

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2026

Ing. Matúš Vereš



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Matúš Vereš

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

NÁVRH METODIKY PRE REDUKCIU AERODYNAMICKÉHO ODPORU CESTNÝCH VOZIDIEL

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov

Žilina 2026

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia (01.09.2023 – 25.08.2026) na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre konštruovania a častí strojov.

Predkladateľ: **Ing. Matúš Vereš**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra konštruovania a častí strojov

Školiteľ: **prof. Ing. Róbert Kohár, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra konštruovania a častí strojov

Oponenti:

1. prof. Ing. Marián Dzimko, PhD.

Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra konštruovania a častí strojov
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina

2. doc. Ing. Pavol Pecho, PhD.

Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov
Katedra leteckej dopravy
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina

3. Ing. Milan Šoška, PhD.

Transmisie Engineering a.s.
Pavla Mudroňa 10, 036 01 Martin

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 25.08.2026 o 8:30 hod. v miestnosti BD004 na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SjF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Prof. Ing. Slavomír Hrček, PhD.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	STRUČNÝ PREHLAD PROBLEMATIKY	4
3	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	7
4	NAVRHNUTÝ METODICKÝ POSTUP	8
5	APLIKÁCIA NAVRHNUTÉHO METODICKÉHO POSTUPU	15
6	DISKUSIA.....	31
7	ZÁVER.....	32
	PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	33
	RESUMÉ.....	34
	ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI.....	35
	LITERATÚRA.....	36

1 ÚVOD

Dvadsiate prvé storočie prinieslo obrovský rozmach automobilovej dopravy. Zároveň sa však začína vo veľkej miere riešiť problém klimatickej krízy, z čoho plynie potreba znižovania spotreby a produkcie emisií. Jedným z hlavných problémov, na ktoré sa poukazuje je hlavne automobilová doprava. Navrhujú sa rôzne riešenia ako znížiť emisie, jedným z nich je napríklad norma Euro 6. Zníženie produkcie emisií často môže byť spájané aj so znížením spotreby paliva.

Okrem úpravy pohonnej jednotky je možné znížiť spotrebu aj optimalizáciou aerodynamických vlastností vozidla, čím sa zníži jeden z jazdných odporov a ušetrí sa palivo. Takáto úprava môže priniesť benefity aj pre elektromobily, ktoré by sa tým mohli stať populárnejšie medzi užívateľmi.

V praxi sa aerodynamické vlastnosti vozidla upravujú zmenou tvaru karosérie, pridaním prvkov karosérie ako napríklad zadný spojler, odobraním prvkov karosérie – odstránenie spätných zrkadiel na ťahačoch. Spomenuté úpravy by sa dali označiť ako pasívne. Aktívne ovplyvňovanie aerodynamiky vozidla si je možné predstaviť ako nasávanie a opätovné vyfukovanie vzduchu na konkrétnych miestach karosérie, zvyčajne za pomoci ventilátorov alebo kompresorov. Takáto aktívna aerodynamika sa nezvykne využívať na bežne dostupných komerčných automobiloch.

Aktívne a pasívne prvky aerodynamiky hojne využívajú v motoršporte, pričom najznámejším príkladom je Formula 1. Športové vozidlá sú známe tým, že ich karoséria má dôkladne prepracovanú aerodynamiku. V tomto prípade však nemusí nutne ísť o zníženie spotreby alebo o zníženie odporu, ale o ciele generovanie prítlaku. Zjednodušene povedané, prítlaková sila „zvyšuje váhu vozidla“ bez toho aby bola zvýšená zotrvačná sila, čo výrazne pomáha vozidlám v prejazde zákrut.

Aktívne riadenie medznej vrstvy je aktívny systém, ktorý dokáže ovplyvniť aerodynamiku v blízkosti povrchu telesa. Pri správnom použití by tento systém mohol byť prospešný v oboch prípadoch – zníženie aerodynamického odporu ale aj zlepšenie aerodynamických vlastností športového vozidla. Cieľom tejto dizertačnej práce by malo byť preskúmanie možností implementácie tohto systému do aerodynamiky karosérie vozidla, a celkovo teda redukcia aerodynamického odporu cestného vozidla.

2 STRUČNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY

Aerodynamický odpor patrí medzi významné jazdné odpory cestných vozidiel. Jeho veľkosť závisí najmä od tvaru karosérie, čelnej plochy vozidla, rýchlosti prúdenia, hustoty vzduchu a charakteru prúdenia v okolí povrchu vozidla. Pri vyšších rýchlostiach sa význam aerodynamického odporu zvyšuje, pretože odporová sila rastie s druhou mocninou rýchlosti. Z tohto dôvodu je optimalizácia aerodynamických vlastností dôležitá nielen pri športových vozidlách, ale aj pri bežných osobných automobiloch, nákladných vozidlách a autobusoch [1-3].

Pri návrhu karosérie vozidla sa najčastejšie využívajú pasívne aerodynamické úpravy. Ide napríklad o tvarovanie prednej časti vozidla, úpravu podvozku, použitie difúzora, spojlera, zadného krídla, krytov kolies alebo rôznych usmerňovacích prvkov. Tieto prvky nemenia aktívne svoje pôsobenie na prúdenie, ale sú navrhnuté tak, aby usmernili prúd vzduchu alebo obmedzili vznik nežiaducich vírov a separácie prúdenia [4–8]. Pri moderných vozidlách sa stále viac využívajú aj adaptívne aerodynamické prvky, ktoré menia svoju polohu v závislosti od jazdných podmienok. Napriek tomu sa aktívne ovplyvňovanie

prúdenia pomocou odsávania alebo vyfukovania vzduchu na karosérii cestných vozidiel zatiaľ nepoužíva v takej miere ako v leteckej alebo v oblasti experimentálnej aerodynamiky.

Dôležitým javom, ktorý ovplyvňuje aerodynamický odpor, je správanie medznej vrstvy. Medzná vrstva predstavuje tenkú oblasť prúdenia v blízkosti povrchu telesa, v ktorej sa rýchlosť vzduchu mení od nulovej hodnoty na povrchu až po rýchlosť hlavného prúdu mimo tejto vrstvy. Charakter medznej vrstvy môže byť laminárny alebo turbulentný. Laminárna medzná vrstva je všeobecne spojená s nižším trením, avšak je citlivejšia na nepriaznivý tlakový gradient a skôr dochádza k jej odtrhnutiu. Turbulentná medzná vrstva má vyššie trenie, ale je stabilnejšia voči separácii prúdenia [9-11]. Odtrhnutie prúdenia spôsobuje vznik úplavu, zvýšenie tlakových strát a tým aj nárast aerodynamického odporu. Z tohto dôvodu je riadenie medznej vrstvy jednou z možností, ako ovplyvniť aerodynamické vlastnosti obtekaného telesa.

Jedným zo spôsobov aktívneho riadenia medznej vrstvy je technológia *HLFC*, teda Hybrid Laminar Flow Control. Tento systém spája vhodné tvarovanie aerodynamického povrchu s aktívnym odsávaním časti medznej vrstvy cez perforovaný alebo štrbinový povrch. Cieľom je ovplyvniť stabilitu prúdenia v blízkosti povrchu a predĺžiť oblasť laminárneho prúdenia, prípadne oddialiť alebo potlačiť separáciu prúdenia. V prípade leteckých aplikácií sa *HLFC* používa najmä na krídlach, chvostových plochách alebo gondolách motorov, kde zachovanie laminárneho prúdenia môže viesť k zníženiu trecieho odporu [12-19].

Základný princíp *HLFC* systému spočíva v tom, že časť vzduchu z medznej vrstvy je odsávaná cez jemné perforácie alebo štrbiny v povrchu. Tým sa z medznej vrstvy odstraňuje časť nízkoenergetického prúdenia, ktoré je náchylnejšie na prechod do turbulencie alebo na odtrhnutie. Odsávanie zároveň znižuje hrúbku medznej vrstvy a môže zlepšiť jej stabilitu. Účinnosť systému však závisí od viacerých parametrov. Dôležitá je poloha odsávania, veľkosť a rozloženie otvorov, intenzita odsávania, tvar vnútorných komôr, tlakové straty v systéme a kvalita povrchu [12, 14, 17]. Pri nesprávnom návrhu môže byť účinok systému nízky alebo môže dôjsť k zhoršeniu aerodynamických vlastností.

V literatúre sa rozlišuje medzi prirodzeným laminárnym prúdením, riadením laminárneho prúdenia a hybridným riadením laminárneho prúdenia. Pri prirodzenom laminárnom prúdení sa využíva hlavne optimalizovaný tvar profilu. Pri aktívnom riadení laminárneho prúdenia sa používa odsávanie s cieľom udržať laminárnu medznú vrstvu. Hybridný systém kombinuje oba tieto prístupy, teda vhodné tvarovanie povrchu a aktívne odsávanie [18]. Výhodou hybridného prístupu je, že môže znižovať požadovaný výkon odsávacieho systému, pretože časť stabilizácie prúdenia zabezpečuje samotná geometria.

Technológia *HLFC* bola dlhodobo skúmaná najmä v leteckom priemysle. Dôvodom je vysoký význam aerodynamického odporu pri lietadlách a možnosť dosiahnuť úsporu paliva pri dlhodobom lete. Medzi známe experimentálne aplikácie patrí napríklad testovanie *HLFC* systému na lietadle Boeing 757 v rokoch 1985 až 1987. Tento výskum potvrdil potenciál *HLFC* systému, ale zároveň poukázal na viacero praktických problémov, ako sú zvýšená hmotnosť systému, energetická náročnosť odsávania a citlivosť perforovaných povrchov na kontamináciu hmyzom a nečistotami [12–14, 20]. Ďalšie poznatky priniesli projekty *HYLDA* a *HYLTEC*, ktoré sa zameriavali na integráciu *HLFC* technológií na veľké dopravné lietadlá. V týchto projektoch sa skúmalo najmä použitie perforovaných panelov na chvostových plochách a krídlach, pričom bolo preukázané, že pri vhodných podmienkach je možné zachovať

laminárne prúdenie na významnej časti profilu [17, 21]. Príklad fungovania *HLFC* systémov na krídle lietadla je zobrazený na obrázku 1.

Vývoj *HLFC* systémov ukázal, že ich praktická realizácia je technicky náročná. Perforované panely musia byť vyrábané s vysokou presnosťou, pretože aj malé odchýlky môžu ovplyvniť rovnomernosť odsávania. Problémom je tiež zanášanie otvorov, potreba pravidelnej údržby, nárast hmotnosti a zložitosť vnútorných rozvodov systému [12, 15, 16]. Z hľadiska návrhu je potrebné riešiť nielen samotnú aerodynamickú účinnosť, ale aj energetickú bilanciu systému. Zníženie aerodynamického odporu je prakticky výhodné iba vtedy, ak úspora energie potrebnej na pohyb vozidla prevýši energiu spotrebovanú na prevádzku aktívneho systému.



Obr. 1 – Porovnanie prúdenia na krídle s uhlom nábehu $21,3^\circ$; a) bez aktívneho *HLFC*; b) s aktívnym *HLFC* [17]

Pri cestných vozidlách je aplikácia *HLFC* systémov menej rozšírená ako v letectve. Dôvodom sú odlišné prevádzkové podmienky, nižšie rýchlosti, výraznejší vplyv znečistenia povrchu, zložitejší tvar karosérie a vyššia variabilita okolitých podmienok. Na druhej strane, princíp aktívneho ovplyvňovania medznej vrstvy môže byť využiteľný aj pri vozidlách, najmä v oblastiach, kde dochádza k separácii prúdenia a tvorbe úplavu. Typickým príkladom sú zadné časti karosérie, strešné hrany, šikmé plochy, bočné hrany alebo oblasti v okolí podvozku. V týchto miestach môže vhodne navrhnuté odsávanie alebo vyfukovanie zmeniť charakter prúdenia a prispieť k zníženiu aerodynamického odporu.

Na overovanie podobných systémov je vhodné použiť kombináciu numerických simulácií a experimentálneho testovania. *CFD* simulácie umožňujú predbežne vyhodnotiť rôzne varianty umiestnenia a intenzity aktívneho systému bez nutnosti výroby každého prototypu. Experimentálne meranie v aerodynamickom tuneli následne slúži na overenie výsledkov simulácií a na posúdenie reálneho správania systému. Takýto postup je vhodný najmä vtedy, ak cieľom nie je iba návrh jedného konkrétneho riešenia, ale vytvorenie všeobecnej metodiky pre výber, návrh a overovanie aktívnych aerodynamických prvkov cestných vozidiel.

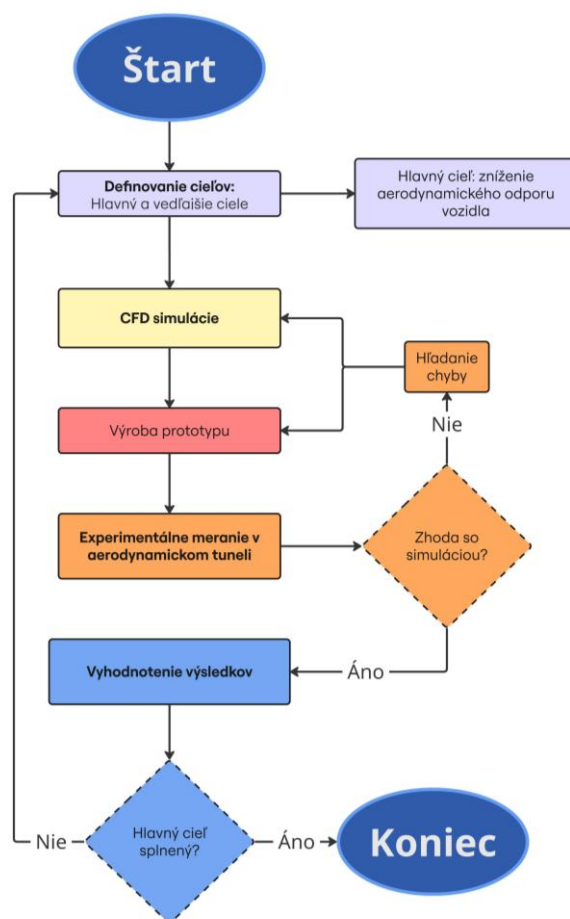
3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh metodiky pre zníženie aerodynamického odporu cestných vozidiel pomocou konštrukčných prvkov, ktoré dokážu aktívne riadiť medznú vrstvu v okolí karosérie vozidla (*HLFC* systémy). Tento hlavný cieľ je ďalej rozčlenený na čiastkové ciele:

1. **Identifikácia vhodného umiestnenia na karosérii:** Na karosérii vozidla je možné nájsť niekoľko vhodných pozícií pre umiestnenie *HLFC* systému tak, aby bolo možné využiť jeho prínos v čo najväčšej efektívite.
2. **Definovanie parametrov:** Je potrebné definovať parametre, ktoré budú sledované a majú byť výstupom experimentu, resp. ukazovateľom zmeny. Sem patria napríklad koeficient odporu, stabilita vírov a podobne. Okrem toho je potrebné zadať aj premenné, ktoré budú systém ovládať alebo ovplyvňovať. Príkladom sú voľba *HLFC* systému a jeho priame parametre, napr. veľkosť a rozloženie otvorov, koeficient vyfukovania/nasávania a iné.
3. **CFD simulácie prúdenia:** Vykonajú sa simulácie prúdenia vzduchu okolo karosérie s využitím *HLFC* a bez využitia tohto systému. Bude sa hľadať optimálne umiestnenie systému, resp. bude sa optimalizovať tvar daného komponentu aby bolo možné využiť systém efektívne.
4. **Výroba zmenšeného modelu:** Pre účely experimentálneho testovania v aerodynamickom tuneli je potrebné vytvoriť model v požadovanej mierke. Výroba tohto modelu bude zabezpečená technológiami *Rapid Prototyping*.
5. **Testovanie modelu v aerodynamickom tuneli:** Model sa následne umiestni do aerodynamického tunela, kde sa otestuje funkčnosť systému v reálnom prostredí.
6. **Porovnanie nameraných výsledkov so simuláciami:** Skontroluje sa charakteristika prúdenia, koeficient odporu, prípadne iné parametre, ktoré boli zadefinované ako výstupné parametre.
7. **Finálne zhrnutie výsledkov:** Vykonané experimentálne meranie a tomu predchádzajúce *CFD* simulácie by mali potvrdiť správnosť navrhutej metodiky. Po prebehnutí a vyhodnotení všetkých testov a simulácií je potrebné sumarizovať, či je daná metodika realizovateľná a dostatočne presná.

4 NAVRHNUTÝ METODICKÝ POSTUP

Na základe analýzy teoretických znalostí bol navrhnutý podrobný metodický postup, ktorý bol následne zovšeobecnený a spracovaný do formy vývojového diagramu. Metodický postup sa skladá v niekoľkých hlavných podkategórií, ktoré sú aj v diagrame rozlíšené rôznymi farbami.



