



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## NÁVRH AERODYNAMICKÉHO PAKETU FORMULE STUDENT

FORMULA STUDENT AERODYNAMICS PACKET DESIGN

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristián Pikovský

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vondruš

BRNO 2025



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Kristián Píkovský**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vondruš**  
Akademický rok: 2024/25

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 aerodynamického balení Formule Student

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce se zabývá návrhem aerodynamického balení Formule Student pomocí metody CFD. CFD simulace bude poté validována pomocí výsledků z experimentálního měření.

### Cíle bakalářské práce:

Popsat historický vývoj aerodynamiky Formule Student.  
Popsat aktuální návrh aerodynamického balení.  
Popsat proces výpočtu CFD.  
Provést experimentální měření.  
Výsledky CFD simulace validovat pomocí experimentálního měření.

### Seznam doporučené literatury:

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road Vehicles. 4th edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.

ANDERSON, John David. Fundamentals of aerodynamics. 5th ed. New York: McGraw-Hill, c2011. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. ISBN 978-0-07-339810-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na soutěž Formule Student, pravidla pro aerodynamické prvky a vývoj aeropaketů týmu TU Brno Racing. V práci je detailně popsán aerodynamický balíček monopostu Dragon e4. Samostatná část je věnována CFD simulacím, které slouží k návrhu a optimalizaci aeropaketů. Hlavním přínosem této práce je validace CFD simulací pomocí experimentálních dat. K tomuto účelu byly využity dvě měřicí aparatury – tlakové pásy a rastrová sonda. Výsledky experimentů odhalily slabiny v přesnosti simulací i měření, na jejichž základě jsou navržena konkrétní řešení pro jejich zlepšení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Validace, CFD simulace, experimentální měření, Formule Student, aerodynamika, tlakové pásy, rastrová sonda

## ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the Formula Student competition, the rules for aerodynamic elements, and the development of aeropackages by the TU Brno Racing team. The thesis provides a detailed description of the aerodynamic package of the Dragon e4 race car. A separate section is dedicated to CFD simulations, which are used for the design and optimization of aeropackages. The key contribution of this work is the validation of CFD simulations using experimental data. For this purpose, two measuring devices were employed – pressure strips and an aero rake. The experimental results revealed shortcomings in the accuracy of both the simulations and the measurements, based on which specific solutions for improvement are proposed.

## KEYWORDS

Validation, CFD simulations, experimental measurement, Formula Student, aerodynamics, pressure strips, aero rake

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PIKOVSKÝ, Kristián. *Návrh aerodynamického paketu Formule Student*. Online, bakalářská práce. Jan VONDRUŠ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165963>.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vondruše a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 22. května 2025

.....

Kristián Pikovský

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Vondrušovi za odborné vedení a cenné připomínky během vypracovávání této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat studentskému týmu TU Brno Racing, společnosti Škoda Auto a.s. a projektu Metacentrum.

Výpočetní zdroje byly poskytnuty v rámci projektu e-INFRA CZ (ID:90254), podpořeného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

# OBSAH

Úvod.....	11
<b>1 Formule Student .....</b>	<b>12</b>
1.1 Soutěž Formule Student .....	12
1.2 Historický vývoj aerodynamiky Formule Student.....	13
1.2.1 Současná pravidla pro aerodynamické prvky .....	13
1.2.2 Změny v pravidlech pro aerodynamické prvky .....	15
1.2.3 Historický vývoj aerodynamiky týmu TU Brno Racing .....	15
<b>2 Monopost Dragon e4 .....</b>	<b>18</b>
2.1 Koncept monopostu .....	18
2.2 Aeropaket monopostu.....	18
2.2.1 Přední křídlo .....	18
2.2.2 Boční podlahy.....	19
2.2.3 Zadní křídlo .....	20
<b>3 CFD .....</b>	<b>21</b>
3.1 Geometrie .....	21
3.2 Doména.....	22
3.3 Síť .....	22
3.3.1 Povrchová síť.....	22
3.3.2 Prismatické vrstvy .....	23
3.3.3 Objemová síť .....	24
3.4 Nastavení řešiče.....	24
3.4.1 Okrajové podmínky .....	25
3.4.2 Turbulentní model .....	25
3.4.3 Prostorová diskretizace.....	26
3.4.4 Inicializace výpočtu.....	27
3.5 Sumarizace simulací.....	27
<b>4 Experimentální měření.....</b>	<b>28</b>
4.1 Měřicí technika .....	28
4.1.1 Tlakové pásky.....	28
4.1.2 Rastrová sonda.....	29
4.2 Příprava měření.....	30
<b>5 Validace CFD pomocí experimentálního měření.....</b>	<b>31</b>
5.1 Tlakové pásky.....	31
5.1.1 Porovnání obou směrů jízdy .....	31
5.1.2 Porovnání rozdílných rychlostí jízdy.....	32
5.1.3 Nepřesnosti měření .....	35
5.1.4 Vyhodnocení validace – tlakové pásky .....	36

---

5.2	Rastrová sonda .....	36
5.2.1	Porovnání simulací pro různé konfigurace monopostu.....	36
5.2.2	Porovnání měření pro různé konfigurace monopostu .....	38
5.2.3	Porovnání měření a simulace .....	38
5.2.4	Nepřesnosti měření .....	39
5.2.5	Vyhodnocení validace – rastrová sonda.....	40
<b>Závěr .....</b>		<b>41</b>
<b>Použité informační zdroje .....</b>		<b>42</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>		<b>45</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>		<b>46</b>
<b>Seznam grafů .....</b>		<b>47</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>		<b>48</b>
<b>Seznam příloh.....</b>		<b>49</b>

## ÚVOD

V oblasti automobilního inženýrství, a především v motorsportu, hraje aerodynamika důležitou roli. Ovlivňuje jízdní vlastnosti vozidla, spotřebu paliva a v motorsportu rozhoduje o úspěchu vozidla na trati. Ačkoliv jsou rychlosti vozů Formule Student relativně nízké, aerodynamika má výrazný vliv na výkonnost monopostu a tím i na výsledky závodů. Hlavním přínosem aerodynamických prvků je zvýšení přítlaku, čímž se zvyšuje normálová síla působící na pneumatiky. Výsledkem je zlepšení trakce při brzdění, zrychlování a průjezdu zatáčkami.

Cílem této bakalářské práce je validovat CFD simulace, využívané v týmu TU Brno Racing, pomocí experimentálního měření. K tomu jsou využity senzory instalované na monopostu, které umožňují sledovat požadované veličiny během jízdy. Dalšími cíli této práce jsou popis historického vývoje aerodynamiky ve Formuli Student, představení aktuálního návrhu aerodynamického balení a přiblížení procesu výpočtu CFD simulace.

Validace CFD simulací pomocí měřených dat je zásadní pro potvrzení přesnosti numerických výpočtů a přiblížení výpočetních modelů reálnému chování proudění. Bez validace postrádají simulace smysl, protože není zřejmé, zda mají jejich výsledky nějakou relevanci.

# 1 FORMULE STUDENT

## 1.1 SOUTĚŽ FORMULE STUDENT

Formule Student (FS) je evropskou verzí původně americké soutěže Formula SAE, která vznikla v roce 1981 v USA. Do Evropy se rozšířila o 17 let později a nyní se koná také v Brazílii, Japonsku, Indii a Austrálii. Celkově se soutěže účastní přes 800 týmů z celého světa. Jedná se o prestižní soutěž univerzitních týmů složených ze studentů bakalářského a magisterského studia. Cílem je postavit vlastní jednomístné závodní auto, které musí být dobře ovladatelné, výkonné, spolehlivé a zároveň bezpečné. Každý tým si musí zajistit veškeré prostředky pro realizaci tohoto náročného úkolu. [1]

Soutěž Formule Student zahrnuje tři hlavní kategorie: se spalovacími motory (*Combustion*), s elektrickými motory (*Electric*) a autonomní vozidla (*Driverless*). Kategorie spalovacích vozů je nejstarší. Elektrická kategorie vznikla v roce 2010, přinesla průlom v bateriových technologiích a elektrických pohonech. Od roku 2017 se rozvíjí autonomní kategorie Driverless, kde se vozy pohybují díky sensorům jako jsou kamery, LiDAR a GPS. Soutěž zahrnuje statické a dynamické disciplíny. Statické disciplíny hodnotí návrh, prezentaci vozu, analýzy nákladů a výrobní udržitelnosti. Dynamické disciplíny testují výkon vozu na trati – od ovladatelnosti na osmičkové dráze (*Skid Pad*), zrychlení na 75 metrech (*Acceleration*), technických schopností na 1 km okruhu až po nejlépe hodnocený vytrvalostní závod na 22 km, kde se současně měří efektivita využití energie (*Endurance, Efficiency*). Tyto disciplíny dohromady prověřují komplexnost návrhu, schopnosti vozidla, členů týmu i řidičů. [2]



Obr. 1: Formula Student Germany 2024 [3]

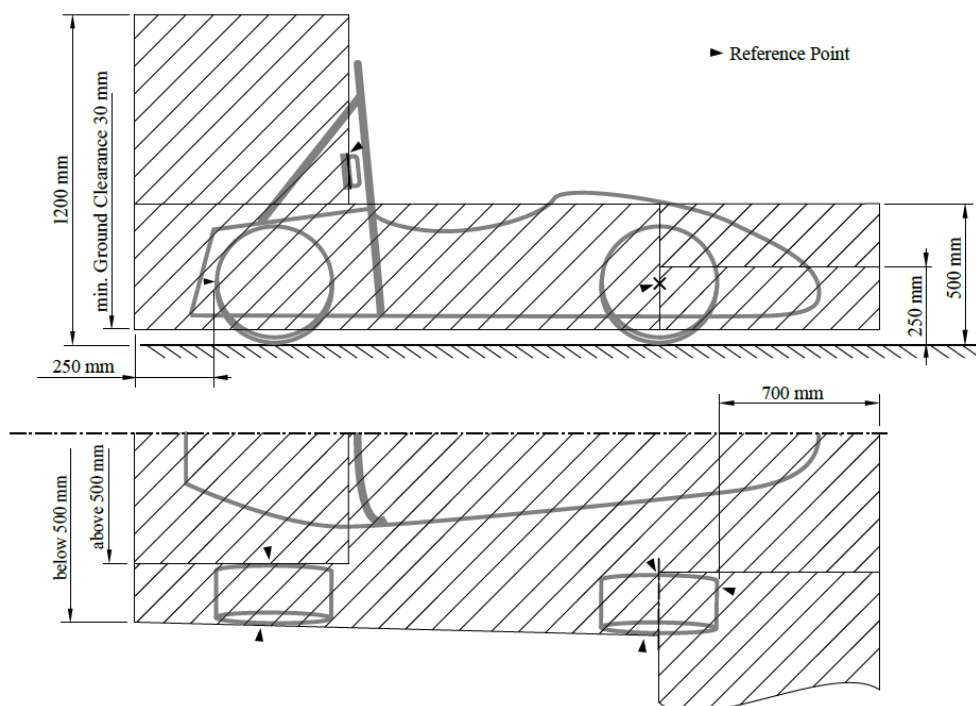
## 1.2 HISTORICKÝ VÝVOJ AERODYNAMIKY FORMULE STUDENT

### 1.2.1 SOUČASNÁ PRAVIDLA PRO AERODYNAMICKÉ PRVKY

Soutěž se řídí přísnými pravidly, která zajišťují bezpečnost, férovost a technickou výzvu pro všechny účastníky [4]. Týmy musí navrhnout, postavit a otestovat monopost odpovídající přesným technickým specifikacím [4]. Pravidla pro soutěže v Evropě se často řídí standardy stanovenými v rámci Formula Student Germany (FSG), která slouží jako referenční základ pro mnoho dalších soutěží.

Dle pravidel je aerodynamický prvek definovaný jako speciálně navržená struktura namontovaná na vozidle za účelem usměrnění proudění vzduchu kolem vozidla, která zvyšuje přítlak působící na vozidlo nebo snižuje jeho aerodynamický odpor. Uchycení této struktury se nepovažuje za aerodynamické zařízení, pokud není záměrně navrženo jako takové. [4]

Tato pravidla stanovují omezení týkající se výšky, šířky a délky aerodynamických prvků ve FS. Aerodynamické prvky musí splňovat specifické výškové limity v různých částech vozidla, přičemž některé části musí být níže než 500 mm nad zemí, zatímco jiné mohou být až 1200 mm vysoko. Šířková omezení se vztahují především k předním a zadním kolům, kde aerodynamické prvky nesmí přesahovat určité hranice. Všechny aerodynamické prvky se musí nacházet v takzvané „obálce“. Na *obr. 2* lze vidět, že šířka obálky před předními koly není omezena. Z hlediska uspořádání závodní tratě však není výhodné, aby šířka aerodynamických prvků před koly byla větší než šířka kol. Pro prostor za hlavou řidiče, který je ve výšce větší než 500 mm nad zemí, začíná obálka od nejzadnější části přední plochy opory opěrky hlavy. [4]

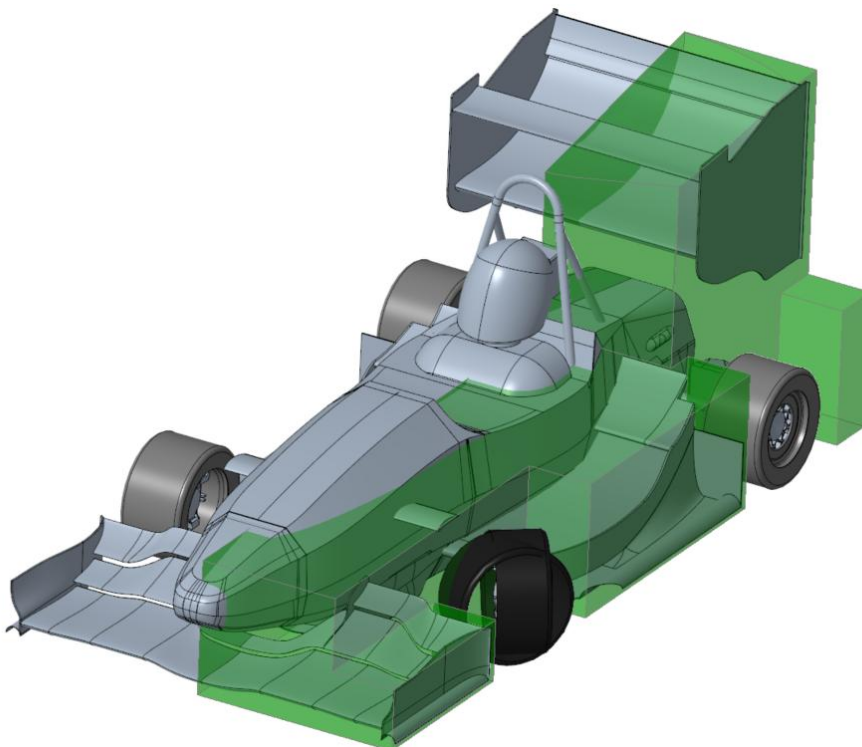


Obr. 2: Schématický obrázek obálky pro aerodynamické prvky [4]

Součástí pravidel jsou i požadavky na pevnost aerodynamických prvků formule. Prvky musí být navrženy tak, aby odolaly specifikovanému zatížení do určité deformace, což zajišťuje jejich bezpečné a efektivní fungování během závodů. Prvky musí zvládnout jak velké síly působící na jejich povrch, tak i menší síly působící v různých směrech. O velikosti zatížení se rozhoduje dle velikosti plochy aerodynamického prvku, na kterou je zatížení aplikováno. [4]

