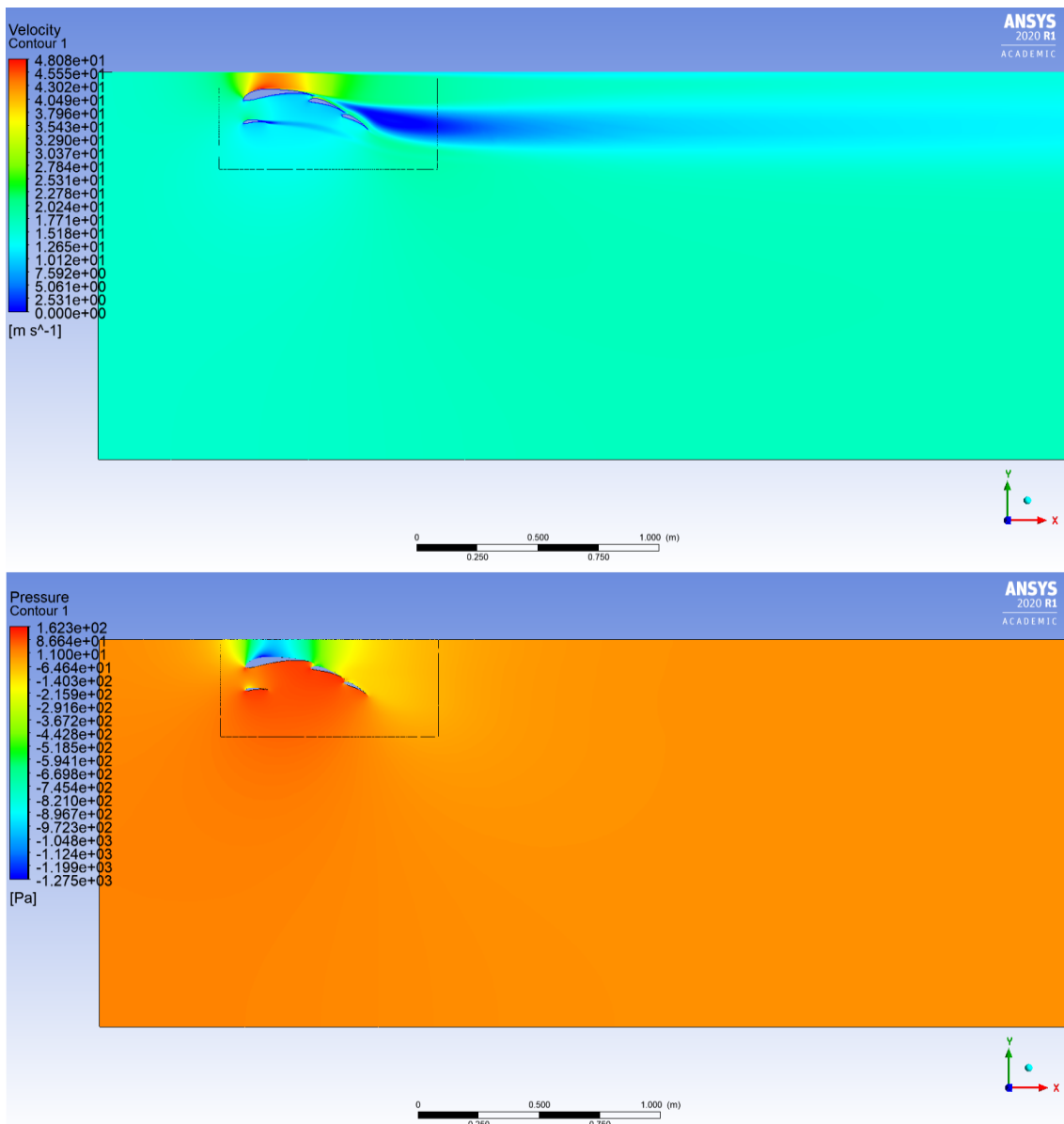
Optimalizujú sa hodnoty NH4\_X, NH4\_Y, E4Scale a E4AoA. Optimalizácia prebieha tak, že sa vytvorí sieť hodnôt a všetky sa vypočítajú. Aby sa predišlo strate času výpočtu, spočiatku je sieť hodnôt nastavená veľmi hrubo. Táto hrubá sieť identifikuje najhoršie kombinácie parametrov a jemnejšia optimalizácia prebehne bez nich.

