



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**AERODYNAMICKÉ VLASTNOSTI RŮZNÝCH
SPECIFIKACÍ PŘEDNÍCH KŘÍDEL
ZÁVODNÍCH VOZŮ FORMULE**

AERODYNAMIC PROPERTIES OF DIFFERENT FRONT WING SPECIFICATIONS
ON FORMULA RACE CAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Šulík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Štefan, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Daniel Šulík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. David Štefan, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Aerodynamické vlastnosti různých specifikací předních křidel závodních vozů formule

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přední křídlo závodních vozů, konkrétně například formule 1, je významným aerodynamickým prvkem celku, který slouží k maximalizaci přitlaku při co nejnižším odporu a dobré ovladatelnosti vozu. Přední křídlo je také prvním aerodynamickým elementem, které se dostává do kontaktu s prouděním a tím pádem může pracovat s relativně příznivými podmínkami proudění. Toto samozřejmě neplatí, pokud se vůz pohybuje za jiným vozem. Významný vliv má přední křídlo, respektive jeho tvar, na směřování proudění na následující komponenty vozu. Jedná se o směřování proudění s ohledem na funkci dalších aerodynamických prvků či dostatečné zásobování chladicího systému. Dalším vlivem na tvar předního křídla je specifikace závodní trati, kdy pro tratě s převažujícími přímými úseky bude tvar předního křídla jiný, než v případě městské trati jako je například Monako. Svůj vliv na tvar předního křídla má v neposlední řadě také regulace ve smyslu předpisů, kterých se musí závodní týmy držet, aby nedošlo k diskvalifikaci. Proto je potřeba při návrhu aerodynamiky předního křídla najít kompromis, který všechny tyto aspekty zohledňuje.

Cíle bakalářské práce:

Student provede literární rešerši na výše zmíněné téma s ohledem na historický vývoj a aktuální stav.

Zohlední současnou formu technických předpisů a regulací pro danou aerodynamiku závodního vozu.

Cílem také bude jednoduchá CFD simulace, na které bude ukázáno, jaký vliv má daná geometrie předního křídla na aerodynamický odpor a přitlačnou sílu.

Seznam doporučené literatury:

HOUGHTON, E. L., P. W. CARPENTER, S. H. COLLICOTT a D. T. VALENTINE. Aerodynamics for engineering students. Seventh Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, 2017. ISBN 9780081001943.

KATZ, J. Race car aerodynamics: designing for speed. 1. Cambridge, MA, USA: Robert Bentley, Incorporated, 1995. ISBN 978-0837601427.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zameriava na aerodynamické vlastnosti predných krídel na závodných vozoch Formule 1. V prvej kapitole sú rozobraté základné aerodynamické princípy tekutín a plynov. V druhej kapitole je rozobraný historicky vývoj predných krídel vo Formule 1. Tretia kapitola rozoberá najnovšie aerodynamické regulácie a ich prínos pre šport. Posledná kapitola je praktická časť, kde sa simuluje obtekanie vzduchu okolo štyroch rôznych krídel a porovnávajú sa ich aerodynamické vlastnosti.

Kľúčové slová

Formula 1, predné krídlo, aerodynamika, prúdenie, prítlak, odpor, element

Abstract

This bachelor's thesis focuses on the aerodynamic properties of front wings on Formula 1 cars. The first chapter discusses the basic aerodynamic principles of fluids and gases. The second chapter discusses the historical evolution of front wings in Formula 1. Third chapter talks about the latest aerodynamic regulations and their benefits for the sport. In the last chapter there is a practical part with an air flow simulation on four different wings and their aerodynamic properties are compared.

Key words

Formula 1, front wing, aerodynamics, flow, downforce, drag, element

Bibliografická citácia

ŠULÍK, Daniel. *Aerodynamické vlastnosti různých specifikací předních křidel závodních vozů formule* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139708>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce David Štefan.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Aerodynamické vlastnosti rôznych špecifikácií predných křídel závodních vozů formule** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktoré tvoria prílohu tejto práce.

V Brně, dňa:

.....

Daniel Šulík

Pod'akovanie

Chcel by som sa poďakovať pánovi Ing. Davidovi Štefanovi, Ph.D. za odborné rady a čas, ktorý mi venoval pri konzultáciách. Chcel by som sa tiež poďakovať mojej rodine a hlavne bratovi a priateľke, ktorí ma psychicky podporovali pri tvorbe tejto práce a celej dobe štúdia.

Obsah

Úvod.....	10
1 Základné vlastnosti mechaniky tekutín a plynov.....	11
1.1 Viskozita	11
1.2 Medzná vrstva	11
1.3 Vplyv viskozity na charakteristiku medznej vrstvy	12
1.3.1 Laminárne prúdenie.....	12
1.3.2 Turbulentné prúdenie.....	12
1.4 Generátory vírov a ich využitie na krídle.....	12
1.5 Rozloženie tlakov na povrchu krídla.....	14
1.6 Aerodynamické sily	14
1.7 COP v F1	15
2 Historický vývoj predných krídel v F1	16
2.1 Prvé začiatky v 60. rokoch	16
2.2 Obdobie 70. rokov.....	16
2.3 Obdobie 80. rokov.....	17
2.4 Obdobie 90. rokov.....	18
2.5 Obdobie 00. rokov.....	19
2.6 Obdobie 10. a začiatok 20. rokov.....	20
3 Technické regulácie aerodynamiky 2022	22
3.1 Hlavné zmeny v technických reguláciách.....	22
3.2 Aerodynamické riešenia tímov 2022	23
3.3 Pozitívny prínos nových regulácií pre šport.....	26
4 Simulácia rôznych profilov predného krídla	27
4.1 Geometria profilov	27
4.2 Výpočtová sieť	28
4.3 Okrajové podmienky	28
4.4 Výsledky simulácii.....	29
4.5 Optimalizácia krídla	32
Záver	34
Zoznam použitých zdrojov	35
Zoznam použitých symbolov a skratiek	39

Úvod

Formula 1 je vrcholom motošportu a neustáleho rozvoja techniky, kde sa objavilo mnoho revolučných vynálezov. V samotných začiatkoch dominoval hlavne výkon motorov a celková váha, pričom nikoho ani nenapadlo, že aerodynamika bude ďalším obrovským krokom vpred k rýchlejšim kolám. To sa zmenilo v roku 1968 kedy sa na trati objavil prvý monopost so zadným a predným krídlom.

Sú to práve predné krídla, ktoré určujú ako sa bude ďalej chovať prúdenie vzduchu a ako budú ovplyvnené zvyšné mechanické a aerodynamické prvky závodného monopostu. Ich návrh bol a aj je kľúčový k úspechu, čo môže byť rozhodujúce medzi tým, či skončíte závod prvý alebo posledný. Postupom času sa začali objavovať čoraz komplexnejšie, prípadne až bizarné riešenia predných krídel, ktoré museli byť neskôr regulované pravidlami od FIA (Fédération Internationale de l'Automobile), či už z bezpečnostných dôvodov, uľahčenia obiehania, alebo kvôli estetike. Napriek tomu sú závodné tímy odhodlané nájsť v reguláciách diery a získať výhodu oproti oponentom za každú cenu, prípadne sa snažia prísť s určitým revolučným riešením.

Aby boli nové aerodynamické riešenia tímov pokrokové, je taktiež potrebné zdokonaľovať metódy merania prúdenia vzduchu a správne vyhodnotiť, či navrhnutý diel má skutočne lepšie vlastnosti ako jeho predchodca. To môžeme zistiť rôznymi spôsobmi, ako napríklad pomocou veterného tunela, ale až s príchodom výpočtovej techniky sa objavili prvé CFD simulácie (Computational Fluid Dynamics). Táto metóda je stále viac a viac preferovaná pri riešení problémov mechaniky tekutín a plynov v porovnaní s veterným tunelom, ktorý je finančne náročný. Aj kvôli tomu sú vydané nové regulácie, diktované od FIA, ktoré čoraz viac obmedzujú využívanie veterných tunelov za účelom znižovania nákladov.

V tejto práci sa pozrieme na historický pokrok predných krídel, oboznámime sa so súčasnými technickými pravidlami v oblasti aerodynamiky Formule 1 a využije sa CFD výpočet na simuláciu prúdenia vzduchu okolo 4 rôznych predných krídel.

1 Základné vlastnosti mechaniky tekutín a plynov

1.1 Viskozita

Viskozita je výsledkom trecích síl pôsobiacich medzi jednotlivými časticami, prípadne molekulami, v tekutine alebo v plyne. Čím vyššia je viskozita, tým ťažšie je pretlačiť teleso prostredím kvôli vzniknutým trecím silám. Následkom toho vznikajú smykové napätia v kvapaline. [1].

Podľa Newtonovho zákona pre tok kvapaliny prúdiaceho rovnobežne nad nehybnou rovinou platí,

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \text{ [MPa]} \quad (1.1)$$

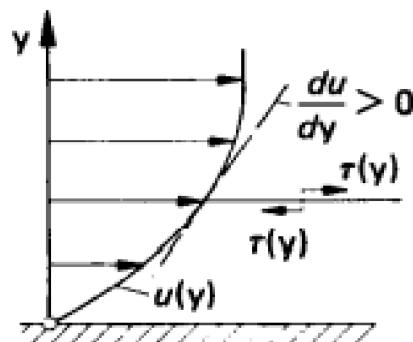
kde τ je smykové napätie, ktoré je úmerné gradientu rýchlosti $\frac{du}{dy}$. Konštanta μ vyjadruje dynamickú viskozitu, ktorá je fyzikálnou vlastnosťou danej kvapaliny a môžeme ju zmerať napríklad pomocou viskozimetra. Dá sa tiež vyjadriť pomocou kinematickej viskozity danej vzťahom,

$$\mu = \nu \cdot \rho \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (1.2)$$

kde ν je kinematická viskozita, ρ je hustota. Pri zmene tlaku a teploty sa hodnoty viskozít kvapalín a plynov menia. Len v prípade nestlačiteľných kvapalín je hodnota kinematickej a dynamickej viskozity μ a ν závislá len od teploty [1].

1.2 Medzná vrstva

Kvapaliny často zo začiatku obtekajú okolo telesa v laminárnych vrstvách, ktoré sú si navzájom rovnobežné. Viskozita kvapaliny spôsobuje jav, kde v nulovej vzdialenosti nad povrchom telesa je rýchlosť prúdenia poslednej laminárnej vrstvy rovná nule a so zvyšujúcou sa kolmou vzdialenosťou od povrchu nám každá nasledujúca laminárna vrstva prúdi rýchlejšie ako tá predošlá, následkom čoho dochádza ku vzniku smykových napätí medzi jednotlivými vrstvami a teda aj trecieho odporu, ako bolo spomenuté v sekcii 1.1. Práve táto oblasť je definovaná ako medzná vrstva, ktorú môžeme vidieť na obrázku č. 1. Od určitej vzdialenosti od povrchu telesa nedochádza k ďalšiemu preklzávaniu medzi laminárnymi vrstvami, a teda nevzniká smykové napätie. Zvyšok kvapaliny prúdi voči telesu rýchlosťou „freestreamu“ [2].

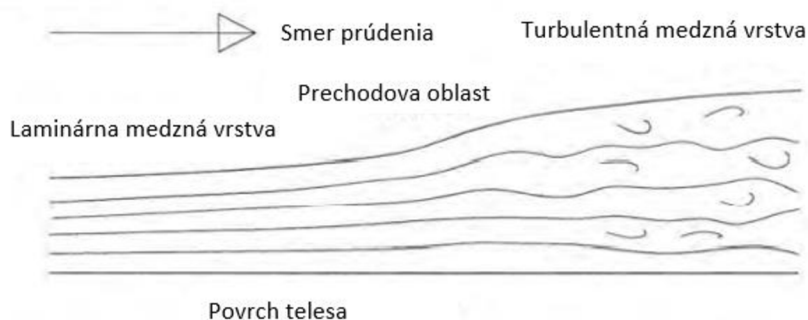


Obrázok 1: Rýchlosť prúdenia kvapaliny v medznej vrstve, upravené z [1]

1.3 Vplyv viskozity na charakteristiku medznej vrstvy

Viskozita sama o sebe odoberá kinetickú energiu. Túto energiu transformuje na teplo, čo je spôsobené trením medzi laminárnymi vrstvami kvapaliny nad povrchom telesa. Aj keď tieto straty sa nám môžu zdať malé, tak to môže mať veľký vplyv na charakteristiku prúdenia v medznej vrstve, ako môžeme vidieť na obrázku č. 2 [2].