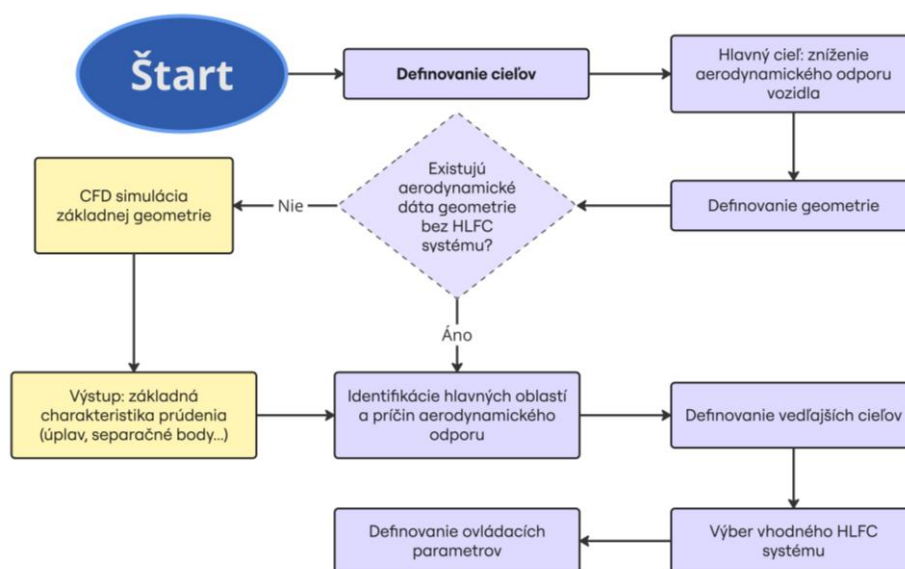
Obr. 2 - Základný metodický postup

Prvotným krokom metodiky je definovanie cieľov. Hlavným cieľom postupu, ktorý je zároveň nemenný pre všetky prípady, je zníženie celkového aerodynamického odporu vozidla. Tento a následné kroky metodiky sú presnejšie zobrazené na vývojovom diagrame tejto fázy (zobrazené na obrázku 3).

Následne je potrebné špecifikovať geometriu, s ktorou sa bude v ďalších krokoch pokračovať. Po zadefinovaní geometrie je potrebné analyzovať jej charakteristiky, konkrétne identifikovať hlavné oblasti aerodynamického odporu a jeho príčiny a taktiež zmapovať základnú charakteristiku prúdenia. Tieto poznatky sú kľúčové pre nasledujúci krok. Ako prvotný zdroj pre tieto informácie môžu slúžiť existujúce vedecké štúdie alebo iné zdroje, ktoré sa zaoberali charakteristikou prúdenia danej geometrie. V prípade, že neexistujú žiadne relevantné zdroje pre zvolenú geometriu je potrebné najprv vykonať CFD simulácie aby bolo možné zmapovať základnú aerodynamickú charakteristiku karosérie.

Po základnej analýze aerodynamiky referenčnej geometrie je potrebné definovať vedľajšie ciele, ktoré podporujú splnenie hlavného cieľa, teda zníženie aerodynamického odporu. Medzi takéto ciele môže patriť napríklad zmenšenie úplavu za vozidlom, posunutie separačného bodu alebo stabilizácia

prúdenia v určitej oblasti karosérie. Konkrétne vedľajšie ciele závisia od zvolenej geometrie, pretože každá karoséria má vlastné dominantné vírové štruktúry, separačné oblasti a charakter úplavu.



Obr. 3 - Prvá fáza metodického postupu

Na základe týchto cieľov sa následne volí vhodný systém aktívneho riadenia medznej vrstvy a jeho ovládacie parametre. Pri systémoch založených na odsávaní alebo vyfukovaní je potrebné určiť najmä polohu otvorov, ich veľkosť, tvar, hustotu, intenzitu odsávania alebo vyfukovania a prípadne aj časový režim činnosti systému. V tejto fáze je vhodné navrhnuť viacero variantov, ktoré sa následne porovnajú pomocou *CFD* simulácií.

Úlohou *CFD* simulácií je posúdiť, či navrhnutý *HLFC* systém vedie k splneniu hlavného a vedľajších cieľov. Hlavným sledovaným parametrom je koeficient aerodynamického odporu, pričom doplnkovo sa hodnotí aj charakter prúdenia, poloha separácie, tvar úplavu a prípadné zmeny vírových štruktúr. Výsledky sa porovnávajú s referenčnou geometriou bez použitia *HLFC* systému. Ak simulácie preukážu zlepšenie aerodynamických vlastností, je možné pokračovať výrobou prototypu. Ak k zlepšeniu nedôjde, je potrebné skontrolovať nastavenie simulácie, prehodnotiť interpretáciu prúdenia a prípadne upraviť vedľajšie ciele, typ systému alebo jeho parametre.

Po úspešnom numerickom overení nasleduje výroba modelu pre experimentálne testovanie. Pri návrhu modelu je potrebné zohľadniť rozmery aerodynamického tunela a parameter *Blockage ratio*, teda pomer čelnej plochy modelu k prierezu testovacej sekcie. Pre spoľahlivé meranie je vhodné udržať túto hodnotu čo najnižšiu, prípadne pri vyšších hodnotách použiť korekčné vzťahy [23, 24].

Experimentálna časť pozostáva z referenčného merania bez *HLFC* systému a z meraní s jednotlivými variantmi aktívneho riadenia prúdenia. Počet meraných konfigurácií závisí od počtu navrhnutých variantov a definovaných cieľov. Pre zvýšenie spoľahlivosti výsledkov sa odporúča každé meranie opakovať minimálne päťkrát.

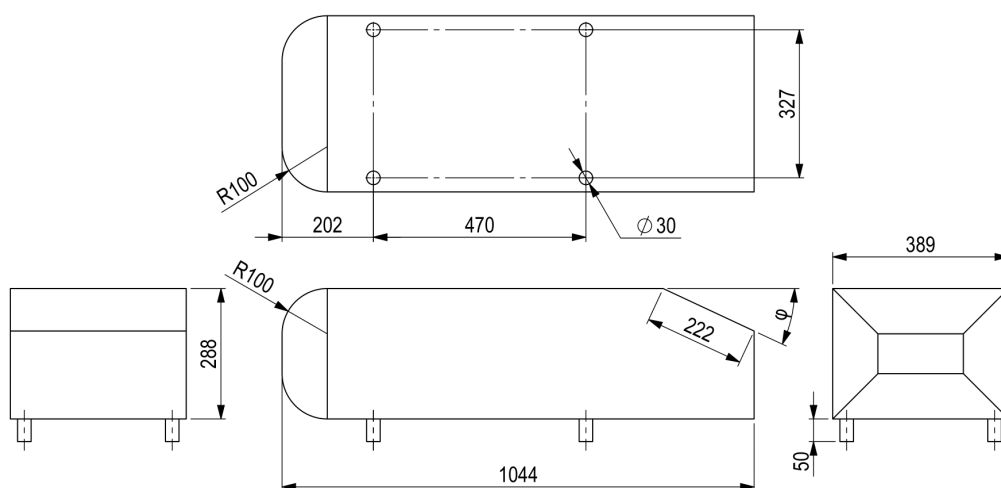
Namerané údaje sa následne porovnávajú s výsledkami *CFD* simulácií. V prípade výrazných rozdielov je potrebné identifikovať príčinu odchýlky, napríklad chybu merania, nepresné nastavenie podmienok alebo nevhodné zjednodušenie numerického modelu. Ak je zhoda dostatočná, pristúpi sa k finálnemu

vyhodnoteniu. Za úspešný možno metodický proces považovať vtedy, ak sa podarí preukázať zníženie aerodynamického odporu, vyhodnotiť splnenie vedľajších cieľov a zdokumentovať vplyv navrhnutého HLFC systému na charakter prúdenia.

Definícia referenčnej geometrie a podmienok

Pre spoľahlivé porovnanie prínosu nových aerodynamických prvkov je potrebné zadefinovať referenčnú geometriu. Dôvodom je skutočnosť, že každá karoséria má jedinečné aerodynamické vlastnosti, preto je potrebné porovnania vykonávať na rovnakej geometrii. Zjednodušená referenčná geometria zároveň znižuje výpočtovú náročnosť a uľahčuje interpretáciu výsledkov, keďže menší počet tvarových prvkov znamená menší počet faktorov ovplyvňujúcich výsledné prúdenie.

V aerodynamike cestných vozidiel sa ako referenčná geometria často používa Ahmedovo teleso, ktoré je od roku 1984 zaužívaným benchmarkom pre výskum prúdenia okolo zjednodušenej karosérie vozidla [24]. Napriek výraznému zjednodušeniu dokáže reprodukovать základné aerodynamické javy typické pre cestné vozidlá, najmä odklon prúdenia v prednej časti, prúdenie pozdĺž strednej časti modelu a vznik separácie a úplavu za zadnou časťou. Teleso tvorí zaoblená predná časť, hranatý stredný blok a zadná šikmá plocha, ktorá približne reprezentuje zadné okno vozidla typu hatchback.



Obr. 4 – 2D zobrazenie Ahmedovho telesa so základnými rozmermi

Navrhnutý metodický postup však nie je viazaný výlučne na Ahmedovo teleso. Je možné ho aplikovať aj na inú zjednodušenú alebo reálnu geometriu vozidla. V takom prípade je však potrebné vytvoriť vlastnú referenčnú konfiguráciu a presne definovať jej rozmery, mierku, okrajové podmienky a spôsob vyhodnocovania výsledkov.

Najdôležitejším parametrom Ahmedovho telesa je uhol sklonu zadnej šikmej plochy, ktorý výrazne ovplyvňuje režim prúdenia a výsledný aerodynamický odpor. Pri malých uhloch zostáva prúdenie prevažne prilepené k povrchu, v kritickej oblasti približne 12° až 30° dochádza k výraznej zmene režimu prúdenia a vzniku C-stĺpkových vírov, zatiaľ čo pri väčších uhloch nastáva úplné odtrhnutie prúdenia. Z tohto dôvodu sa pri experimentoch často používajú konfigurácie so sklonom 25° alebo 35° [24].

Pri návrhu experimentu je potrebné definovať aj mierku modelu, čelnú plochu, rýchlosť prúdenia a Reynoldsovo číslo. Tieto parametre by mali byť zvolené tak, aby umožnili porovnanie s dostupnými

štúdiami a zároveň rešpektovali možnosti použitého aerodynamického tunela. Pri experimentálnych meraniach je vhodné dodržiavať štandardné laboratórne podmienky podľa normy ISO 291 [25], čím sa zvyšuje reprodukovateľnosť výsledkov a ich porovnateľnosť s inými prácami.

Identifikácia a výber zón pre aplikáciu HLFC systému

Výber miesta pre umiestnenie *HLFC* systému je priamo závislý na analýze aerodynamickej charakteristiky referenčnej geometrie. Každá karoséria má jedinečné aerodynamické vlastnosti, preto nie je možné jednoznačne povedať, kde sa nachádza najvhodnejšie miesto pre *HLFC* systém.

V prípade použitia Ahmedovho telesa je k dispozícii veľká databáza štúdií, ktoré sa zaoberali experimentami na tomto telese. Vzhľadom na svoju relatívne jednoduchú geometriu ponúka toto teleso obmedzené možnosti pre aplikáciu systému – táto karoséria má niekoľko typických vírivých prúdov a separačných bodov, ktoré predstavujú vhodných kandidátov pre umiestnenie systému. Príkladom je napríklad Ahmedovo teleso s uhlom sklonu šikmej plochy 35° . Pri tomto uhle dochádza ku garantovanému odtrhnutiu prúdenia na hrane medzi strechou a šikmou plochou. Umiestnenie *HLFC* systému práve do tejto oblasti má najväčší potenciál priniesť zmenu v charakteristike prúdenia. Podobný prípad na Ahmedovom telese môže nastať pri voľbe uhla šikmej plochy 0° . V tomto prípade vznikne geometria pripomínajúca dodávku alebo van. Umiestnenie systému na hrany zadnej steny by mohlo mať za následok „pritiahnutie“ odtrhnutého prúdu, čím sa zmenší oblasť úplavu za vozidlom a teda dôjde k zníženiu odporu vozidla.

Pri použití inej geometrie ako Ahmedovho telesa platia rovnaké princípy. Analyzuje sa aerodynamika v okolí karosérie za pomoci *CFD* alebo experimentálnych dát (ak existujú). Pri tomto skúmaní sa hľadajú práve takéto separačné body ako boli spomenuté vyššie. Je však dôležité dodať, že pri použití tvarovo zložitejšej geometrie, napríklad zaoblené tvary karosérie dnešných automobilov, nemusia byť separačné body tak výrazné. Dôvodom sú jednak zaoblenejšie tvary, ktoré pomáhajú plynulému prúdeniu, ale taktiež to, že väčšie množstvo rôznych prvkov na karosérii (množstvo uhlov, zaoblení a podobne) spôsobuje väčšie množstvo vírov a pretínaní prúdnic, čiže je zložitejšie identifikovať kritické miesto, ktoré spôsobuje zhoršenie vlastností karosérie.

Niektoré karosérie môžu mať zrejmé separačné body, zväčša na zadnej hrane strechy alebo kufra, ktoré priamo ponúkajú možnosť umiestnenia systému. Avšak, existujú aj karosérie, ktoré v niektorej časti pôsobia ako aerodynamicky vyladené. Príkladom by mohlo byť vozidlo, ktoré má stabilné prúdenie okolo celej hornej časti vozidla, ale napríklad prúdenie okolo bočných stien nie je ideálne a dochádza k odtrhnutiu prúdu na konci zadných dverí alebo na zadnej hrane kufra. Tieto plochy opäť predstavujú vhodného kandidáta pre umiestnenie *HLFC* systému.

Definícia parametrov aktívneho systému

Po identifikácii vhodného miesta pre umiestnenie *HLFC* systému je potrebné zvoliť typ aktívneho riadenia prúdenia a definovať jeho parametre. Pre aplikáciu na cestné vozidlá prichádzajú do úvahy najmä systémy založené na odsávaní alebo vyfukovaní medznej vrstvy. Keďže účinnosť jednotlivých systémov závisí od geometrie karosérie, rýchlosti prúdenia a charakteru separácie, odporúča sa navrhnuť viacero variantov a ich účinnosť následne porovnať.

Pri návrhu systému je potrebné určiť najmä polohu aktívnej oblasti, veľkosť, tvar a hustotu otvorov, ich orientáciu voči smeru prúdenia a spôsob rozloženia na karosérii. Otvory môžu mať napríklad tvar

kruhových perforácií alebo drážok a môžu byť orientované kolmo na povrch, tangenciálne so smerom prúdenia alebo pod zvoleným uhlom. Pri návrhu je potrebné zohľadniť trojrozmerný charakter prúdenia, pretože aktívny systém nemusí byť vždy potrebné aplikovať po celej šírke karosérie.

Okrem geometrických parametrov je nutné definovať aj radiacie parametre systému, predovšetkým intenzitu odsávania alebo vyfukovania a jeho časový režim. Systém môže pracovať kontinuálne alebo pulzne, pričom oba prístupy môžu viesť k rozdielnym výsledkom. Intenzita aktívneho systému sa môže vyjadriť pomocou bezrozmerných koeficientov, napríklad koeficientu hybnosti pri vyfukovaní:

$$C_{\mu F} = \frac{A_J}{A_B} \cdot \frac{v_J^2}{v_r^2} \quad (1)$$

kde A_J je veľkosť premietnutej plochy trysky (otvoru), A_B je veľkosť premietnutej plochy testovaného telesa, v_J je rýchlosť vyfukovaného vzduchu a v_r je rýchlosť voľného prúdu (v tomto kontexte rýchlosť jazdy vozidla) [26].

Hodnoty týchto koeficientov je vhodné voliť čo najnižšie, avšak tak, aby bol dosiahnutý požadovaný aerodynamický účinok. Príliš vysoká intenzita odsávania alebo vyfukovania môže zvýšiť energetickú náročnosť systému a znížiť jeho celkovú efektivitu.