Štvrtý element krídla sa neosvedčil. Hodnoty prítlaku generované elementom sú nižšie než zníženie hodnoty prítlaku na zvyšku krídla a k aspoň rovnakej hodnote aerodynamického prítlaku sa priblížila len jedna kombinácia hodnôt. Z tejto hodnoty potom vyšla malá optimalizácia, pričom sa dodržovali rovnaké odstupy 1 mm a 0,5° alebo 1°. Ako vidno z obrázku časti optimalizácie, najvyššia hodnota bola 417 N prítlaku.

Obr. 5.7- Časť hodnôt z optimalizácie štvrtého elementu

Name	P9 - speed	P16 - NH4Y	P17 - E4scale	P18 - E4aoa	P19 - NH4_X	P10 - lift-op	P11 - drag-op
Units	m s <sup>-1</sup>	m		degree	m	N	N
DP 9	16	0,035	0,2	10	0	393,41	21,64
DP 10 (Current)	16	0,025	0,1	0	0	393,73	21,229
DP 11	16	0,004	0,15	0	0,046	406,1	20,518
DP 12	16	0,004	0,1	0	0,046	409,25	20,273
DP 13	16	0,004	0,15	0	0,05	406,4	20,525
DP 14	16	0,004	0,1	0	0,05	402,01	20,706
DP 15	16	0,004	0,15	0	0,04	413,3	20,146
DP 16	16	0,004	0,1	0	0,04	397,14	20,927
DP 17	16	0,004	0,16	0	0,04	408,38	20,524
DP 18	16	0,004	0,17	0	0,04	397,4	21,091
DP 19	16	0,004	0,14	0	0,04	400,36	20,97
DP 20	16	0,004	0,13	0	0,04	410,45	20,321
DP 21	16	0,005	0,15	1	0,04	417,08	20,144
DP 22	16	0,005	0,15	2	0,04	404,96	20,97
DP 23	16	0,005	0,15	1,5	0,04	415,17	20,168
DP 24	16	0,004	0,15	1	0,04	399,55	21,044
DP 25	16	0,006	0,15	1,5	0,04	391,83	21,473
DP 26	16	0,005	0,15	1	0,05	391,8	21,589
DP 27	16	0,002	0,1	2	0,04	403,86	20,624

Obr. 5.8 – Rýchlostné a tlakové pole najlepšieho krídla s tromi elementami s pridaným štvrtým elementom



## 6 Posúdenie výsledku

Výsledok 418N prítlaku je dostačujúci pre nahradenie straty zmenou konceptu krídla. Táto hodnota však obsahuje relatívne veľkú chybu výpočtu, z jednej časti spôsobenú samotným výpočtom, ktorá z kalibrácie vyplynula ako 10% celkovej hodnoty a z druhej časti chyby spôsobenej geometriou vozidla. Na skutočnom vozidle je totiž krídlo v interakcii s bočnicou, zvyškom krídla, rotujúcim kolesom a v menšej miere aj s trupom vozidla. Tento 3D priestor sa zásadne líši od zjednodušenej 2D simulácie použitej v optimalizácii. Na validáciu výsledku je potrebná simulácia výsledného jedinca v simulácii celého vozidla s rotujúcimi kolesami. K tejto simulácii nedošlo z časových dôvodov. Očakáva, že v priebehu pokračovania prerušenej sezóny 2019/2020 dôjde k uskutočneniu simulácie celého vozidla, kde sa definitívne vyhodnotí efektívnosť konceptu. Predbežné simulácie celého vozidla, ktoré obsahovali geometriu predného krídla vychádzajúceho z výsledkov práce prebehli, ale obsahovali chyby v geometrii modelu, ktorých riešeniu sa venovala väčšina času a vyčítanie hodnôt prítlaku sa udialo len na veľkých častiach vozidla. Hodnota prítlaku na prednej náprave je 252 N z celkového prítlaku 600 N [19]. Je teda zrejmé, že hodnota prítlaku predného krídla bude v skutočnosti oveľa menšia ako naznačovali výsledky optimalizácie. Na zistenie skutočnej hodnoty je preto nutná aspoň validácia samotných elementov v simulácii celého vozidla. Ako dodatok k CFD validácii sa plánuje aj validácia krídla počas testovania monopostu pomocou vizualizácie prúdenia na elementoch bavlnkami alebo zvyrazňovacou tekutinou a merania prítlaku na nápravách, vďaka času získanému znížením intenzity závodnej sezóny z dôvodu pandémie Covid-19.