Profil medznej vrstvy môžeme pozorovať napríklad na aute idúcom rýchlosťou v , kde medzná vrstva na začiatku automobilu bude mať hrúbku rádovo niekoľkých milimetrov (laminárne prúdenie) a v zadnej časti auta už môže dosahovať hrúbku niekoľkých centimetrov (väčšia pravdepodobnosť vzniku turbulentného prúdenia). V prípade odtrhnutia medznej vrstvy by došlo ku strate vztlaku a nárastu odporových síl [3].



Obrázok 2: Prechod z laminárneho na turbulentné prúdenie, upravené z [2]

1.3.1 Laminárne prúdenie

Laminárne prúdenie nastáva vtedy, keď sa všetky častice v parcele kvapaliny pohybujú rovnakým smerom ako je priemerná rýchlosť prúdenia a zároveň všetky *prúdnice*, ktoré častice kvapaliny opisujú sú si navzájom rovnobežné [2]. Laminárne prúdenie je náchyľnejšie na odtrhnutie od povrchu telesa, výhodou je, že vytvára menší trecí odpor oproti turbulentnému prúdeniu a preto je preferovaná v závodných automobiloch [3].

1.3.2 Turbulentné prúdenie

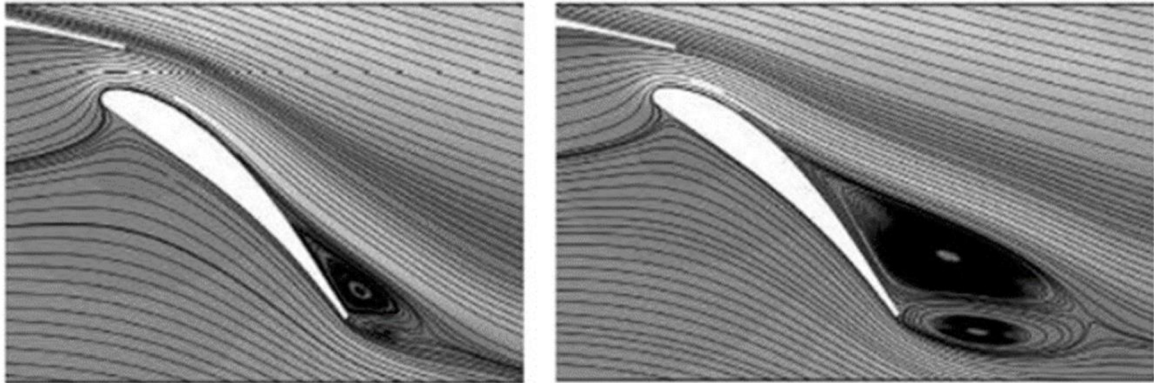
Turbulentné prúdenie nastáva vtedy, keď jednotlivé častice kvapaliny opisujú chaotické trajektórie, aj keď je ich priemerná rýchlosť a smer rovnaký ako pri laminárnom prúdení [2]. Turbulentné prúdenie je menej náchylné na odtrhnutie od povrchu a preto v miestach, kde hrozí separácia prúdenia od povrchu je uprednostnenou voľbou [3].

1.4 Generátory vírov a ich využitie na krídle

Vírové generátory sami o sebe vytvárajú odpor, ale tiež ho vedú znížiť tým, že zabraňujú separácii prúdenia od profilu krídla. Celkový účinok generátora vírov možno vypočítať súčtom jeho pozitívnych a negatívnych účinkov. Pre dosiahnutie stanovených cieľov je dôležité zvoliť jeho vhodný tvar a veľkosť [4].

Počas prúdenia vzduchu okolo generátora vírov, dochádza k vzniku špirálovito rotujúceho prúdu vzduchu, v ktorom je tlak najnižší v jeho strede a postupne narastá smerom k okraju. Tieto rotujúce vírové štruktúry obsahujú veľké množstvo energie, ktorá je uložená v rotujúcom pohybe kvapaliny. V prostredí ideálnej kvapaliny by vzniknutý vír nikdy nezmizol, avšak pri reálnych kvapalinách sa obsiahnutá energia vo víre prostredníctvom viskozity kvapaliny pomaly rozptýli do okolia a vírová štruktúra zanikne [4].

Ich výhodou je, že dodávajú energiu medznej vrstve a preto ich môžeme využiť v miestach, kde je veľká pravdepodobnosť separácie prúdenia (napríklad prudké zakrivenie povrchu). Príkladom ako oddialiť separáciu medznej vrstvy môžeme vidieť na obrázku č. 3. Na ľavej strane obrázku vidíme, že pri použití vírového generátora môžeme výrazne zmenšiť oblasť, kde dochádza k spätnej cirkulácii vzduchu (na pravej strane obrázku č. 3) [4].

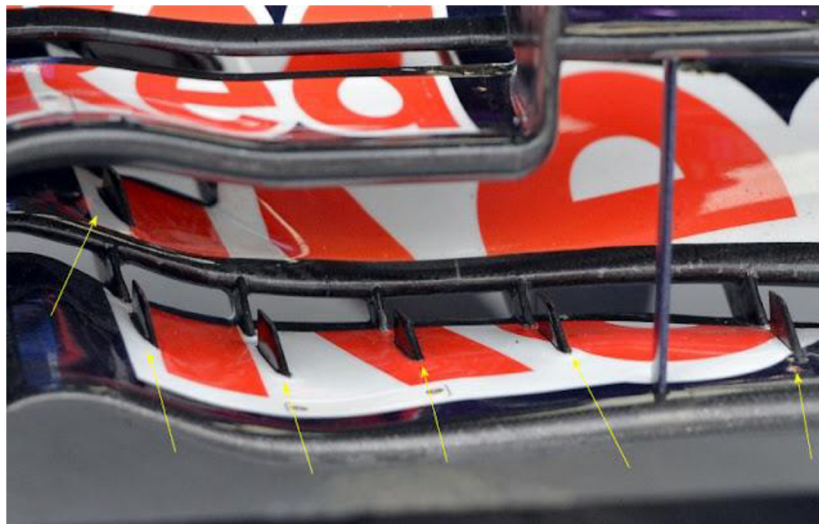


Klapka s vírovými generátormi

Klapka bez vírových generátorov

Obrázok 3: Vplyv vírových generátorov na prúdenie medznej vrstvy, upravené z [6]

Ďalší príklad ich využitia môžeme vidieť na obrázku č. 4, kde na prednom krídle tímu Redbull Racing boli pridané malé vírové generátory, ktoré pomáhajú usmerniť prúdenie vzduchu okolo profilu krídla a oneskorujú separáciu medznej vrstvy, prípadne pomáhajú regulovať prúdenie vzduchu okolo a za pneumatiky, čím zvyšujú efektivitu krídla [4,5].



Obrázok 4: Vírové generátory na prednom krídle F1 Red Bull Racing [5]

1.5 Rozloženie tlakov na povrchu krídla

Pre pochopenie čo spôsobí vztlak alebo prítlak je potrebné pochopiť čo sa deje s tlakmi v okolí krídla. Na túto problematiku nám slúži Bernoulliho rovnica,

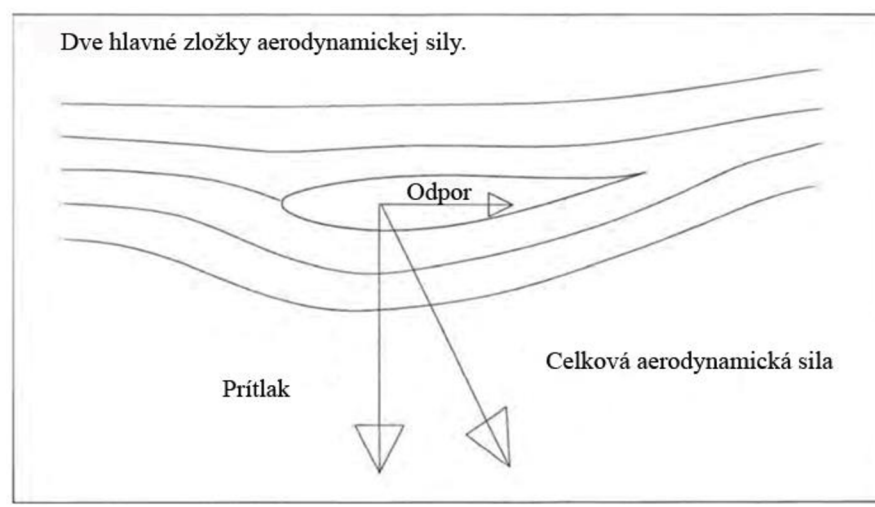
$$p_s + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = konst \quad (1.3)$$

kde p_s predstavuje statický tlak, $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ predstavuje dynamický tlak, ρ je hustota kvapaliny a v je rýchlosť prúdenia. Pre pochopenie, čím väčší je dynamický tlak, tým menší bude statický tlak [2].

Bernoulliho rovnicu môžeme aplikovať k danej problematike iba ak sa do sústavy nepridáva ani neodoberá energia, kvapalina je nestlačiteľná, ďalej rovnica nevie počítať s turbulentným prúdením, takže sa dá aplikovať len pre voľné, nenarušené prúdenie vzduchu nad medznou vrstvou a nedokáže pracovať s viskóznymi efektami. Ak berieme na vedomie tieto podmienky so zákonom zachovania hmotnosti, ktorý hovorí že hmotnostný tok kvapaliny alebo vzduchu je rovnaký na začiatku krídla aj na jeho konci, tak môžeme zjednodušene Bernoulliho rovnicu pochopiť na obtekaní vzduchu okolo jednoduchého profilu krídla. Vzduch ktorý prúdi pod krídlom, musí prejsť väčšiu vzdialenosť a teda musí cestovať rýchlejšie, ako vzduch ktorý prúdi nad krídlom, aby sa jednotlivé parcely vzduchu stretli na konci krídla. Výsledkom bude nižší lokálny statický tlak pod krídlom oproti statickému tlaku nad krídlom [2].

1.6 Aerodynamické sily

Hlavné sily o ktoré sa budeme zaujímať a ktoré ovplyvňujú celkové vlastnosti vozu je odporová a prítlačná sila, ako môžeme vidieť na obrázku č. 5 [2].



Obrázok 5: Hlavné aerodynamické sily, upravené z [2]

Pre výpočet výsledných síl je potrebné zistiť sumu všetkých lokálnych statických tlakov pôsobiacich na povrchu telesa, a vynásobiť túto sumu celkovým povrchom. Takže môžeme povedať, že pre výpočet prítlačnej a odporovej sily platí rovnica,

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_L \quad [\text{N}] \quad (1.4)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_D \quad [\text{N}] \quad (1.5)$$

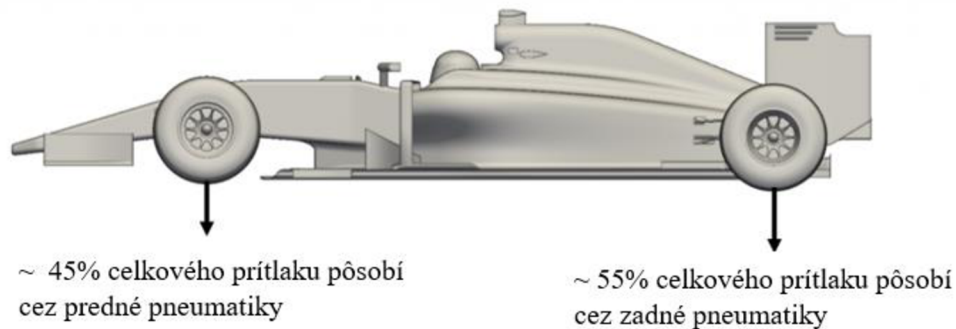
kde F_L a F_D sú výsledná prítláčná a odporová sila, ρ je hustota prostredia, v je rýchlosť telesa, S je čelná plocha vozu, koeficienty C_L a C_D opisujú ako tvar auta ovplyvňuje prúdenie a lokálne tlaky okolo vozu [2].

Existuje aj bočná aerodynamická sila, ktorá môže ovplyvniť stabilitu vozu a v niektorých prípadoch nesmie byť podcenená. Vytvárať ju môže bočný nárazový vietor, prípadne iné auto nachádzajúce sa v blízkosti druhého. Nevýhodou je, že táto sila sa ťažko predpovedá a ťažko modeluje [2].

1.7 COP v F1

COP, alebo ináč „centre of pressure“, je terminológia pre označenie bodu na telese, kde pôsobia všetky aerodynamické sily na dané teleso, a v ktorom nie je žiadny aerodynamický moment [2].

Typicky je COP na závodnom monoposte nastavené tak, aby pôsobilo za ťažiskom vozu. Konkrétne v F1 je typickým rozložením aerodynamických síl v približne pomere 45% pôsobiacich na prednú nápravu, pričom zvyšných 55% aerodynamických síl pôsobí na zadnej náprave ako môžeme vidieť na obrázku č. 6 [7].