Další pravidlo stanovuje minimální rádiusy aerodynamických prvků vozidla, které by se mohly dostat do kontaktu s chodcem, aniž by došlo k přímému kontaktu s vozidlem. Pro všechny hrany směřující vpřed je tak stanoven minimální rádius 3 mm. Pro ostatní hrany, které nejsou orientovány vpřed, je minimální rádius 1 mm. [4]

V pravidlech se nachází i části, které nejsou přímo definovány pro aerodynamické prvky, ale souvisí s nimi. Jedná se například o Tractive System Active Light (TSAL), které musí být viditelné ze vzdálenosti 3 m horizontálně a výšky 1,6 m. Toto pravidlo je relevantní z toho důvodu, že zadní křídlo může potenciálně omezit viditelnost TSAL. Dalším takovým pravidlem je pravidlo týkající se prostoru okolo kol. Kola a pneumatiky musí být z boku plně viditelné. Žádná část vozidla nesmí zasahovat do prostoru, který se nachází mezi dvěma svislými čarami – 75 mm před a 75 mm za vnějším průměrem předních i zadních kol. Tato zóna sahá vodorovně od vnějšího okraje kola až k jeho vnitřní straně, viz *obr. 3*. Pravidla se vztahují na situaci, kdy jsou rovně natočená kola. Dále je v pravidlech zmíněno, že *sliding skirts* a ostatní aerodynamická zařízení se nesmí dostat do kontaktu s vozovkou. [4]



*Obr. 3:* Obálka v CAD

### 1.2.2 ZMĚNY V PRAVIDLECH PRO AERODYNAMICKÉ PRVKY

Během více než čtyřicetileté historie soutěže docházelo k různým obměnám pravidel pro aerodynamické prvky. Jednalo se například o změny rozměrů obálky, ve které se aerodynamické prvky nacházejí, změny velikosti rádiusů nebo možnost využít tzv. *power ground* efekt, což je využití externích větráků pro zvýšení přtlaku. Dříve se aerodynamické prvky řídily především pravidly FSAE (Formula SAE) a dle dodatků jednotlivých závodů. Od roku 2017 se však aerodynamické prvky staly součástí i pravidel FSG. [3, 4]

V aktuálních pravidlech pro sezónu 2025 se kromě definice prostoru, ve kterém se nachází aerodynamické prvky, objevují další doplňující pravidla. Například pro sezónu 2025 je definovaný maximální jmenovitý výkon 500 W pro aktivní zařízení, které je určené k pohybu vzduchu. Tento výkon se vztahuje na součet všech takových zařízení včetně chladících ventilátorů. Toto pravidlo de facto zamezuje využití *power ground* efektu. [4]

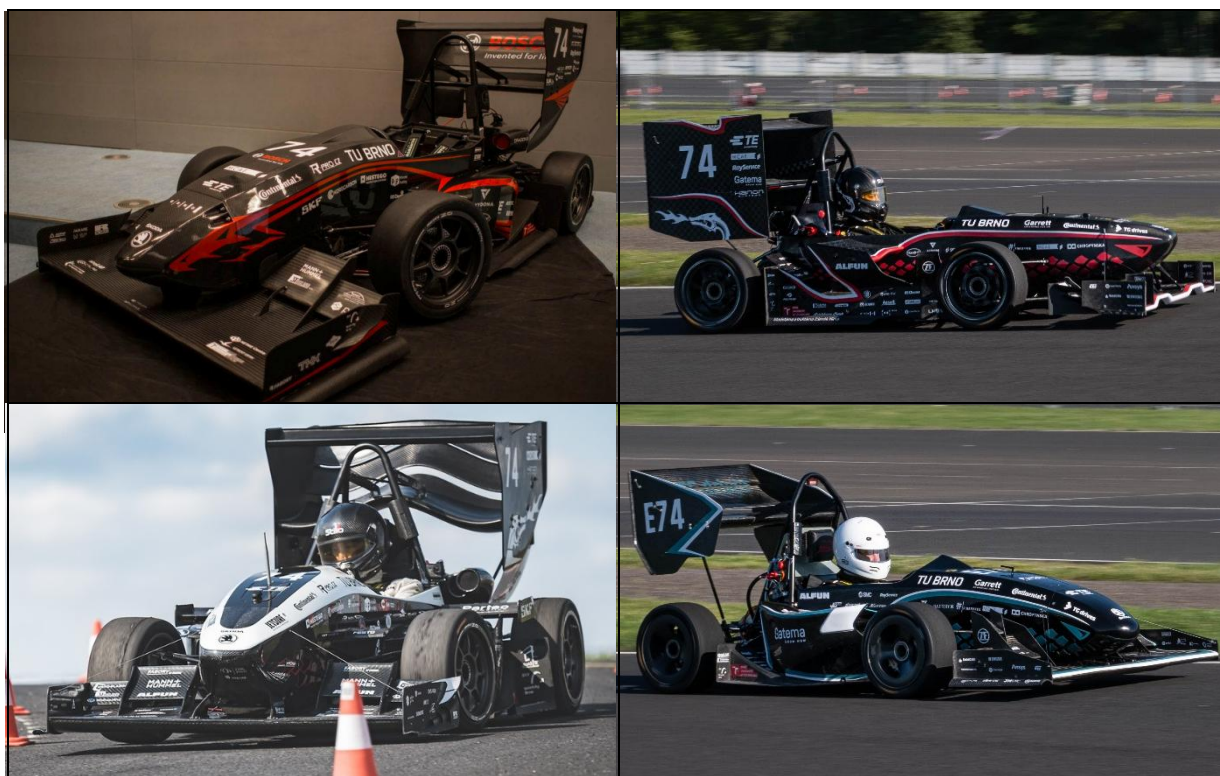
### 1.2.3 HISTORICKÝ VÝVOJ AERODYNAMIKY TÝMU TU BRNO RACING

V počátcích své existence se tým zaměřoval především na základní konstrukční aspekty vozidla, jako jsou rám, zavěšení a pohonná jednotka. Až do roku 2014, tedy v prvních třech sezónách, vozy tohoto týmu nevyužívaly žádný aerodynamický paket. První významný krok směrem k aerodynamickému zlepšení byl realizován v sezóně 2014, kdy tým představil svůj čtvrtý monopost s názvem Dragon 4 (*obr. 4*). Tento vůz byl vůbec prvním modelem TU Brno Racing, který disponoval plnohodnotným aerodynamickým balíčkem. [5]



Obr. 4: Dragon 4 (vlevo nahoře) [26], Dragon 5 (vlevo dole) [27], Dragon 6 (vpravo nahoře) [5], Dragon 7 (vpravo dole) [5]

V následující sezóně na monopostu Dragon 5 (*obr. 4*) došlo k významné změně pravidel ze strany FSAE. Konkrétně se jednalo o úpravu pravidel týkajících se maximální povolené šířky zadního křídla. Zatímco v předchozích letech byla šířka zadního křídla určována na základě vnějších hran pneumatik, od sezóny 2015 bylo nově určeno, že šířka nesmí přesáhnout vnitřní okraj pneumatik. Po úpravách vynucených změnou pravidel v sezóně 2015 zůstal aerodynamický koncept na voze Dragon 6 (*obr. 4*) víceméně nezměněn. Zásadní aerodynamická revoluce nastala až s příchodem modelu Dragon 7 (*obr. 4*) v roce 2017. Nejvýznamnější změnou na tomto monopostu byla implementace bočních podlah s integrovanými difuzory, které se táhly podél celého vozu. Velkou změnou prošlo také přední křídlo. [5]



*Obr. 5:* Dragon 8 (vlevo nahoře) [28], Dragon 9 (vlevo dole) [5], Dragon X (vpravo nahoře) [5], Dragon e1 (vpravo dole) [5]

V roce 2018 představil tým model Dragon 8 (*obr. 5*), kde byl zachován základní koncept z předchozí sezóny, avšak došlo k řadě evolučních úprav. Na bočních podlahách se nově objevil *bargeboard*, který slouží k odklonění úplavu za předním kolem od monopostu [6]. Zbytek bočních podlah byl dále tvarově optimalizován a upraven s cílem maximalizovat jejich funkčnost. Podstatnou změnou prošel i zadní difuzor – zatímco u předchozích generací byl rozdělen do dvou částí, u Dragonu 8 byl implementován jednotný centrální difuzor, který poskytoval vyšší účinnost. Zadní křídlo rovněž doznalo úprav. Byly přepracovány bočnice a nad hlavní kaskádu elementů byl přidán jeden další element. [5]

Další krok ve vývoji představoval Dragon 9 (*obr. 5*) z roku 2019, kde tým pokračoval v evolučním vývoji aerodynamiky. Novinkou byl tzv. negativní element umístěný v oblasti předních kol, který měl za úkol směřovat více vzduchu do chladičů v bočnicích. Dalším přidavným prvkem byl *sidewing*, což je přítláčné křídlo nacházející se nad bočními podlahami. I samotné podlahy prošly drobnou optimalizací tvaru, stejně jako zadní difuzor. Zadní křídlo zaznamenalo výraznou změnu – celá jeho kaskáda byla výrazně prohnuta. [5]

Model Dragon X (*obr. 5*), z roku 2021, se dočkal kompletního přepracování předního křídla. Zásadní novinkou byl také zadní difuzor, který využíval externích větráků. Dragon X představoval konec éry spalovacích formulí týmu TU Brno Racing. Ve stejném roce se také představila první elektrická formule týmu, která využívala aeropaket a základy monopostu Dragon 7. Nesla označení Dragon e1 (*obr. 5*). První elektrickou formulí s vlastním aerodynamickým balíčkem se stal v roce 2022 Dragon e2 (*obr. 6*). Tento monopost byl vůbec první monopost v historii týmu, který nevyužíval difuzor. Důvodem odstranění tohoto prvku byla hlavně obtížná zástavba s monokokem. Model Dragon e3 (*obr. 6*) navázal na předchozí elektrický koncept a přinesl řadu evolučních úprav. Jednou z nejvýznamnějších změn bylo nové umístění chladičů za zadními koly, které mělo za cíl nejen zlepšit účinnost chladičů, ale také zlepšit proudění přes boční podlahy [7]. [5]



*Obr. 6:* Dragon e2 (vlevo) [5], Dragon e3 (vpravo) [5]

## 2 MONOPOST DRAGON E4

### 2.1 KONCEPT MONOPOSTU

Dragon e4 (eD4) je čtvrtým monopostem týmu TU Brno Racing, který má elektrický pohon. Především monopost Dragon e3 se ve světovém žebříčku umístil na 15. místě [8]. Koncept monopostu se zachoval stejný jako v předšlém roce. Dragon e4 (*obr. 7*) má poháněnou zadní nápravu synchronními motory pro obě kola, planetovou převodovku s přímým ozubením, karbonový celokompozitní monokok, odpružení roll-heave s pull-rodem vepředu a push-rodem vzadu [9]. Pull-rod na přední nápravě je specifickou odlišností monopostu eD4 oproti většině studentských formulí, které využívají push-rod na přední nápravě [9]. Výhodou pull-rodu je nižší poloha těžiště, která zlepšuje ovladatelnost vozu [10].



Obr. 7: Dragon e4 [5]

### 2.2 AEROPAKET MONOPOSTU

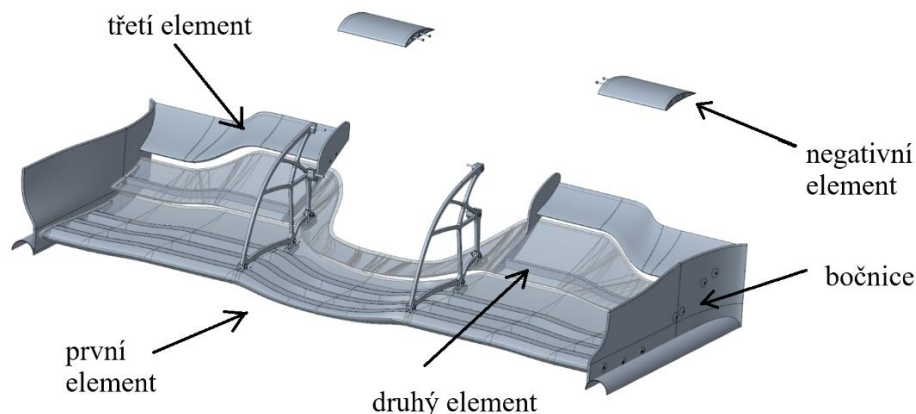
#### 2.2.1 PŘEDNÍ KŘÍDLO

Přední křídlo (*obr. 8*) je první část aeropaketu, která se dostává do kontaktu se vzduchem. Je proto důležité z hlediska rozložení výsledné aerodynamické síly mezi přední a zadní nápravou, jelikož významně ovlivňuje proudění celého aeropaketu. Přední křídlo vytváří výrazný přítlak zejména díky přízemnímu efektu, a to i přesto, že jeho plocha je menší než u zadního křídla a bočních podlah. Nevýhodou předního křídla je jeho blízkost k vozovce, což ho činí citlivým na pohyby vozidla, jako je klopení a naklánění během jízdy.

Přední křídlo monopostu eD4 je rozdělené na tři elementy, přičemž 1. a 2. element se rozprostírá po celé šířce monopostu. Bočnice předního křídla jsou zahnuté kvůli nasměrování vzduchu od předního kola, kde vzniká nepříznivý úplav za rotujícím kolem. Na vnější straně bočnice

se nachází tunel, který má za cíl vytvořit bariéru mezi volným prouděním a spodní stranou křídla vytvářející přítlak.

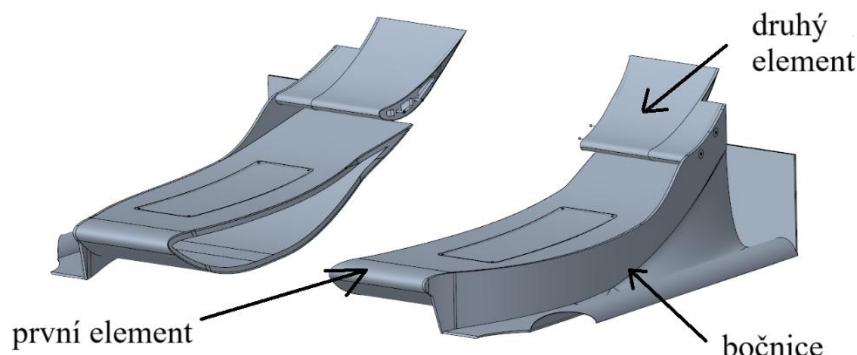
Za předním křídlem se nachází tzv. negativní element. Ten nevytváří přítlak, ale vztlak. Jeho význam je v nasměrování vzduchu do bočních podlah a na zadní křídlo. Je důležitý z hlediska rozložení aerodynamických sil mezi přední a zadní nápravou.