Do doby kým neprebehnú tieto merania nemôžeme považovať výsledok práce za smerodatný.

## 7 Záver

Cieľom práce bolo navrhnuť a optimalizovať časť predného krídla monopostu Formule Student s ohľadom na splnenie pravidiel a interakciu predného krídla s ostatnými časťami vozidla. Návrh prebehol na začiatku práce, kde sa stanovili ciele návrhu a vytvorila sa nová koncepcia krídla, ktorá na nahradenie straty prítlaku na časti krídla zmenou koncepcie potrebovala adekvátny nárast prítlaku na inej, relatívne malej časti krídla. Následne prebehla optimalizácia tejto časti krídla pomocou genetického algoritmu pre krídlo s dvoma a troma elementami a potom pomocou priameho krokového algoritmu pre krídlo zahrňujúce elementy štyri.

Štvrtý element krídla nezvýšil celkový prítlak jedinca, jeho použitie by preto bolo prínosné len v prípade pozitívneho efektu na aerodynamiku zvyšku vozidla, napríklad ovplyvňovaním prúdenia vzduchu okolo prednej nápravy.

Tab. 7.1 – Porovnanie parametrov monopostov Dragon 9 a Dragon X

Monopost	Cl	Cd	CoP (vzhľadom na prednú nápravu)	Celkový prítlak	Celkový odpor
Dragon 9	3,30	1,6	43,00 %	589,28 N	285,77 N
Dragon X	3,36	1,59	41,97 %	600,86 N	283,98 N

Z výsledkov predbežných simulácií celého vozidla vyplýva, že hodnoty prítlaku aj odporu sa v novej generácii monopostu zlepšili. V čase odovzdania práce sa ešte nepodarilo zistiť podiel prínosu nového predného krídla. Absencia validácie znamená, že koncept krídla potrebuje ďalší vývoj a v súčasnej dobe nie je vhodný na použitie na súťažnom vozidle. Zníženie intenzity závodnej sezóny kvôli pandémie Covid-19, ale ponúka možnosť koncept otestovať na monoposte Dragon X a do budúcnosti ho vylepšiť. Koncept sa javí perspektívne hlavne z hľadiska stability prúdenia vzduchu so zmenou rýchlosti, čo je jedna z najslabších stránok aeropaketu monopostu Dragon 9.

Vytvorenie optimalizačného algoritmu umožňuje v budúcich sezónach zrýchliť proces návrhu aerodynamiky a zlepšiť výsledky tímu v súťaži.