Obrázok 6: Rozloženie aerodynamických síl na pneumatikách vozu F1, upravené z [7]

V prípade, ak je generovaného príliš veľa prítlaku na zadnej časti auta (COP sa nachádza za ťažiskom z bočného pohľadu na auto), predné pneumatiky strácajú príľnavosť a auto sa stáva nedotáčavým. Naopak, príliš veľa prítlaku na prednej časti auta (COP sa nachádza pred ťažiskom auta) spôsobí, že zadné pneumatiky strácajú príľnavosť a auto je náchylné na pretáčavosť [7].

2 Historický vývoj predných krídel v F1

Postupom času sa začali objavovať čoraz dokonalejšie a efektívnejšie predné krídla, ktoré často boli pred zvyškom konkurencie. V tejto kapitole preberieme ich postupný vývoj a pripomenieme si najznámejšie modely.

2.1 Prvé začiatky v 60. rokoch

V roku 1968 sa na Veľkej cene Monaka prvý krát, objavili krídla na závodnom monoposte Lotus 49B. Krídla umiestnené na prednom nose auta poskytli veľmi potrebný prítlak na náročnej kľukatej trati. Tato inovácia dodala potrebnú rýchlosť autu v zákrutách, vďaka čomu Graham Hill vyhral Veľkú cenu Monaka. Na obrázku č. 7 môžeme vidieť ako vyzerali prvé krídla na tomto monoposte [8].



Obrázok 7: Lotus 49B s prvými prednými krídlami [9]

Ostatné tímy nasledovali, a snažili sa dosiahnuť čo najväčšiu rýchlosť v prejazdoch cez zákruty. Krídla začali naberať na rozmeroch a zrodila sa nová éra vysokých krídel [8]. Táto nová súťaž v meraní krídel dosiahla svoj vrchol už v nasledujúcom roku 1969. Absurdným riešením boli vysoko umiestnené krídla, napríklad na monoposte Marta Cosworth MS10, ktoré priamo ohrozovali samotného jazdca. Na Veľkej cene Španielska sa práve kvôli nebezpečným konfiguráciám zrodila vážna nehoda. Používanie krídiel muselo byť obmedzené, a boli zavedené prvé pravidlá pri ich používaní, ako dodržanie maximálnej výšky, šírky, uchytanie krídel začalo byť kontrolované, aerodynamické zariadenia museli byť geometricky navrhnuté tak, aby sa výrazným spôsobom nedeformovali, nemali žiadne mechanicky pohyblivé časti a museli byť pevne prichytené ku karosérii monopostu [10].

2.2 Obdobie 70. rokov

V celom období tohto desaťročia nastal rozkol v prístupe k aerodynamickému konceptu prednej časti vozu Formule 1 medzi jednotlivými tímami. Niektoré tímy ako Ferrari, McLaren a Lotus ostali používať predné krídlo, ale objavila sa tu skupina tímov ako March, Brabham alebo Tyrrell, ktorí opustili koncept predného krídla a priklonili sa k nápadu používať predný spojler. Veľkým problémom bol vznik turbulentného vzduchu, ktorý vytvárali predné kolesá, čo spôsobovalo nárast aerodynamického odporu a vztľaku. Spojlery boli širšie ako predné krídla, výraznejšie zakryli pneumatiky a dokázali efektívnejšie presmerovať prúdenie vzduchu po bokoch vozu [11].

Ďalším motívom používania týchto spojlerov bol, že dokázali vytvoriť takzvaný „ground effect“. Princíp spočíval v tom, že predný spojler fungoval ako vertikálna bariéra, čo maximalizovalo bod stagnácie vysokého tlaku v prednej časti auta (oblasť vysokého tlaku), pričom došlo k urýchleniu prúdenia vzduchu pod predný spojler (oblasť nízkeho tlaku). Spôsob ako využiť oblasť nízkeho a vysokého tlaku vzduchu bolo umiestnenie takzvaného horizontálneho rozdeľovača na spodnú časť predného spojlera. Na plochu z vrchnej strany rozdeľovača pôsobila oblasť vysokého tlaku, čím vznikla prítlačná sila. Tím March z roku 1975 je príkladom, u ktorých bol použitý takýto predný spojler na ich monoposte, vid' obrázok č. 8 [11].



Obrázok 8: March 751 s predným spojlerom [12]

2.3 Obdobie 80. rokov

V období 80. rokov sa upustilo od predných spojlerov a všetky tímy sa vrátili k pôvodnému konceptu predných krídiel. Niektoré však boli netypicky menšie, než by sa očakávalo. Príkladom je tím Williams, ktorý v roku 1980 dominoval celú sezónu so svojím vozom FW07B, ktorý generoval cez „ground effect“ prítlak tak efektívne, že predné krídlo bolo takmer nepotrebné kvôli čomu bolo navrhnuté rozmerovo menšie, než u ostatných tímov, vid' obrázok č. 9 [13].



Obrázok 9: Williams FW07B [14]

Neskôr iné tímy hľadali ako efektívnejšie využívať potenciál predných krídel, čo sa dalo napríklad dosiahnuť zväčšovaním takzvaných koncových dosiek, ktoré boli bežne použité mnohými tímami v tomto období. Zmysel a využitie koncovej dosky je v zabránení prelievaniu oblasti vysokého tlaku vzduchu nad krídlom do oblasti nízkeho tlaku vzduchu pod krídlom. Bez koncových dosiek dochádzalo ku vzniku indukovaných vírov na krajoch krídel, ktoré spotrebovávali energiu, následkom čoho bol vznik odporu a strata prítlaku [15]. Na obrázku č. 10 monopost MP4/4 od tímu McLaren z roku 1988, ktorý bol zároveň najdominantnejším monopostom v histórii Formule 1, vidíme že súčasťou predného krídla boli aj koncové dosky, ktoré úspešne prispeli k celkovému radikálnemu riešeniu aerodynamiky vozu, ktoré bolo možné doceliť vďaka nízko uloženému V6 motoru, jazdca a tým pádom aj veľmi nízko položenému ťažisku voza [16].



Obrázok 10: McLaren MP4/4 [16]

2.4 Obdobie 90. rokov

V tomto období FIA reagovala na inžiniersky pokrok v snahe znížiť aerodynamickú efektívnosť, aby spomalila autá a zvýšila bezpečnosť [17]. Zaužívané bolo generovať čo najviac prítlaku pomocou difúzoru. Avšak nízko uložené krídlo zabraňovalo jeho efektívnemu fungovaniu, pretože obmedzovalo prúdenie vzduchu pod monopostom, kvôli čomu nebolo možné dosiahnuť dostatočne nízke hodnoty tlaku v oblasti difúzoru. Tím Tyrrell v roku 1990 prišiel s inovatívnym riešením, ktoré spočívalo v anhedrálnom profile predného krídla, ako môžeme vidieť na obrázku č. 11. Princíp spočíval v zvýšení polohy kužeľového nosu monopostu, čo zvýšilo prúdenie vzduchu pod vozidlom a znížilo hodnoty tlaku v oblasti difúzoru. Samotné krídlo pritom mohlo byť stále v blízkosti vozovky, kde dokázalo pracovať najefektívnejšie [18].



Obrázok 11: Tyrrell 019 s anhedrálnym profilom predného krídla [18]

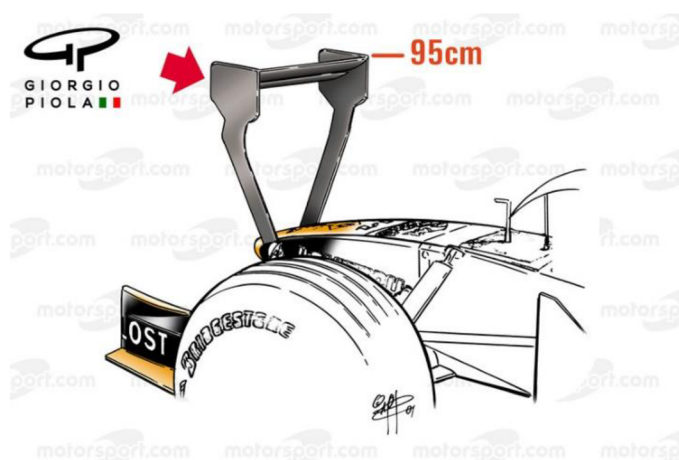
Tiež sa objavili multi-elementové predné krídla. Cieľom tohto konceptu je oneskoriť separáciu prúdenia medznej vrstvy zo spodnej časti krídla, čo by malo za následok prudký nárast odporu. Oneskorenie je možné dosiahnuť dodaním energie medznej vrstve využitím prúdenia vysokého energetického toku vzduchu z vrchnej časti krídla, pričom sa časť z neho presmeruje pod krídlo. Výhodou je schopnosť jazdiť s vyšším uhlom nábehu a vyššími hodnotami prítlačku bez výraznej separácie medznej vrstvy [19]. Tento princíp bol využívaný už omnoho skôr u iných tímov, ale Ferrari s monopostom 412 T2 v roku 1995 s jedným víťazstvom v Kanade boli jedni z prvých tímov, ktorý implementovali predné krídlo, ktoré obsahovalo celkovo tri elementy, ako môžeme vidieť na obrázku č.12 [20].



Obrázok 12: Ferrari 412 T2 s multi-elementovým predným krídlom [20]

2.5 Obdobie 00. rokov

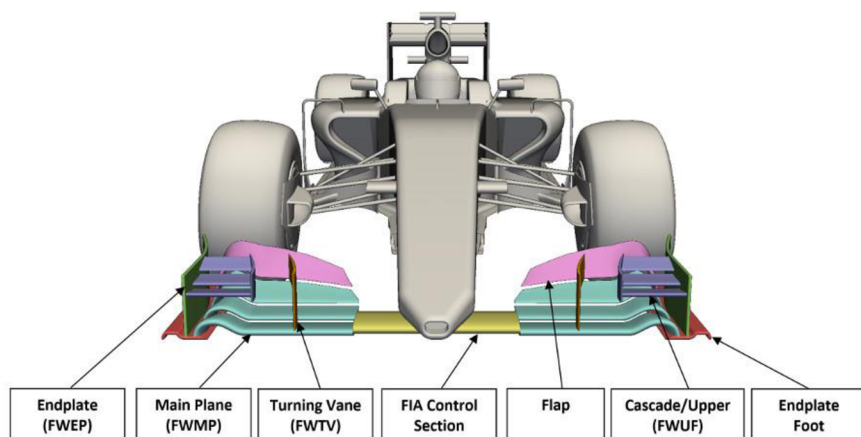
Zmeny v reguláciách aerodynamiky každým rokom prispievali k vzniku predných krídel s čoraz zložitejšou geometriou. Objavili sa aj veľmi nezvyčajné koncepty v snahe obísť regulácie a získať výhodu nad konkurenciou, pri ktorých v roku 2001 tím Arrows (viď. obrázok č. 13) prišiel s neortodoxným riešením na veľkej cene Monaka, kde sú požadované vysoké nároky na generovanie prítlačku. Na nos predného krídla bolo umiestnené druhé predné krídlo, ktoré bolo umiestnené do výšky 95cm. Účelom bolo zvýšiť prítlak na prednej časti auta, čo zlepšovalo príľnavosť predných pneumatík v zákrutách. FIA z bezpečnostných dôvodov reagovala okamžitým zákazom tohto riešenia ešte pred samotnou kvalifikáciou [22].



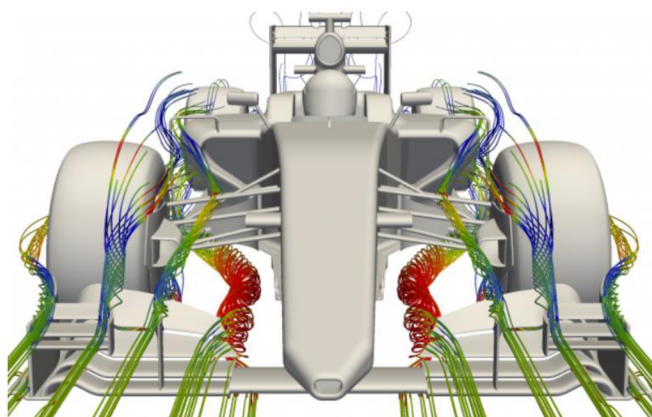
Obrázok 13: Arrows A22 so sekundárnym predným krídlom [22]

2.6 Obdobie 10. a začiatok 20. rokov

Od roku 2010 do 2018 sa na prednom krídle príliš veľa zmien vo vzhľade neodohráva. Výnimkou sú z roka na rok malé odlišnosti v jednotlivých rozmeroch krídla, pričom viaceré už komplexne tvarované elementy sa stávajú sofistikovanejšie. Predné krídlo obsahuje mnoho aerodynamických zariadení, z ktorých každé plní dôležitú úlohu, preto sa pozrieme bližšie na všetky jeho časti a vysvetlíme si ich jednotlivé úlohy, vid' obrázky č. 14 a 15. Budeme brať do úvah pravidilá vydané od FIA z roku 2018. Ostatné ročníky sa miestami mierne líšia pravidlami, ale základný koncept predného krídla ostáva rovnaký. Vzhľadom na to, že neexistujú odborné výrazy v slovenčine opisujúce všetky časti predného krídla, budeme v obrázku č. 14 používať anglické názvy.