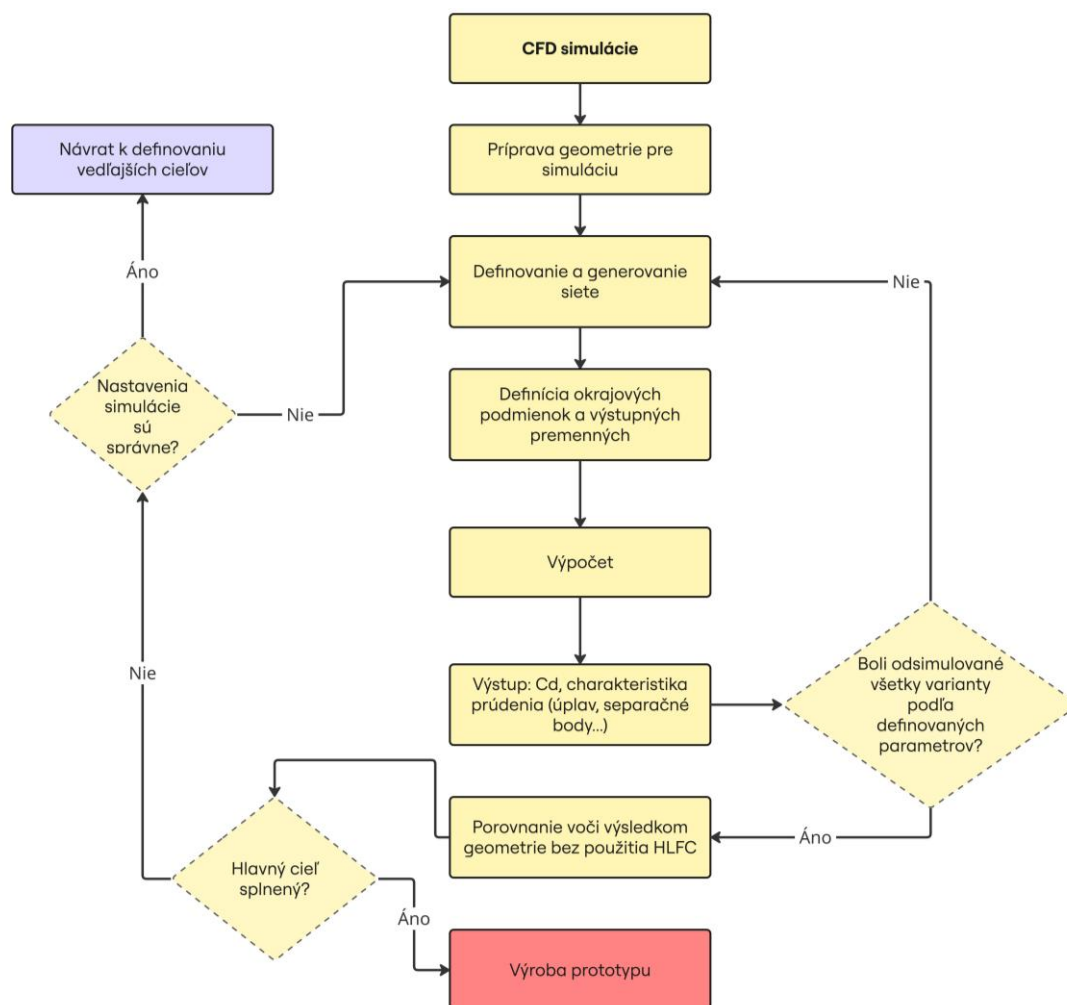
Metodika numerickej simulácie (CFD)

Základným krokom numerickej časti metodiky je voľba simulačného softvéru a vhodného výpočtového prístupu. V oblasti aerodynamiky vozidiel sa bežne využívajú softvéry ako *Ansys Fluent* [27–29], *OpenFOAM* [30, 31] alebo Siemens *STAR-CCM+* [32, 33]. Pri simuláciách turbulentného prúdenia je následne potrebné zvoliť vhodný prístup, napríklad *RANS*, *LES* alebo *IDDES*.

Prístup *RANS* patrí medzi najpoužívanejšie riešenia, pretože je výpočtovo efektívny a umožňuje realizovať väčší počet parametrických štúdií. Jeho nevýhodou je nižšia schopnosť zachytiť nestacionárne javy a detailnú dynamiku úplavu. Naopak, *LES* umožňuje podrobnejšie zachytiť veľké vírové štruktúry a časovo závislé javy, avšak vyžaduje výrazne jemnejšiu sieť a vyšší výpočtový výkon. Keďže pri návrhu *HLFC* systémov pre cestné vozidlá je potrebné porovnávať viacero konfigurácií, ako vhodný kompromis sa javí práve prístup *RANS*.

Po voľbe výpočtového prístupu nasleduje definovanie virtuálneho aerodynamického tunela. Jeho rozmery sa zvyčajne určujú vzhľadom na dĺžku alebo výšku testovaného modelu tak, aby bol obmedzený vplyv okrajových podmienok na prúdenie v okolí vozidla. Následne sa vytvorí výpočtová sieť. Pri *CFD* simuláciách sa využívajú najmä hexahedrálne, tetrahedrálne alebo hybridné siete. Hexahedrálna sieť poskytuje vyššiu presnosť pri zachytávaní smerového prúdenia a nižšiu numerickú chybu, jej príprava je však náročnejšia. Tetrahedrálna sieť je vhodnejšia pre zložité geometrie, ale zvyčajne vyžaduje väčší počet elementov a dôkladné zjemnenie v oblasti stien modelu.

Pri tvorbe výpočtovej siete je potrebné zohľadniť tvarovú zložitosť modelu a požadovanú presnosť výpočtu. Pri jednoduchších geometriách je možné využiť hexahedrálnu sieť, ktorá poskytuje dobrú presnosť pri zachytávaní smerového prúdenia. Pri zložitejších tvaroch je vhodnejšia tetrahedrálna alebo hybridná sieť, napríklad typu *Poly-Hexcore*, ktorá kombinuje výhody viacerých typov elementov. V blízkosti stien modelu je potrebné použiť zjemnenie siete, aby bolo možné dostatočne presne zachytiť správanie medznej vrstvy.



Obr. 5 - Vývojový diagram pre fázu numerických simulácií

Kvalita siete v blízkosti steny sa zvyčajne hodnotí pomocou bezrozmerného parametra (y^+). Jeho cieľová hodnota závisí od zvoleného turbulentného modelu a spôsobu riešenia medznej vrstvy. Pri nízkych hodnotách (y^+) je možné presnejšie zachytiť prúdenie vo viskózne podvrstve, čo však výrazne zvyšuje počet elementov a výpočtovú náročnosť. Po zvolení cieľovej hodnoty (y^+) je potrebné určiť výšku prvej vrstvy elementov, napríklad pomocou dostupných výpočtových vzťahov alebo špecializovaných kalkúlátorov [29, 34].

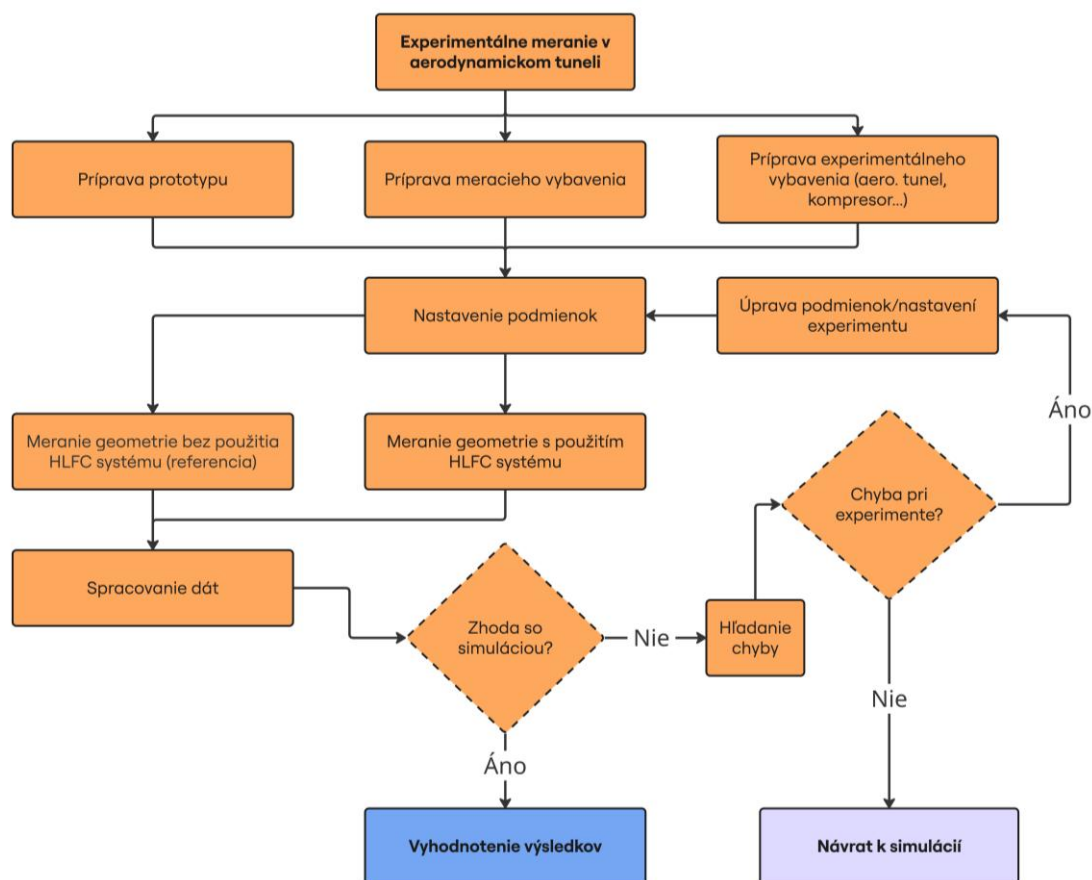
Dôležitou súčasťou *CFD* modelu je aj správne nastavenie okrajových podmienok. Na vstupe do domény sa zvyčajne definuje rýchlosť prúdenia, na výstupe tlaková podmienka a na stenách tunela vhodný typ steny podľa charakteru riešeného problému. Pre otvory *HLFC* systému sa nastavujú podmienky vstupu alebo výstupu prúdenia podľa toho, či ide o vyfukovanie alebo odsávanie. Hodnoty týchto podmienok musia zodpovedať navrhnutým parametrom aktívneho systému.

Pri simulácii podlahy je možné použiť pevnú alebo pohyblivú podlahu. Pohyblivá podlaha lepšie reprezentuje reálny pohyb vozidla po vozovke, avšak jej použitie by malo zodpovedať možnostiam následného experimentálneho overenia. Z dôvodu porovnateľnosti *CFD* a experimentu je vhodné nastaviť numerický model tak, aby čo najviac zodpovedal podmienkam použitého aerodynamického tunela. Súčasťou prípravy simulácie by mala byť aj štúdia nezávislosti siete, pri ktorej sa porovnáva stabilizácia sledovaných veličín, najmä koeficientu odporu (C_d), pri rôznej jemnosti siete.

Metodika experimentálneho overovania

Experimentálne overenie výsledkov *CFD* simulácií prebieha v aerodynamickom tuneli. Pred meraním je potrebné pripraviť model, meracie zariadenia a technické vybavenie potrebné na činnosť *HLFC* systému, teda zdroj pretlaku alebo podtlaku a jeho prepojenie s otvormi v modeli. Prvým krokom experimentu má byť vždy referenčné meranie bez použitia *HLFC* systému, ktoré slúži ako základ pre porovnanie účinnosti navrhnutých variantov.

Pri umiestnení modelu do tunela je potrebné zohľadniť vplyv podlahy a stien testovacej sekcie. Ak tunel nedisponuje pohyblivou podlahou, je možné použiť vyvýšenú dosku, ktorá čiastočne obmedzí vplyv medznej vrstvy vznikajúcej na podlahe tunela. Pri *HLFC* systémoch je zároveň potrebné navrhnuť prívod hadíc alebo potrubí tak, aby čo najmenej zasahovali do prúdenia v okolí modelu.



Obr. 6- Vývojový diagram metodického postupu pre experiment

Základným výstupom experimentu je meranie odporovej sily, z ktorej sa následne určí koeficient odporu. Podľa dostupného vybavenia a vedľajších cieľov je možné meranie doplniť aj o tlakové snímače alebo vizualizáciu prúdenia. Tieto metódy nie sú vždy nevyhnutné, ale môžu výrazne pomôcť pri hodnotení charakteru úplavu, separácie prúdenia a účinku *HLFC* systému.

Pri vyhodnocovaní výsledkov je potrebné zohľadniť aj neistoty merania, najmä presnosť meracích zariadení, opakovateľnosť meraní, nastavenie tlaku alebo podtlaku a presnosť uloženia modelu v tuneli. Pre zvýšenie spoľahlivosti výsledkov sa odporúča každé meranie opakovať minimálne päťkrát a následne vyhodnotiť priemerné hodnoty a rozptyl nameraných údajov.

5 APLIKÁCIA NAVRHNUTÉHO METODICKÉHO POSTUPU

Aby bolo možné potvrdiť, či je vyššie navrhnutá metodika správne zostavená, je potrebné vyskúšať prezentovaný postup a zistiť, či je s jeho pomocou možné skutočne dosiahnuť redukcii aerodynamického odporu.

Prvým zásadným krokom metodiky je voľba geometrie, na ktorej sa budú všetky testy realizovať. Pre tieto účely sa najviac hodí Ahmedovo teleso a to z viacerých dôvodov. Veľkou výhodou je práve jeho jednoduchosť – testované deje sa budú dať relatívne ľahko pozorovať, pretože do deja nevstupuje veľké množstvo rôznych vírov, ktoré by ovplyvnili výsledky.

Pred samotným návrhom geometrie bolo vopred počítané s tým, že na experimentálne merania bude využitý aerodynamický tunel Žilinskej univerzity. Vzhľadom na rozmery testovacej sekcie tohto tunela (prierez 350 mm x 350 mm, dĺžka 650 mm) bola zvolená mierka Ahmedovho telesa 1:3. Blokáž tunela v tomto prípade je 10%. Uhol sklonu šikmej plochy bol zvolený 35°, pretože pri tomto sklone dochádza k zaručenému odtrhnutiu prúdu vzduchu. Použitie *HLFC* má potenciál toto prúdenie pritiahnuť späť k šikmej ploche, takže je možné predpokladať, že vzniknutý jav by mal byť ľahko pozorovateľný.

Tvorba referenčnej CFD simulácie

Pre numerické simulácie bol použitý softvér *Ansys Fluent 2025 R1*. Model Ahmedovho telesa bol do softvéru importovaný vo formáte *STP* a umiestnený do výpočtovej domény, ktorej rozmery boli prispôbené testovacej sekcii použitého aerodynamického tunela. Keďže tunel nedisponuje pohyblivou podlahou, pri návrhu domény sa uvažovalo s umiestnením modelu na vyvýšenú dosku približne 50 mm nad podlahou tunela.

Výpočtová doména bola rozdelená na dve časti. V blízkosti modelu bola použitá jemnejšia tetrahedrálňa sieť a vo vzdialenejšej oblasti hexahedrálňa sieť. Na povrch Ahmedovho telesa bolo aplikované zjemnenie siete a vrstvy typu *Inflation*, aby bolo možné lepšie zachytiť správanie medznej vrstvy. Cieľová hodnota bola zvolená ($y^+ = 1$), pričom výška prvej vrstvy bola určená pomocou dostupných výpočtových nástrojov [34].

Okrajové podmienky simulácie boli nastavené tak, aby čo najviac zodpovedali podmienkam experimentálneho merania. Na vstup domény bola zadaná rýchlosť prúdenia 14 m.s^{-1} , čo zodpovedá približne 50 km.h^{-1} a Reynoldsovmu číslu ($3,3 \times 10^5$). Na výstupe bola použitá podmienka *Outlet*, bočné a horná stena boli nastavené ako *Symmetry* a spodná stena ako pevná nepohyblivá podlaha.

Správnosť základného nastavenia bola overená kontrolnou simuláciou Ahmedovho telesa v mierke 1:1 s pohyblivou podlahou. Dosiahnutá hodnota ($C_d = 0,278$) sa veľmi dobre zhodovala s literatúrou, kde sa uvádza hodnota približne ($C_d = 0,279$) [35, 36]. Táto zhoda potvrdila vhodnosť zvoleného numerického nastavenia.

Následne bola vykonaná štúdia nezávislosti siete, ktorej cieľom bolo určiť vhodnú jemnosť siete vzhľadom na presnosť výsledku a výpočtovú náročnosť. Celkovo bolo vykonaných 11 iterácií s rôznymi veľkosťami elementov. Ako optimálne bolo zvolené nastavenie z iterácie č. 10, pri ktorom už ďalšie zjemňovanie siete neprinieslo významnú zmenu koeficientu odporu. Táto sieť bola následne použitá

pre všetky ďalšie simulácie. Vyššia výsledná hodnota odporu oproti referenčným štúdiám bola spôsobená najmä užšou výpočtovou doménou a použitím pevnej podlahy namiesto pohyblivej.

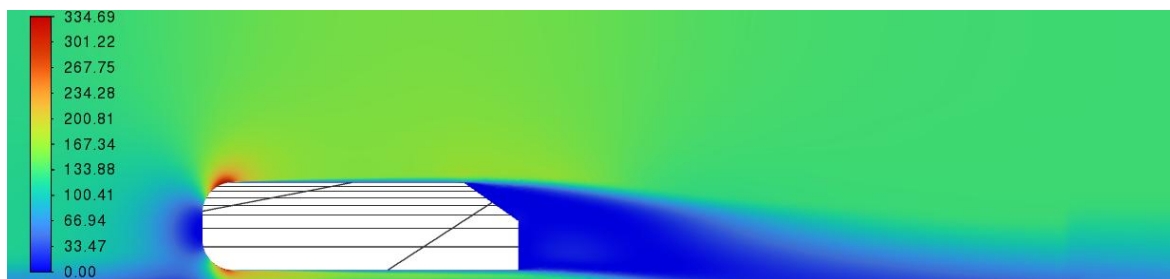
Nastavenia siete sú uvedené v druhom stĺpci tabuľky 1 vždy v nasledovnom poradí – Veľkosť elementu pre *Body Sizing* veľkej domény (hexahedrálne elementy) / Veľkosť elementu pre *Body Sizing* malej domény (tetrahegrálne elementy) / Veľkosť elementu pre *Face Sizing*.