## Zoznam použitých zdrojov

- [1] *Formule Student* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/o-nas/formula-student/>
- [2] *TU Brno Racing* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/o-nas/tu-brno-racing/>
- [3] *Disciplines* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/disciplines/>
- [4] *Formula Student Combustion – World Ranking List* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://fs-world.org/C/>
- [5] FSG. *Formula Student Rules 2020* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [6] RICHARD, Stone. *Vehicle Aerodynamics. Automotive Engineering Fundamentals*. SAE International, 2004, s. 1-1. ISBN 9780768009873. Dostupné tiež z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpAEF00006/id:kt006NSEJ3/automotive-engineering/vehicle-aerodynamics?kpromoter=Summon>
- [7] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designig for speed*. Revised 2nd edition. Cambridge: Bentley Publishers.com, 2006, 307 stran. ISBN 0-8376-0142-8.
- [8] HARISH, Ajay. *Front Wing of an F1 Car: How to Optimize Its Design* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/2016/10/front-wing-f1-car-optimize/>
- [9] TU Brno Racing. *Dragon 9 Design Book*.
- [10] JÁNOŠÍK, T. *Aerodynamický návrh nové generace přitlačných křídel formule SAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Robert Popela, Ph.D..
- [11] SELIG, Michael S., James J. GUGLIELMO, Andy P. BROEREN a Philippe GIGUERE. *Summary of Low-Speed Airfoil Data*. Virginia Beach, Virginia: SoarTech Publications, 1995. ISBN 0-9646747-1-8.
- [12] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent User's Guide* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod\\_page.html?pn=Fluent&prodver=20.1&lang=en](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Fluent&prodver=20.1&lang=en)
- [13] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod\\_page.html?pn=Fluent&prodver=20.1&lang=en](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Fluent&prodver=20.1&lang=en)
- [14] SCHLICHTING, Hermann a Klaus GERSTEN. *Boundary-Layer Theory*. 9th ed. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-52919-5. ISBN 9783662529171.

- [15] SELIG, Michael S. a James J. GUGLIELMO. High-Lift Low Reynolds Number Airfoil Design. *JOURNAL OF AIRCRAFT*. 1997, **34**(1), 72-79. Dostupné tiež z: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/2.2137>
- [16] MASÁROVÁ, Mária. *Genetické algoritmy*. Brno, 2018. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. František V. Zbořil, CSc.
- [17] GAD, Ahmed. *Genetic Algorithm Implementation in Python* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/genetic-algorithm-implementation-python-ahmed-gad/>
- [18] STRACHOTA, Pavel. *Geometrické transformace pomocí matic* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: [http://saint-paul.fjfi.cvut.cz/base/sites/default/files/POGR/POGR2/07.maticove\\_transformace.pdf](http://saint-paul.fjfi.cvut.cz/base/sites/default/files/POGR/POGR2/07.maticove_transformace.pdf)
- [19] TU Brno Racing. *Dragon X Design Book*.
- [20] Motorsport Technology. *2018 Front wing – the best that will ever be made? matic* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://motorsport.tech/formula-1/f1-2018-front-wing>
- [21] *Le Mans 2016* [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.mulsannescorner.com/RCELeMans2016.html>
- [22] CTU Cartech [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: [https://www.facebook.com/ctucartech/?epa=SEARCH\\_BOX](https://www.facebook.com/ctucartech/?epa=SEARCH_BOX)
- [23] Formula Student Team Delft [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/FSteamDelft/>
- [24] TUW Racing [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/tuwracing/>
- [25] Dynamis PRC [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/DynamisPRC/>
- [26] Oxford Brookes Racing [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/OxfordBrookesRacing/>
- [27] GreenTeam Uni Stuttgart [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/greenteamstuttgart/>
- [28] Formula Student Team Tallinn [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/FSTeamTallinn/>
- [29] Ecurie Aix – Formula Student Team RWTH Aachen e.V. [online]. [cit- 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/EcurieAix/>

## Zoznam použitých skratiek a symbolov

Cl	[-]	koeficient vztlaku (prítlaku)
Cd	[-]	koeficient odporu
CoP	[%]	Centre of Pressure- Aerodynamický stred
AoA	[°]	Angle of Attack- Uhol nábehu
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota vzduchu
v	[m/s]	Rýchlosť prúdenia
d	[m]	Charakteristický rozmer
$\mu$	[kg/ms]	Dynamická viskozita
r	[m]	Polomer kružnice
Re	[-]	Reynoldsove číslo
I	[%]	Turbulence Intensity- Intenzita vírenia
l	[m]	Turbulence length scale- Dĺžka vírenia