Obrázok 14: Jednotlivé aerodynamické prvky krídla, upravené z [23]



Obrázok 15: Vzniknuté prúdenie jednotlivými prvkami krídla [7]

Prvou časťou krídla je oblasť kontrolovaná FIA. Táto oblasť je široká 250 mm z oboch strán od centrálnej roviny vozidla, a je rovnaká u každého monopostu (vid' žltá plocha v obrázku č. 14). V tejto oblasti nie sú povolené na krídle žiadne elementy, ktoré by slúžili pre akékoľvek aerodynamické využitie. Viac ako 250 mm od stredu krídla nasleduje hlavná časť krídla, spoločne s nastaviteľnou klapkou („Main Plane“ a „Flap“ v obrázku č. 14). Tieto časti krídla sú hlavným zdrojom prítlaku a tiež vytvárajú jeden z najsilnejších vírov generovaných na monoposte, ktorý sa volá Y250 vír (možné vidieť na obrázku č. 15 ako najväčší vznikajúci vír). Tento vír je využitý ako bariéra,

ktorá zabraňuje turbulentnému vzduchu narúšať prúdenie pod monopostom, čím sa zvyšuje prítlak a efektívnosť podlahy a difúzoru. Taktiež je jeho úlohou presmerovať od karosérie monopostu chaoticky turbulentný vzduch vznikajúci za prednou pneumatikou, ktorý by inak narúšal aerodynamiku vozu. Pri vhodných klimatických podmienkach na trati dochádza ku kondenzácii v samotnom víre, vďaka čomu je ho niekedy možné vidieť voľným okom. Ďalší generovaný vír vzniká pri vnútornej strane koncových dosiek pod hlavnou časťou krídla. Vír presmeruje prúdenie okolo pneumatík, čím sa znižuje nežiadúci odpor. Kaskády a otáčacie lopatky („Cascade“ a „Turning Vane“ podľa obrázku č. 14) sú prvkami, ktoré negenerujú prítlak, naopak, z experimentálnych simulácií bolo možné zistiť že kaskády prispievajú k miernemu poklesu celkového prítlaku, a prispievajú k efektívnejšiemu usmerneniu vzduchu okolo pneumatík. Otáčacie lopatky môžu byť využité na chladenie brzd, generovanie vírov, prípadne k iným požadovaným účelom. Koncová doska („Endplate“) má tiež za úlohu zvýšenie efektivity predného krídla, zabraňuje stretu vysokého tlaku s nízkym tlakom pod krídlom (tento princíp bol využívaný už skôr, vid' kapitola 2.3). Poslednou časťou krídla je päťka koncovkej dosky („Endplate Foot“), ktorá má z predného pohľadu zaoblenú drážku v ktorej sa vytvára ďalší vír, opäť prispievajúci k správnejmu vedeniu vzduchu okolo vozu. Nesprávny návrh ktoréhokoľvek z týchto komponentov môže negatívne ovplyvniť zvyšok aerodynamiky vozu a preto sa do tejto časti investuje mnoho úsilia a času [24, 25, 26, 37].

Až v roku 2019 došlo k výraznejším zmenám v aerodynamických pravidlách na prednom krídle, ktoré trvali do roku 2021. Regulácie po novom nedovoľovali žiadne kaskády, otáčacie lopatky, ani žiadne iné aerodynamické prvky okrem samotných klapiek spoločne s hlavnou časťou krídla a koncových dosiek. Celkové rozpätie krídla bolo zmenené z pôvodných 1800 mm na 2000 mm, pri pohľade spredu pravidlá umožňovali krídlu nachádzať sa v oblasti od 75 mm do 300 mm nad referenčnou rovinou (horizontálna rovina ku ktorej je pripevnená doska nachádzajúca sa pod podlahou vozu) [32] oproti pôvodnej oblasti od 75 mm do 275 mm nad referenčnou rovinou [33]. Cieľom týchto zmien bolo znížiť vzniknuté turbulentné prúdenie, ktoré negatívne a nepredvídateľným spôsobom ovplyvňovalo aerodynamiku vozu pokúšajúceho sa predbehnúť oponenta [27].

3 Technické regulácie aerodynamiky 2022

Aj napriek neustálym zmenám v technických reguláciách nebolo možné uľahčiť predbiehajúce jazdcovi, ktorý sa nachádzal v úplave oponenta. Preto FIA v roku 2022 zaviedla veľké zmeny v pravidlách s cieľom zvýšiť akciu a predbiehajúce na trati. Úpravou technických pravidiel v oblasti aerodynamiky má za cieľ zefektívniť aerodynamiku vozu nachádzajúceho sa v úplave, a tým jazdcovi uľahčiť predbiehajúce [21].

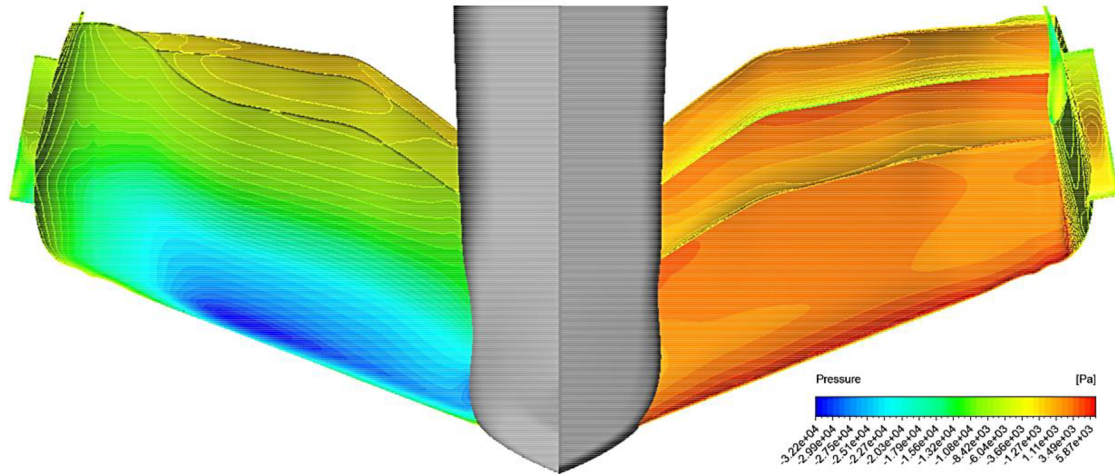
V krátkosti zanalyzujeme aj ostatné aerodynamické prvky vozu podieľajúce sa na znížení celkového vírenia a úplavu za monopostom.

3.1 Hlavné zmeny v technických reguláciách

Nová generácia predného krídla je oproti svojmu predchodcovi rozdielna v mnohých aspektoch. Predné krídlo môže pozostávať z najviac 4 elementov, vrátane hlavnej roviny krídla, uchytenej priamo k špičke nosu. Ostatné elementy sú uchytené na bočnú stranu nosa, čím je znemožnené ďalej využívať Y250 vír, ktorý spôsoboval nežiaduce turbulentné prúdenie za vozom, a teda prispieval k neľahkému obiehaniu. Jednotlivé elementy sú na konci krídla zakrivené a spájajú sa do jednej koncovej dosky, mierne naklonenej pod uhlom smerom k monopostu. Ich funkcia spočíva v presmerovaní prúdenia vzduchu okolo vonkajšej strany kolies, avšak podľa regulácií je táto možnosť veľmi limitovaná s cieľom znížiť rozptyl turbulentného vzduchu okolo pneumatiky, ktorý by taktiež negatívne ovplyvnil obiehajúce. Predné krídlo je teda navrhnuté tak, aby v čo najmenšej možnej miere narúšalo prichádzajúce laminárne prúdenie. To je dôležité pre aerodynamickú efektívnosť podlahy, kde tento vzduch vstupuje cez nasávacie otvory nachádzajúce sa za prednou pneumatikou kadiaľ je ďalej urýchlený cez podlahu, kde dochádza k poklesu statického tlaku a vzniká „ground effect“, ktorý bol vo Formule 1 zakázaný už niekoľko desaťročí. V prípade, že by bol tento vzduch príliš rozvírený, došlo by k poklesu aerodynamickej efektívnosti podlahy [29]. Vzduch ďalej vystupuje zo zaobleného difúzoru a je sacím efektom vytiahnutý s úplavom do výšky vyššej, ako je samotný monopost. K presmerovaniu chaotického vzduchu tiež prispieva nové zadné krídlo, ktoré po novom neobsahuje koncové dosky, ktoré sa povodne ťahali vertikálnym smerom nad klapku krídla. Zadné krídlo pozostáva z dvoch elementov (2 klapky), jeden z nich obsahujúci systém DRS („drag reduction system“), ktorý znižuje odpor na rovinách a uľahčuje obiehajúce. Obidva tieto elementy sa spájajú na konci krídla a plynulým zaoblením sa otáčajú vertikálnym smerom dole. Ako ostatné časti monopostu je nová verzia zadného krídla navrhnutá k nižšej produkcii turbulentného prúdenia. Poslednou výraznou zmenou sú nové kryty na kolesách a deflektory, ktoré majú spoločne za cieľ zredukovať a usmerniť chaotické vírenie vzniknuté pri rotácii pneumatík [30].

Tieto výrazné zmeny zo sebou prinášajú rozdielne správanie celého auta a jednotlivých aerodynamických zariadení. Preto zanalyzujeme predné krídlo, na ktorom vidíme tlakové rozloženia na jeho povrchu, vid' obrázok č. 16. Spodná strana hlavného elementu pri nábežnej hrane znázorňuje oblasť nízkeho statického tlaku, kde prúd vzduchu má najväčšiu rýchlosť. Smerom k poslednému elementu je hodnota tlakového gradientu kladná, dochádza k zvýšeniu hodnôt tlakov smerom k poslednému elementu krídla a k úbytku energie v medznej vrstve, ktorú je nutne obnoviť prevodom vysoko energetického prúdenia z vrchnej časti krídla pomedzi prekryvajúce sa elementy. Horná

časť krídla má hodnoty statických tlakov rozložené rovnomernejšie, a teda hodnota tlakového gradientu je v pozdĺžnom a priečnom smere krídla blízka nule. Výsledky tejto simulácie však treba brať ako ilustračné, pretože v skutočnosti každý tím disponuje iným riešením predného krídla a teda rôznymi aerodynamickými vlastnosťami [21].



Obrázok 16: Tlakové rozloženie na prednom krídle zo spodnej strany (naľavo), z vrchnej strany (napravo)[21]

3.2 Aerodynamické riešenia tímov 2022

V tejto časti sa pozrieme na rôzne varianty predných krídel, ktoré vynikli spomedzi konkurencie a ujasníme si ich funkciu a spôsob, ako jednotlivé tímy pristupovali k novým technickým reguláciám.

Na obrázku č. 17 môžeme vidieť ako pristupoval k aerodynamike predného krídla tím Aston Martin. Všimnime si prvý element, ktorý nie je uchytený k nosu, ale naopak k sekundárnemu elementu krídla, pričom je vidieť jeho nadvihnutú centrálnu časť, aby umožnil čo najväčšiemu objemu vzduchu prejsť do oblasti podlahy, a tým zvýšil prítlak cez „gorund effect“. Nevýhodou tohto riešenia je úbytok prítlaku v centrálnej časti krídla, ktorý je nutné získať na okrajoch, kde môžeme vidieť posledný element v maximálnej novej výške stanovenej technickými reguláciami FIA, ktorý sa ďalej zakrivuje nadol k okrajovej doske krídla, kde dochádza k odvodu vzduchu okolo vonkajšej časti pneumatiky. Agresívny uhol nábehu posledného elementu môže spôsobovať výrazné nežiaduce prúdenie vzduchu ponad pneumatiku smerom na vonkajšiu stranu, čím môže narastať celkový odpor. Aston Martin dokázal využiť pravidlá naplno pomocou nastaviteľného čapu, ktorý ovláda uhol nábehu posledného elementu, ako generátor víru, ktorý sa dá využiť k rôznym účelom, ktoré tím zatiaľ konkrétne neprezradil [34]. Iný prístup mali tímy ako McLaren, vid' obrázok č. 18, ktorých centrálna časť predného krídla (konkrétne prvý element), je viac zakrivená smerom dole. Nevýhodou tohto riešenia môže byť obmedzenie vzduchu, ktorý nedokáže prúdiť v takom objeme do podlahy, naopak výhodou je schopnosť generovať väčšiu prítlačnú silu v strednej časti krídla, a teda nie je potrebné hľadať kompenzáciu v uhle nábehu ako je to u Aston Martinu. Okrajové dosky krídla sú približne v strede svojej plochy horizontálne zalomené smerom dovnútra, čím rozdeľujú prúdenie vzduchu do dvoch smerov okolo vonkajšej strany pneumatiky. Posledným rozdielom je vírový generátor, ktorý je na poslednom elemente

oproti Aston Martinu posunutý ďalej od stredu krídla s omnoho jednoduchším geometrickým návrhom. Tím rovnako neprezradil zmysel tohto zariadenia, takže nie je úplne známe jeho využitie [35].