Tab. 1 - Štúdia nezávislosti siete

Iterácia	Nastavenie siete	Vygenerovaná sieť		Pevná podlaha	Pohyblivá podlaha
1	30/20/10	Uzly	82671	C_d	C_d
		Elementy	208653	0.4544	0.4427
2	24/17/8	Uzly	125069	C_d	C_d
		Elementy	305012	0.4456	0.4326
		Zmena	1.5	-1.9%	-2.3%
3	20/15/7	Uzly	167406	C_d	C_d
		Elementy	402816	0.4406	0.4299
		Zmena	1.3	-1.1%	-0.6%
4	18/12/6	Uzly	238243	C_d	C_d
		Elementy	634834	0.4358	0.4187
		Zmena	1.6	-1.1%	-2.6%
5	18/10/5	Uzly	305746	C_d	C_d
		Elementy	942857	0.4254	0.4087
		Zmena	1.5	-2.4%	-2.4%
6	15/10/5	Uzly	371388	C_d	C_d
		Elementy	1017429	0.4262	0.4082
		Zmena	1.1	0.2%	-0.1%
7	15/8/4	Uzly	517919	C_d	C_d
		Elementy	1703132	0.4148	0.4005
		Zmena	1.7	-2.7%	-1.9%
8	17/7/3	Uzly	758247	C_d	C_d
		Elementy	2554436	0.4112	0.3987
		Zmena	1.5	-0.9%	-0.4%
9	14/6/2	Uzly	1218786	C_d	C_d
		Elementy	4234946	0.4034	0.3924
		Zmena	1.7	-1.90%	-1.6%
10	15/4/2	Uzly	2182212	C_d	C_d
		Elementy	7641275	0.3955	0.3883
		Zmena	1.8	-2.0%	-1.0%
11	14/5/1.5	Uzly	3015576	C_d	C_d
		Elementy	9131969	0.3926	0.3860
		Zmena	1.2	-0.7%	-0.6%

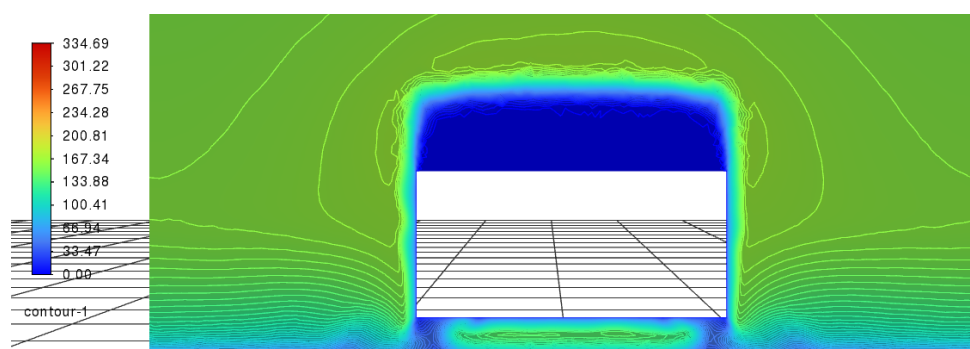
Výsledky referenčnej simulácie

Z obrázku 8 je možné pozorovať, že v oblasti za vozidlom dochádza k veľkému úplavu, tak ako aj bolo pôvodne očakávané. Obrázok 7 zobrazuje rez stredovou rovinou telesa, na ktorej sú farebne vyznačené kontúry dynamického tlaku. Tmavomodré plochy vyobrazujú oblasti veľmi nízkeho, až nulového dynamického tlaku, čo znamená, že v týchto miestach dochádza k zníženému pohybu vzduchu.



Obr. 7 - Zobrazenie kontúr dynamického tlaku v stredovej rovine

Na obrázku 8 je vyobrazený rez v rovine priechne na smer jazdy, ktorý je umiestnený približne v polovici zadnej šikmej plochy. V tejto rovine sú vykreslené kontúry dynamického tlaku. Z obrázku je možné pozorovať, že úplav zobrazený na predchádzajúcom obrázku je rovnomerne rozložený po šírke vozidla. To znamená, že na okrajoch vozidla nevznikajú žiadne výrazné víry, ktoré by oblasť úplavu zmenšovali.



Obr. 8 - Zobrazenie kontúr dynamického tlaku v priečnej rovine v strede zadnej šikmej plochy

Definícia vedľajších cieľov

Nasledujúcim krokom metodiky je definícia vedľajších cieľov, ktorá prichádza po identifikovaní oblastí s veľkým aerodynamickým odporom, v tomto prípade sa jedná o úplav za vozidlom. Hlavným cieľom metodiky je zníženie odporu, vedľajšie ciele majú za úlohu definovať ako bude hlavný cieľ dosiahnutý. V prípade tohto testu bude primárnym vedľajším cieľom zredukovanie oblasti úplavu za vozidlom. Sekundárnym vedľajším cieľom testu je pritiahnutie odtrhnutého prúdenia k šikmej ploche.

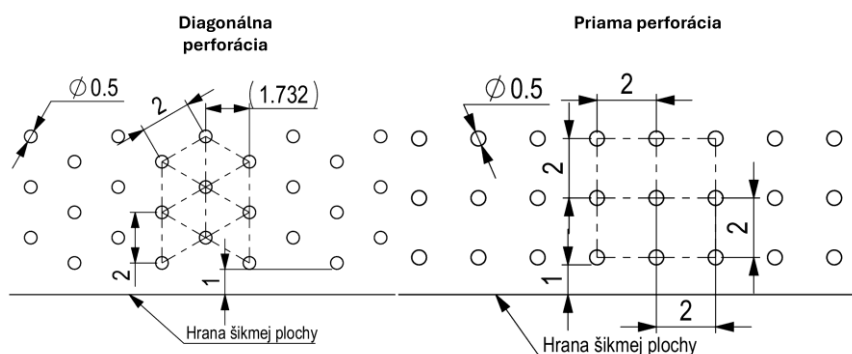
Voľba HLFC systému a jeho ovládacích prvkov

Po definovaní vedľajších cieľov je potrebné zvoliť vhodný *HLFC* systém. Metodika v tomto kroku umožňuje dva prístupy. Prvý spočíva vo výbere jedného systému a podrobnejšom skúmaní jeho ovládacích parametrov, napríklad hustoty perforácie, veľkosti otvorov, smeru odsávania alebo vyfukovania. Druhý prístup je založený na porovnaní viacerých *HLFC* systémov, avšak s menším dôrazom na detailnú optimalizáciu každého z nich. V tejto práci bol zvolený druhý prístup, pretože umožnil porovnať účinnosť rôznych spôsobov aktívneho riadenia prúdenia a zároveň lepšie demonštrovať použiteľnosť navrhutej metodiky.

Pre overovací prípad boli zvolené tri varianty *HLFC* systému, ktoré mali potenciál ovplyvniť separáciu prúdenia a charakter úplavu za modelom. Prvým riešením bolo odsávanie medznej vrstvy v blízkosti separačného bodu, teda v oblasti prechodu medzi strechou modelu a šikmou zadnou plochou.

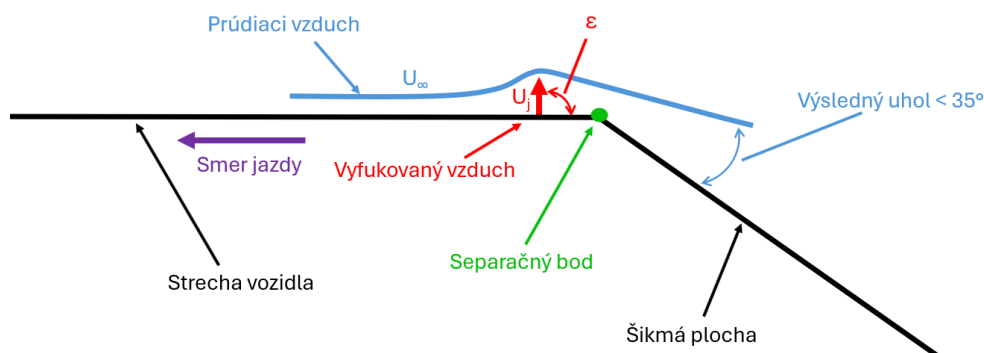
Odsávanie v tejto oblasti môže odstrániť časť nízkoenergetického prúdenia z medznej vrstvy a tým podporiť jeho pritiahnutie k šikmej ploche [12, 14, 15, 17].

Tento systém bol riešený v dvoch geometrických variantoch. V prvom prípade bolo odsávanie realizované pomocou drážky umiestnenej tesne za separačným bodom. V druhom prípade bola použitá perforácia povrchu, ktorá umožňuje rovnomernejšie rozloženie odsávania na zvolenej ploche.



Obr. 9 - Hustota a rozloženie perforácií

Druhým zvoleným *HLFC* systémom bolo kolmé vyfukovanie na streche modelu. Cieľom tohto riešenia bolo ovplyvniť prúdenie pred separačnou hranou tak, aby sa zmenil smer prúdu vstupujúceho na šikmú zadnú plochu. Predpokladalo sa, že vhodne nastavené vyfukovanie môže znížiť účinný uhol medzi prúdom a šikmou plochou, a tým podporiť opätovné priľnutie prúdenia. Pre tento variant bola použitá drážka rovnakého rozmeru ako pri odsávaní a zároveň aj perforácia v diagonálnom rozložení. Pri perforovanom variante bol sledovaný aj vplyv uhla vyfukovania, pričom sa porovnávali hodnoty 90°, 45° a 30°.



Obr. 10 - Očakávaný princíp fungovania kolmého vyfukovania

Tretím spôsobom aktívneho riadenia bolo tangenciálne vyfukovanie v smere jazdy. V tomto prípade bolo vyfukovanie umiestnené v oblasti zhodnej s odsávaním, teda tesne pod separačným bodom. Cieľom bolo dodať energiu prúdeniu v blízkosti šikmej plochy a podporiť jeho priľnutie. Aj tento systém bol testovaný vo variante s drážkou a s diagonálnou perforáciou.

Pre všetky navrhnuté konfigurácie boli uvažované štyri intenzity odsávania alebo vyfukovania. Výstupná rýchlosť trysiek bola následne vypočítaná pomocou rovnice 1 ako vstupný parameter pre CFD simulácie. Koeficient vyfukovania/odsávania bol zvolený na základe hodnoty koeficientu, ktorá sa

bežne volí pre lietadlá, a to konkrétne 0,02 [12, 14-16]. Keďže nie je možné s istotou povedať, či bude táto hodnota vhodná aj pre cestné vozidlá bol výpočet realizovaný pre rozsah $C_{\mu F}$ od 0,015 do 0,0225.

Tab. 2 - Vypočítané rýchlosti trysiek

	Plocha trysky [m ²]	Rýchlosť trysiek [m.s ⁻¹]			
		$C_{\mu F} = 0,015$	$C_{\mu F} = 0,0175$	$C_{\mu F} = 0,020$	$C_{\mu F} = 0,0225$
Drážka	0,000244	12,483	13,483	14,414	15,288
Diagonálna perforácia	0,00004292	29,761	32,146	34,365	36,450
Priama perforácia	0,00003763	31,785	34,331	36,702	38,928

CFD simulácie variantov s HLFC systémami

Pre potreby CFD simulácií boli na modeli vopred definované plochy trysiek, na ktoré boli následne aplikované okrajové podmienky zodpovedajúce odsávaniu alebo vyfukovaniu podľa zvolených parametrov. V okolí týchto plôch bola sieť lokálne zjemnená, aby bolo možné presnejšie zachytiť zmeny prúdenia v blízkosti aktívneho systému.

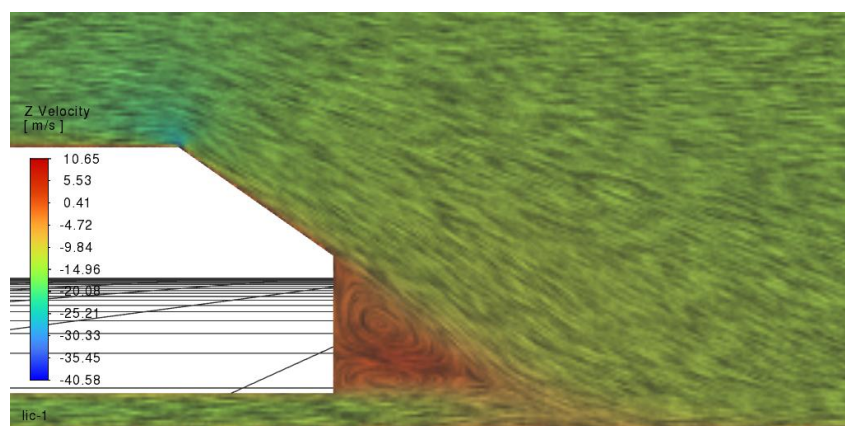
Hlavným sledovaným parametrom bol koeficient aerodynamického odporu. Doplnkovo boli vyhodnocované aj rezy stredovou rovinou, ktoré umožnili posúdiť charakter prúdenia a splnenie vedľajších cieľov. Výsledky jednotlivých variantov HLFC systému boli porovnané s referenčnou hodnotou bez aktívneho riadenia prúdenia, ktorá mala hodnotu $C_d = 0,3955$.

Tab. 3 - Výsledné hodnoty koeficientov odporu pre jednotlivé varianty

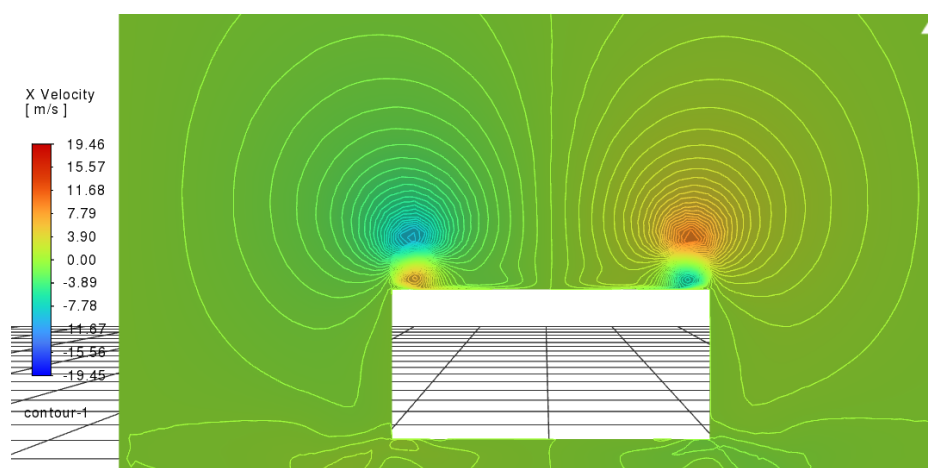
Variant		Koeficient odporu			
		$C_{\mu F} = 0,015$	$C_{\mu F} = 0,0175$	$C_{\mu F} = 0,020$	$C_{\mu F} = 0,0225$
Odsávanie	Drážka	0.5326 35.7%	0.4565 16.3%	0.3993 1.7%	0.3550 -9.6%
	Diagonálna perforácia	0.4900 24.8%	0.4202 7.0%	0.3676 -6.4%	0.3272 -16.7%
	Priama perforácia	0.4887 24.5%	0.4195 6.9%	0.3677 -6.3%	0.3263 -16.9%
Vyfukovanie kolmé	Drážka	0.6636 69.0%	0.5147 31.1%	0.4648 18.4%	0.4239 8.0%
	Diagonálna perforácia, kolmý smer (90°)	0.4871 24.1%	0.4175 6.3%	0.3655 -6.9%	0.3252 -17.2%
	Diagonálna perforácia, 45°	0.4847 23.5%	0.4153 5.8%	0.3632 -7.5%	0.3228 -17.8%
	Diagonálna perforácia, 30°	0.4851 23.6%	0.4157 5.9%	0.3636 -7.4%	0.3231 -17.7%
Vyfuk. tang.	Drážka	0.5016 27.8%	0.4308 9.7%	0.3779 -3.7%	0.3366 -14.3%
	Diagonálna perforácia	0.5034 28.2%	0.4313 9.9%	0.3770 -4.0%	0.3350 -14.7%

Z výsledkov vyplýva, že najvhodnejší HLFC systém je práve vyfukovanie na streche a to konkrétne vyfukovanie pod uhlom 45°. Tangenciálne vyfukovanie sa ukázalo ako najmenej efektívne. Taktiež je možné pozorovať, že pri odsávaní a aj pri kolmom vyfukovaní sa drážka ukázala ako nie veľmi efektívne

riešenie. Z pohľadu na rezy vyplynulo, že splnenie sekundárneho vedľajšieho cieľa sa podarilo iba v prípade odsávania drážkou. Na obrázku 11 je zobrazený rez so zvýraznením rýchlostí v smere osi Z.