CFD	Computational Fluid Dynamics
FS	Formula Student
SAE	Society of Automotive Engineers
FSAE	Formula Society of Automotive Engineers
Aeropaket	Aerodynamický paket vozu
WEC	World Endurance Championship
F1	Formula 1
NH	Nábežná hrana

## Zoznam obrázkov

2.1	Rozmerové pravidlá súťaže [5].....	13
3.1	Predné krídlo v súťaži Formula 1 zo sezóny 2018 [20].....	15
3.2	Predné krídlo v súťaži WEC v roku 2016 [21].....	16
3.3	Výsledky simulácie času na kolo [9] .....	17
3.4	Monopost Dragon 4 [1].....	17
3.5	Monopost Dragon 6 [1].....	18
3.6	Monopost Dragon 9, najnovší monopost z dielne TU Brno Racing [1] .....	18
3.7	Monopost tímu CTU Cartech z ČVUT [22].....	19
3.8	Detail na sústavu elementov predného krídla na monoposte tímu Formula Student Team Delft z Technickej univerzity v Delfte v Holandsku [23] .....	19
3.9	Záber na predné krídlo TUW Racing, s jasne viditeľnými elementami generujúcich vírenie na koncoch krídla [24] .....	20
3.10	Monopost Dynamis PRC [25] .....	20
3.11	Detail na predné krídlo monopostu Oxford Brooks Racing vo veternom tuneli [26] .....	21
3.12	Monopost GreenTeam Uni Stuttgart [27] .....	21
3.13	Monopost FS Team Tallinn so zjavným zakrivením krídla [28] .....	22
3.14	Monopost tímu Ecurie Aix [29].....	22
3.15	Simulácia prúdenia na monoposte Dragon 9 - pozdĺžny rez [9] .....	23
3.16	Analýza prúdenia okolo malého obráteného elementu na monoposte Dragon 9 [9] .....	24
3.17	Koncepčný návrh krídla pre monopost Dragon X .....	25
3.18	Simulácia prúdenia na koncepčnom návrhu Dragon X, zvýraznené sú oblasti vírenia vzduchu.....	26
4.1	Sieť kalibračného modelu .....	33
4.2	Rýchlostné pole počas kalibrácie (AoA-0°) .....	33
5.1	Koncepčný návrh v obálke pravidiel .....	34
5.2	Priebeh typického genetického algoritmu [16].....	37
5.3	Vytvorenie geometrie v programe Ansys Design Modeler, červenými bodkami sú označené polohy nábežných hrán a názorná ukážka súradníc tvaru profilu, ktoré sa používajú v algoritme .....	38
5.4	Chromozóm jedinca.....	40
5.5	Výpočetná sieť a jej detail v okolí elementov, ukážka na víťaznom jedincovi.....	42

5.6	Rýchlostné a tlakové pole víťazného jedinca.....	43
5.7	Časť hodnôt z optimalizácie štvrtého elementu .....	45
5.8	Rýchlostné a tlakové pole najlepšieho krídla s tromi elementami s pridaným štvrtým elementom.....	46

## Zoznam tabuliek

4.1	Rozmery siete buniek pri kalibrácii .....	29
5.1	Obmedzenia pri tvorbe počiatkovej populácie.....	39
5.2	Chromozóm víťazného jedinca.....	42
7.1	Porovnanie parametrov monopostov Dragon 9 a Dragon X .....	48

## Zoznam grafov

4.1	Hodnoty kalibrácie v 2D priestore .....	31
4.2	Hodnoty kalibrácie v 3D priestore .....	32
4.3	Aerodynamická polára siete 2D_3 .....	32
5.1	Konvergenčný graf základnej optimalizácie .....	41