Obr. 8: Přední křídlo s negativem Dragonu e4

### 2.2.2 BOČNÍ PODLAHY

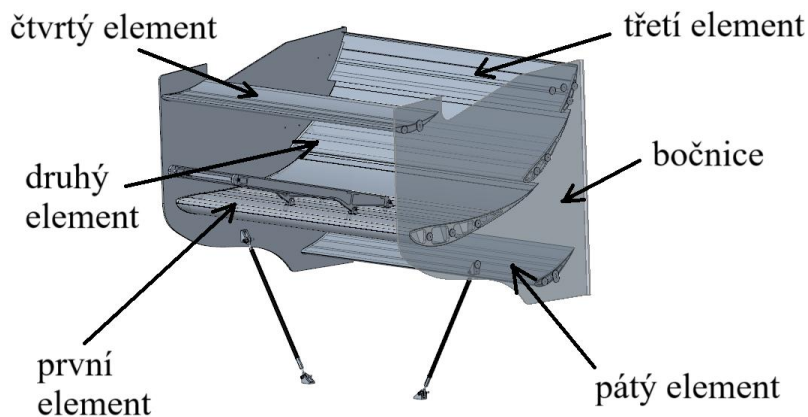
Boční podlahy jsou prvky umístěné po stranách vozu mezi přední a zadní nápravou, vedle prostoru pro řidiče (obr. 9). Boční podlahy využívají přízemního efektu k vytváření přítlačné síly a vyznačují se vysokou účinností – poměr mezi vyprodukovaným přítlakem a aerodynamickým odporem je u nich vyšší než u ostatních částí aerodynamického balíčku. Boční podlahy svou polohou mezi přední a zadní nápravou příliš neovlivňují podélnou polohu *Center of Pressure* (CoP), což je místo působení výsledné aerodynamické síly. Součástí bočních podlah jsou také tunely na bočnicích, které mají stejnou funkci jako tunely na předním křídle.



Obr. 9: Boční podlahy eD4

### 2.2.3 ZADNÍ KŘÍDLO

Zadní křídlo (*obr. 10*) je ve směru proudění vzduchu poslední část aeropaketu. Nachází se mezi zadními koly a ve srovnání se zbytkem aeropaketu poměrně vysoko, aby na zadní křídlo proudil co nejčistší vzduch. Svou polohu v zadní části monopostu zvyšuje výslednou aerodynamickou sílu na zadní nápravě a pomáhá tak stabilitě vozu při jízdě. Jelikož se zadní křídlo nachází za ostatními aerodynamickými prvky, šasi a řidičem, je těmito částmi vozu negativně ovlivněno. Zadní křídlo monopostu eD4 se skládá z hlavní kaskády tří elementů, které vytváří většinu přítláčné síly zadního křídla. Dále se nachází jeden element nad hlavní kaskádou a další pod ní.



*Obr. 10: Zadní křídlo eD4*

### 3 CFD

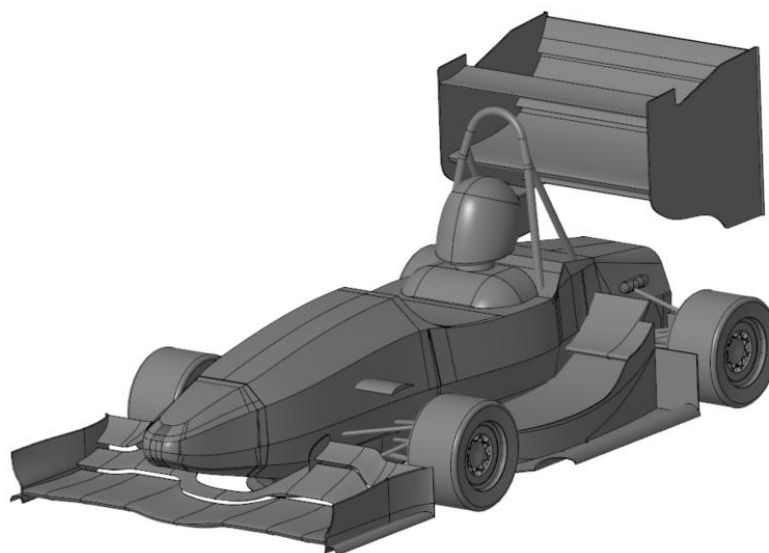
Computational fluid dynamics (CFD) je věda, která předpovídá pohyb proudění, přenos hmoty a tepla, chemické reakce a s nimi spojené jevy. Využívá k tomu numerické metody, kterými jsou řešeny rovnice popisující tyto jevy. [11]

Řešení a síťování pro účely této práce jsou prováděny v programu Ansys Fluent za využití výpočetních zdrojů virtuální organizace MetaCentrum.

#### 3.1 GEOMETRIE

Model monopostu eD4 je pro CFD zjednodušený oproti skutečnému vozu z důvodu urychlení výpočtů a zlepšení kvality sítě (*obr. 11*). Zjednodušení se týká například zanedbání držáků předního křídla, zadního křídla, prostoru uvnitř monokoku, náfuků, hadic, kabeláže, šroubů, matic atd. Pro zamezení problémů se síťováním jsou na koncích profilů zařezány odtokové hrany. V této zjednodušené geometrii formule se nenachází geometrie senzorů, které byly použity pro potřeby této práce.

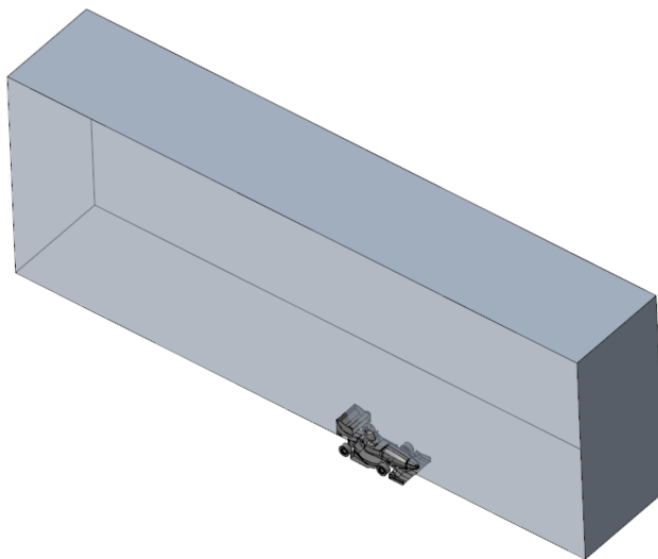
Geometrie je vytvořena v programu Creo Parametric a následně exportována pomocí univerzálního souboru (.step) do programu SpaceClaim, kde se pomocí skriptu upraví geometrie formule podle požadované jízdní výšky. Změnou jízdní výšky se posouvají kinematické body na vozu. Mezi těmito body a kinematickými body na těhlici jsou pak vytvořena ramena zavěšení.



*Obr. 11:* Zjednodušená geometrie monopostu

## 3.2 DOMÉNA

Pro účely této práce je doména ve tvaru kvádrů (*obr. 12*) a je zde využito symetrie pro zjednodušení výpočtů. Délka domény je přibližně třikrát délka monopostu dopředu a pětkrát délka monopostu dozadu. Šířka domény je zhruba šestkrát šířka monopostu a výška domény je okolo sedminásobku výšky monopostu. Dostatečná velikost domény je důležitá proto, aby okrajové podmínky na stěnách domény neměly vliv na výslednou simulaci proudění [12].



*Obr. 12:* Doména

## 3.3 Síť

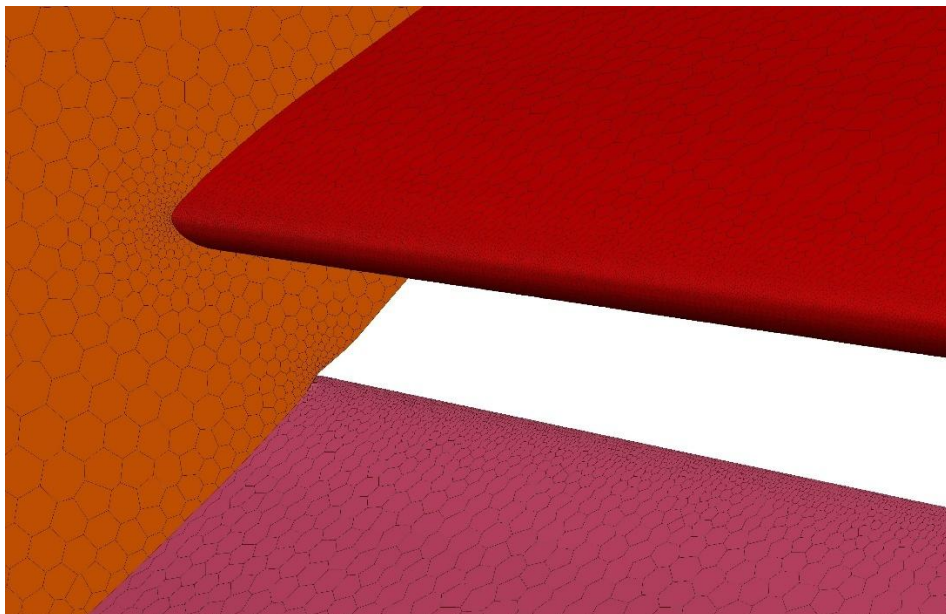
Síť je základní prvkem metody konečných objemů, která se využívá v CFD. Rozděluje doménu na konečný počet výpočetních buněk (tzv. kontrolních objemů), ve kterých jsou během výpočtu řešeny soustavy rovnic popisující proudění tekutin (v tomto případě vzduchu) [13]. Kvalita sítě ovlivňuje přesnost a výpočetní náročnost simulace. Síť také ovlivňuje, jak kvalitně je vymodelována geometrie ploch [12].

### 3.3.1 POVRCHOVÁ SÍŤ

První operace při vytváření sítě je tvorba povrchové sítě, která představuje diskretizaci povrchu geometrie na menší plochy [13]. Povrchová síť slouží jako podklad pro následující objemovou síť, proto musí být dostatečně jemná, aby postihla velké zakřivení v některých částech geometrie [12].

Pro zjemnění geometrie je využito tzv. *scoped-sizing*, který umožňuje řídit rozložení velikosti sítě na povrchu nebo uvnitř objemu [14]. Pro zakřivené plochy se jedná o zjemnění povrchové sítě v závislosti na zakřivení povrchu. To lze vidět na *obr. 13*, kde pomocí této funkce došlo

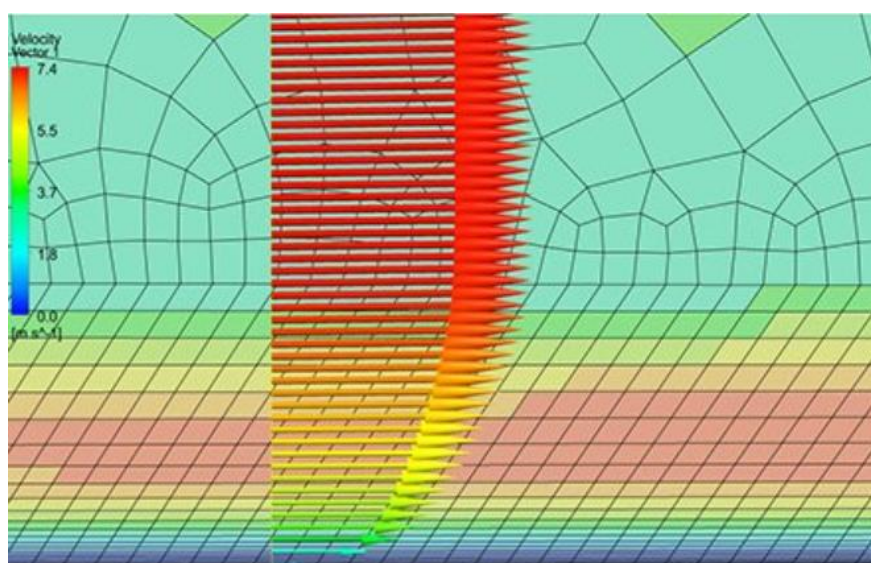
k zjemnění sítě na náběžné hraně elementu. Dále je využito funkce *scoped-sizing* u geometrie, kde se nachází hrany o malých rozměrech. Pomocí funkce *proximity sizing* lze na tyto hrany vytvořit dostatečně malé buňky, které zajistí, aby se hrana nezdeformovala [12].



Obr. 13: Povrchová síť na elementech předního křídla

### 3.3.2 PRISMATICKÉ VRSTVY

Prismatické vrstvy se při CFD simulacích využívají kvůli detailnímu popsání rychlostního profilu v blízkosti stěny (obr. 14). Důvodem pro vytvoření prismatických vrstev je tvorba mezní vrstvy při proudění tekutiny kolem stěn. Pro popis sítě v blízkosti stěny se využívá bezrozměrná veličina  $y^+$ , která je důležitá pro volbu správného turbulentního modelu. [12]



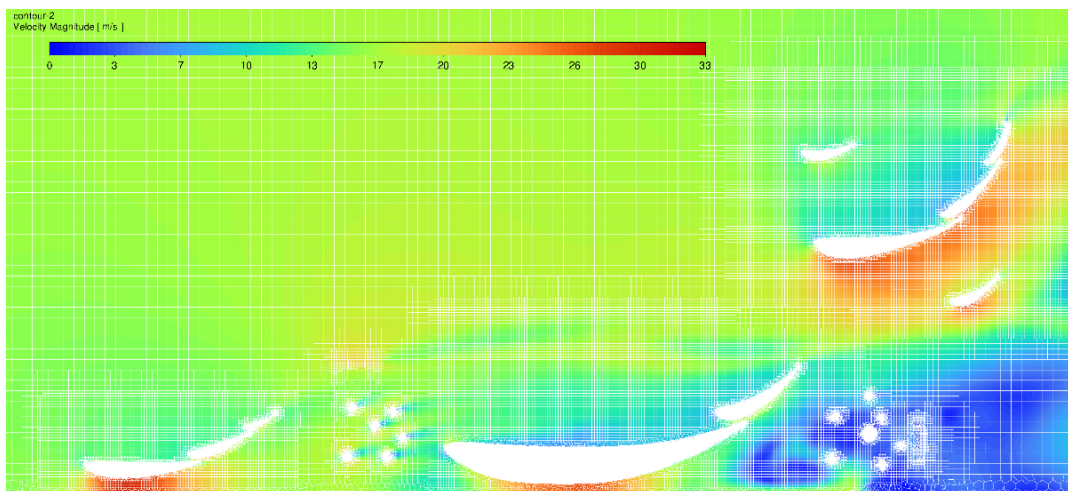
Obr. 14: Prismatické vrstvy [15]

### 3.3.3 OBJEMOVÁ SÍŤ

Cílem objemové sítě je vytvoření trojrozměrných buněk nacházejících se v prostoru mezi stěnami, na kterých byla vytvořená povrchová síť. Velikost buněk se liší v závislosti na jejich umístění. U povrchu se nachází již zmiňované prismatické vrstvy, ve kterých se nacházejí nejmenší buňky. Za prismatickými vrstvami se nachází buňky ve tvaru mnohostěnů, které se vzdáleností od povrchu zvětšují. Nakonec se generují krychle, které slouží pro zjednodušení a urychlení výpočtu. Počet buněk v objemové síti je klíčový faktor na výpočetní nároky a důvěryhodnost výsledků. [12]

Pro robustnost výpočtu je kontrolována kvalita vygenerovaných buněk pomocí parametru skewness, který popisuje zkosení buněk od ideálního tvaru. Buňky, které jsou vyhodnoceny jako příliš zkosené jsou pomocí korekčních nástrojů opraveny. Dalším kontrolovaným parametrem je *aspect ratio*, který vyjadřuje poměr mezi nejdelším a nejkratším rozměrem buňky. Buňky s vysokým *aspect ratio* se vytvářejí často v oblasti prismatických vrstev, které mají nízkou výšku. [12]

Dále je využito funkce *body of influence*, která umožňuje určit oblast pro řízení velikosti sítě. Pro tuto oblast se specifikuje maximální velikost buněk. To lze vidět na *obr. 15*, kde jsou vidět oblasti ve tvaru obdélníku, ve kterých je zjemněná síť. Minimální velikost buněk je určena na základě vlivu dalších *scoped-sizing* funkcí, které jsou nadřazené. Tyto oblasti byly vytvořeny v místech geometrie, kde je podstatné mít dostatečně jemnou síť pro zajištění přesnosti výsledků. [16]



Obr. 15: Body of influence

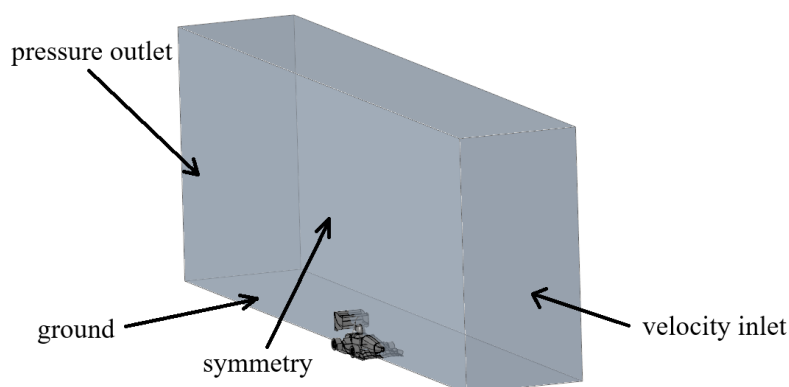
## 3.4 NASTAVENÍ ŘEŠIČE

Simulace je řešena stacionárně a pomocí *Pressure-Based* řešiče, který se používá pro subsonické proudění, kde nedochází ke stlačení vzduchu [17]. *Pressure-Based* řešič provádí diskretizaci rovnic hybnosti a kontinuity [18]. K propojení tlakového a rychlostního pole slouží *Pressure-Velocity Coupling*, který pomocí rovnic proudění upravuje rovnici kontinuity k odvození dodatečné podmínky pro tlak [18]. Ten je nastaven, aby řešil rovnice proudění

segregovaným způsobem. Segregovaná metoda vede k rychlejšímu výpočtu na iteraci, ale za cenu většího počtu iterací ke konvergenci simulace [14].