Obrázok 17: Predne krídlo tímu Aston Martin, rok 2022 [34]



Obrázok 18: Predne krídlo tímu McLaren, rok 2022 [28]

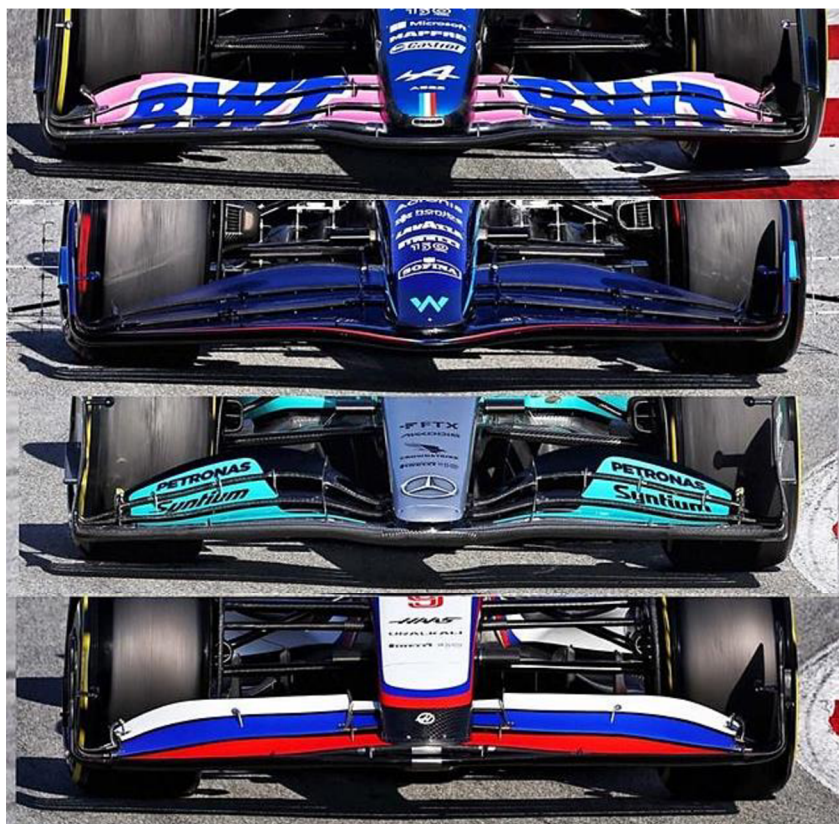
Ďalším tímom je Ferrari, ktorý môžeme vidieť na obrázku č. 19. Na rozdiel od McLarenu a Aston Martinu, môžeme vidieť nos, ktorý je navrhnutý s hladším zaoblením hrán po svojej dĺžke smerom k jazdovi. Cieľom tohto návrhu je snaha zredukovať straty, ktoré sa môžu tvoriť na jeho pozdĺžnych hranách (teda vznik ďalšieho vírenia). Nos je tiež uchytený k prvému elementu krídla a predeľuje ho na dve časti. Filozofia je podobná ako u McLarenu, kde stred krídla je centrálné zaťaženie viac, ako má Aston Martin [38].



Obrázok 19: Predne krídlo tímu Ferrari, rok 2022 [39]

Prístup k oficiálnym výsledkom aerodynamických simulácií jednotlivých tímov je utajovaný kvôli konkurencii a preto treba brať analýzu krídel s určitou rezervou.

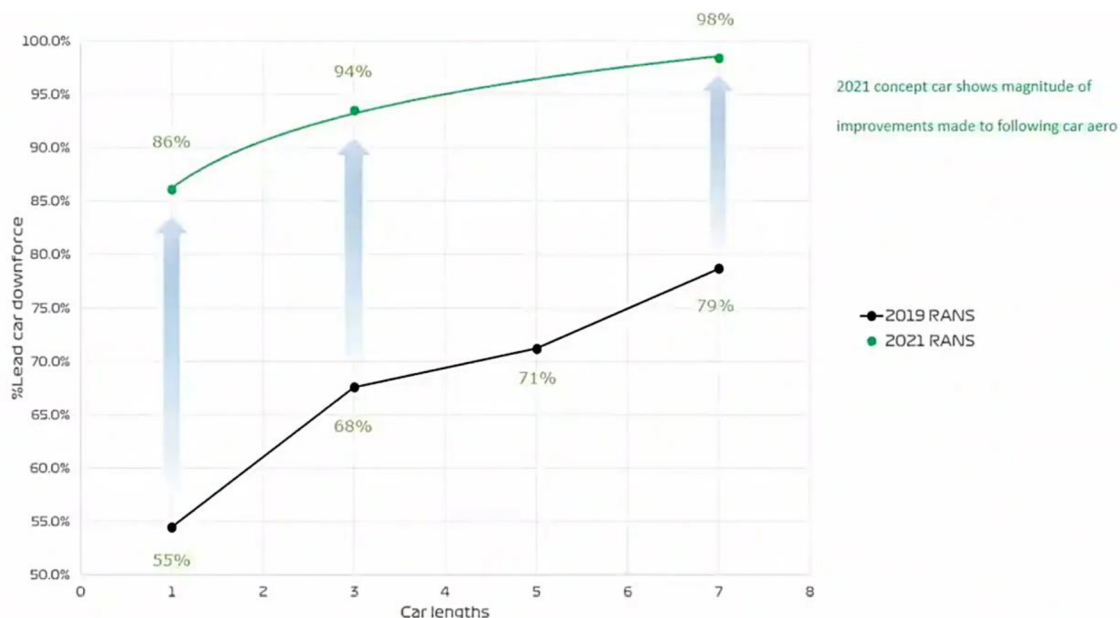
Pre doplnenie môžeme vidieť na obrázku č. 20 krídla ďalších tímov ako Alpine, Williams, Mercedes a Hass. Filozofia týchto krídel je podobná, ako u predošlých diskutovaných monopostoch a teda nebudeme rozoberať jednotlivo každý model krídla.



Obrázok 20: Predne krídlo tímov Alpine, Williams, Mercedes a Hass, upravené z [40]

3.3 Pozitívny prínos nových regulácií pre šport

Už z výsledkov z veterného tunela a simulácií boli zistené vynikajúce hodnoty prítlaku monopostov na rok 2022 (pôvodne 2021, ale kvôli covid pandémie bolo rozhodnuté posunúť nové regulácie na rok 2022, aby sa pomohlo tímom vo finančne neľahkej situácii). Obrázok č. 21 znázorňuje celkový prítlak auta v percentách v závislosti na vzdialenosti za druhým jazdcom. Vidíme iba 2% stratu prítlaku na monoposte z roku 2022 oproti 21% strate z roku 2019 ku ktorej auto prišlo už pri 7 dĺžkach monopostov (1 dĺžka sa rovná približne 5,7 m) za súperom. Veľmi prekvapujúce sú hodnoty prítlaku v jednej dĺžke závodného monopostu za súperom, kde na nových monopostoch dochádza iba k 14% strate oproti pôvodným 45% [31]. Tieto výsledky boli potvrdené aj samotnými jazdcami, ktorý si všimli výrazné zlepšenie prítlaku v zákrutách počas prenasledovania súpera. Na druhú stranu vznikol problém s úplavom, ktorý stratil na efektívite, pretože veľká časť z neho je vynesena nad monopost a počas prenasledovania oponenta na rovinkách nedochádza k takému poklesu odporu ako tomu bolo pôvodne. Jednou kompenzáciou tohto problému je nové a väčšie DRS, ktoré jazdcom uľahčí obiehacie [36].



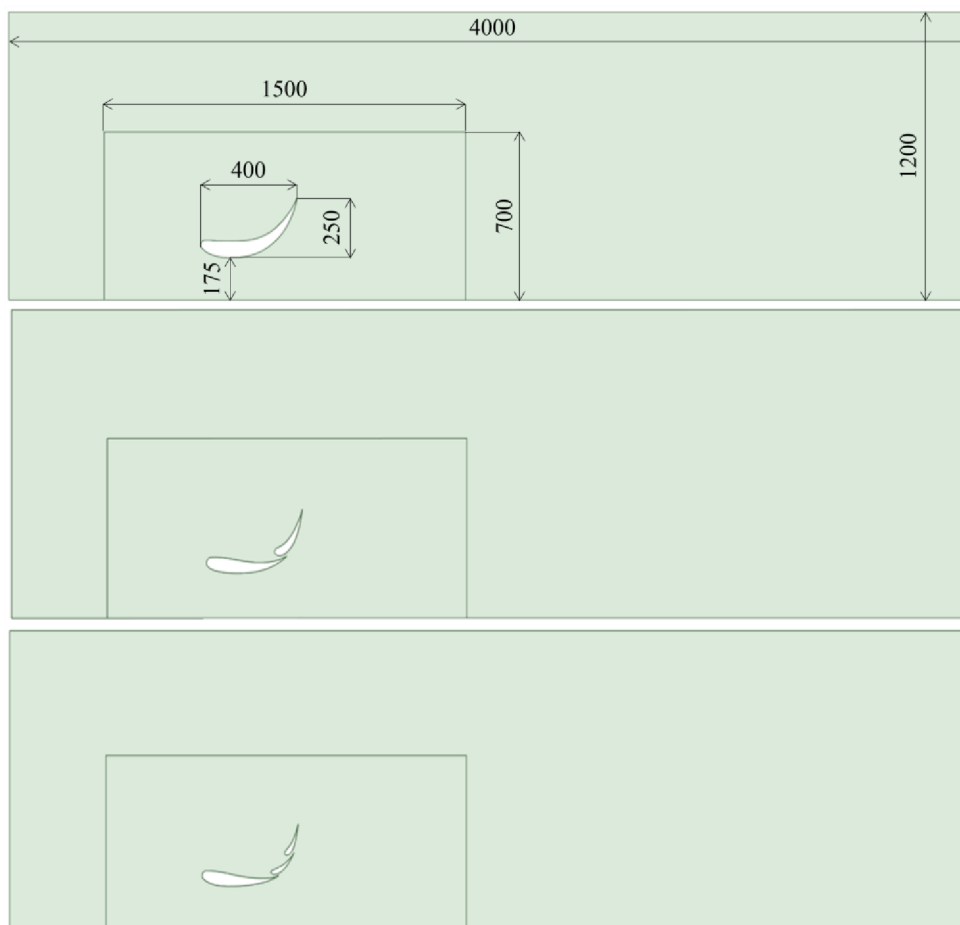
Obrázok 21: Závislosť celkového prítlaku monopostu na vzdialenosti za druhým monopostom nachádzajúceho sa v úplave v roku 2022 oproti 2019 [31]

4 Simulácia rôznych profilov predného krídla

V tejto časti sa pozrieme na simuláciu troch rôznych profilov predného krídla, kde sa budeme zaoberať hlavne separáciou medznej vrstvy a jej odtrhnutím od povrchu krídla pri rôznych rýchlostiach. Riešenia ako zabrániť separácii medznej vrstvy budú postupné pridávanie elementov na krídle a budeme sledovať zmenu odporu, prítlaku a zhodnotíme celkovú efektívnosť jednotlivých riešení.

4.1 Geometria profilov

Všetky profily krídel majú celkové rozmery 400 mm na šírku, 250 mm na výšku (pri pohľade spredu na krídlo) a celkovú dĺžku 900 mm (vysunutie profilu do priestoru). Tieto rozmery sú zvolené hlavne preto, aby sa získali rozumné hodnoty prítlaku a odporu. Výška v mieste, kde je krídlo a vozovka k sebe najbližšie bude nastavená na 175 mm. Na obrázku č. 22 môžeme vidieť všetky profily krídel vo výpočtových doménach.



