



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

AERODYNAMIKA ELEKTROMOBILU A AUTOMOBILU SE SPALOVACÍM MOTOREM

AERODYNAMICS OF AN ELECTRIC VEHICLE AND A VEHICLE WITH COMBUSTION ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Mikula

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vondruš

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Marek Mikula**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vondruš**
Akademický rok: 2022/23

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:

Aerodynamika elektromobilu a automobilu se spalovacím motorem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce rešeršního charakteru se zabývá popisem rozdílných požadavků na aerodynamiku elektromobilu a automobilu se spalovacím motorem. Na příkladech soudobé produkce bude provedeno srovnání aerodynamických charakteristik pro stejné modelové řady vozů. K práci je nutné využití zahraniční odborné literatury.

Cíle bakalářské práce:

Popsat druhy aerodynamických odporů působících na vůz.
Provést rešerši aktuálních metod používaných při vývoji aerodynamiky vozu.
Určit rozdílné požadavky na aerodynamiku vozu s elektromotorem a spalovacím motorem.
Provést rešerši aktuálně používaných metod aktivních aerodynamických prvků sériových vozů.
Provést srovnání aerodynamických charakteristik u vozů stejné modelové řady s elektromotorem a spalovacím motorem.

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.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zameriava na popis rozdielov aerodynamiky elektromobilov a automobilov so spaľovacím motorom. Pre rovnaké modelové rady vozidiel a odlišné pohony sa vykonal prieskum dnešného trhu a práca bola doplnená o aktuálnu tému nasadenia aktívnych aerodynamických prvkov a systémov, pri vozidlách v odlišných cenových kategóriách s rôznymi aerodynamickými požiadavkami.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

aktívna aerodynamika, podlaha automobilu, predný nárazník, automobilový spojler, chladiace otvory, elektromobil, aerodynamický odpor, koeficient aerodynamického odporu

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on describing the differences in aerodynamics between electric and internal combustion engine cars. For the same vehicle model lines and different powertrains, a survey of today's market has been conducted and the thesis has been complemented with the current topic of the implementation of active aerodynamic features and systems for vehicles in different price ranges with different aerodynamic requirements.

KEYWORDS

active aerodynamics, underside of automobile, front bumper, automobile spoiler, cooling openings, electric vehicle, aerodynamic drag, coefficient of aerodynamic drag

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MIKULA, Marek. *Aerodynamika elektromobilu a automobilu se spalovacím motorem*. Brno, 2023. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedúci bakalárskej práce Jan Vondruš. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149738>.



ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Vondruša a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 26. mája 2023

.....

Marek Mikula

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som chcel poďakovať pánovi Ing. Janovi Vondrušovi za pripomienky, cenné rady, vysvetlenie pojmov a ochotu spolupracovať pri tvorbe tejto záverečnej práce. Ďalej by som chcel poďakovať celej svojej rodine, ktorá ma počas celého štúdia podporovala a stála pri mne.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Aerodynamický odpor.....	12
1.1 Delenie aerodynamického odporu	12
1.2 Tvarový aerodynamický odpor	12
1.2.1 Tlakový aerodynamický odpor	12
1.2.2 Trecí aerodynamický odpor.....	13
1.3 Medzná vrstva a Reynoldsovo číslo	13
1.4 Odtrhnutie medznej vrstvy.....	14
1.5 Úplav za vozidlom	14
1.6 Aerodynamický vztlak.....	15
1.6.1 Indukovaný odpor v dôsledku aerodynamického vztlaku	15
1.7 Odpor rotácie kolies.....	15
1.8 Odpor prostredia	16
1.8.1 Koeficient aerodynamického odporu C_D a podobnostné čísla	16
2 Aktuálne metódy aerodynamického vývoja.....	18
2.1 CFD (Computational Fluid Dynamics).....	18
2.2 Aerodynamický tunel.....	19
2.2.1 Metóda vizualizácie PIV (Particle Image Velocimetry).....	20
2.2.2 Metóda vizualizácie dymovou clonou.....	20
2.2.3 Metóda vizualizácie pomocou bavlnených Nití	20
2.3 Experiment jazdnou skúškou a dojazdový test	20
2.4 Normované referenčné modely vozidiel.....	21
2.4.1 DrivAer model.....	21
2.4.2 AeroSUV	22
3 Požiadavky aerodynamiky vozidla.....	23
3.1 Požiadavky elektromobilu	23
3.1.1 Chladenie a otvory v prednej maske	23
3.1.2 Tvar podlahy.....	24
3.1.3 Hluk a vibrácie.....	24
3.2 Požiadavky automobilu so spaľovacím motorom.....	25
3.2.1 Chladenie spaľovacieho motoru	25
3.2.2 Tvar podlahy.....	27
3.3 Porovnanie vplyvu rozdielných pohonných jednotiek na aerodynamiku vozidla	29
3.3.1 Vplyv podlahy na aerodynamiku vozidla.....	29
3.3.2 Vplyv otvorov v prednej maske na aerodynamiku vozidla	29
4 Aktívne aerodynamické prvky sériových vozidiel.....	31
4.1 Aktívny predný spojler	31
4.2 Aktívny predný splitter	31
4.3 Aktívne mriežky predného nárazníku.....	32
4.4 Aktívne podvozkové panely a klapky.....	33
4.5 Aktívny zadný spojler.....	34
4.5.1 Aktívna aerodynamická brzda.....	35
4.5.2 DRS (Drag Reduction System).....	36

4.6	Aktívne aerodynamické klapky	37
4.7	Aktívny zadný difúzor	37
4.8	Aktívne nastaviteľný podvozok	38
4.9	Systemy aktívnej aerodynamiky	39
5	Aerodynamika vozidiel rovnakej modelovej rady	41
5.1	Kategória Hatchback	41
5.2	Kategória Sedan	44
5.3	Kategória SUV	46
5.4	Prehľad hodnôt koeficientov aerodynamického odporu	50
	Záver	52
	Použité informačné zdroje.....	53
	Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	63

ÚVOD

Elektrické vozidlá sú rýchlo rastúcou zložkou automobilového priemyslu a pripravujú sa vykonávať nezanedbateľnú úlohu v budúcnosti automobilovej dopravy. Zvyšovanie popularity elektrických vozidiel je spôsobené niekoľkými faktormi vrátane ich environmentálnych výhod, nákladovej efektívnosti a zlepšeného výkonu v porovnaní s tradičnými vozidlami poháňanými spaľovacím motorom.