### 3.4.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky jsou vstupní a výstupní parametry proudění pro výpočetní řešení úlohy. Na stěně domény před geometrií monopostu je využita okrajová podmínka *velocity inlet*. Pomocí této okrajové podmínky je možné nastavit požadovanou rychlost volného proudění, což lze také chápat jako rychlost, kterou se monopost pohybuje. Stěna na výstupu z domény je nastavena jako *pressure outlet* a je rovna hodnotě atmosférického tlaku neboli nulovému relativnímu tlaku. Stěna představující vozovku je nastavená jako *moving wall* se stejnou rychlostí a směrem jako volné proudění. Na obr. 16 je tato okrajová podmínka nazvaná jako *ground*. Protože simulace má představovat jízdu formule po rovině, je využito okrajové podmínky *symmetry*, která rozděluje monopost na dvě půlky. Na zbylých stěnách domény je aplikovaná okrajová podmínka *wall* s nulovým smykovým třením na povrchu [19]. Další místem, kde jsou definovány okrajové podmínky jsou kola. Pro stěny představující vnější povrch pneumatiky je zadána okrajová podmínka *moving wall* s rotací dopočítanou z rychlosti volného proudění a poloměru pneumatiky [12]. Pro prostor uvnitř kola je aplikována metoda Moving Reference Frame (MRF). Volba okrajových podmínek je základní nastavení pro dosažení fyzikálně správných výsledků.

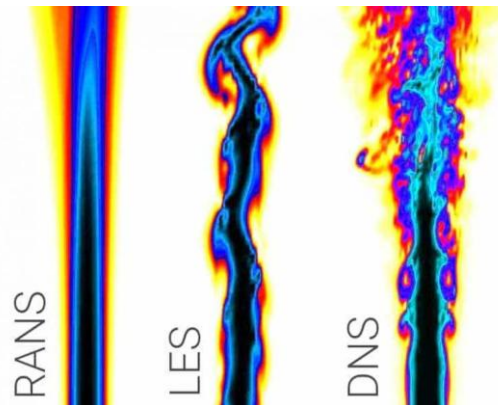


Obr. 16: Okrajové podmínky na doméně

### 3.4.2 TURBULENTNÍ MODEL

Turbulentní model představuje nástroj pro modelování turbulence. Turbulence by kvůli své chaotické povaze byla velmi náročná na Direct Numerical Solution (DNS). Toto řešení dokáže postihnout i nejmenší tvorbu vírů. Pro možnost použití této metody by byla nutná velmi jemná výpočetní síť a tím pádem je velmi vysoká výpočetní náročnost. Nejpřesnějším turbulentním modelem, když nepočítáme přímé numerické řešení, je metoda Large Eddy Simulation (LES), která řeší rovnice proudění přímo pro velké víry a malé víry modeluje. Méně přesným turbulentním modelem je Detached Eddy Simulation (DES). Tento hybridní turbulentní model kombinuje LES pro zachycení vírů v oblastech volného proudění a Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) pro modelování turbulence v blízkosti stěn [20].

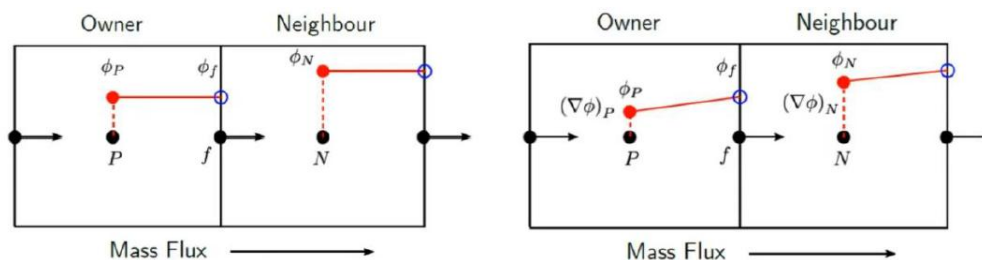
Nejméně náročným turbulentním modelem je samotný RANS, kde jsou rovnice proudění zprůměrovány v čase. Tímto zjednodušením přibývají do rovnic tzv. Reynoldsova napětí. Pro účely této práce byl zvolen turbulentní model RANS  $k-\omega$  SST, díky kterému je možno řešit simulaci stacionárně. Další výhodou oproti ostatním RANS modelům je poměrně dobré zachycení odtržení mezní vrstvy. Pro správnou funkci tohoto turbulentního modelu je potřeba dosahovat vhodné hodnoty  $y^+$ . Pro kvalitní vykreslení mezní vrstvy je potřeba, aby hodnota  $y^+$  byla menší než 5. Na *obr. 17* se nachází schématické zobrazení různých druhů modelování turbulence. [12]



*Obr. 17:* Porovnání různých modelování turbulence [21]

### 3.4.3 PROSTOROVÁ DISKRETIZACE

Prostorovou diskretizací je v tomto případě myšleno interpolační schéma pro prostorovou diskretizaci, které využívá interpolace počítaných veličin mezi aktuální buňkou a buňkou následující po směru proudění [12]. Interpolace se využívá k odhadnutí hodnoty veličiny na společné stěně mezi buňkami, která je důležitá pro určování gradientů veličin mezi buňkami. Mezi základní diskretizační schémata řadíme diskretizaci prvního a druhého řádu. Diskretizace prvního řádu předpokládá, že hodnota ve středu buňky odpovídá průměrné hodnotě v celé buňce a hodnota zůstává v celém objemu buňky konstantní. Hodnota pro stěnu buňky je tak rovna hodnotě ve středu buňky, která se nachází proti směru proudění (*upstream* buňka). Při diskretizaci druhého řádu je uplatněna lineární interpolace pro získání hodnoty na stěně buňky. Hodnota na stěně buňky je dopočítána pomocí rozvoje Taylorovy řady kolem těžiště buňky. Při použití tohoto schématu je dosaženo vyšší přesnosti, ale často vede k horší konvergenci výpočtu. Schématické porovnání mezi oběma schématy lze vidět na *obr. 18*. [18]



*Obr. 18:* Interpolační schéma prvního řádu (vlevo) a druhého řádu (vpravo) [19]

Teoreticky by při vytvoření velmi jemné sítě nemělo záležet, zda je využita prostorová diskretizace prvního nebo druhého řádu. V simulacích pro účely této práce je využíváno interpolační schéma prvního řádu. Při pokusu vypočítat simulaci s diskretizací druhého řádu docházelo k divergenci výpočtu.

#### 3.4.4 INICIALIZACE VÝPOČTU

Inicializace výpočtu zahrnuje nastavení počátečních podmínek pro výpočetní síť. Jedná se o prvotní odhad hodnot veličin v buňkách domény [17]. První možností je standardní inicializace, která dosazuje do všech buněk stejnou hodnotu [12]. Tato možnost je dostatečná pro jednoduché simulace [14]. Další možností je hybridní inicializace, která využívá interpolaci okrajových podmínek [18]. K vytvoření odhadu rychlostního a tlakového pole je řešena Laplaceova rovnice [18]. Tato metoda je výchozím nastavením inicializace ve Fluentu a pro méně složité simulace vede k úspěšné inicializaci výpočtu. Pro inicializaci simulace pro tuto práci je využito výsledků z předchozích simulací jako vstupních hodnot, což snižuje počet iterací pro dosažení dostačující konvergence simulace.

### 3.5 SUMARIZACE SIMULACÍ

V *tabulce 1* se nachází přehled základních parametrů simulace.

*Tabulka 1: Shrnutí CFD simulace*

Druh použitých prvků	Poly-hexcore
Počet buněk	40 mil.
Počet iterací	800–1000 (dle konvergence)
Výpočetní čas	6–10 h na clusteru (20 CPU, 200 GB RAM)

Byla provedena kontrola nezávislosti jemnosti sítě na výsledcích. Pro hodnotu 40 mil. buněk došlo k ustálení sledovaných hodnot jako je např. přítlak nebo odpor. Při dalším zvyšování počtu buněk docházelo již jen k malým změnám těchto hodnot, ale za cenu navýšení výpočetního času. Za podmínku úspěšné konvergence výpočtu je považováno klesnutí residuí pod  $10^{-4}$  a ustálení sledovaných veličin.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Experimentální měření probíhalo ve spolupráci se společností Škoda Auto a.s., která připravuje validační měření aerodynamiky vozů Formule Student. Testování probíhalo na polygonu Škoda Auto v Úhelnici u Mladé Boleslavi. Měření se uskutečnilo s monopostem eD4, jemuž se věnuje 2. kapitola této práce.

Pro experimentální měření byly využity dva typy měřicí techniky. Prvním z nich jsou tlakové pásky, které měří rozložení tlaku na profilech křídlel. Sledovanou veličinou byl statický tlak, na jehož základě se na jednotlivých křídlech vytváří přitlačná síla. Tento údaj je následně využit pro validaci CFD simulací v následující kapitole. Druhým měřicím zařízením byla rastrová sonda, která slouží k vykreslení tlakového pole v rovině kolmé na směr jízdy (proudění). Pomocí rastrové sondy byl měřen celkový tlak, jenž vyjadřuje celkovou energii proudícího vzduchu [22]. Měření probíhalo se dvěma konfiguracemi monopostu. Sledovala se změna tlakového pole za předními koly při různých konfiguracích, která byla následně porovnávána s výsledky CFD simulací.

### 4.1 MĚŘICÍ TECHNIKA

#### 4.1.1 TLAKOVÉ PÁSKY

Tlakové pásky (*obr. 19*) slouží pro měření tlakového pole podél povrchu tělesa, kolem kterého obtéká vzduch. Použité pásky, vyrobené firmou 4Jtech s.r.o., se skládaly z 24 miniaturních absolutních tlakových senzorů, rozmístěných s roztečí 10 mm na ohebném pásku. Díky flexibilitě materiálu mezi senzory bylo umožněno jednoduché přizpůsobení pásku na zakřivený povrch. [23]

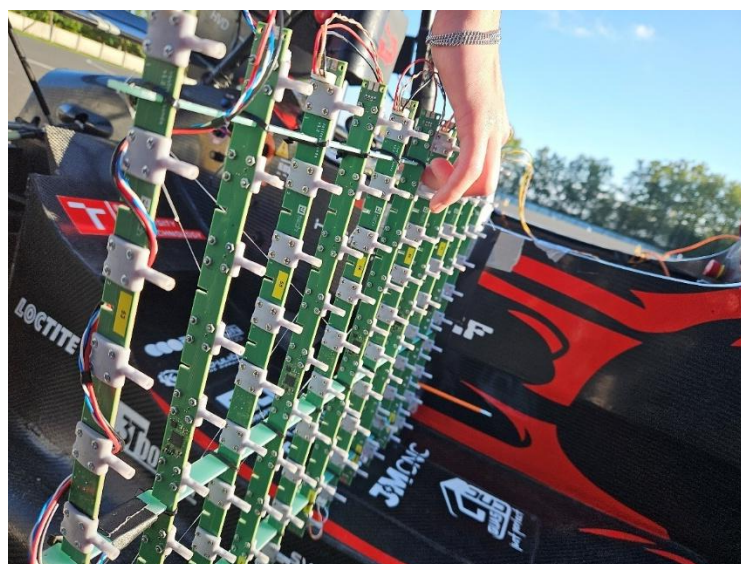


*Obr. 19:* Tlakový pásek

Každý pásek je na koncích vybaven konektory, které umožňují spojování více pásků do delších měřících úseků. Sensory měří absolutní barometrický tlak, nicméně pro potřeby aerodynamického měření je potřeba měřit tlak relativní. K tomuto účelu se využívá samostatný referenční pásek, čímž se zároveň odstraní teplotní závislost jednotlivých sensorů. Každý senzor je individuálně kalibrován, přičemž doporučený interval opětovné kalibrace je 24 měsíců. Celková přesnost sensorů činí  $\pm 60$  Pa a rozdíl mezi jednotlivými senzory je  $\pm 20$  Pa. Maximální vzorkovací frekvence sensorů je 200 Hz při zapojení 10 pásků na jedné sběrnici. Při vyšším počtu pásků připojených na jednu sběrnici frekvence klesá, přičemž při 20 páscích je frekvence 100 Hz. Pro účely tohoto měření bylo využito 20 pásků na jednu sběrnici. Celková výška jednotlivých sensorů nepřekračuje 1,25 mm, což je podstatné pro neovlivnění obtékání vzduchu v mezní vrstvě. [23, 24]

#### 4.1.2 RASTROVÁ SONDA

Rastrová sonda (*obr. 20*) je modulární digitální sonda celkového tlaku, vyvinutá společností 4Jtech s.r.o., kterou lze skládat do mříží (rastru) a mapovat tak tlakové pole v blízkém okolí monopostu [24]. Využívá stejné typy sensorů jako tlakové pásky, ale její uspořádání a účel měření se liší. Rastrová sonda je navržena pro měření celkového (stagnačního) tlaku. Tohoto je dosaženo pomocí speciální trubičky, která směřuje proudící vzduch přímo na senzor do bodu, kde dochází ke zpomalení proudění až do nulové rychlosti – tzv. stagnační bod. V tomto bodě se kinetická energie proudění přemění na tlakovou energii, a tím pádem je na senzoru naměřen celkový tlak, který je součtem statického a dynamického tlaku. Na tomto principu funguje například Pitotova trubice, která se využívá na letadlech pro měření rychlosti. [22]



*Obr. 20:* Rastrová sonda

## 4.2 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Před samotným sběrem dat bylo nutné připravit měřicí techniku k provozu, což zahrnovalo instalaci tlakových pásek a rastrové sondy. Cílem bylo zajistit co nejpřesnější a nejspolehlivější měření bez poškození použitých senzorů.