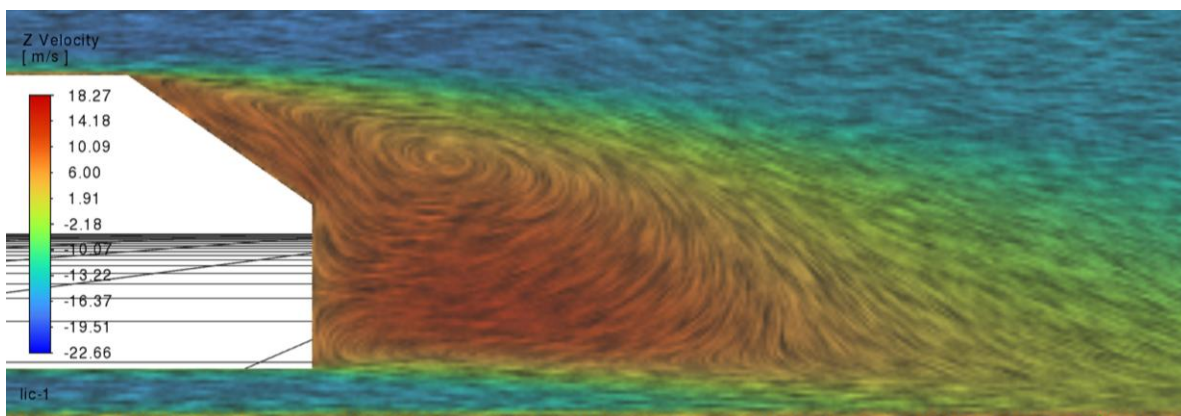
Obr. 11 - Pohľad na úplav za vozidlom; odsávanie drážkou



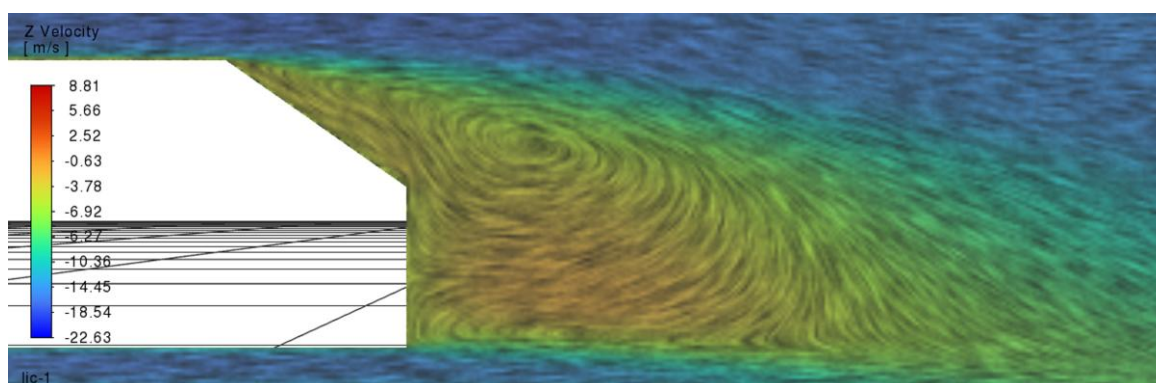
Obr. 12 - Vykreslenie rýchlostí v osi X (pričná os) v pričnej rovine; odsávanie drážkou

Z obrázku je zrejmé, že v porovnaní s úplavom v referenčnej simulácii (Obr. 7) došlo k jeho veľmi výraznej redukcii, takže by sa dalo očakávať aj výrazné zníženie odporu, k čomu však nedošlo. Dôvod je možné odhaliť po pohľade na rez pričnou rovinou (Obr. 12). Obrázok zobrazuje kontúry rýchlostí v smere osi X (na obrázku horizontálna os). Je možné pozorovať, že v strede vozidla je rýchlosť nulová. Úplav je v týchto miestach zredukovaný. Na okrajoch vozidla došlo k vzniku dvoch masívnych vírov. Tieto víry vznikajú tak, že vzduch prúdiaci popri bočných stenách vozidla sa snaží dostať ponad šikmú plochu. V tomto prípade sa však nad šikmou plochou nachádza prúd pritiahnutý odsávaním. Stret týchto dvoch prúdov vytvorí pozorovaný vír. Tieto víry sú zdrojom značného aerodynamického odporu.

Použitie perforácie pri odsávaní nedocielilo želané pritiahnutie prúdu, avšak došlo k značnej redukcii odporu. Rozdiel medzi priamou a diagonálnou perforáciou bol v tomto prípade iba minimálny. Obrázky 13 a 14 zobrazujú priame porovnanie úplavu medzi referenčnou simuláciou a simuláciou s odsávaním priamou perforáciou. Veľkosť samotného úplavu zostala takmer nezmenená, avšak už na prvý pohľad je zrejmé, že došlo k redukcii jeho intenzity, čo má za následok zníženie celkového odporu.

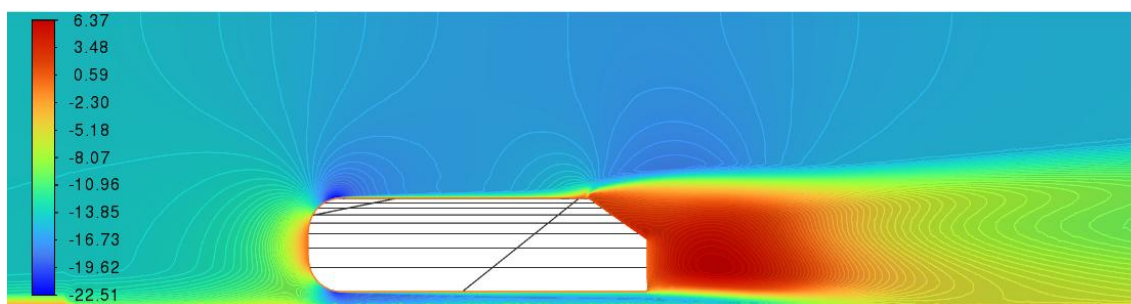


Obr. 13 - Rýchlosti v smere jazdy (os Z) v stredovej rovine pre referenčnú simuláciu (bez HLFC)



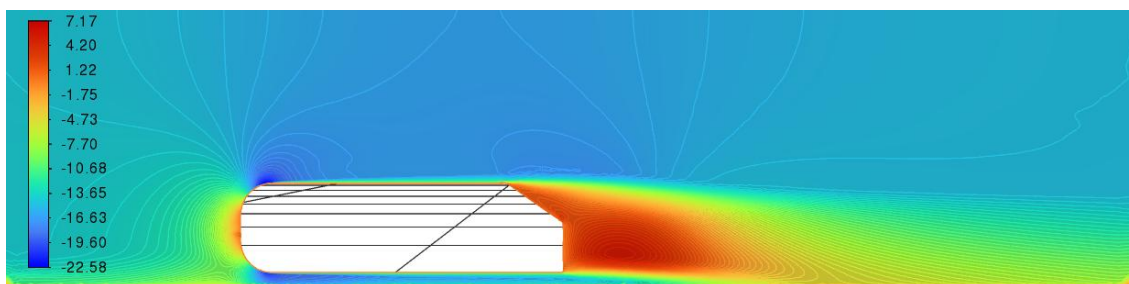
Obr. 14 - Rýchlosti v smere jazdy (os Z) v stredovej rovine pre odsávanie priamou perforáciou

Kolmé vyfukovanie drážkou sa nepriblížilo k očakávanému výsledku, preto ani nebolo testované v konfiguráciách s vyfukovaním pod uhlom 45° alebo 30° . Ako je zrejmé z obrázku 15, prúdenie bolo až príliš vydvihnuté a dokonca ešte zväčšilo oblasť úplavu a došlo k zvýšeniu odporu.



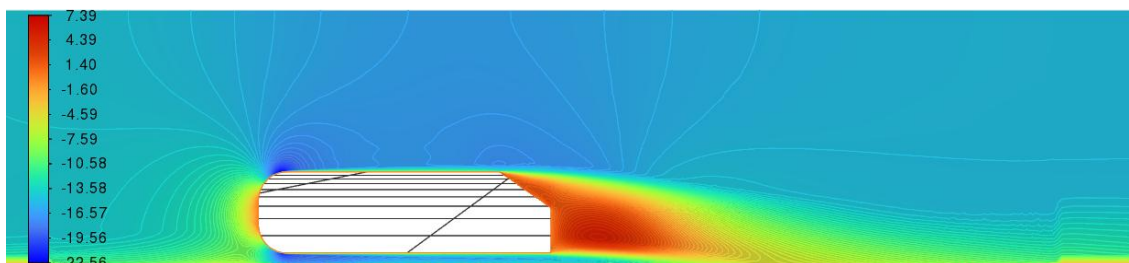
Obr. 15 - Rýchlosti v smere jazdy (os Z) v stredovej rovine; kolmé vyfukovanie drážkou

Vyfukovanie na streche pomocou diagonálnej perforácie (Obr. 16) sa práve ukázalo ako výhodnejšie riešenie, a to napriek tomu, že tento variant v skutočnosti nefungoval tak, ako bolo očakávané (Obr. 10). Namiesto vytvorenia „steny,“ ktorá nadvihne prúd a vytvorí vlnku perforácia vytvorila drobné trojdimenzionálne (všesmerové) víry v medznej vrstve. Toto drobné energizovanie pomohlo stiahnuť časť prúdenia nižšie, čím sa mierne zmenšila veľkosť úplavu, ale hlavne sa znížila jeho intenzita, čo výrazne napomohlo zníženiu celkového odporu.



Obr. 16 - Rýchlosti v smere jazdy v stredovej rovine; kolmé vyfukovanie diagonálnou perforáciou

Podobným spôsobom sa prejavil aj efekt tangenciálneho vyfukovania (Obr. 17). Vyfukovaný prúd vytvoril drobné víry, ktoré pomohli zmierniť intenzitu úplavu. Tým, že vzduch je vyfukovaný pod úrovňou separačného bodu sa prirodzene znižuje výška úplavu, čo taktiež značne prispieva k zníženiu celkového odporu. V prípade tangenciálneho vyfukovania bol medzi drážkou a perforáciou zaznamenaný iba minimálny rozdiel.



Obr. 17 - Rýchlosti v smere jazdy v stredovej rovine; tangenciálne vyfukovanie drážkou

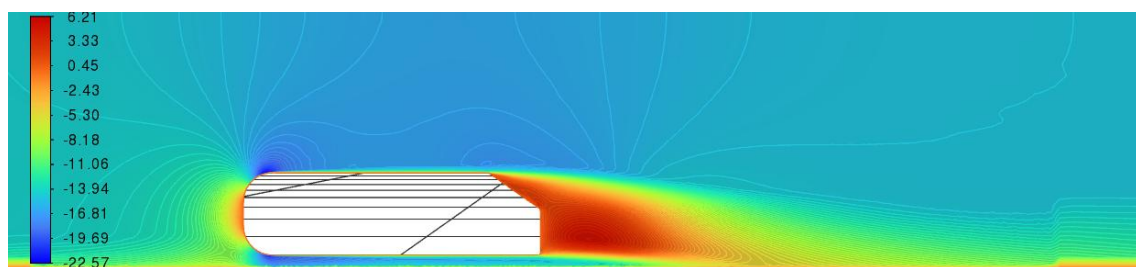
Všetky HLFC systémy dosiahli maximálnu efektivitu pri použití koeficientu vyfukovania/odsávania s hodnotou 0,0225. Nižšie hodnoty koeficientu neprinesli takú efektivitu, alebo dokonca celkový odpor zvýšili. Dôvodom tohto zvýšenia je práve trecí odpor. Výstupné rýchlosti na tryskách boli nižšie než okolitý prúd vzduchu. Zapnutie HLFC systému dodalo prúdenia len nízku energiu, takže výsledné prúdy boli buď príliš pomalé a kontraproduktívne.

Keďže variant s vyfukovaním kolmo na streche cez diagonálnu perforáciu sa ukázal ako najefektívnejší bolo dodatočne rozhodnuté, že sa bližšie preskúmajú jeho ovládacie parametre. Taktiež platí, že obdobný systém sa na lietadlách nevyužíva, takže nebol známy žiadny vhodný bod kam umiestniť drážku/perforáciu (vzdialenosť od separačného bodu, hrany šikmej plochy) na rozdiel od odsávania. V doteraz testovanom variante bola drážka/perforácia vzdialená 1 mm od hrany šikmej plochy.

Celkovo bolo otestovaných 7 ďalších variantov s rôznou vzdialenosťou perforácie od hrany šikmej plochy. Tieto varianty boli testované so smerom vyfukovania kolmým (90°) a so sklonom 45° . Uhol 30° už pre tieto varianty nebol testovaný, pretože z výsledkov (Tab. 3) je zrejmé, že k zlepšeniu voči 45° variantu nedochádza. Vyfukovanie drážkou už taktiež nebolo viac testované, všetky varianty využívajú iba diagonálnu perforáciu.

Najvyššia efektivita bola dosiahnutá pri vzdialenosti perforácie 100 mm (Obr. 18), resp. 150 mm a vyfukovaní pod uhlom 90° . Rozdiel vo výsledkoch pre tieto dva varianty je zanedbateľný. Z výsledkov je taktiež možné pozorovať, že v prvotných variantoch bolo vyfukovanie pod uhlom 45° mierne

efektívnejšie, avšak, od vzdialenosti 42 mm už dosahovalo lepšie výsledky práve vyfukovanie pod uhlom 90°.



Obr. 18 - Zobrazenie rýchlostí v smere jazdy v stredovej rovine; kolmé vyfukovanie, posun o 100 mm

Tab. 4 - Výsledné hodnoty koeficientov odporu pre dodatočne testované varianty kolmého vyfukovania

Variant		Koeficient odporu			
		$C_{UF} = 0,015$	$C_{UF} = 0,0175$	$C_{UF} = 0,020$	$C_{UF} = 0,0225$
Vyfukovanie kolmé	Drážka	0.6033 53.67%	0.4679 19.18%	0.4225 7.62%	0.3854 -1.83%
	Bez posunu, 1 mm	0.4871 24.07%	0.4175 6.34%	0.3655 -6.90%	0.3252 -17.17%
	Posun 1, 6 mm	0.4859 23.76%	0.4166 6.11%	0.3648 -7.08%	0.3244 -17.37%
	Posun 2, 12 mm	0.4848 23.48%	0.4158 5.91%	0.3639 -7.31%	0.3236 -17.58%
	Posun 3, 24 mm	0.4825 22.90%	0.4137 5.37%	0.3622 -7.74%	0.3220 -17.98%
	Posun 4, 42 mm	0.4813 22.59%	0.4125 5.07%	0.3609 -8.07%	0.3209 -18.26%
	Posun 5, 100 mm	0.4805 22.39%	0.4118 4.89%	0.3602 -8.25%	0.3202 -18.44%
	Posun 6, 150 mm	0.4806 22.41%	0.4118 4.89%	0.3600 -8.30%	0.3203 -18.42%
	Posun 7, 220 mm	0.4821 22.80%	0.4135 5.32%	0.3619 -7.82%	0.3216 -18.08%
Vyfukovanie 45°	Bez posunu, 1 mm	0.4847 23.46%	0.4153 5.78%	0.3632 -7.49%	0.3228 -17.78%
	Posun 1, 6 mm	0.4843 23.36%	0.4149 5.68%	0.2628 -33.06%	0.3224 -17.88%
	Posun 2, 12 mm	0.4835 23.15%	0.4144 5.55%	0.3626 -7.64%	0.3222 -17.93%
	Posun 3, 24 mm	0.4825 22.90%	0.4135 5.32%	0.3619 -7.82%	0.3218 -18.03%
	Posun 4, 42 mm	0.4822 22.82%	0.4135 5.32%	0.3618 -7.85%	0.3217 -18.06%
	Posun 5, 100 mm	0.4821 22.80%	0.4133 5.27%	0.3616 -7.90%	0.3215 -18.11%
	Posun 6, 150 mm	0.4819 22.75%	0.4132 5.25%	0.3613 -7.97%	0.3215 -18.11%
	Posun 7, 220 mm	0.4826 22.92%	0.4135 5.32%	0.3622 -7.74%	0.3220 -17.98%

Experimentálne testovanie

Keďže experimentálne testovanie všetkých variantov by bolo mimoriadne časovo a materiálovo náročné, boli na základe výsledkov simulácií zvolené tri varianty pre experiment – kolmé vyfukovanie (90° , posun o 100 mm), odsávanie pomocou priamej perforácie a odsávanie pomocou drážky.

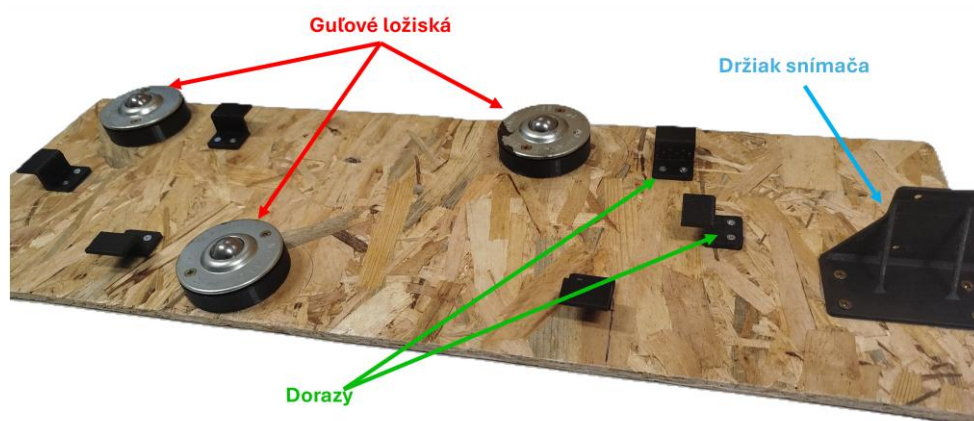
Dôvody pre voľbu práve týchto variantov sú hlavne ich výsledky v redukcii odporu, avšak, odsávanie pomocou drážky bolo zvolené primárne preto, aby sa otestovalo či sa naozaj podarí pritiahnuť prúdenie k šikmej ploche (sekundárny vedľajší cieľ).