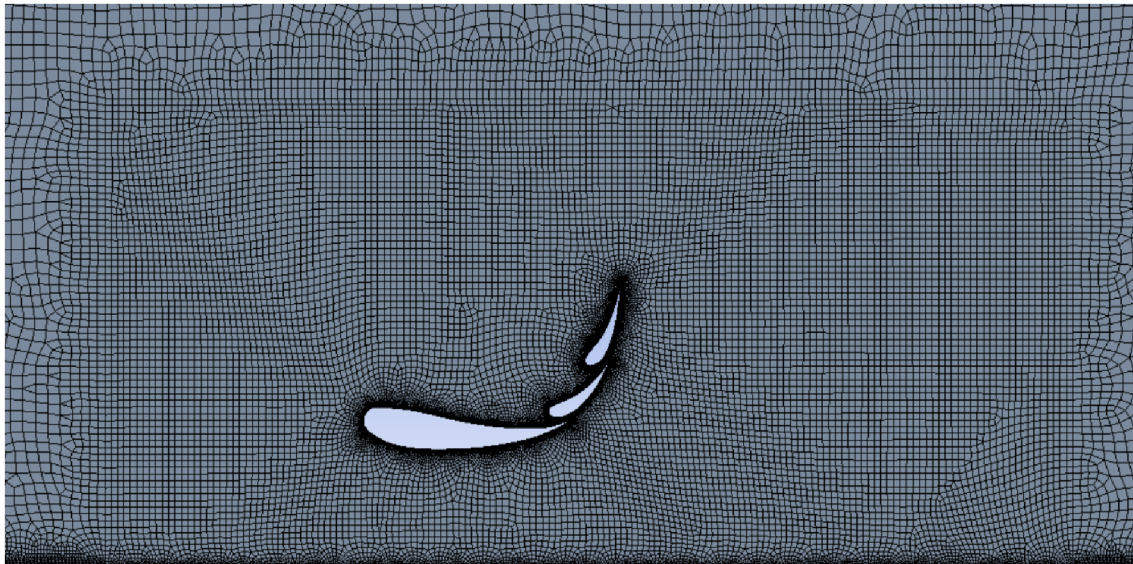
Obrázok 22: Profily krídel a oblasť výpočtových domén

Výpočtové domény pre všetky typy krídel sú nastavené s rozmermi 4000 mm na dĺžku a 1200 mm na výšku. Krídla v tomto priestore sú umiestnené tak, aby bol dvojnásobok šírky krídla (celkovo 800 mm) medzi vstupom domény a najprednejšou časťou krídla a zároveň sedemnásobok šírky krídla (2800 mm) medzi výstupom domény a najzadnejšou časťou krídla.

4.2 Výpočtová sieť

Veľkosť výpočtovej siete je navrhnutá tak, aby nebola zbytočne náročná pre dostupný HW, ale bola zároveň dostatočne presná pre samotný výpočet. Preto sú nastavené menšie elementy s veľkosťou 10 mm len v blízkom okolí krídla (oblasť o rozmeroch 700 mm na 1500 mm, viď obrázok č. 22), kde hodnoty tlakových a rýchlostných gradientov sú väčšie, ako v ďalekom okolí krídla, a presnosť výpočtu je tu teda požadovaná. Na podchytenie správania medznej vrstvy na krídle sa nastavila hrúbka prvého elementu medznej vrstvy na 0,0025 mm s 1,1 násobným inkrementom hrúbky po 30 vrstiev. Keďže je krídlo len 175 mm nad povrchom zeme, bola tiež vytvorená dostatočne jemná sieť pre zachytenie správania medznej vrstvy aj na vozovke.

Tieto parametre pre výpočtovú sieť sú nastavené pre všetky 3 krídla rovnako. Na obrázku č. 23 môžeme vidieť vygenerovanú výpočtovú sieť pre troj-elementové krídlo kde si môžeme všimnúť zjemnenú sieť v oblasti vozovky. Podobne vysieťovanie bolo dosiahnuté aj u zvyšných dvoch verzií krídel.



Obrázok 23: Výpočtová sieť troj-elementového krídla

4.3 Okrajové podmienky

U všetkých krídel sa prúdenie na vstupe domény nastavilo ako „velocity inlet“. Jednotlivé výpočty boli uskutočnené pri rýchlostiach prúdenia na vstupe od $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s inkrementom rýchlosti po $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ďalšie fyzikálne parametre vzduchu ako teplota, bola nastavená na 288 K a atmosféricky tlak na 101325 Pa. Výstup z domény, kde prúdiaci vzduch opúšťa prostredie nad a za krídlom, boli nastavené na typ „pressure outlet“.

Vozovka bola nastavená ako translačne sa pohybujúca stena vo vodorovnom smere pod krídlom, ktorej rýchlosť bola totožná rýchlosti prúdenia vzduchu pri vstupe domény (teda od $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

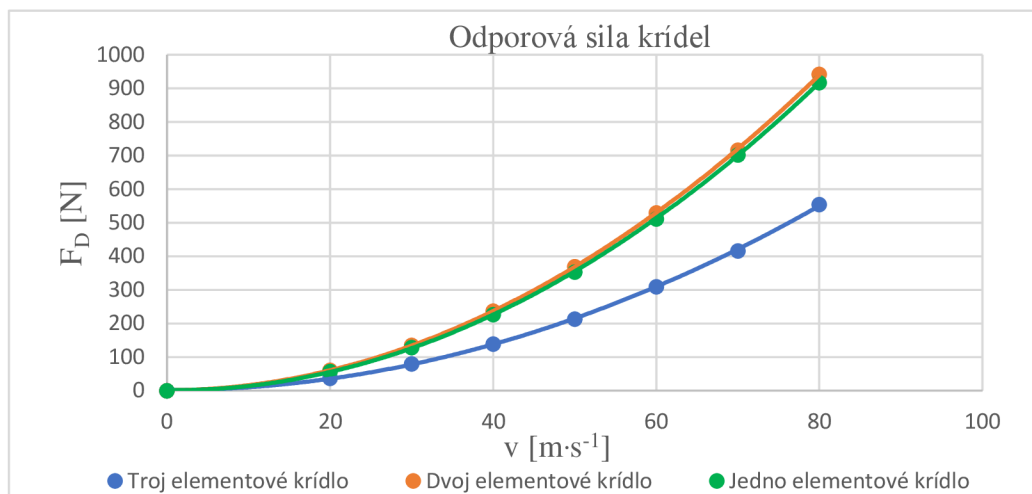
Ako turbulentný model na podchytenie správania medznej vrstvy bol použitý prednastavený SST $k-\omega$ model, preto bolo treba dodržať podmienku $y^+ < 1$ pre správne podchytenie medznej vrstvy. Hodnoty y^+ u jedno, dvoj a troj-elementového krídla v príslušnom poradí nadobudli maximálnych hodnôt 0,59, 0,87 a 0,81.

Ďalej bol použitý stacionárny výpočet prúdenia. „Pressure-Velocity Coupling“ bol nastavený na „Coupled“ a všetky diskretizácie rovníc gradientov (disipácia energie, kinetická energia, moment a tlak) boli nastavené na „Second Order Upwind“.

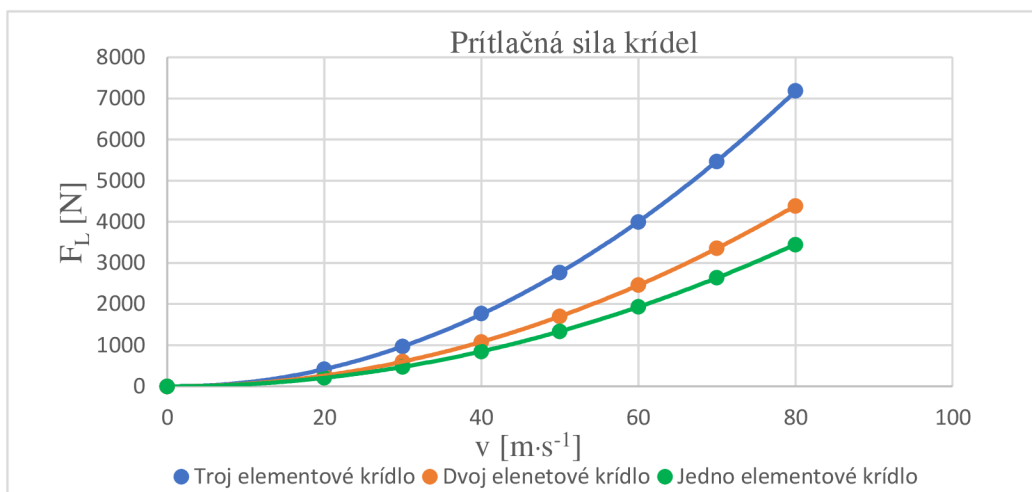
Výpočet hodnôt residuálov („x-velocity“, „y-velocity“, „k“, „omega“ a „continuity“) prebiehal pri 1000 iteráciách..

4.4 Výsledky simulácii

V obrázku č. 24 a 25 sú zobrazené priebehy odporu a prítlaku jednotlivých krídel v závislosti od rýchlosti. Priebehy sú parabolického priebehu, čo potvrdzujú aj rovnice 1.4 a 1.5 z ktorých sa dajú tieto sily tiež dopočítať. Veľký nárast v prítlaku je predovšetkým u troj-elementového krídla, ktorého aerodynamické vlastnosti sú lepšie oproti zvyšným dvom krídlam. Okrem vysokého prítlaku ma krídlo aj výrazne nižší odpor, čo môže byť výhodné predovšetkým na tratiach, kde sa dosahujú maximálne rýchlosti.

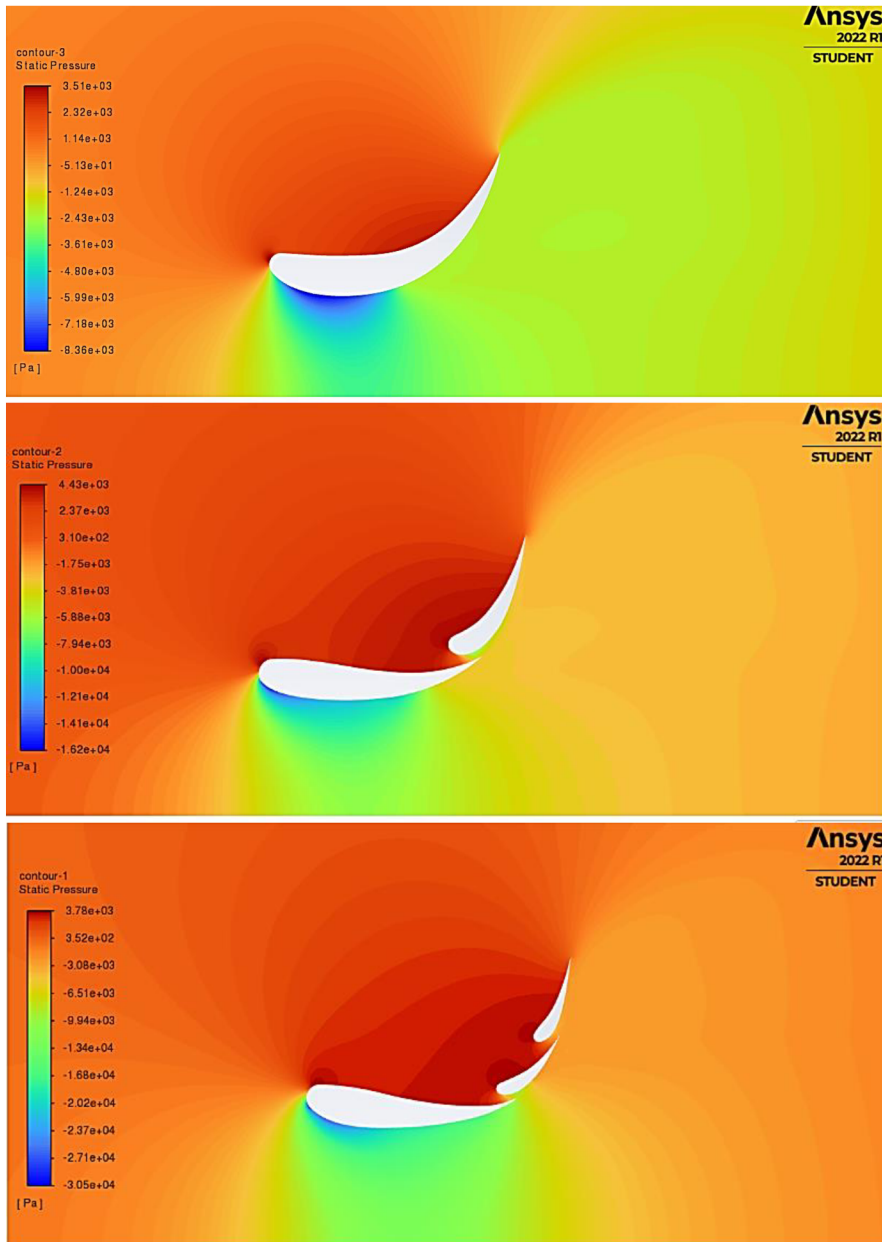


Obrázok 24: Celkový generovaný odpor krídel v závislosti od rýchlosti



Obrázok 25: Celkový generovaný prítlak krídel v závislosti od rýchlosti

Na obrázku č. 26 je možné vidieť kontúry tlakov, taktiež môžeme vidieť aj bod stagnácie (silno červená farba), kde v tomto bode je všetka kinetická energia premenená na tlakovú. U prvých dvoch krídel sa tento bod nachádza prevažne na čelách profilov, čo môže byť nežiadúcim zdrojom odporovej sily vo vodorovnom smere. Viditeľný rozdiel je pri poslednom variante krídla, kde sa tento bod prevažne nachádza na vrchnej strane spodného profilu. To môže byť výhodné, hlavne kvôli vysokému tlaku, ktorý v tomto prípade pôsobí vertikálne na vrchnú plochu krídla, čím dochádza ku generovaniu ďalšej prítlačnej sily.