Tlakové pásky byly aplikovány na jednotlivé elementy předního a zadního křídla, boční podlahy, nos monopostu a také na monokok. Při jejich instalaci byl kladen důraz na umístění, aby neovlivňovaly proudění a také aby se připevněním nepoškodily. Zároveň bylo nutné pásky umístit co nejdále od zdrojů rušení jako například jsou motory a měnič [24]. Pro usnadnění následného vyhodnocení bylo každé měřicí místo označeno a byla také odměřena vzdálenost pásky k vhodnému vztažnému bodu, viz *obr. 21*. Všechny pásky byly propojeny pomocí spojovacích kabelů vedoucích do řídicí jednotky, která byla napájena z akumulátoru formule. Řídicí jednotka byla také propojena LAN kabelem s notebookem pro sběr dat [24].



*Obr. 21:* Měření vzdálenosti pásky

Rastrová sonda vyžadovala pevné a přesné uchycení [24]. Z tohoto důvodu byly navrženy a vyrobeny dva držáky. První držák byl nalepen na horní hranu monokoku a druhý byl přišroubován přímo na monokok. Sonda byla během měření připojena ke stejné řídicí jednotce jako pro tlakové pásky. Měření tak probíhalo separátně, jelikož byla k dispozici jedna řídicí jednotka. Pro dosažení co největší přesnosti měření se rastrová sonda nacházela na druhé straně formule než tlakové pásky.

Kromě senzorů pro měření aerodynamiky byla využita také telemetrická data z *dataloggeru*, která poskytovala informace o rychlosti formule v reálném čase. Dále byly zaznamenávány okolní podmínky, konkrétně teplota vzduchu, atmosférický tlak a rychlost větru, jelikož tyto veličiny výrazně ovlivňují proudění a je třeba je zohlednit při interpretaci dat. Rovněž byla přesně odměřena světlá výška monopostu ve statickém stavu, která ovlivňuje proudění pro elementy využívající přízemní efekt. Pneumatiky byly nahuštěny na tlak 2 bary, aby se minimalizovalo jejich stlačení a tím i nežádoucí změny světlé výšky během měření.

## 5 VALIDACE CFD POMOCÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

### 5.1 TLAKOVÉ PÁSKY

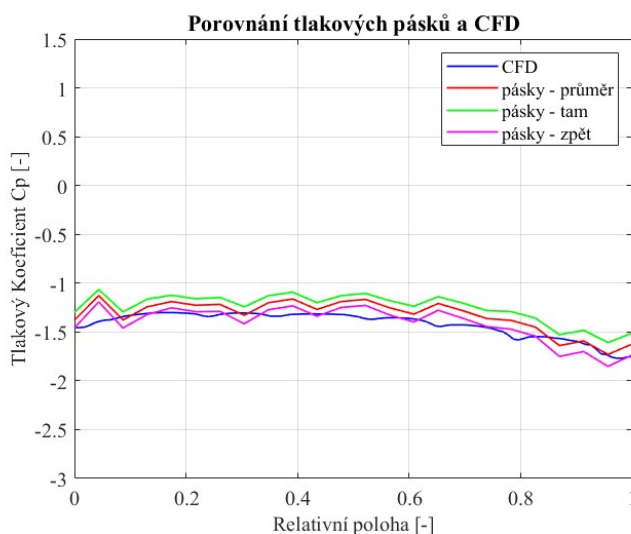
Pro validaci pomocí tlakových pásek byla zvolena jízda po rovince. Jezdilo se při různých rychlostech od 60 km/h až po 100 km/h. Při porovnání hodnot je podstatné se zaměřit na průběhy a trendy než na samotné absolutní hodnoty ze senzorů [24]. Pro přehlednost jsou všechny tlaky z měření i simulace převedeny na tlakový koeficient  $C_p$ , který sjednocuje průběhy nezávisle na rychlosti

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho v^2}, \quad (1)$$

kde  $p$  je statický tlak v konkrétním místě,  $p_\infty$  je statický tlak volného proudění,  $\rho$  je hustota vzduchu a  $v$  je rychlost volného proudění vzduchu (rychlost vozu) [22]. Výpočetní síť je navržena pro simulaci jízdy při rychlosti 60 km/h a pro validaci pomocí tlakových pásek je využito simulace pouze v této rychlosti. Předpokládá se, že při rychlostech 60 km/h až 100 km/h zůstává charakter proudění vzduchu nezměněn [25].

#### 5.1.1 POROVNÁNÍ OBOU SMĚRŮ JÍZDY

Na následujícím grafu bude provedena analýza jízdy v obou směrech. Pro jízdu označenou slovem „tam“ lze z grafu vidět, že hodnoty tlakového koeficientu  $C_p$  mají průměrně nižší hodnoty než při jízdě označené „zpět“. Z toho plyne, že při měření byla nezanedbatelná rychlost větru v den měření. Proto pro zbytek analýzy budou v úvahu brány průměrné hodnoty z obou směrů měření. Toto průměrování ovlivňuje výsledky validace, protože tlakový koeficient závisí na druhé mocnině rychlosti. Pro všechny grafy vyskytující se v kapitole 5.1 platí následující parametry: na ose y se nachází tlakový koeficient  $C_p$ , na ose x se nachází relativní poloha, která nabývá hodnot 0 až 1 a slouží pouze pro správné umístění hodnot z CFD a měření.

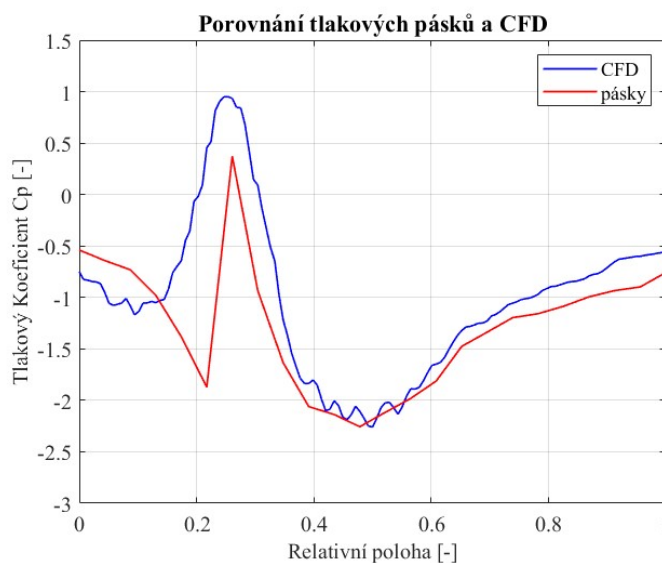


Graf 1: Závislost směru jízdy na výsledcích měření

Na *grafu 1* lze vidět rozložení statického tlaku na sací straně prvního elementu zadního křídla. Z grafu je patrné, že při jízdě směrem „tam“ foukal vítr ve směru jízdy, protože výsledné tlakové rozložení dosahuje nižší hodnoty než u jízdy směrem „zpět“. Je tomu tak, protože relativní rychlost formule vůči vzduchu je menší než při jízdě v bezvětří. Vliv větru je viděn na výsledcích všech tlakových pásek napříč různými rychlostmi jízdy.

### 5.1.2 POROVNÁNÍ ROZDÍLNÝCH RYCHLOSTÍ JÍZDY

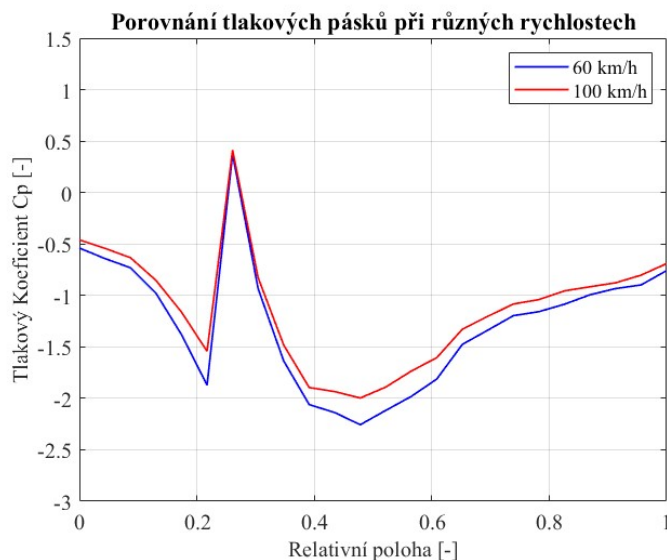
Pro porovnání vlivu rychlosti na výsledky validace bude využito pásku, který se nachází na pátém elementu zadního křídla. Začátek tlakového pásku se nachází na tlakové straně elementu a pokračuje přes náběžnou hranu na sací stranu elementu. *Graf 2* ukazuje porovnání tlakových pásků a výsledku CFD simulací při rychlosti 60 km/h. Pro analýzu je důležitá především sací strana elementu, která má hlavní roli při generování přítlaku. K odlišnostem dochází zejména u náběžné hrany křídla. Hodnota stagnačního bodu v CFD je podle očekávání 1, zatímco při experimentu byla naměřena hodnota okolo 0,4. To může být způsobeno nevhodně nalepeným senzorem, který v místě stagnačního bodu změnil podobu proudění. Dále je velmi obtížné nalepit senzor přesně do místa, ve kterém se stagnační bod nachází. V oblasti minimálního tlaku průběhy i absolutní hodnoty na senzorech věrně kopírují hodnoty ze simulací. Dále směrem doprava na *grafu 2* se hodnoty začínají více rozcházet. Tyto rozchody nejsou dostatečně velké, aby se dalo jednoznačně prohlásit, že zde dochází k separaci proudění.



*Graf 2:* Pátý element zadního křídla při 60 km/h

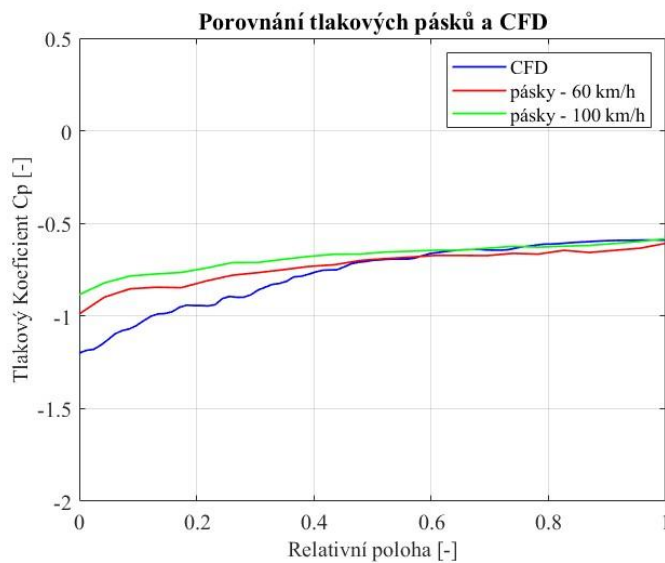
Na *grafu 3* se nachází přehlednější porovnání průběhů tlaků z experimentálního měření pro rychlosti 60 km/h a 100 km/h. Z grafu je patrné, že trend průběhu tlaku je téměř identický. Pro absolutní hodnoty už tohle tvrzení neplatí. Při zaměření se na hodnoty minimálního tlaku z měření pro obě rychlosti dosahuje hodnota koeficientu tlaku -2,25 pro rychlost 60 km/h. Pro rychlost 100 km/h je to -2. Důvodem tohoto rozdílu může být větší míra nepřesnosti pro měření v nižší rychlosti. Z grafu lze také vidět, že s rostoucí vzdáleností od stagnačního bodu se křivky obou průběhů postupně přibližují k sobě. To může být způsobeno mezní

vrstvou, která se směrem od náběžné hrany elementu zvětšuje. Ta způsobuje, že se zvyšuje dynamická přesnost měření [24].



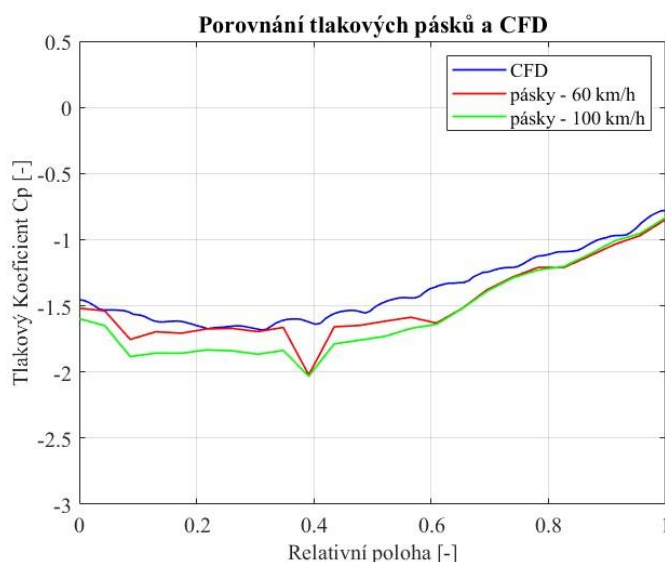
*Graf 3:* Výsledky měření pro různé rychlosti

Trend nižších absolutních hodnot se objevoval na většině tlakových pásek nacházejících se na zadním křídle. Na následujících grafech jsou zobrazeny průběhy tlakových koeficientů na dalších měřených místech při různých rychlostech. *Graf 4* obsahuje porovnání tlakových průběhů na sací straně prvního elementu bočních podlah. Trend větších absolutních hodnot tlakového koeficientu při nižších rychlostech je z grafu patrný. Při porovnání průběhů tlaku z měření se simulacemi lze vidět, že se trendy průběhů příliš neshodují v levé části grafu. V této části se element nachází poměrně blízko k vozovce a může tak být ovlivněný změnou světlé výšky, ke které během jízdy docházelo. Dále může být tato odchylka zapříčiněna špatným pozicováním výsledků z měření vůči hodnotám ze simulace. Data v pravé části (blíže k odtokové hraně) grafu ukazují téměř stejné hodnoty z měření a simulace.