Model je príliš veľký na to, aby bol vytlačený v jednom kuse ($L=345$ mm), preto je rozdelený na dve polovice. Na modeli sú taktiež predpripravené vybratia v tvare rybinovej drážky, do ktorých sa budú vkladať menšie segmenty pripravenou perforáciou/drážkou. Tieto segmenty sa budú počas testovania meniť pre jednotlivé varianty. Zadná polovica modelu je dutá. Jedna zo zadných nožičiek má taktiež predpripravenú dieru s priemerom 6 mm aby bolo možné priviesť pneumatickú hadicu priamo do dutiny. Z tejto dutiny sa potom priamo odsáva/vyfukuje vzduch cez jeden z dvoch segmentov.

Hlavným výstupom experimentu má byť koeficient odporu, ktorý sa následne porovná s výsledkom simulácie. Koeficient sa vypočíta z nameranej sily, ktorá pôsobí na model od prúdiaceho vzduchu.

Pre výpočet koeficientu je potrebná iba sila pôsobiaca v smere prúdu vzduchu (v smere jazdy), takže jednoosové snímanie sily je dostačujúce. Použitý bol digitálny snímač sily *IMADA DS2-1* s meracím rozsahom 5 N a presnosťou snímania 0,001 N.

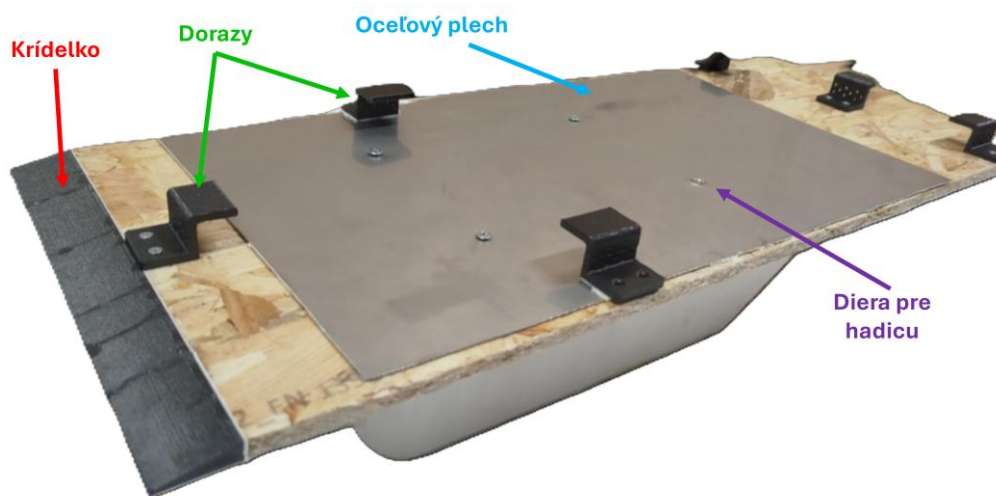
Model musí byť v tuneli voľne uložený, aby sa mohol pod vplyvom prúdiaceho vzduchu pohybovať. Tento pohyb potom vyvodí silu na snímač. Je preto potrebné zvoliť taký typ uloženia, aby jeho pasívne odpory čo najmenej ovplyvnili meranie. Optimálne uloženie pre tento prípad je uloženie na tri guľové ložiská. Model je umiestnený na vyvýšenu dosku 50 mm nad podlahu, aby spomalené prúdenie pri stene neovplyvnilo meranie. Výška uloženia sa zhoduje s výškou opernej plochy snímača sily.



Obr. 19 - Spodná doska meracieho prípravku

Merací prípravok sa teda skladá z dvoch dosiek s hrúbkou 9 mm, troch guľových ložísk a viacerých dorazových doštičiek, ktoré zabezpečujú, že v žiadnom prípade sa nemôže doska s modelom zosunúť z ložísk a poškodiť tunel. Na spodnej strane dosky s modelom je prilepený hladký oceľový plech,

ktorého účelom je minimalizovanie strát v trení medzi doskou a ložiskami. Spodná (pevná) doska je uložená na protišmykových gumových podložkách, ktoré zabráňujú jej pohybu v tuneli.



Obr. 20 - Horná doska meracieho prípravku (pohľad na spodnú stranu)

Po príprave potrebného vybavenia sa môže začať samotná fáza merania. V aerodynamickom tuneli boli merané nasledovné konfigurácie:

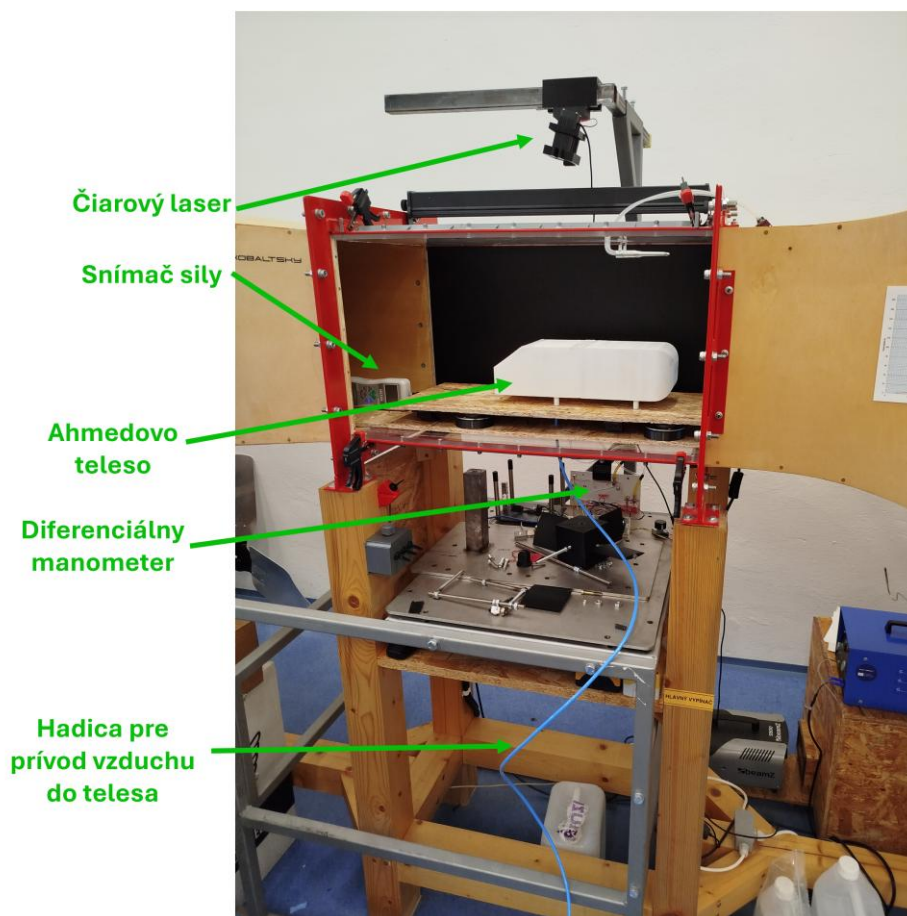
1. Merací prípravok: Ako prvé sa zrealizovalo meranie samotného meracieho prípravku bez Ahmedovho telesa. Dôvodom je, že horná doska prípravku je taktiež tlačaná prúdiacim vzduchom a teda zvyšuje výsledný odpor. Súčasťou odporu sú aj pasívne odpory, teda trenie medzi ložiskami a doskou.
2. Ahmedovo teleso: Druhé meranie sa zameralo na otestovanie samotného Ahmedovho telesa (bez *HLFC*) systému. Výsledok tohto merania sa použije pre referenčné porovnanie s ďalšími konfiguráciami a taktiež sa porovná aká je odchýlka od simulácie
3. Vyfukovanie na streche
4. Odsávanie drážkou
5. Odsávanie priamou perforáciou

Pre všetky varianty sa uskutočnilo päť opakovaných meraní. Výsledky všetkých meraní budú sumarizované v nasledujúcej podkapitole.

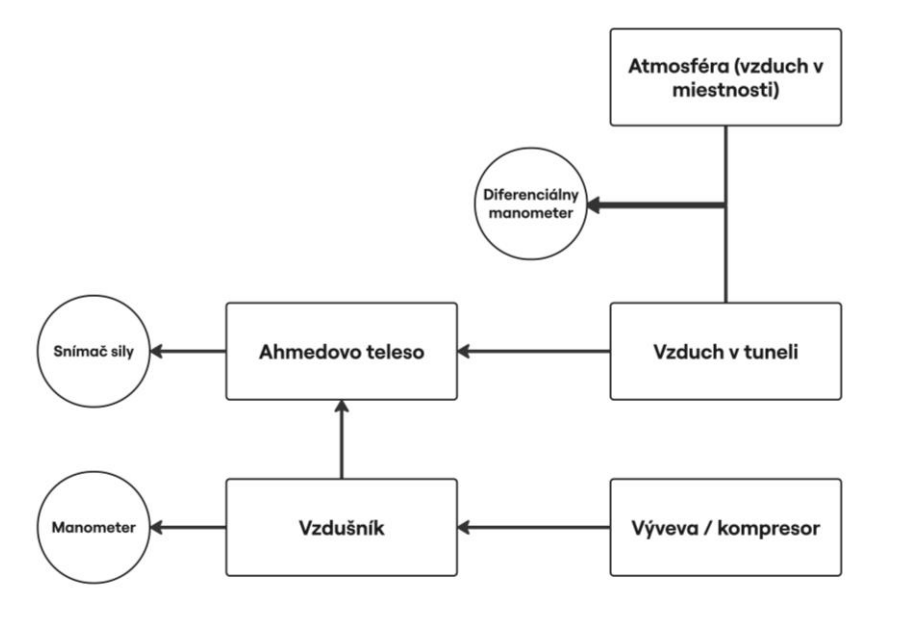
Po realizácii meraní prvých dvoch konfigurácií prišlo na rad meranie s použitím *HLFC* systémov. V tabuľke 2 sú uvedené rýchlosti vzduchu na výstupe z trysiek. Je však problematické merať túto rýchlosť priamo, preto je potrebné nájsť spôsob ako ju riadiť nepriamo. Na obrázku 22 je vyobrazená schéma celého meracieho systému pre merania s *HLFC* systémami.

Začiatkom schémy je meranie tlakového rozdielu za pomoci pithotových trubíc a kvapalinového manometra. Tento diferenciálny manometer ukazuje tlakový rozdiel medzi atmosférickým tlakom (tlak v miestnosti) a tlakom v testovacej sekcii tunela. Pomocou Bernoulliho rovnice (rovnica 1) sa následne vypočíta rýchlosť prúdu vzduchu v testovacej sekcii. Tento prúd pôsobí silou na Ahmedovo teleso, z ktorého je následne prenesená na snímač sily. Pri použití *HLFC* vstupuje do schémy aj vzduch privádzaný, resp. odvádzaný z Ahmedovho telesa. Model je pneumatickou hadicou prepojený so vzdušníkom. Výveva alebo kompresor riadia tlak vzduchu vo vzdušníku, ktorý je snímaný pomocou

manometra. Z tlakov odčítaných z oboch manometrov je potom možné stanoviť rýchlosť vzduchu na výstupe z trysiek.



Obr. 21 - Uloženie modelu v tuneli



Obr. 22 - Schéma merania sily pôsobiacej na Ahmedovo teleso pri využívaní HLFC systému

Rýchlosť vzduchu na výstupe z trysky sa vypočíta ako:

$$v_{tr} = C_v \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

kde: C_v je koeficient výtoku; ΔP je rozdiel tlakov; ρ je hustota vzduchu.

Koeficient výtoku je dôležitým parametrom výpočtu. Pre dierky v perforácií s malým priemerom (v tomto prípade 0,5 mm) v realite dôjde k stratám spôsobeným trením na stenách dierky a kontrakciou prúdu, takže reálna rýchlosť bude nižšia ako teoretická. Pre takéto malé otvory sa koeficient volí v rozsahu 0,6 až 0,8 [17, 37]. Keďže rýchlosť trysky je známa, z rovnice 2 sa vyjadří tlakový rozdiel:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{v_{tr}}{C_v}\right)^2 \quad (2)$$

Pre vyfukovanie na streche pomocou diagonálnej perforácie je požadovaná rýchlosť vzduchu na výstupe z trysky $36,450 \text{ m.s}^{-1}$. Koeficient výtoku sa uvažuje 0,7. Vypočítaná hodnota ΔP predstavuje potrebný tlakový rozdiel medzi tlakom na výstupe a tlakom vo vzdušníku. Je potrebné si uvedomiť, že manometer na vzdušníku meria tlak voči atmosférickému tlaku, avšak tlak v testovacej sekcii je nižší než atmosférický tlak v dôsledku rýchlejšieho prúdenia vzduchu.

Tlak zobrazený na manometri vzdušníka je rozdiel tlaku v nádrži a atmosférického tlaku:

$$\Delta P_{vzdusnik} = P_{tank} - P_{atm} \quad (3)$$

kde: P_{tank} je tlak vo vzdušníku a P_{atm} je atmosférický tlak. Tlak zobrazený na diferenciálnom kvapalinovom manometri:

$$\Delta P_{tunel} = P_{atm} - P_{stat} \quad (4)$$

kde: P_{stat} je statický tlak v testovacej sekcii tunela. Potrebný tlakový rozdiel vypočítaný z rovnice 15 bude súčtom tlaku odčítaného z manometra vzdušníka a tlaku odčítaného z kvapalinového manometra:

$$\Delta P = \Delta P_{vzdusnik} + \Delta P_{tunel} \quad (5)$$

Pri odsávaní sa pracuje so zápornými hodnotami tlaku, takže rovnica sa upraví:

$$\Delta P_{odsavanie} = -\Delta P_{vzdusnik} - \Delta P_{tunel} \quad (6)$$

Pri odsávaní je potrebné na vzdušník použiť manometer pre meranie podtlaku. Rýchlosti 14 m.s^{-1} zodpovedá hodnota $\Delta P_{tunel} = 120 \text{ Pa}$. Z rovnice 5 sa teda vyjadří potrebný tlak vzduchu v nádrži vzdušníka:

$$\Delta P_{vzdušník} = \Delta P - \Delta P_{tunel} \quad (5)$$

Potrebné hodnoty sú veľmi malé, preto bolo potrebné použiť manometer pre nízke tlaky. Z toho dôvodu sú aj vypočítané tlaky uvádzané v milibaroch.

Tab. 5 - Vypočítané hodnoty tlaku vo vzdušníku pre jednotlivé varianty merania

	Požadovaná rýchlosť [m.s ⁻¹]	Potrebný tlak/podtlak [mbar]
Vyfukovanie kolmé (diag. perforácia)	36,450	15,4
Odsávanie drážkou	15,288	4,1
Odsávanie priamou perforáciou	38,928	20,1

Pre všetky varianty bolo urobených 5 opakovaných meraní. Dĺžka merania bola aspoň 5 sekúnd, s výnimkou odsávania perforáciou, kde sa ukázalo ako problematické udržať požadovaný podtlak dlhšie ako 3 sekundy. Hodnota sily bola zaznamenávaná v časovom intervale 0,1 sekundy. Zo všetkých piatich meraní bol následne vypočítaný aritmetický priemer, smerodajná odchýlka a koeficient variácie a taktiež boli vyhotovené krabicové diagramy.