Obrázok 26: Kontúry statických tlakov okolo profilov krídel

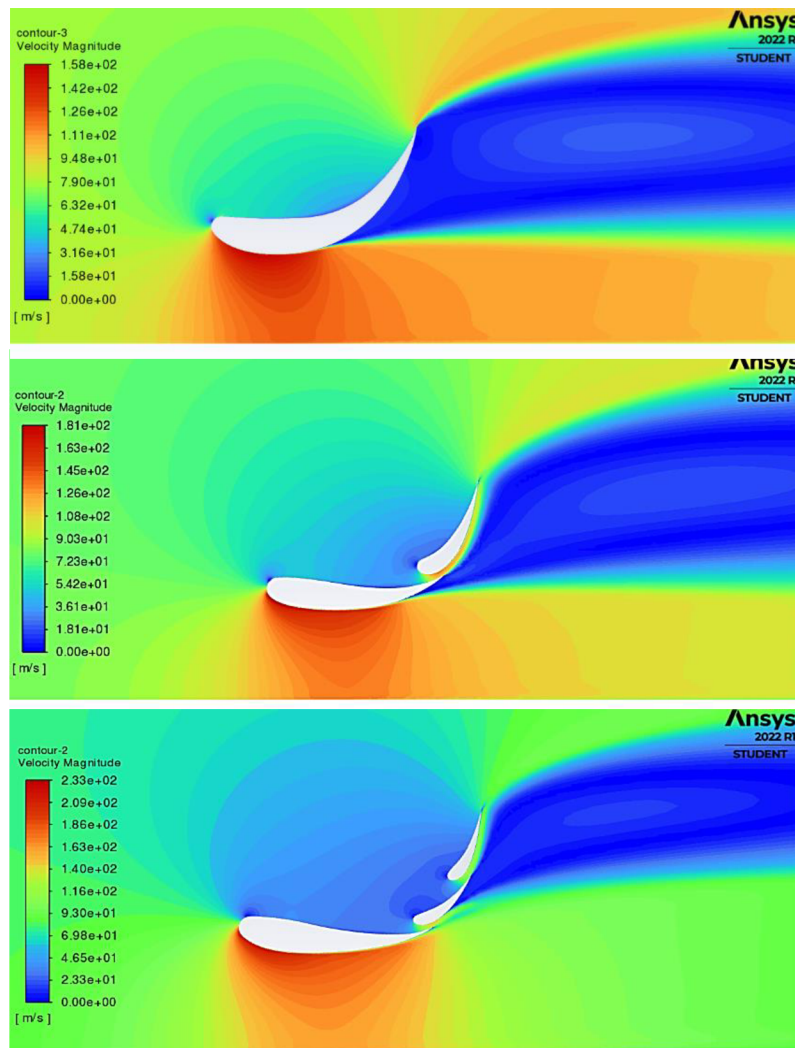
Pri vizualizácii rýchlosti prúdenia vzduchu okolo jednotlivých profilov na obrázku č. 27 pri rýchlosti 80 ms^{-1} môžeme vidieť veľmi skorú separáciu medznej vrstvy u jedno-elementového krídla, čo má za príčinu nárast statického tlaku pod krídlom od

miesta utrhnutia medznej vrstvy a teda pokles celkového generovaného prítlaku. Dochádza k vzniku veľkého úplavu a cirkulácie vzduchu za krídlom, ktorá spotrebuje energiu pre jej existenciu, čo spôsobuje nárast odporu.

U dvoj-elementového krídla bolo možné uchytiť medznú vrstvu pod druhým elementom čím sa v tejto oblasti dosiahol nižší statický tlak a teda vyšší celkový prítlak oproti prvému krídlu. Nevýhodou je stále skorá separácia medznej vrstvy na spodnom elemente, veľký úplav za krídlom a teda nie je stále plne využitý aerodynamický potenciál krídla.

Pri poslednom krídle nedochádza na spodnom elemente k žiadnej separácii medznej vrstvy a úplav je viditeľne menší oproti predošlým špecifikáciám. Nedokonalosťou je čiastočná separácia medznej vrstvy na druhom elemente. Vyriešenie tohto problému sa dá docieľiť zmenou geometrie profilu, prípadne doladiť umiestnenie jednotlivých profilov voči sebe.

Keďže sa všetky krídla nachádzajú v blízkosti povrchu trate, je tok vzduchu medzi spodnou časťou krídla a vozovkou značne urýchlený a dochádza k prudkému poklesu statického tlaku pod krídlom, čím sú účinky prítlacnej sily ešte väčšie.

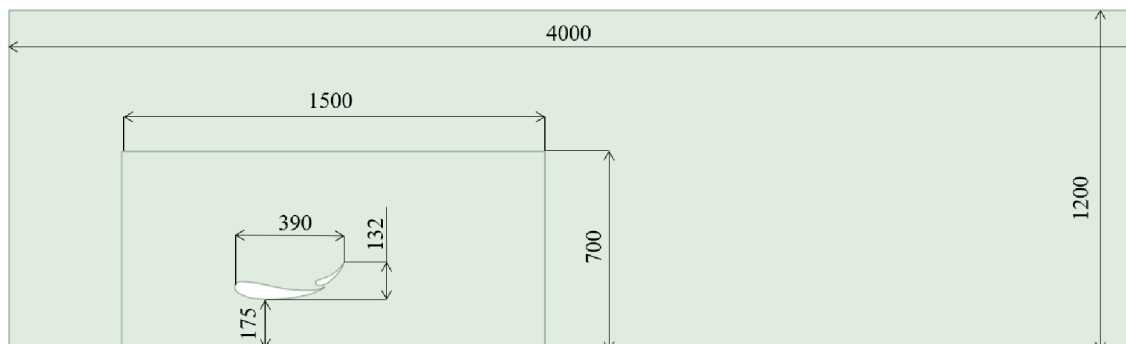


Obrázok 27: Kontúry rýchlosti vzduchu okolo krídel

4.5 Optimalizácia krídla

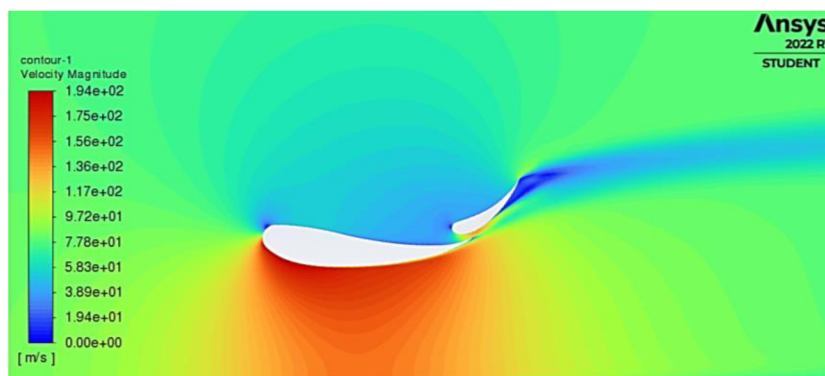
Doteraz boli všetky krídla nastavené s vysokým uhlom nábehu (približne 27°). Tento uhol bol zmeraný medzi dvoma priamkami. Prvá priamka prechádzala nábežnou hranou prvého profilu a bola totožná so smerom prúdenia vzduchu. Druhá priamka ležala taktiež na nábežnej hrane prvého profilu a zároveň na odtokovej hrane posledného profilu.

Pravé kvôli tejto vysokej hodnote uhla nábehu bola geometria profilov navrhnutá s agresívnym zakrivením zo spodnej strany krídel, čo spôsobovalo skorú separáciu medznej vrstvy a tým zbytočne veľký odpor. Keďže troj-elementové krídlo vytváralo najmenší úplav a nedochádzalo na jeho spodnom elemente k separácii medznej vrstvy, bolo vybrané na ďalšiu optimalizáciu, kde hlavným cieľom bolo predovšetkým znížiť celkový úplav a tým zvýšiť celkovú aerodynamickú efektívnosť. To sa dosiahlo odstránením horného profilu. Ďalej bol uhol nábehu druhého elementu znížený o 2° , pričom spodný element ostal nezmenený. Nová šírka krídla sa zmenila zo 400 mm na 390 mm a celková výška krídla (pri pohľade spredu) sa zmenšila na 132 mm, ako môžeme vidieť na obrázku č. 28. Ostatné rozmery, ako výška od vozovky a rozmery domény ostali nezmenené.



Obrázok 28: Rozmery optimalizovaného krídla a výpočtovej domény

Parametre na vygenerovanie výpočtovej siete ostali rovnaké (podľa kapitoly 4.2) spolu s rovnakými okrajovými podmienkami (podľa kapitoly 4.3) a opäť bol po 1000 iteráciách prevedený výpočet (hodnota y_+ nadobudla maximálnej hodnoty 0,69).



Obrázok 29: Kontúry rýchlosti prúdiaceho vzduchu pri optimalizovanom krídle

Z výsledkov kontúr rýchlosti na obrázku č. 29 je vidieť výrazné zmenšenie úplavu, čo prispelo k nižšej hodnote odporu, ako môžeme vidieť v tabuľke č. 1, kde sú medzi jednotlivými krídlami porovnané tiež hodnoty prítlačkov a pomery vztlačového a

odporového koeficientu, ktoré boli vypočítané podľa rovníc 1.4 a 1.5 pri maximálnej rýchlosti $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a následne dané do pomeru.

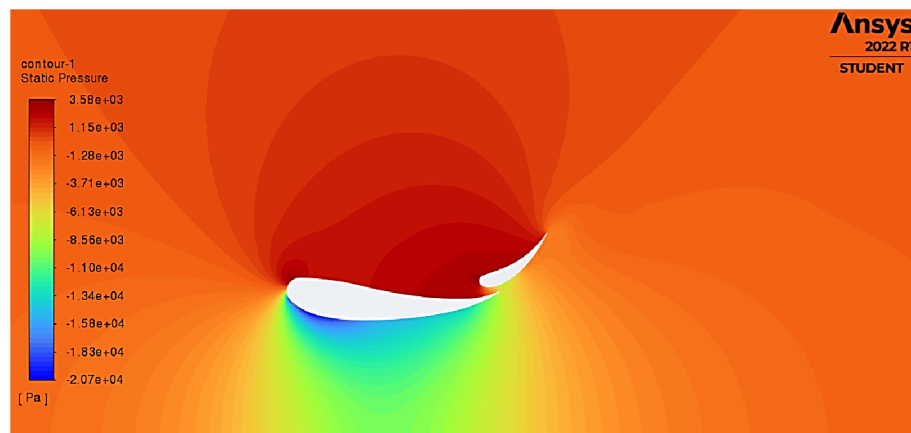
Pomer vztlakového a odporového koeficientu vyjadruje efektivitu krídla. Čím vyššia je hodnota, tým je krídlo aerodynamicky efektívnejšie.

Relatívne nízke hodnoty majú prvé dva varianty krídel. Výrazný rozdiel je pozorovaný pri troj-elementovom krídle, kde je hodnota tohto pomeru o 8,31 väčšia oproti predošlej variante krídla. Ďalšie zvýšenie tohto pomeru bolo dosiahnuté pri optimalizovanom krídle, kde môžeme vidieť nárast až o 21,21 oproti troj-elementovému krídlu.