Graf 4: První element bočních podlah

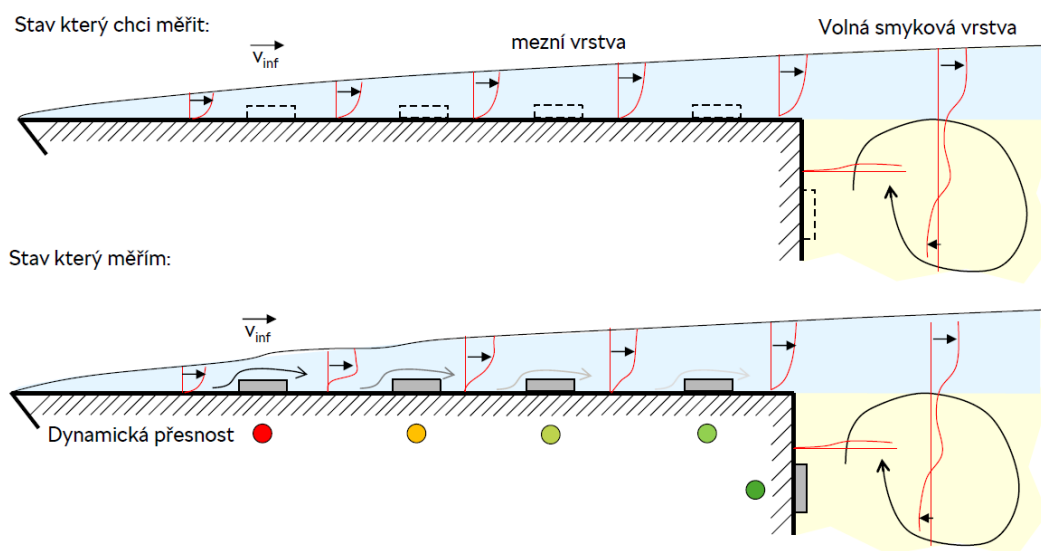
Na *grafu 5* je zobrazeno porovnání simulace a měření na sací straně prvního elementu předního křídla. Z grafu je vidět, že data z jednoho senzoru vykazují špatné hodnoty a nejsou brána v úvahu. Trend průběhu tlaku z měření věrohodně odpovídá simulaci. Stejně jako na předchozím grafu je shoda dat z měření a simulace větší u odtokové hrany křídla. Při porovnání absolutních hodnot z experimentálního měření je vidět, že se hodnoty liší. Zejména v oblasti minimálního tlaku, kde je element v blízkosti vozovky. Nachází se zde opačný trend než na zadním křídle, kde absolutní hodnoty tlaku z rychlosti 60 km/h dosahují menších hodnot než při rychlosti 100 km/h.



Graf 5: První element předního křídla

### 5.1.3 NEPŘESNOSTI MĚŘENÍ

Při validaci CFD simulací pomocí měření tlakových pásek je nutné zohlednit několik nedostatků a nepřesností, které mohou ovlivnit kvalitu a spolehlivost výsledků měření. Samotné tlakové pásky mají určitou nepřesnost měření, která byla zmíněna v kapitole 4 [24]. Dynamická přesnost pásek je přímo úměrná výšce mezní vrstvy vznikající na povrchu obtékaného povrchu, viz obr. 22.



Obr. 22: Dynamická přesnost pásku [24]

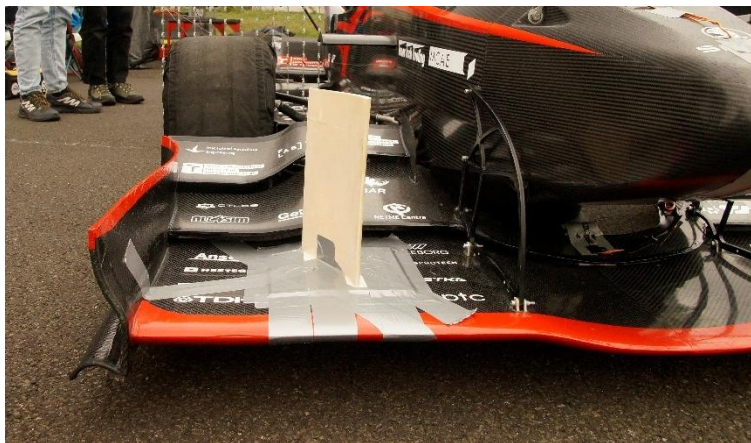
Kvalita měření je výrazně ovlivněna správným umístěním tlakových pásek. Špatně nalepené pásky mohou měnit lokální proudění vzduchu kolem měřených bodů, což vede ke zkreslení naměřených hodnot. Rychlost monopostu při jízdě nebyla konstantní jako je tomu při simulacích proudění. Rychlost byla udržována manuálně řidičem pomocí plynového pedálu. Venkovní měření je velmi ovlivněno působením větru, které mění tlakové rozložení okolo obtékaného monopostu. Na testovacím polygonu se může měnit nadmořská výška, která přímo ovlivňuje atmosférický tlak [24]. Referenční pásek, ze kterého se počítají hodnoty relativního tlaku se nachází na místě s určitým atmosférickým tlakem, zatímco formule při měření měnila svou polohu. Nepřesnosti vznikající při nastavování formule mohou také významně ovlivnit výsledky měření. Zejména nastavení světlé výšky je klíčové, neboť tato hodnota přímo ovlivňuje vykreslení statického tlaku na elementech, které využívají přízemní efekt. I drobné odchylky v nastavení této výšky mohou mít za následek nepřesnosti při měření. Další zdroj nepřesností představuje výrobní a montážní nepřesnost jednotlivých elementů, konkrétně vzdálenost mezi povrchem elementu a zemí. Pokud není tato vzdálenost stejná jako v modelu, dochází ke zkreslení proudění a tím i měřených hodnot tlaku. Rovněž je nutné zohlednit osvětlení tlakových pásek přímým slunečním svitem, které může způsobit zkreslení naměřených hodnot [24].

#### 5.1.4 VYHODNOCENÍ VALIDACE – TLAKOVÉ PÁSKY

Výsledek validace tlakovými páskami ukázal, že využívaný CFD model je schopný věrohodně popisovat tlakové pole na jednotlivých elementech křidel. Samotné simulace i měření bylo ovlivněno různými vlivy nepřesností, ale i přes tyto skutečnosti je patrné, že CFD výpočty odpovídají poměrně přesně naměřeným datům. Tento závěr je vyvozený z grafů, které jsou součástí této kapitoly, ale i ze zbylých měřených míst, které se nachází v *příloze 1*. V příloze se nachází výsledky z měření a simulace pro rychlost 60 km/h.

### 5.2 RASTROVÁ SONDA

Druhým měřicím zařízením pro validaci CFD simulací byla rastrová sonda, která umožňuje detailní měření tlakového pole ve zvolené rovině. Pro validaci byla zvolena pozice za předními koly, kde vzniká významný úplav vlivem rotace kol. Měření proběhlo se dvěma konfiguracemi monopostu. První je původní konfigurace formule Dragon e4 a druhým je eD4 s vertikálním elementem na prvním elementu předního křídla, viz *obr. 23*. Tento prvek generuje vír, jenž by měl odklonit úplav směrem od podélné osy vozu, a tím zlepšit přívod „čistého“ vzduchu k zadní části monopostu. Měření probíhalo při rychlosti monopostu 100 km/h. Na tuto rychlost sice není navrhovaná výpočetní síť pro simulace, ale pro sledování veličin daleko od stěn ji budeme považovat za dostatečnou.



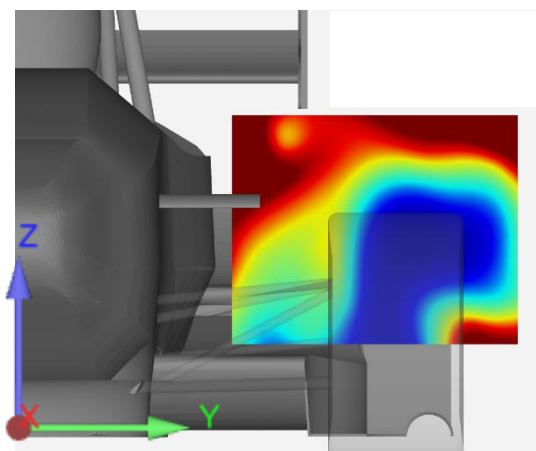
*Obr. 23:* Dragon e4 – konfigurace s vertikálním elementem

Stejně jako u tlakových pásek závisely výsledky měření na směru jízdy. Pro zbytek analýzy validace pomocí rastrové sondy budou interpretovány zprůměrované výsledky měření pro jízdu v obou směrech. Data z jednotlivých senzorů rastrové sondy jsou pro zobrazení celé plochy dopočítávána v prostředí MATLAB s využitím kubické spline interpolace.

#### 5.2.1 POROVNÁNÍ SIMULACÍ PRO RŮZNÉ KONFIGURACE MONOPOSTU

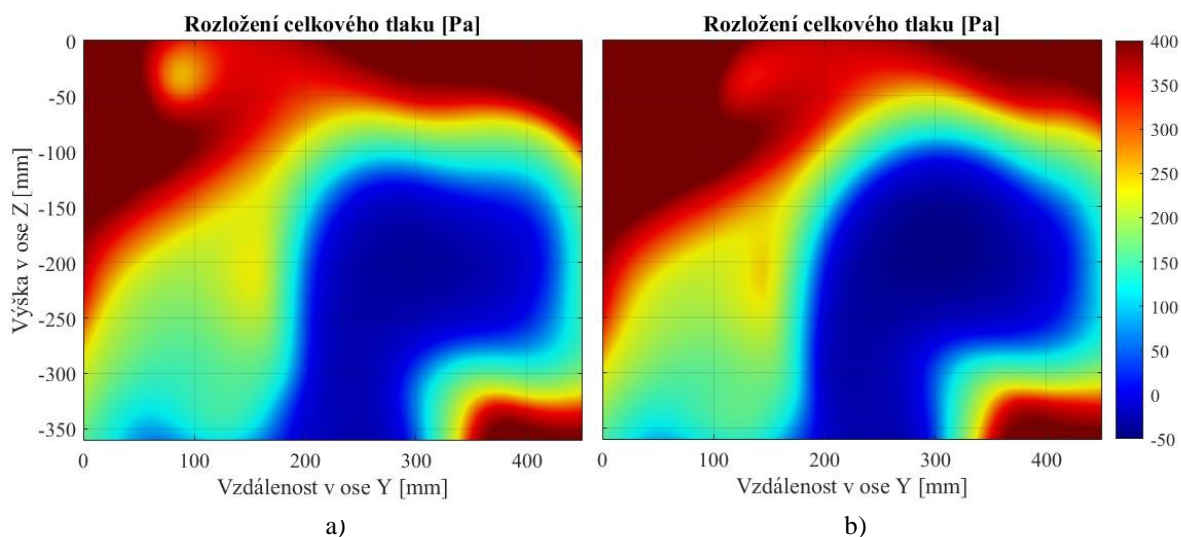
Pro všechny grafy vyskytující se v kapitole 5.2 platí následující parametry: na ose y se nachází výška v ose z, na ose x se nachází vzdálenost v ose y, barevné hodnoty značí velikost relativního celkového tlaku. Souřadnice [0;0] na ose y a ose x grafu značí místo polohy senzoru, který

se nachází v největší vzdálenosti od vozovky a nejbližší k monokoku formule. Zobrazení modelu formule s polohou rastrovou sondou včetně souřadného systému se nachází na *obr. 24*.



*Obr. 24:* Zobrazení polohy rastru v CFD

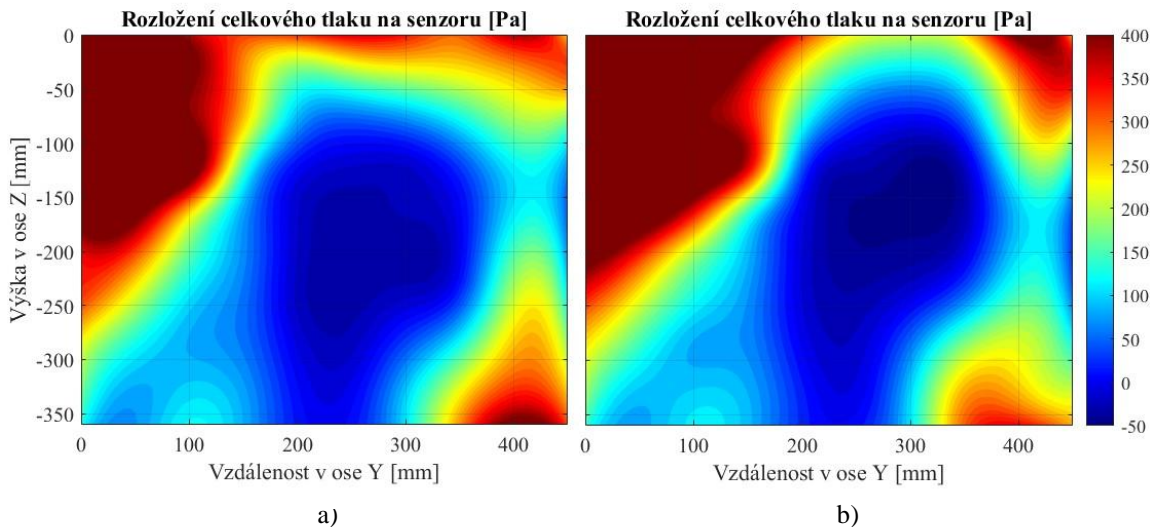
Na *grafu 6a*) se nachází vykreslené tlakové pole původní konfigurace eD4. Vpravo se nachází upravená konfigurace s vertikálním elementem. Pro tuto analýzu je podstatné zaměřit se na oblast vysokého celkového tlaku u monokoku. Při porovnání obou konfigurací lze vidět, že v tomto místě je oblast vysokého celkového tlaku (tmavě červená barva) na upravené konfiguraci větší než na konfiguraci původní. Na *grafu 6a*) se v levém horním rohu nachází oblast nižšího tlaku znázorňující vír vytvářený negativním elementem. Tento vír se nachází i na *grafu 6b*), ale jeho intenzita je menší. Další oblastí k pozorování je oblast nízkého tlaku (úplavu), který se nachází za rotujícími koly. Pro konfiguraci s vertikálním elementem lze vidět, že se úplav odklonil směrem od monokoku.



*Graf 6:* porovnání simulace a) původní eD4 b) konfigurace s vertikálním elementem

### 5.2.2 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ PRO RŮZNÉ KONFIGURACE MONOPOSTU

Graf 7 zobrazuje porovnání výsledků měření pro dvě konfigurace Dragonu e4 (vlevo původní eD4, vpravo konfigurace s vertikálním elementem). Z porovnání obou grafů lze jednoznačně vidět, že oblast vysokého celkového tlaku je při konfiguraci s vertikálním elementem podstatně větší než u původní verze eD4. Rozdíl začíná již od místa nejbližší u monokoku, kde je výška v ose z -250 mm. Zaměříme-li se na izolinii znázorňující hodnotu 400 Pa (místo přechodu světle červené na tmavě červenou), tak na grafu 7a) stoupá tato linie více strměji než na grafu 7b).

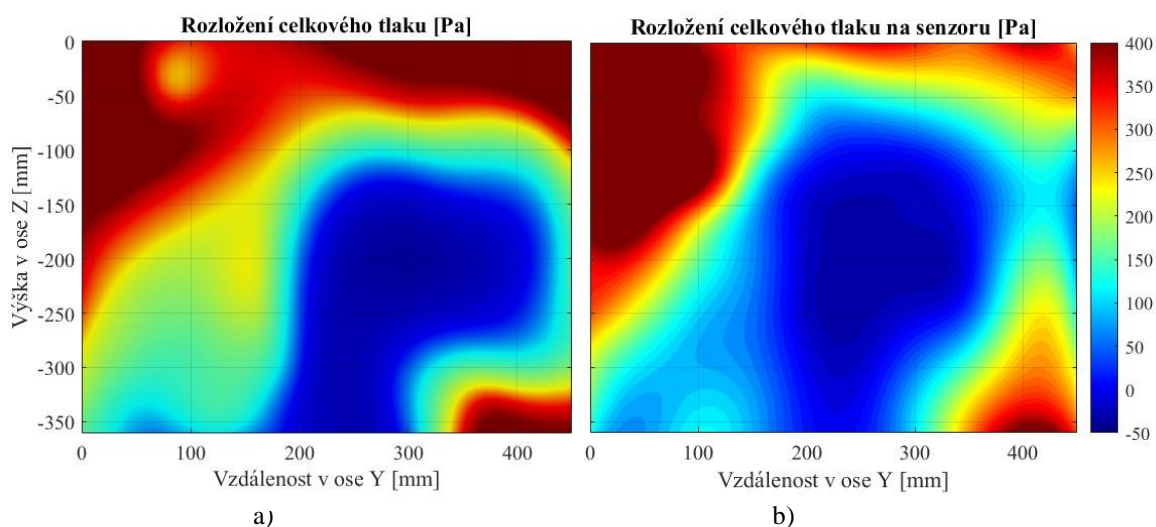


Graf 7: a) původní eD4 b) konfigurace s vertikálním elementem

Tato oblast je pro analýzu nejvíce podstatná, neboť se ve směru proudění za ní nachází boční podlahy a zadní křídlo, viz obr. 24. Rozšířením této oblasti vzniká prostor pro implementaci dalších přítlačných křídel.