Tab. 5 - Namerané hodnoty sily

	Meranie sily [N]					Priemerná sila [N]	Smerodajná odchýlka [N]	Koeficient variácie [%]
	1	2	3	4	5			
Merací prípravok	0,364	0,361	0,363	0,370	0,395	0,371	0,014	3,8
Ahmedovo teleso	1,055	1,097	1,029	1,082	1,099	1,072	0,030	2,8
Vyfukovanie kolmé	0,958	1,003	1,077	0,962	0,948	0,990	0,053	5,4
Odsávanie drážkou	1,037	1,078	1,056	1,018	1,040	1,046	0,022	2,1
Odsávanie perforáciou	0,935	0,933	0,931	0,996	1,026	0,964	0,044	4,5

Namerané hodnoty sily slúžia ako základ pre priame porovnanie so simuláciou. Aby bolo možné vypočítať koeficient odporu, musí byť najprv od jednotlivých hodnôt nameranej sily odčítaná hodnota sily, ktorú pôsobí na samotný merací prípravok. Vypočítané sily sumarizuje tabuľka 6. Následne je možné vypočítať koeficient odporu:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_v}{\rho \cdot S \cdot v_r^2} \quad (7)$$

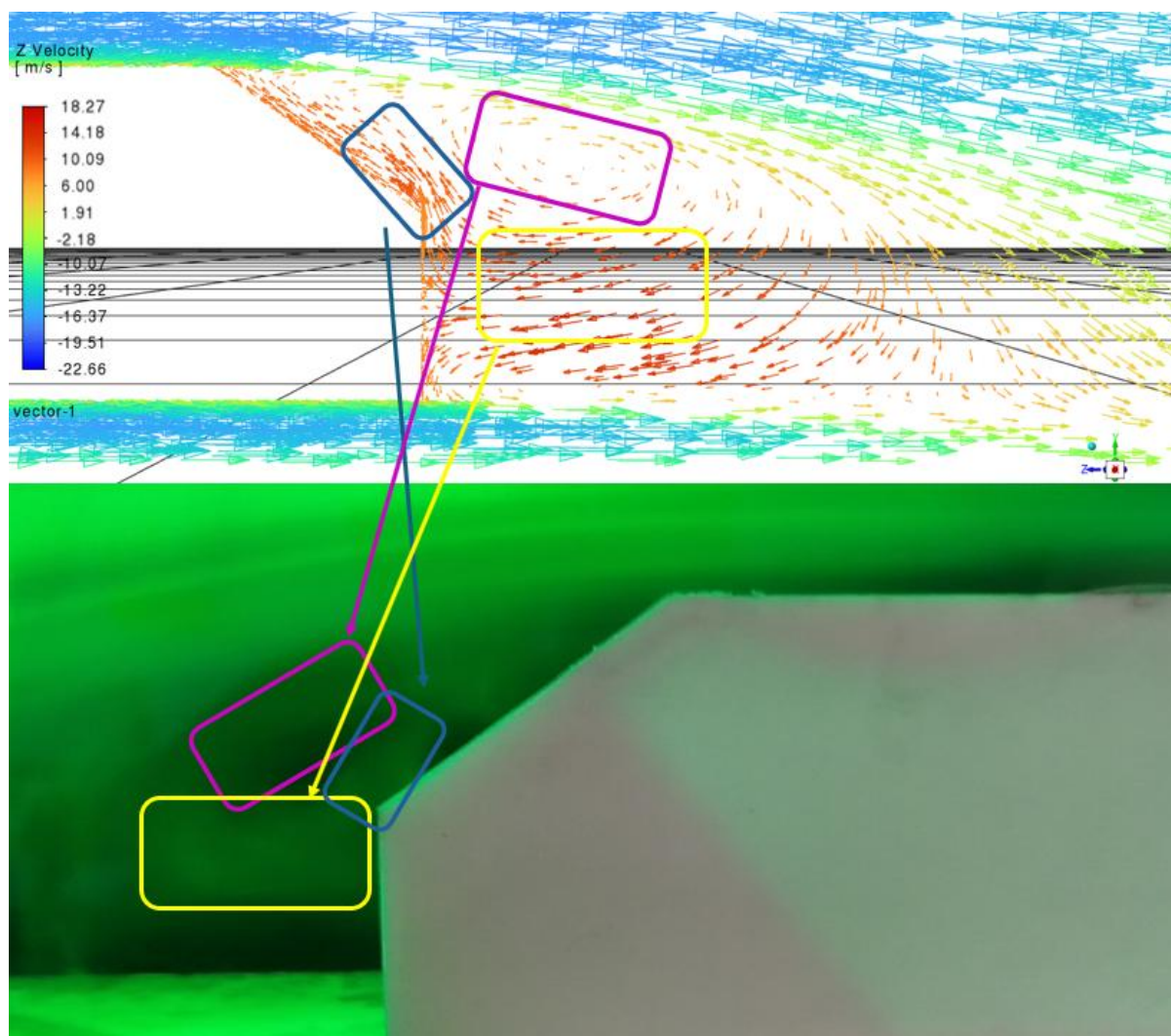
Pomocou tejto rovnice sa vypočítajú koeficienty odporu pre všetky testované konfigurácie. Tabuľka 6 zobrazuje vypočítané hodnoty a taktiež aj ich percentuálny rozdiel voči referencií a aj voči výsledku zo simulácie. Koeficienty odporu kvantifikujú splnenie hlavného cieľa metodiky.

Tab. 6 - Vypočítané sily, koeficienty odporu a ich percentuálne rozdiely

	Sila po odčítaní mer. prípravku	Koeficient odporu [-]	Rozdiel voči Ahmedovmu telesu	Rozdiel voči simulácií
Ahmedovo teleso	0,701	0,452	-	13,1%
Vyfukovanie kolmé	0,619	0,399	-11,7%	19,7%
Odsávanie drážkou	0,675	0,435	-3,8%	11,4%
Odsávanie perforáciou	0,593	0,382	-15,5%	14,6%

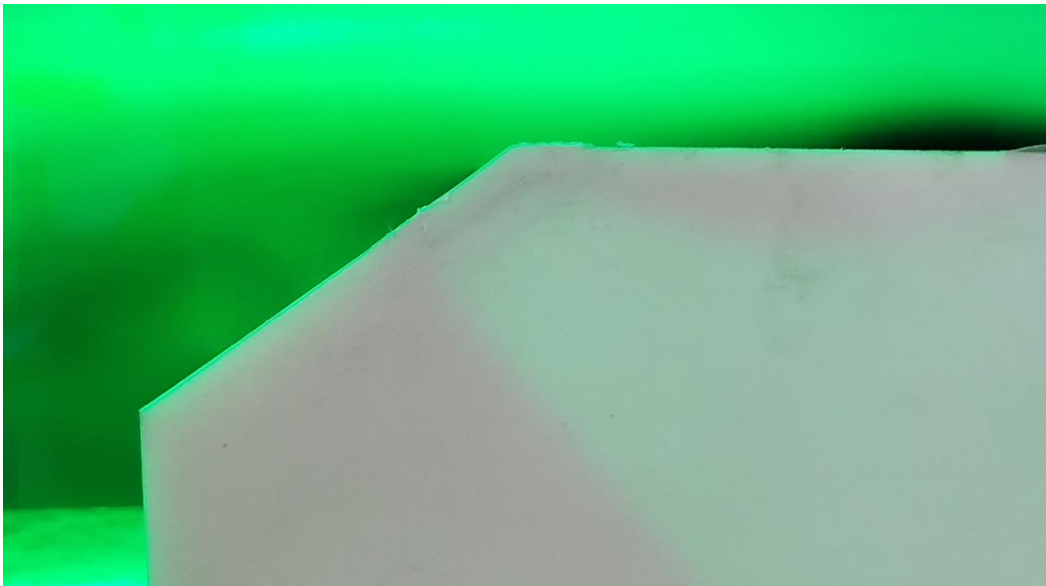
Na obrázku 23 je zobrazený úplav za Ahmedovým telesom (referenčné meranie). Je možné pozorovať zreteľnú „prázdnu“ oblasť za vozidlom. Obrázok zároveň ponúka priame porovnanie so simuláciou. Na obrázku sú vyznačené viaceré oblasti prúdenia, ktoré sa zhodujú v oboch prípadoch.

K najvýraznejšej zmene by malo dôjsť práve pri odsávaní pomocou drážky. Pri meraní došlo k čiastočnému úspechu, ktorý je zobrazený na obrázku 24. Simulácia naznačuje, že by malo dôjsť ku kompletnému pritiahnutiu prúdenia a veľmi výraznej redukcii úplavu. Reálne meranie ale ukázalo, že veľká časť prúdenia ostáva bez zmeny, avšak, časť prúdu sa naozaj pritiahla k šikmej ploche. Priamo nad šikmou plochou je možné pozorovať prúd vzduchu rovnobežný s hranou plochy. Nad týmto prúdom sa však stále nachádza tmavšia zóna, čo znamená, že úplav stále nie je dokonale vyplnený.



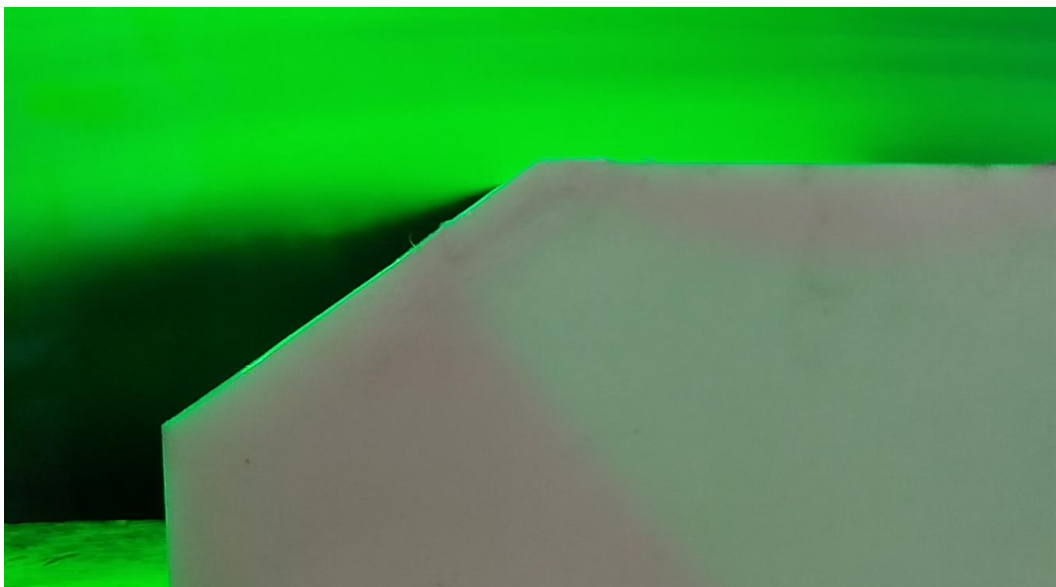
Obr. 23 - Porovnanie úplavu za vozidlom medzi simuláciou a experimentom

Pre variant s vyfukovaním na streche sa bohužiaľ nepodarilo vytvoriť snímku, na ktorej by bolo možné pozorovať zmenu v charakteristike prúdenia. Vyfukovaný prúd totiž ovplyvňuje primárne medznú vrstvu, a súčasné vybavenie tunela nedokáže takéto jemné zmeny zaznamenať.



Obr. 24 - Zobrazenie prúdenia tesne nad šikmou plochou; odsávanie drážkou

Odsávanie pomocou priamej perforácie však prinieslo zmenu, ktorú bolo možné pozorovať. Odsávanie pomohlo časť prúdu pritiahnuť nižšie, čo zredukovalo oblasť úplavu. Výsledok simulácie naznačuje, že vďaka rozvírenému prúdeniu v okolí separačného bodu dôjde k zníženiu intenzity vírenia v úplave. Obrázok 25 však zobrazuje výrazné stiahnutie prúdenia smerom nadol.



Obr. 25 - Zobrazenie prúdenia nad šikmou plochou; odsávanie priamou perforáciou

Z výsledkov je možné potvrdiť, že hlavný cieľ metodiky, redukcia aerodynamického odporu, bol splnený a to dokonca viacerými testovanými variantmi. Sekundárne ciele metodiky boli zamerané na redukciiu odporu pomocou zmiernenia úplavu za vozidlom a na pritiahnutie prúdenia k šikmej ploche. Na základe analýzy obrázkov z experimentálneho testovania (charakteristiky úplavu) je možné konštatovať, že primárny vedľajší cieľ bol splnený úplne, a sekundárny vedľajší cieľ bol splnený čiastočne. Podľa vývojového diagramu metodického postupu je teda experiment považovaný za ukončený.

6 DISKUSIA

Hlavným cieľom práce bolo navrhnutie metodického postupu pre zníženie aerodynamického odporu cestných vozidiel pomocou aktívneho riadenia medznej vrstvy. Na overenie správnosti metodiky bolo potrebné aplikovať celý postup na konkrétnom overovacom prípade. Kapitola 5 preto opisuje jednotlivé kroky riešenia od výberu referenčnej geometrie, cez CFD simulácie, návrh variantov HLFC systému až po experimentálne overenie. Z hľadiska nadväznosti jednotlivých krokov neboli odhalené zásadné nedostatky a postup je možné považovať za logický a systematický.

Ako referenčná geometria bolo použité Ahmedovo teleso. Na základe referenčnej CFD simulácie bola identifikovaná výrazná oblasť úplavu za modelom, preto boli okrem hlavného cieľa definované aj dva vedľajšie ciele: zmiernenie úplavu a pritiahnutie prúdenia k šikmej ploche. Následne boli navrhnuté viaceré varianty aktívneho riadenia prúdenia, konkrétne kolmé vyfukovanie na streche, tangenciálne vyfukovanie za separačným bodom a odsávanie medznej vrstvy pomocou drážky alebo perforácie.

Výsledky CFD simulácií ukázali, že najväčší potenciál mali varianty s vyfukovaním na streche a odsávaním pomocou priamej perforácie. Experimentálne výsledky tieto predpoklady čiastočne potvrdili. Najvýraznejšie zníženie aerodynamického odporu bolo dosiahnuté pri odsávaní medznej vrstvy pomocou perforácie, kde odpor klesol o 15,5 %. Pri kolmom vyfukovaní na streche bola dosiahnutá redukcia 11,7 %, zatiaľ čo simulácia predpovedala 18,4 %. Variant s odsávaním pomocou drážky dosiahol redukcii iba 3,8 %, hoci simulácia očakávala 9,6 %. Rozdiel medzi simuláciou a experimentom však ani v jednom prípade neprekročil 20 %, čo je vzhľadom na charakter riešenej úlohy možné považovať za prijateľnú zhodu.

Počas riešenia sa ukázalo, že CFD simulácie typu RANS nemusia vždy dostatočne presne zachytiť jemné zmeny v medznej vrstve, najmä pri variantoch, kde môže mať významnejší podiel trecí odpor. Experimentálne meranie bolo zároveň ovplyvnené viacerými neistotami, najmä presnosťou nastavenia nízkych hodnôt tlaku vo vzdušníku, stratami v hadiciach a dutine modelu, drsnosťou povrchu, geometrickou presnosťou 3D tlačeného modelu, uložením modelu v tuneli a mierkou 1:3.

Napriek uvedeným obmedzeniam je možné konštatovať, že navrhnutá metodika bola úspešne overená. Umožnila identifikovať vhodné oblasti pre aplikáciu HLFC systému, navrhnúť testované varianty, numericky ich posúdiť a experimentálne overiť. Metodika je preto použiteľná ako výberový a optimalizačný postup pre ďalší výskum aktívneho riadenia prúdenia pri cestných vozidlách. Nie je však finálnym dôkazom konštrukčnej realizovateľnosti systému pre sériové vozidlo, keďže tá si vyžaduje ďalšie riešenie energetickej bilancie, konštrukčnej integrácie a testovania na realistickejšej geometrii vozidla.

7 ZÁVER

Hlavným cieľom práce bolo navrhnúť metodiku pre testovanie využiteľnosti *HLFC* systémov na cestných vozidlách. Cieľom práce nebolo exaktné dokázanie konkrétnej hodnoty zníženia aerodynamického odporu, ale najmä vytvorenie a overenie postupu, pomocou ktorého je možné pri návrhu a integrácii týchto systémov postupovať. Navrhnutá metodika zahŕňa výber geometrie, definovanie cieľov, stanovenie vstupných a výstupných parametrov, výber *HLFC* systému, návrh testovaných variantov, metodiku *CFD* simulácií, výrobu prototypu a jeho experimentálne overenie.

Navrhnutá metodika bol overená na konkrétnom prípade. Ako referenčná geometria bolo zvolené Ahmedovo teleso [24], ktoré predstavuje všeobecne uznávaný referenčný model pri skúmaní aerodynamiky cestných vozidiel. Aj napriek tomu, že aerodynamické vlastnosti Ahmedovho telesa sú v literatúre dobre popísané, v práci sa postupovalo tak, ako keby tieto údaje neboli k dispozícii. Cieľom bolo overiť, či metodika dokáže riešiteľa viesť od analýzy referenčnej geometrie až po návrh konkrétneho aktívneho systému.

Na základe referenčnej *CFD* simulácie bola identifikovaná výrazná oblasť úplavu za modelom. Okrem hlavného cieľa, ktorým bolo zníženie aerodynamického odporu, boli preto definované aj dva vedľajšie ciele: zmiernenie úplavu za vozidlom a pritiahnutie prúdenia k šikmej ploche. Následne boli navrhnuté tri varianty aktívneho riadenia prúdenia, konkrétne kolmé vyfukovanie na streche modelu, tangenciálne vyfukovanie v smere jazdy za separačným bodom a odsávanie medznej vrstvy na šikmej ploche. Pri jednotlivých variantoch sa sledoval vplyv tvaru trysiek, ich rozloženia, umiestnenia a intenzity vyfukovania alebo odsávania.

Pre navrhnuté varianty boli vykonané *CFD* simulácie, ktoré ukázali, že najväčší potenciál mali varianty s vyfukovaním na streche a odsávaním pomocou perforácie. Tieto konfigurácie boli preto vybrané pre experimentálne overenie. Dodatočne bol testovaný aj variant s odsávaním pomocou drážky, pretože v simuláciách dokázal najvýraznejšie pritiahnuť prúdenie k šikmej ploche. Na experimentálne testovanie bol pomocou aditívnych technológií vyrobený zmenšený model Ahmedovho telesa. Súčasne bol navrhnutý aj merací prípravok, ktorý umožnil meranie odporovej sily v aerodynamickom tuneli. Na základe nameranej sily bol následne vypočítaný koeficient aerodynamického odporu.

Pri experimentálnom testovaní sa ako problematická ukázala najmä časť súvisiaca s nastavením tlaku vo vzdušníku. Keďže sa pracovalo s nízkymi hodnotami pretlaku a podtlaku, ich presné nastavenie bolo náročné a použité vybavenie neumožňovalo udržať požadované hodnoty dlhší čas. Napriek obmedzeniam sa podarilo získať výsledky, ktoré potvrdili predpoklady zo simulácií. Najvýraznejšie zníženie odporu bolo dosiahnuté pri variante s odsávaním medznej vrstvy perforáciou, kde pokles odporu dosiahol hodnotu 15,5 %. Rozdiel medzi simuláciami a experimentálnym meraním sa pohyboval v rozsahu 11 až 20 %, čo je možné považovať za prijateľnú zhodu.