## Zoznam príloh

A	Hodnoty optimalizácie použité v grafoch konvergenie	
A.1	Hodnoty maximálneho prítlaku krídla s dvoma elementami .....	53
A.2	Hodnoty priemerného prítlaku krídla s dvoma elementami .....	54
A.3	Hodnoty maximálneho prítlaku krídla s troma elementami .....	55
A.4	Hodnoty priemerného prítlaku krídla s troma elementami .....	56



## A Hodnoty optimalizácie použité v grafoch konvergenzie

Všetky hodnoty prítlaku sú v Newtonoch

### A.1 Hodnoty maximálneho prítlaku krídla s dvoma elementami

Generácia	Prítlak		Generácia	Prítlak
1	260,14169		25	333,49518
2	265,51593		26	333,49518
3	268,7952		27	333,49518
4	268,7952		28	333,74506
5	270,30991		29	333,74506
6	271,72867		30	333,74506
7	278,68469		31	333,74506
8	281,11444		32	334,75049
9	281,11444		33	334,75049
10	283,3912		34	337,39313
11	289,86609		35	337,39313
12	290,92578		36	340,36072
13	290,92578		37	340,97769
14	290,92578		38	340,97769
15	297,99731		39	340,97769
16	297,99731		40	340,97769
17	297,99731		41	340,97769
18	297,99731		42	341,60263
19	306,81976		43	341,60263
20	306,81976		44	341,60263
21	333,49518		45	341,60263
22	333,49518		46	341,60263
23	333,49518		47	341,60263
24	333,49518			

## A.2 Hodnoty priemerného prítlaku krídla s dvoma elementami

Generácia	Prítlak		Generácia	Prítlak
1	112		25	198
2	128		26	202
3	135		27	201
4	142		28	203
5	148		29	208
6	152		30	209
7	156		31	212
8	159		32	214
9	164		33	215
10	167		34	216
11	172		35	215
12	173		36	217
13	175		37	216
14	177		38	218
15	180		39	218
16	182		40	220
17	181		41	221
18	183		42	219
19	185		43	220
20	185		44	218
21	193		45	221
22	194		46	222
23	194		47	221
24	197			

### A.3 Hodnoty maximálneho prítlaku krídla s tromi elementami

Generácia	Prítlak		Generácia	Prítlak
1	325,96771		33	395,7175
2	337,19635		34	395,7175
3	339,36389		35	395,7175
4	344,95438		36	395,7175
5	358,59695		37	398,08954
6	360,70663		38	398,08954
7	367,77515		39	399,12677
8	372,11414		40	399,12677
9	375,43173		41	399,12677
10	375,43173		42	399,12677
11	375,76791		43	399,12677
12	375,76791		44	399,12677
13	375,76791		45	401,8252
14	379,40091		46	401,8252
15	379,40091		47	408,24469
16	379,40091		48	408,24469
17	379,40091		49	408,24469
18	380,35767		50	409,63397
19	380,35767		51	409,63397
20	387,08551		52	410,78137
21	387,08551		53	410,78137
22	390,30347		54	410,78137
23	390,30347		55	417,71271
24	390,30347		56	417,71271
25	390,30347		57	417,71271
26	391,82849		58	417,71271
27	391,82849		59	417,71271
28	391,82849		60	417,71271
29	391,82849		61	417,71271
30	391,82849		62	417,71271
31	391,82849		63	417,71271
32	391,82849		64	417,71271

#### A.4 Hodnoty priemerného prítlaku krídla s dvoma elementami

Generácia	Prítlak		Generácia	Prítlak
1	263		33	372
2	278		34	371
3	293		35	373
4	295		36	374
5	299		37	373
6	301		38	372
7	303		39	374
8	307		40	374
9	309		41	373
10	315		42	375
11	321		43	377
12	327		44	378
13	332		45	379
14	338		46	378
15	339		47	382
16	342		48	380
17	341		49	381
18	344		50	379
19	349		51	381
20	351		52	380
21	353		53	382
22	355		54	383
23	360		55	386
24	361		56	385
25	363		57	380
26	365		58	384
27	367		59	385
28	366		60	383
29	365		61	385
30	368		62	382
31	371		63	383
32	370		64	381