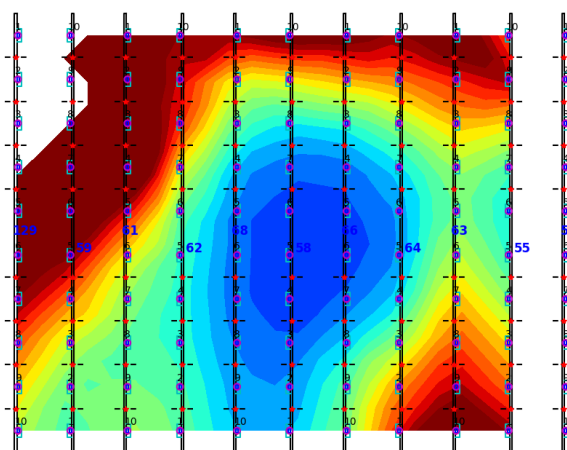
### 5.2.3 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ A SIMULACE

Na grafu 8 vlevo se nachází tlakové pole z CFD simulace a vpravo výsledky z experimentálního měření. Na první pohled jsou vidět velké odlišnosti. Ze simulace je možné vidět vykreslení vírové struktury od negativního elementu. Ta se kvůli rozteči senzorů na rastrové sondě vůbec nevyskytuje na výsledcích z měření, viz obr. 25. Na tomto obrázku lze také vidět, že krajní segment (vpravo) sondy nezaznamenával data.



Graf 8: Rastrová sonda a) CFD b) měření

Největší rozdíl se vyskytuje v horní části grafu, kde oblast nízkého celkového tlaku z měření zabírá o dost větší plochu než lze vidět z výsledků simulace. Tento rozdíl je nejspíš způsobený ohybem rastrové sondy, což lze vidět na *obr. 26*. Sensory nacházející se nejdále od uchycení sondy mohou být vychýleny v řádech milimetrů až centimetrů. Při samotném měření mohou být výchyly ještě větší, neboť se působením vzduchu celá sonda rozkmitá. Dalším důvodem může být zjednodušená geometrie formule pro CFD, ve které se nenachází náfuky na brzdy. Dále má rozměry pneumatik neodpovídají realitě a není brána v úvahu její struktura povrchu.



Obr. 25: Rastr odběrových míst

#### 5.2.4 NEPŘESNOSTI MĚŘENÍ

Rastrová sonda vykazuje obdobné nepřesnosti měření jako tlakové pásky, neboť obě měřicí zařízení využívají shodné senzory. Mezi zdroje těchto nepřesností patří samotná přesnost senzorů, nekonstantní rychlost vozidla a proměnlivé atmosférické podmínky. Přesnost správných výsledků na senzorech sondy klesá se vzdáleností od držáků, jelikož se vlivem prohnutí sondy mění poloha jednotlivých senzorů. Velký vliv na výsledky může mít kmitání

sondy způsobené nápořem vzduchu při jíždě, což nezpůsobuje nejen změnu polohy jednotlivých senzorů, ale může zapříčinit i změnu naměřených hodnot tlaku.



*Obr. 26: Ohyb rastrové sondy*

### 5.2.5 VYHODNOCENÍ VALIDACE – RASTROVÁ SONDA

Validace pomocí rastrové sondy prokázala, že CFD simulace dokázala vykreslit zvětšení oblasti vysokého celkového tlaku stejně jako tomu bylo u experimentálního měření. Z porovnání výsledků měření a simulací vyplývá, že z měření dochází k většímu rozšíření oblasti vysokého celkového tlaku, než je tomu v simulaci. Při přímém porovnání výsledků z měření a simulace docházelo na první pohled k velkým odlišnostem. Tato skutečnost je opodstatněná, neboť měření i simulace mají své nedostatky. Hlavním důvodem nepřesnosti měření je deformace sondy a pro simulaci je rozhodující faktorem nepřesnosti zjednodušená geometrie modelu monopostu.

## ZÁVĚR

V bakalářské práci byla provedena validace CFD simulací pomocí experimentálního měření pro vůz kategorie Formule Student. Účelem validace je ověření korelace výsledků ze simulací s daty z reálného měření. V rámci práce bylo využito simulace vyvíjené studentským týmem TU Brno Racing. Pro experimentální měření bylo využito dvou měřících zařízení – tlakových pásek a rastrové sondy.

Validace tlakovými pásky ukázala určité nesrovnalosti, zejména u náběžných hran křídel. Na elementech zadního křídla docházelo k rozchodu hodnot v stagnačním bodě. Tento rozchod může být způsoben nevhodně nalepeným senzorem či obtížnou lokalizací přesného místa stagnačního bodu. V oblasti sací strany elementů však měření na elementech zadního křídla dobře odpovídala simulacím. Na sací straně bočních podlah byla shoda průběhu tlaku téměř shodná na polovině měřeného úseku. Nepřesnosti se objevovaly především v místech blíže k náběžné hraně elementů, kde dochází k jejich přiblížení k vozovce. Tlakové průběhy na sací straně prvního elementu předního křídla vykazovaly shodu po celé délce měřeného úseku. Pomocí tlakových pásek byla také analyzována rozdílnost tlakového koeficientu pro různé rychlosti jízdy. Na zadním křídle docházelo ke snížení absolutních hodnot tlaku s rostoucí rychlostí, ale tento trend se nepotvrdil na bočních podlahách a předním křídle. To může být způsobeno proměnnou jízdní výškou během měření, zatímco v simulaci je model dokonale tuhý.

Pro měření rastrovou sondou byly použity dvě konfigurace formule – původní a upravená verze s vertikálním elementem na předním křídle. Výsledky simulací i měření ukázaly, že přidání tohoto prvku vedlo k rozšíření oblasti vysokého celkového tlaku v blízkosti monokoku, což přispívá k přívodu „čistého“ vzduchu k zadní části monopostu. Při porovnání experimentálních dat s CFD simulacemi docházelo k velkým odlišnostem výsledků. Zejména v oblasti, která byla více vzdálená od uchycení sondy a docházelo zde k poměrně velkému ohybu sondy. Dále se mohly projevit rozdíly způsobené zjednodušenou geometrií modelu v simulacích.

Výsledek validace tlakovými pásky ukázal, že využívaný CFD model je schopný věrohodně popisovat tlakové pole na jednotlivých elementech křídel. Pro budoucí měření bych doporučil se zaměřit na tlakové rozložení elementu po celé jeho šířce. Dále by bylo vhodné zajistit stabilní světlou výšku, neboť elementy využívající přízemní efekt jsou na změny světlé výšky náchylné. Výsledek validace rastrovou sondou prokázal, že přidaný element na předním křídle zvětšuje oblast vysokého celkového tlaku. Tohoto výsledku lze využít pro návrh budoucích aeropaketů týmu. Validace také ukázala nedostatky upevnění rastrové sondy a pro vyhodnocení samotného úplavu bych doporučil měření opakovat. Pro měření s oběma senzory by bylo vhodné využití Pitotovy trubice, která by vzala do úvahy rychlost monopostu vůči vzduchu, tedy včetně rychlosti větru.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Formule Student*. Online. TU Brno Racing. C2024. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/onas/formula-student/>. [cit. 2024-12-19].
- [2] *Formula Student*. Online. Wikipedia. [2023]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Formula\\_Student](https://cs.wikipedia.org/wiki/Formula_Student). [cit. 2024-12-27].
- [3] *Formula Student Germany*. Online. Formula Student Germany. C2025. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/>. [cit. 2025-01-02].
- [4] *Formula Student Rules 2025*. Online. Formula Student Germany. 2024. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2025/rules/FS-Rules\\_2025\\_v1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2025/rules/FS-Rules_2025_v1.1.pdf). [cit. 2025-01-02].
- [5] TU BRNO RACING. *Interní materiály týmu*. 2025.
- [6] *Bye Bye Bargeboards (Bargeboards Goodbye): An Ode to the Bargeboard*. Online. Dostupné z: <https://www.f1technical.net/features/23469>. [cit. 2025-05-14].
- [7] ŽŮREK, Michael. *Měření průtoku vzduchu kompaktním výměníke ve větrném tunelu*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2023.
- [8] *Formula Student - World Ranking*. Online. Formula Student - World Ranking. 2023. Dostupné z: <https://fs-world.org/>. [cit. 2025-01-03].
- [9] *Dragon e4*. Online. TU Brno Racing. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/garaz/dragon-e4/>. [cit. 2025-01-03].
- [10] MILLIKEN, William F. a MILLIKEN, Douglas L. *Race car vehicle dynamics*. SAE International, 1995. ISBN 9781560915263.
- [11] VODIČKA, Vít. *Přehled a vývoj CFD metod*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011.
- [12] DERKA, David. *CFD analýza monopostu Formule student při průjezdu zatáčkou*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2023.
- [13] ZELENSKÝ, Petr; BARTÁK, Martin; ZMRHAL, Vladimír a KRUPA, Radislav. *CFD model ventilátorové komory sestavné klimatizační jednotky*. 2017, s. 1-3.

- [14] *Fluent User's Guide*. Online. 2024. Dostupné z: [https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu\\_ug/flu\\_ug.html](https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_ug/flu_ug.html). [cit. 2025-03-08].
- [15] *What  $y^+$  should I use? Part 3 – Understanding impact of  $Y^+$  and number of prism layers on flow resolution*. Online. 2020. Dostupné z: [https://www.leapaust.com.au/blog/cfd/y-plus\\_part3\\_understanding-impact-of-y-and-number-of-prism-layers-on-flow-resolution/](https://www.leapaust.com.au/blog/cfd/y-plus_part3_understanding-impact-of-y-and-number-of-prism-layers-on-flow-resolution/). [cit. 2025-02-23].
- [16] *Size Functions and Scoped Sizing*. Online. 2024. Dostupné z: [https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=///Views/Secured/corp/v242/en/flu\\_ug/tgd\\_user\\_size\\_functions.html](https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=///Views/Secured/corp/v242/en/flu_ug/tgd_user_size_functions.html). [cit. 2025-02-23].
- [17] VERSTEEG, H.K. a MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. 2nd. Harlow: Pearsom Prentice Hall, 2007. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [18] *Fluent Theory Guide*. Online. 2024. Dostupné z: [https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu\\_th/flu\\_th.html](https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html). [cit. 2025-03-08].
- [19] ŠULÍK, Daniel. *Návrh geometrických prvků k zlepšení aerodynamiky předního křídla vozu formule student*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2024.
- [20] STRELETS, M. *Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows*. 2001.
- [21] *Turbulence models in CFD*. Online. Dostupné z: <https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/>. [cit. 2025-03-08].
- [22] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics*. ROBERT BENTLEY, 1996. ISBN 9780837601427.
- [23] 4JTECH. *200Hz Synchronous Pressure Strips*. 4. 2024.
- [24] VOJÍK, Lukáš. *Validační měření aerodynamiky vozů FS PG Škoda Úhelnice*. 2024.
- [25] *Similarity Parameters*. Online. Glenn Research Center. Dostupné z: [https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/similarity-parameters/?utm\\_source=chatgpt.com#similarity-parameter](https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/similarity-parameters/?utm_source=chatgpt.com#similarity-parameter). [cit. 2025-05-07].

- [26] TU BRNO RACING. *Dragon 4*. Online. TU Brno Racing. C2025. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/en/garage/dragon4/>. [cit. 2025-05-18].
- [27] TU BRNO RACING. *Dragon 5*. Online. TU Brno Racing. C2025. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/garaz/dragon5/>. [cit. 2025-05-18].
- [28] TU BRNO RACING. *Dragon 8*. Online. TU Brno Racing. C2025. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/garaz/dragon8/>. [cit. 2025-05-18].

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

TSAL – Tractive System Active Light

FS – Formule Student

FSG – Formula Student Germany

FSAE – Formula SAE

eD4 – Dragon e4

CoP – Centre of pressure

MRF – Moving reference frame

DNS – Direct Numerical Solution

LES – Large Eddy Simulation

DES – Detached Eddy Simulation

RANS – Reynolds-Averaged Navier-Stokes

$C_p$	[-]	Koeficient tlaku
$p$	[Pa]	Statický tlak
$p_\infty$	[Pa]	Statický tlak volného proudění
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Hustota vzduchu
$v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost

## SEZNAM TABULEK

*Tabulka 1: Shrnutí CFD simulace ..... 27*

## SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1:</i> Závislost směru jízdy na výsledcích měření.....	31
<i>Graf 2:</i> Pátý element zadního křídla při 60 km/h.....	32
<i>Graf 3:</i> Výsledky měření pro různé rychlosti.....	33
<i>Graf 4:</i> První element bočních podlah .....	34
<i>Graf 5:</i> První element předního křídla .....	34
<i>Graf 6:</i> porovnání simulace a) původní eD4 b) konfigurace s vertikálním elementem .....	37
<i>Graf 7:</i> a) původní eD4 b) konfigurace s vertikálním elementem .....	38
<i>Graf 8:</i> Rastrová sonda a) CFD b) měření .....	39