Na základe dosiahnutých výsledkov je možné konštatovať, že ciele práce boli splnené. Navrhnutá metodika predstavuje logický a systematický postup, ktorý umožňuje analyzovať geometriu, navrhnúť vhodný typ aktívneho riadenia prúdenia, numericky posúdiť jeho účinnosť a následne ho experimentálne overiť. Výsledky zároveň ukázali, že aktívne riadenie medznej vrstvy môže pri vhodnom návrhu ovplyvniť charakter prúdenia za vozidlom a prispieť k zníženiu aerodynamického odporu.

PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Vedecký prínos

- Bol navrhnutý metodický postup pre aplikáciu aktívneho riadenia medznej vrstvy na karosériu cestných vozidiel za účelom redukcie aerodynamického odporu.
- Práca prepája poznatky z oblasti *HLFC* systémov, ktoré sú bežne riešené najmä v leteectve, s problematikou aerodynamiky cestných vozidiel.
- Výsledky práce ukázali, že aktívne riadenie prúdenia môže ovplyvniť charakter úplavu a prispieť k zníženiu aerodynamického odporu.
- Práca zároveň poukazuje na potrebu hodnotenia nielen samotného koeficientu odporu, ale aj charakteru prúdenia, miesta separácie a stability úplavu.

Prínosy pre prax

- Navrhnutá metodika môže slúžiť ako počiatočný postup pri návrhu a optimalizácii aktívnych aerodynamických prvkov cestných vozidiel
- Postup umožňuje systematicky porovnávať rôzne varianty odsávania alebo vyfukovania z hľadiska ich vplyvu na aerodynamický odpor.
- Využitie referenčnej geometrie umožňuje zjednodušiť úvodnú fázu návrhu a znížiť výpočtovú náročnosť v porovnaní s priamym testovaním reálnej karosérie.
- Kombinácia *CFD* simulácií a experimentálneho overovania umožňuje efektívnejšie vyberať vhodné konfigurácie pred výrobou zložitejších prototypov.
- Výsledky môžu byť využiteľné pri ďalšom vývoji aerodynamických prvkov pre osobné vozidlá, úžitkové vozidlá, autobusy alebo nákladné vozidlá.
- Práca zároveň upozorňuje na praktické obmedzenia aktívnych systémov, najmä potrebu energetickej bilancie, presného nastavenia tlaku/prietoku a technologickej realizovateľnosti perforovaných alebo štrbinových povrchov.

Prínosy pre vzdelávanie

- Práca môže slúžiť ako podklad pri výučbe aerodynamiky cestných vozidiel, najmä pri vysvetľovaní medznej vrstvy, separácie prúdenia, úplavu a aerodynamického odporu.
- Navrhnutý metodický postup je využiteľný ako príklad prepojenia teoretických poznatkov, numerických simulácií a experimentálneho overovania.
- Spracovanie problému na Ahmedovom telese je vhodné pre študentské práce, pretože ide o jednoduchú, dobre definovanú a často používanú referenčnú geometriu.
- Výsledky práce môžu byť využité pri návrhu laboratórnych úloh v aerodynamickom tuneli.
- Práca môže študentom ukázať, že pri technickom výskume nie je dôležitý iba samotný výsledok, ale aj správne definovanie metodiky, vstupných podmienok, neistôt merania a spôsobu vyhodnotenia.

RESUMÉ

The dissertation deals with the design of a methodology for reducing the aerodynamic drag of road vehicles by means of active boundary layer control. Aerodynamic drag is one of the important factors affecting the energy consumption of vehicles, especially at higher speeds. In current practice, drag reduction is mostly achieved by passive aerodynamic modifications of the body shape. However, active flow control systems, such as Hybrid Laminar Flow Control, have been investigated mainly in aviation, where they can improve the behaviour of the boundary layer and reduce aerodynamic losses. This work examines whether a similar principle can be systematically applied to road vehicle aerodynamics.

The main objective of the dissertation was not only to verify one specific aerodynamic solution, but primarily to propose and test a methodological procedure for the application of active flow control systems. The proposed methodology includes the selection of a suitable reference geometry, definition of the main and secondary objectives, determination of input and output parameters, selection of active flow control variants, numerical assessment using *CFD* simulations, manufacturing of a physical model and experimental verification in a wind tunnel.

The methodology was verified using a scaled Ahmed body model, which is a widely used reference geometry in vehicle aerodynamics. First, a reference *CFD* simulation without active flow control was carried out. Based on the obtained flow field, the main aerodynamic problem was identified as the large wake region behind the model. Therefore, in addition to the main objective of reducing aerodynamic drag, two secondary objectives were defined: reduction of the wake region and reattachment of the flow to the rear slanted surface. Several active flow control variants were then proposed, including perpendicular blowing on the roof, tangential blowing behind the separation point, and suction through a slot or perforated surface on the slanted rear part.

The numerical simulations indicated that the most promising configurations were roof blowing and boundary layer suction through perforations. These variants were selected for experimental testing. A scaled model of the Ahmed body was manufactured using additive technologies, and a measuring fixture was designed for drag force measurement in a wind tunnel. During the experiment, particular attention was paid to the adjustment of pressure and vacuum in the internal chamber of the model. This part proved to be technically demanding, mainly because low pressure differences had to be controlled and maintained for a short time.

Despite these limitations, the experimental results confirmed the general trends predicted by the *CFD* simulations. The highest drag reduction was achieved for the variant with boundary layer suction through a perforated surface, where the aerodynamic drag was reduced by 15.5 %. The difference between the *CFD* simulations and the experimental measurements ranged from 11 % to 20 %, which can be considered acceptable with respect to the character of the investigated problem.

The results of the dissertation show that the proposed methodology is logical, systematic and applicable for the preliminary assessment of active flow control systems in road vehicle aerodynamics. The work also shows that active boundary layer control can influence the wake structure and contribute to drag reduction. At the same time, further research is needed, especially in the field of energy balance, optimisation of control parameters and verification on more realistic vehicle geometries.

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

Publikácie v zahraničných karentovaných časopisoch

- **VEREŠ, M., BRUMERČÍK, F., BAŠŤOVANSKÝ, R., KOHÁR, R.** *A New Paradigm in Torque Transfer: Rethinking Shaft Key Placement*. 2024. *Machines*, 12(11), 824. <https://doi.org/10.3390/machines12110824>
- **MADAJ, R., KOHÁR, R., BRUMERČÍK, F., VEREŠ, M.** *Design Study of Hole Types for Improved Cooling of Experimental Heatsinks Manufactured by SLM Technology Using an AlSi10Mg Alloy*. 2025. *Applied Sciences*, 15(4):2118. <https://doi.org/10.3390/app15042118>

Publikácie v časopisoch, ktoré nie sú karentované, ale sú registrované v databázach WoS alebo SCOPUS

- **WEIS, P., SMETANKA, L., HRČEK, S., VEREŠ, M.** *Interactive Application as a Teaching Aid in Mechanical Engineering*. 2024. *Computers*, 13(7):170. <https://doi.org/10.3390/computers13070170>
- **GAJDOŠÍK, T., GAJDÁČ, I., MADAJ, R., VEREŠ, M.** *Concept for an Electromechanical Connection and Steering Joint for a Small Off-Road Electric Vehicle*. 2025. *Vehicles*, 7(2):30. <https://doi.org/10.3390/vehicles7020030>
- **MADAJ, R., VEREŠ, M., KOHÁR, R., WEIS, P., ŠULEK, F.** *Overcoming Rotary Mechanism Limitations in CNC Machines: A 3-PRS Approach*. 2025. *Manufacturing Technology*, 25(4):500-510. DOI: 10.21062/mft.2025.050
- **GAJDOŠÍK, T., VEREŠ, M., GAJDÁČ, I., BAŠŤOVANSKÝ, R.** *Experimental Evaluation of Vibration Responses to Progressive Gear Damage in Planetary Gear*. 2025. *Manufacturing Technology*, 25(4):469-481. DOI: 10.21062/mft.2025.056
- **WEIS, P., BAŠŤOVANSKÝ, R., VEREŠ, M.** *A Web-Based Digital Twin Framework for Interactive E-Learning in Engineering Education*. 2025. *Computers*, 14(10):435. <https://doi.org/10.3390/computers14100435>
- **BAŠŤOVANSKÝ, R., VEREŠ, M., MADAJ, R., KOHÁR, R., WEIS, P.** *A Segmental Joining Method for Large-Scale Additive Components: Case Study on a Fan Blade*. 2026. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 10(3):87. <https://doi.org/10.3390/jmmp10030087>

Publikácie na zahraničných vedeckých konferenciách

- **VEREŠ, M., KOZÁRIK, D., DEGANOVÁ, L., KOHÁR, R., MADAJ, R.** *A Modular Test Stand for Studying Rotor Characteristics and Vibration Diagnostics*. TRANSCOM 2026. *Transportation Research Procedia*, 93:360-366. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.055
- **KOZÁRIK, D., BAŠŤOVANSKÝ, R., HRČEK, S., VEREŠ, M.** *Analysis of Knot Variants and Their Impact on the Mechanical Performance of Dyneema Composite Ropes*. TRANSCOM 2026. *Transportation Research Procedia*, 93:380-385. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.11.058
- **VEREŠ, M., BRUMERČÍK, F., BAŠŤOVANSKÝ, R., KOHÁR, R., MADAJ, R., ŠTEININGER, J.** *Transverse Key vs Spline Shaft: Efficiency and Design Trade-Offs in Torque Transmission*. ICMD 2025. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*, 75(3):101-108. DOI: 10.2478/scjme-2025-0043

LITERATÚRA

- [1] Flandro, G. A., McMahon, H. M., & Roach, R. L. (2011). *Basic aerodynamics: incompressible flow* (Vol. 31). Cambridge University Press. ISBN 978-0521805827, 432.
- [2] Hirschel, E. H. (2005). *Basics of aerothermodynamics*. AIAA. ISBN 978-1563476914, 413.
- [3] Teória vozidiel. [online]. [dátum: 13.10.2024]. Dostupné z: http://kdmnt.uniza.sk/files/podklady/teoria_vozidiel/jazdne_odpory.pdf
- [4] Yanzhen G., Yipeng L., Jiaqiang S., & Wang D. (2023). Optimization of Reynolds numbers effects on aerodynamic drag and automotive performance. *Theoretical and Natural Science*, 13(1):144-149.
- [5] Shivam, S. S., Guleria, A., & Mukkamala, Y. S. (2015). Aerodynamic Drag Reduction of a Notchback Car Geometry by Delaying Flow Separation using Vortex Generators. *Int. J. Eng. Res*, V4.
- [6] Carmods Australia. Subaru OEM Vortex Generator (WRX/STi 2015-21). [online]. [Cit. 20.10.2024]. Dostupné z: <https://www.carmodsaustralia.com.au/Subaru-E751SVA010-OEM-Vortex-Generator-WRX/STi-2015>
- [7] WRC WINGS. Review of the Ford Fiesta WRC new rear diffuser. 2018. [online]. [Cit. 20.10.2024]. Dostupné z: <https://www.wrcwings.tech/2018/10/15/review-of-the-ford-fieta-wrc-new-rear-diffuser/>
- [8] Meder, J., Wiegand, T., & Pfadenhauer, M. (2014). Adaptive aerodynamics of the new Porsche 911 Turbo. *ATZ worldwide*, 116(2), 42-45.
- [9] National air and space museum. Boundary Layer. [online]. [Cit. 15.10.2024]. Dostupné z: <https://howthingsfly.si.edu/media/boundary-layer-0>
- [10] LearnCAX. Basics of Y Plus, Boundary Layer and Wall Function in Turbulent Flows. [online]. [Cit. 16.10.2024]. Dostupné z: <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/basics-of-y-plus-boundary-layer-and-wall-function-in-turbulent-flows>
- [11] McWilliam, M., & Johnson, D. (2008). *Development of a wind tunnel test apparatus for horizontal axis wind turbine rotor testing* (Vol. 43208, pp. 679-687).
- [12] Young, T. M., Humphreys, B., & Fielding, J. P. (2001). Investigation of hybrid laminar flow control (HLFC) surfaces. *Aircraft design*, 4(2-3), 127-146.
- [13] de la Escalera, F. M., Essa, Y., Castello, M. Á., Pillai, U., Chiminelli, A., Lizaranzu, M., & Maimi, P. (2018, June). Challenges of hybrid laminar flow control (HLFC) in aircraft design and manufacturing. In *Proceedings of the 18th European conference on composite materials* (pp. 24-28).
- [14] Seitz, A., & Horstmann, K. H. (2010, September). Design Studies on NLF and HLFC Applications at DLR. In *Proceedings of the 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, Nizza, France* (pp. 19-24).
- [15] Krishnan, K. S. G., Bertram, O., & Seibel, O. (2017). Review of hybrid laminar flow control systems. *Progress in Aerospace Sciences*, 93, 24-52.
- [16] Prasannakumar, A., Wolff, J., Radespiel, R., Boermans, L., Hühne, C., & Badrya, C. (2022). Design and power calculation of HLFC suction system for a subsonic short-range aircraft. *CEAS Aeronautical Journal*, 13(4), 1003-1026.
- [17] Sabo M. (2022). Use of the HLFC Technology in the Process of Aerofoils Friction Drag Reduction. *Master's Thesis*. Žilinská univerzita v Žiline.
- [18] Kalarikovilagam Srinivasan, G., & Bertram, O. (2019). Preliminary design and system considerations for an active hybrid laminar flow control system. *Aerospace*, 6(10), 109.

- [19] Schrauf, G. H., & von Geyr, H. (2020). Simplified hybrid laminar flow control for the A320 fin-aerodynamic and system design, first results. In *AIAA Scitech 2020 Forum* (p. 1536).
- [20] Braslow, A.(1999) A History of Suction-Type Laminar-Flow Control with Emphasis on Flight Research. NASA History Division. *Monographs in Aerospace History*, (13).
- [21] CORDIS. (2002). Hybrid Laminar Flow Demonstration on Aircraft | HYLDA Project. EU Publication Office [online], [Cit. 11.10.2024]. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/project/id/BRPR950135>
- [22] Choi, C. K., & Kwon, D. K. (1998). Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behavior of bluff body. *Wind Struct Int J*, 1(4), 351-364.
- [23] Takeda, K., & Kato, M. (1992). Wind tunnel blockage effects on drag coefficient and wind-induced vibration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 42(1-3), 897-908.
- [24] Ahmed, S. R., Ramm, G., & Faltin, G. (1984). Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE transactions*, 473-503.
- [25] ISO. ISO 291:2022; Plastics—Standard atmospheres for conditioning and testing; *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*, 2022.
- [26] Zhang, J., Zhang, T., Yuan, J., & Zeng, Y. (2025, August). Design, simulation, and experimental validation of a HLFC system. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 3078, No. 1, p. 012048). IOP Publishing.
- [27] Afianto, D., Han, Y., Yan, P., Yang, Y., Elbarghthi, A. F., & Wen, C. (2022). Optimisation and efficiency improvement of electric vehicles using computational fluid dynamics modelling. *Entropy*, 24(11), 1584.
- [28] Nainar, A. S. (2020). Investigation of Light Vehicle Stability on Overtaking Heavy Vehicle using CFD. *INTERNATIONAL JOURNAL*, 8(5), 2548-2551.
- [29] ANSYS. (2024). Ansys Fluent – Fluid Simulation Software. [online]. [Cit. 25.10.2024]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [30] Ravelli, U., & Savini, M. (2020). Aerodynamic investigation of blunt and slender bodies in ground effect using OpenFOAM. *International Journal of Aerodynamics*, 7(1), 36-60.
- [31] Weinman, K. A., Wilhelmi, H., Bell, J. R., Heine, D., & Wagner, C. (2020). On the simulation of a heavy vehicle wake in OpenFOAM with real-world data. In *STAB/DGLR Symposium* (pp. 504-513). Cham: Springer International Publishing.
- [32] Tison, N. (2019). Wheeled Amphibious Vehicle Water Egress M&S Using CFD and Simplified Vehicle Modeling Methodologies. In *Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium* (pp. 13-15).
- [33] Ahmad, N. E., Abo-Serie, E., & Gaylard, A. (2010). Mesh optimization for ground vehicle aerodynamics. *CFD letters*, 2(1), 54-65.
- [34] Cadence Design Systems, Inc. 2026. [online]. [Cit. 10.05.2026]. *Compute mesh spacing for a given Y+ for viscous flow in CFD*. Dostupné z: <https://www.cadence.com>
- [35] Guilmineau, E., Deng, G. B., Leroyer, A., Queutey, P., Visonneau, M., & Wackers, J. (2018). Assessment of hybrid RANS-LES formulations for flow simulation around the Ahmed body. *Computers & Fluids*, 176, 302-319.
- [36] Meile, W., Brenn, G., Reppenhagen, A., Lechner, B., & Fuchs, A. (2011). Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. *CFD letters*, 3(1), 32-39.
- [37] Risse, K. (2016). *Preliminary overall aircraft design with hybrid laminar flow control* (Doctoral dissertation, Dissertation, RWTH Aachen University, 2016). ISBN-13 978-3844049503.