Tabuľka 1: Porovnané aerodynamické parametre krídel pri rýchlosti $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

	Odporová sila (N)	Vztlaková sila (N)	C_L/C_D (-)
1-Elementové Krídlo	917	-3445	3,76
2-Elementové Krídlo	942	-4386	4,66
3-Elementové Krídlo	554	-7185	12,97
Optimalizované Krídlo	179	-6118	34,18

V obrázku č. 30 je vidieť tlakové rozloženie optimalizovaného krídla, kde si môžeme všimnúť body stagnácie na oboch profiloch. V mieste, kde došlo k predčasnému utrhnutiu medznej vrstvy (na druhom elemente) je možné vidieť mierny nárast statického tlaku pod krídlom. Znížením statického tlaku v tomto mieste sa dá iba ďalším oneskorením separácie medznej vrstvy, čo by viedlo k ďalšej geometrickej optimalizácii krídla.



Obrázok 30: Kontúry statických tlakov okolo optimalizovaného krídla

Záver

V prvej kapitole boli rozobrané základné vlastnosti mechaniky tekutín a plynov, aby mohol čitateľ lepšie porozumieť ostatným problémom a informáciám obsiahnutým v ďalších kapitolách.

V druhej kapitole je rozobraný historický vývoj predných krídel na vozoch Formule 1. V kapitole sú postupne rozobrané jednotlivé koncepty krídel, z pohľadu ako fungovali a na akých aerodynamických princípoch boli založené. V období 2010-2021 sú krídla podrobne rozobrané a sú vysvetlené ich jednotlivé časti, aj to ako fungujú.

V tretej kapitole sú rozobrané najnovšie aerodynamické pravidlá vo Formule 1 a pojednáva sa, ako tieto pravidlá zmenili aerodynamické správanie a vzhľad predných krídel oproti ich predchodcom. Bolo porovnané, ako nové monoposty reagujú na úplav za súperom, oproti svojim predchodcom z roku 2019. Výsledky boli pozitívne a hodnoty prítlačku ostali relatívne vysoké. Po novom je možné zachovať až 86% celkového prítlačku na monoposte pri vzdialenosti približne 5,7 m za súperom. Staré monoposty si boli schopné zachovať iba 55% pôvodného prítlačku. Už v prvých pretekoch sezóny boli tieto výsledky vidieť v menších rozostupoch medzi monopostami počas prenasledovania.

V poslednej kapitole sú simulované celkovo 4 verzie krídel. U prvého krídla je dobre si tiež uvedomiť, aký negatívny dopad môže mať zlé navrhnutá geometria profilu na generovaný prítlak a odpor. U dvoj-elementového krídla je prítlak zvýšený vďaka medznej vrstve pod druhým elementom, avšak úplav za krídlom bol stále veľký. Môžeme povedať, že tieto dve verzie krídel sú aerodynamicky neefektívne, a v motošporte by neboli použiteľné. U troj-elementového krídla sa zabránilo separácii medznej vrstvy na celom spodnom profile, úplav bol viditeľne menší oproti predošlým verziám, ale zbytočne veľký uhol nábehu stále generoval veľký úplav, ktorého sa nebolo možné zbaviť. Posledná verzia krídla bola optimalizovaná z troj-elementového krídla, kde bol odstránený horný element. Napriek poklesu prítlačku celkovo o 1015 N (z 7185 N na 6118 N) bolo úspechom výrazne znížiť celkový odpor až o 375 N (z 554 N na 179 N).

Z pomerov vztlakového a odporového koeficientu bolo následne možné určiť, že optimalizované krídlo je aerodynamicky najefektívnejšie.

Tato simulácia je však stále ďaleko od reality. Vo výpočte sa nepočíta s indukovanými vírmi, ktoré by vznikali na okraji profilov, preto by bolo dobre v budúcnosti (prípadne v diplomovej práci) zlepšiť simuláciu a prejsť na 3D modeli predných krídel, ktoré by obsahovali aj prednú časť nosu, šasi, ku ktorej by boli upevnené závesy a rotujúce kolesá. Ďalším obohatením by bola aj praktická časť, kde by sa vytvorilo skutočné krídlo podľa virtuálneho modelu v mierke 1:1 ku ktorému by boli pripútené aj kolesá so závesmi. Celý model by sa odskúšal vo veternom tuneli a porovnali by sa namerané hodnoty s hodnotami zo simulácie. V prípade, že by sa výsledky z experimentu nezhodovali so simuláciou, sú k dispozícii aj iné turbulentné modely, ako napríklad GEKO $k-\omega$ model u ktorého je možné nastavovať aj koeficient separácie medznej vrstvy CSEP, aby simulácia lepšie odzrkadľovala realitu.

Hlavným prínosom tejto práce je predovšetkým, aby slúžila, ako výučný materiál a vedomostne obohatila budúcich študentov v oblasti aerodynamiky a využitia CFD simulácii v praxi.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] HUCHO, Wolf-Heinrich. *Aerodynamics of road vehicles : from fluid mechanics to vehicle engineering*. Cambridge: Butterworth-Heinemann, [1990]. ISBN 0-408-01422-9.
- [2] MCBETH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Sparkford: Haynes Publishing, c2006. ISBN 1 84425 230 2.
- [3] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. [Cambridge]: Bently Publishers.com, c1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [4] Vortex. *Formula 1 Dictionary* [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/vortex.html>
- [5] SOMERFIELD, Matthew. MONTREAL GP (FP3 & QUALIFYING) - TECHNICAL IMAGE GALLERY - SATURDAY. *Somers F1* [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <http://www.somersf1.co.uk/2013/06/montreal-gp-fp3-qualifying-technical.html>
- [6] PANARAS, Argyris G. Micro-vortex generators for shock wave/boundary layer interactions. *Science Direct* [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376042114001134#!>
- [7] Secrets of Formula 1 Part 2 – Importance of Aerodynamics. *Totalsimulation* [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.totalsimulation.co.uk/secrets-formula-1-part-2-importance-aerodynamics/>
- [8] FAGNAN, René. The first appearance of wings on Formula 1 cars. *Motosport* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://us.motorsport.com/f1/news/1968-first-wings-f1-1000902/1389076/>
- [9] [LEGENDARY EX-GOLD LEAF F1 LOTUS 49B RACED BY GRAHAM HILL...]. *Bonhams* [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: https://www.bonhams.com/press_release/15896/
- [10] MOWBRAY, Jennie. F1 HISTORY: 1969 – HIGH WINGS BANNED. *Thejudge13* [online]. [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://thejudge13.com/2014/02/13/f1-history-1969-high-wings-banned/>
- [11] MCCABE, Gordon. Formula 1 aerodynamics in the 1970s. *McCabism.blogspot* [online]. [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <http://mccabism.blogspot.com/2011/09/formula-1-aerodynamics-in-1970s.html>
- [12] Livery of the Day – March 751. *The Livery Blog* [online]. [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://theliveryblog.wordpress.com/2016/01/05/livery-of-the-day-march-751/>
- [13] Williams FW07. *Theansweris27* [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://theansweris27.com/williams-fw07/>
- [14] 1980 WILLIAMS COSWORTH FW07B. *Talacrest* [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.talacrest.com/riyadh-car-show/1980-williams-cosworth-fw07b>

- [15] Why do Car Wings Need Endplates?. *Youtube* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=Vyrhx4wh5G8&t=22s&ab_channel=KYLE.ENGINEERS
- [16] PERKINS, Chris. Gordon Murray Explains Why the McLaren MP4/4 Was So Dominant. *Roadandtrack* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.roadandtrack.com/motorsports/a13517410/gordon-murray-mclaren-mp4-4-interview/>
- [17] ALLIANZ. History of Aerodynamics. *F1network* [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.f1network.net/main/s107/st22394.htm>
- [18] Tyrrell 019 Ford 1990 and Tyrrell Innovation. *Primotipo* [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://primotipo.com/2014/09/16/tyrrell-019-ford-1990-and-tyrrell-innovation/>
- [19] Why are Car Wings Multi Element?. *Youtube* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=JVf3tERII7w&ab_channel=KYLE.ENGINEERS
- [20] NOBLE, Jonathan. How Alesi battled tears to take his only F1 win. *Motorsport* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/f1/news/alesi-podcast-canadian-gp-1995-retro/4805073/>
- [21] CASTRO, Xabier a Zeeshan A. RANA. Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly. *Google* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiy6pGTw5r2AhViIMUKHTDLAegQFnoECA4QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F2311-5521%2F5%2F4%2F237%2Fpdf&usq=AOvVaw1fugx7v_AdkE1Ib2s7hTuA
- [22] PIOLA, Giorgio. Monaco's craziest ever Formula 1 tech ideas. *Motorsport* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://au.motorsport.com/f1/news/monacos-craziest-ever-tech-ideas-1041223/3101912/>
- [23] Secrets of Formula 1 Part 3 – The role of the Front Wing. *Totalsimulation* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.totalsimulation.co.uk/secrets-formula-1-part-3-role-front-wing/>
- [24] TYSON, Will. How does an F1 front wing work?. *Youtube* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=mTJX1wwVOCM&ab_channel=WillTyson
- [25] How a Formula 1 car works: Episode 1 - front wings. *Youtube* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=2qSHCs_KiWU&ab_channel=Autosport
- [26] The effect of different aerodynamic elements on the efficiency of the McLaren MP4-29 front wing. *Theansweris27* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://theansweris27.com/the-effect-of-different-aerodynamic-elements-on-the-efficiency-of-the-mclaren-mp4-29-front-wing/>

- [27] 2019 Aerodynamic Regulations Explained. *Youtube* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=XCJTf6E4BbY&ab_channel=FORMULA1
- [28] NOBLE, Jonathan. McLaren's Monaco Gulf livery inspired 2022 F1 colour tweak. *Motorsport* [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/f1/news/mclaren-monaco-gulf-livery-colour-tweak/8084627/>
- [29] Gary Anderson's verdict on Mercedes' 2022 F1 design. *F1godfather* [online]. [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <https://f1godfather.com/2022/02/18/gary-andersons-verdict-on-mercedes-2022-f1-design/>
- [30] F1's 2022 Tech in 3D - Everything You Need To Know. *Youtube* [online]. [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=m5xmMCpLsZc&ab_channel=Autosport
- [31] How F1's 2022 rules should bring closer racing: aero changes explained. *Motorsportmagazine* [online]. [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <https://www.motorsportmagazine.com/articles/single-seaters/f1/behind-the-scenes-of-f1s-new-2021-rules-and-why-they-could-work>
- [32] 2019 FORMULA ONE TECHNICAL REGULATIONS. *FIA* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: https://www.fia.com/sites/default/files/2019_technical_regulations_-_2019-03-12.pdf
- [33] 2018 FORMULA ONE TECHNICAL REGULATIONS. *FIA* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: https://www.fia.com/sites/default/files/1-2018_technical_regulations_2017-12-19_0.pdf
- [34] FORSTER, Kyle. The crucial design details on Aston Martin's 2022 F1 car — and the bits it's hiding. *Motorsportmagazine* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.motorsportmagazine.com/articles/single-seaters/f1/the-crucial-design-details-on-aston-martins-2022-f1-car-and-the-bits-its-hiding>
- [35] McLaren MCL36 - Aerodynamics Analysis and Initial Thoughts. *Youtube* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=VYBzndSFVpw&ab_channel=KYLE.ENGINEERS
- [36] Are 2022 F1 Cars Actually Worse At Overtaking. *Youtube* [online]. [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=vIeCYpm_71I&ab_channel=FormulaWorld
- [37] Y250 VORTEX. *Ecstasyshots* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://ecstasyshots.wordpress.com/tag/y250-vortex/>
- [38] Ferrari F1-75 - Aerodynamics Analysis and Initial Thoughts. *Youtube* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=o_pVuaNkx0o&ab_channel=KYLE.ENGINEERS
- [39] Ferrari drivers Sainz and Leclerc shake down new F1-75 car at Fiorano. *Formula1* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z:

<https://www.formula1.com/en/latest/article.ferrari-drivers-sainz-and-leclerc-shake-down-new-f1-75-car-at-fiorano.78prGT93iwq0qJYTJndJzg.html>

- [40] Every 2022 F1 front wing design. *Reddit* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z:
https://www.reddit.com/r/formula1/comments/szjxm7/every_2022_f1_front_wing_design/

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Symbol	Veličina	Jednotka
τ	Smykové napätie	[Pa]
μ	Dynamická viskozita	[Pa · s]
ν	Kinematická viskozita	[m ² /s]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
p_s	Statický tlak	[Pa]
v	Rýchlosť	[m/s]
F_L	Vztlaková sila	[N]
F_D	Odporová sila	[N]
C_L	Vztlakový koeficient	[-]
C_D	Odporový koeficient	[-]
S	Čelná plocha	[m ²]
FIA	Medzinárodná automobilová federácia	
COP	Centrum pôsobenia tlaku	
DRS	System redukcie odporu	
CSEP	Koeficient separácie medznej vrstvy	