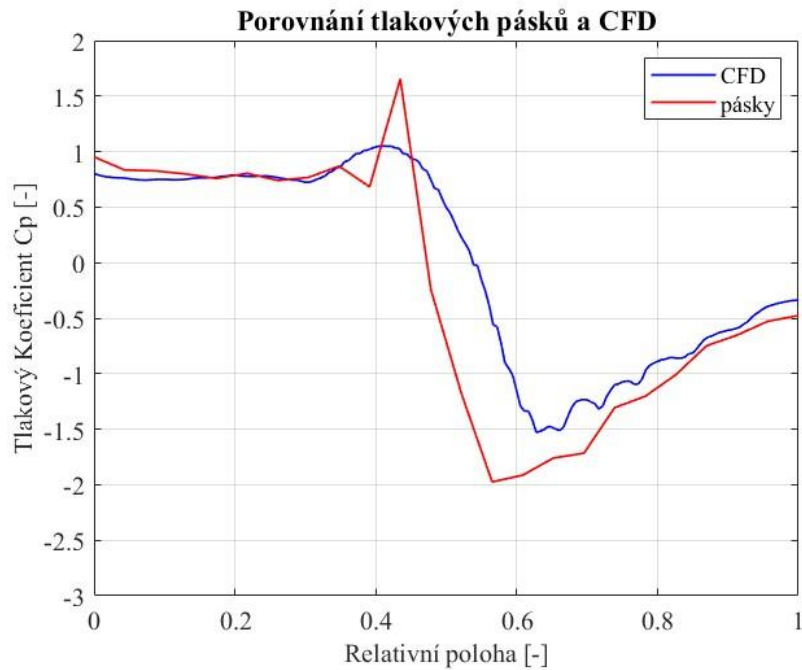
## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1:</i> Formula Student Germany 2024 [3].....	12
<i>Obr. 2:</i> Schématický obrázek obálky pro aerodynamické prvky [4].....	13
<i>Obr. 3:</i> Obálka v CAD.....	14
<i>Obr. 4:</i> Dragon 4 (vlevo nahoře) [26], Dragon 5 (vlevo dole) [27], Dragon 6 (vpravo nahoře) [5], Dragon 7 (vpravo dole) [5].....	15
<i>Obr. 5:</i> Dragon 8 (vlevo nahoře) [28], Dragon 9 (vlevo dole) [5], Dragon X (vpravo nahoře) [5], Dragon e1 (vpravo dole) [5].....	16
<i>Obr. 6:</i> Dragon e2 (vlevo) [5], Dragon e3 (vpravo) [5].....	17
<i>Obr. 7:</i> Dragon e4 [5] .....	18
<i>Obr. 8:</i> Přední křídlo s negativem Dragonu e4.....	19
<i>Obr. 9:</i> Boční podlahy eD4.....	19
<i>Obr. 10:</i> Zadní křídlo eD4 .....	20
<i>Obr. 11:</i> Zjednodušená geometrie monopostu.....	21
<i>Obr. 12:</i> Doména .....	22
<i>Obr. 13:</i> Povrchová síť na elementech předního křídla.....	23
<i>Obr. 14:</i> Prismatické vrstvy [15] .....	23
<i>Obr. 15:</i> Body of influence .....	24
<i>Obr. 16:</i> Okrajové podmínky na doméně .....	25
<i>Obr. 17:</i> Porovnání různých modelování turbulence [21] .....	26
<i>Obr. 18:</i> Interpoláční schéma prvního řádu (vlevo) a druhého řádu (vpravo) [19] .....	26
<i>Obr. 19:</i> Tlakový pásek .....	28
<i>Obr. 20:</i> Rastrová sonda .....	29
<i>Obr. 21:</i> Měření vzdálenosti pásku.....	30
<i>Obr. 22:</i> Dynamická přesnost pásku [24] .....	35
<i>Obr. 23:</i> Dragon e4 – konfigurace s vertikálním elementem .....	36
<i>Obr. 24:</i> Zobrazení polohy rastru v CFD.....	37
<i>Obr. 25:</i> Rastr odběrových míst.....	39
<i>Obr. 26:</i> Ohyb rastrové sondy.....	40

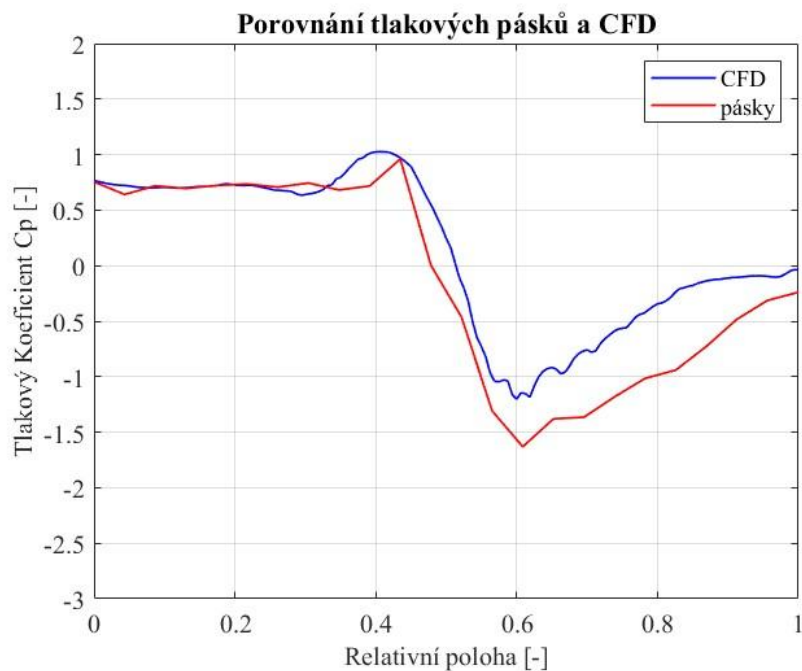
## SEZNAM PŘÍLOH

<i>Příloha 1:</i>	Tlakové pásy – porovnání měření a simulace	I
-------------------	--	---

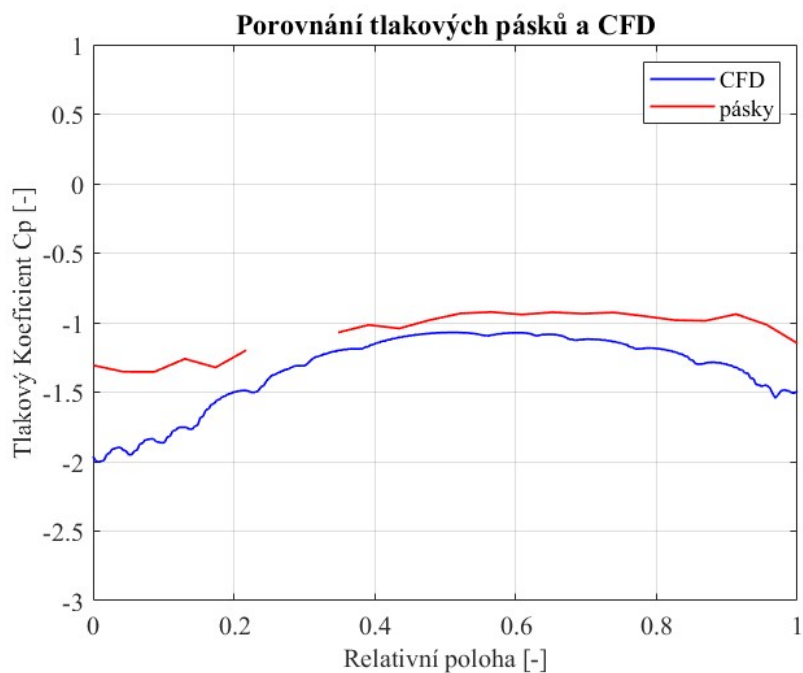
Příloha 1:



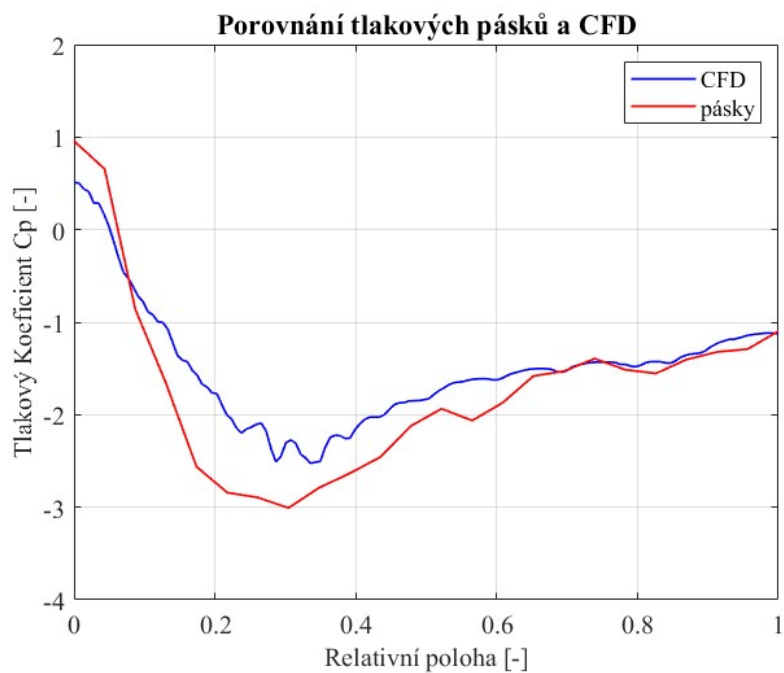
Třetí element zadního křídla u bočnice



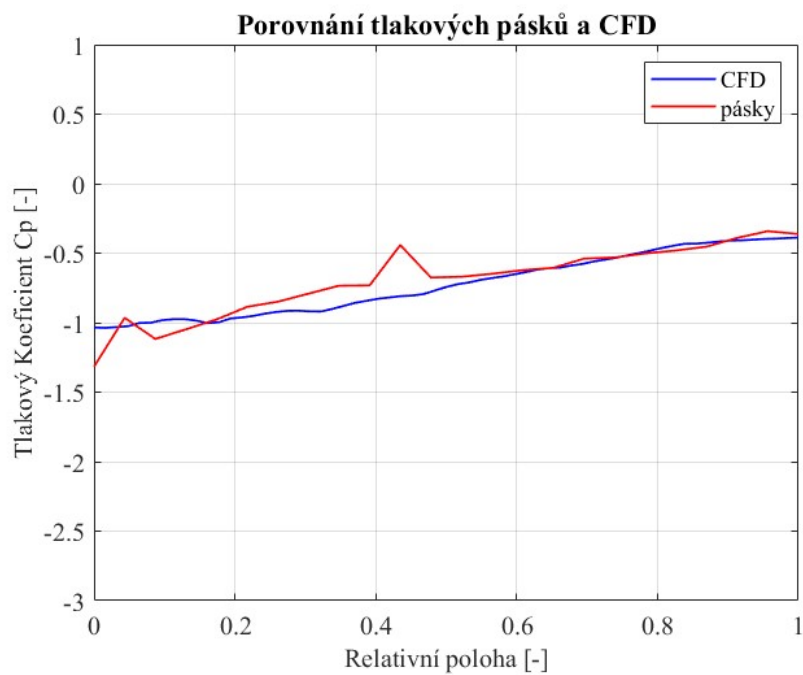
Třetí element zadního křídla uprostřed



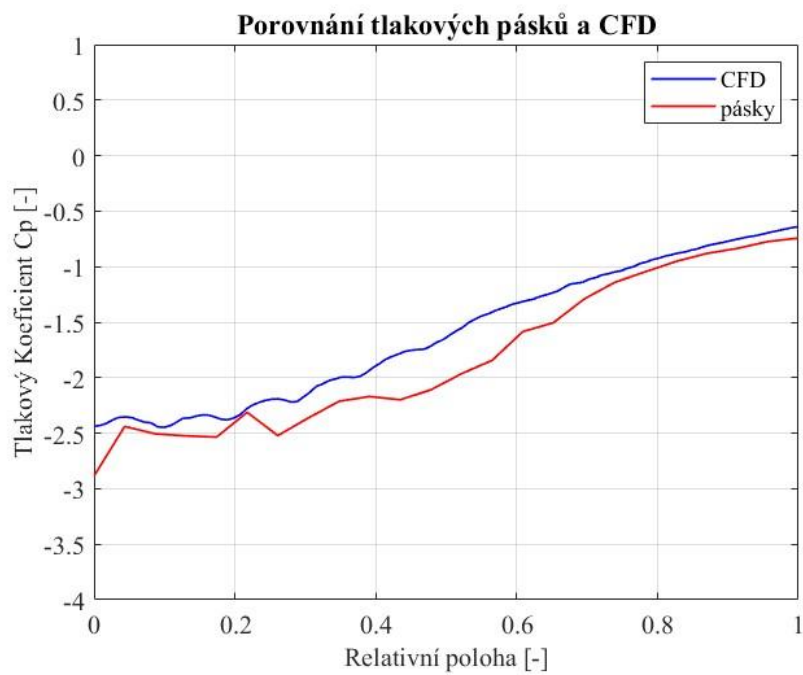
První element zadního křídla uprostřed



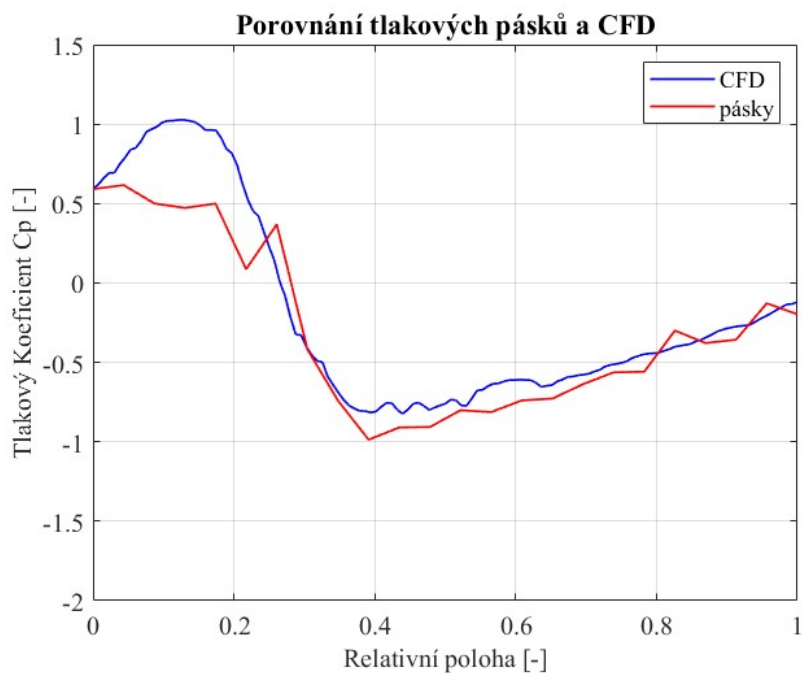
Druhý element zadního křídla uprostřed



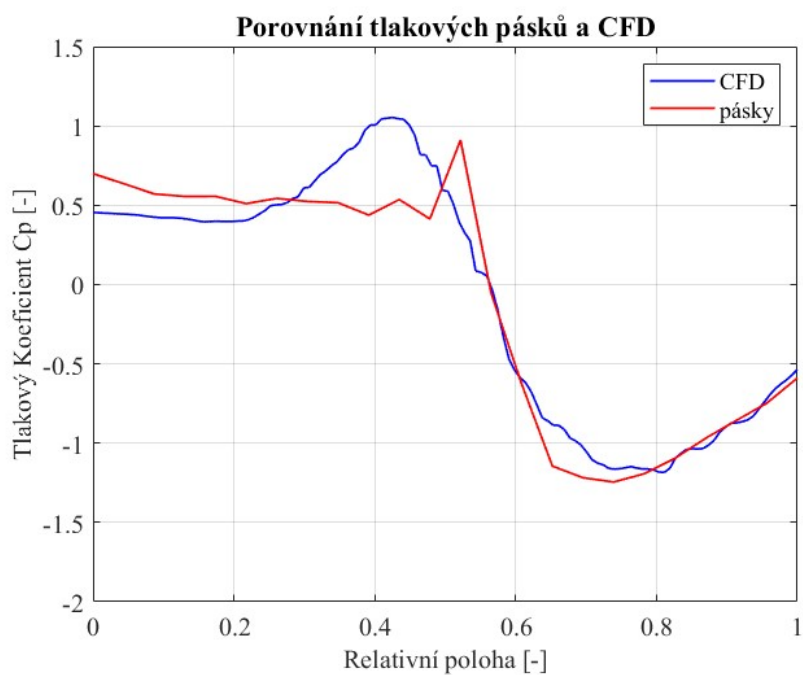
Druhý element bočních podlah



První element předního křídla



Druhý element předního křídla



Druhý element předního křídla u bočnice