S nezanedbateľným podielom elektromobilov na automobilovom trhu sa začal klásť väčší dôraz na ich špeciálne aerodynamické požiadavky, ktoré sa odlišujú od vozidla so spaľovacím motorom. Ďalším dôvodom sú neustále sa sprísňujúce normy pre výrobcov automobilov, preto sa v dnešnej dobe berie efektívnosť a úspornosť do úvahy už hneď na začiatku vývoja osobného vozidla. Tieto úspory sa pretvárajú na ušetrené náklady pre pohon vozidla a dlhší dojazd, ktorý je dôležitý v rámci zatiaľ sa rozvíjajúcej siete elektrických nabíjajúcich staníc. Tento problém sa snažíme riešiť aj znižovaním koeficientu aerodynamického odporu.

Avšak aerodynamické prvky, ktoré sú pre osobné vozidlo potrebné (krídla, nárazníky, chladiace otvory), vytvárajú aerodynamický odpor zo zásady svojho fungovania. Niektoré z týchto prvkov však dávajú zmysel len za určitých rýchlostí a podmienok, môžu však viesť k zvýšeniu alebo zníženiu koeficientu aerodynamického odporu automobilu. Kvôli zníženiu aerodynamického odporu sa vytvárajú aktívne aerodynamické prvky, ktoré sú ovládané elektromotormi a riadiacou jednotkou, ktorá berie do úvahy aktuálne jazdné podmienky a umožňuje modifikovať aerodynamické vlastnosti a správanie vozidla za jazdy.

Cieľom tejto práce je popísať druhy aerodynamických odporov pôsobiacich na vozidlá, taktiež predstaviť aktívne aerodynamické prvky sériových vozov a rozdielne požiadavky elektromobilov a automobilov so spaľovacím motorom na aerodynamiku. Aerodynamický odpor má účinok aj na stabilitu vozidla a komfort, predovšetkým za vyšších rýchlostí. Aktívne aerodynamické prvky sú schopné ovplyvňovať tento odpor a zvyšovať úroveň dojazdu, pohodlia a bezpečnosti voči vozovke.

Ďalším cieľom je porovnanie aerodynamických charakteristík ako sú napríklad koeficient odporu pri automobiloch rovnakej modelovej rady, ktoré sú na aktuálnom trhu dostupné vo verziách so spaľovacím motorom a vo verziách s elektromotorom.

1 AERODYNAMICKÝ ODPOR

Aerodynamický odpor je sila brániaca pohybu telesa cez tekutinu, pri vozidlách pohybu cez vzduch. Pokiaľ sa vozidlo pohybuje po vozovke, vytvára narušenie v prúdovom poli voľného prúdu a má viacero zložiek, ktoré budú popísané v nasledujúcich podkapitolách.

Pri vývoji osobných vozidiel je z aerodynamického hľadiska najvýznamnejší aerodynamický odpor. Pri konštantnej plynulej rýchlosti za jazdy po horizontálnej rovine je odpor tvorený aerodynamickým a valivým odporom. Od rýchlosti automobilu 65-80 km/h začína prevažovať aerodynamický odpor. [1]

1.1 DELENIE AERODYNAMICKÉHO ODPORU

Delenie aerodynamického odporu podľa vzniku [1, 2]:

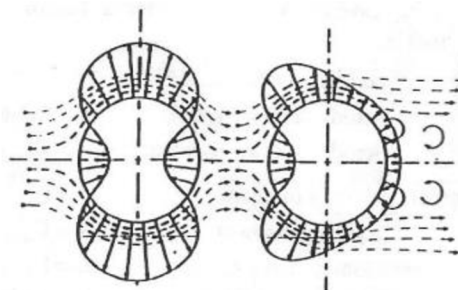
- Tvarový odpor
 - Tlakový – 50 až 80 %
 - Trecí – 5 až 10 %
- Indukovaný odpor ako následok aerodynamického vztlaku – 3 až 10 %
- Tvarový odpor interferenčných účinkov detailov na povrchu karosérie – 10 až 20 %
- Rotačný odpor kolies – 5 %
- Priechodový odpor vzduchu cez systém automobilu (klimatizácia, kúrenie) – 10 až 20 %

1.2 TVAROVÝ AERODYNAMICKÝ ODPOR

Tvarový odpor je zložený z trecieho a tlakového odporu. [1]

1.2.1 TLAKOVÝ AERODYNAMICKÝ ODPOR

Tlakový aerodynamický odpor vzniká odtrhnutím prúdu vzduchu od plochy telesa. Pomocou odtrhnutia sa vytvára miesto s turbulentným a vírovým prúdením nazývané úplav za telesom. V ideálnych prostrediach nedochádza k tomuto odtrhnutiu a tlakový odpor nadobúda nulových hodnôt, pri reálnych telesách vždy vzniká úplav. Tvarový tlakový odpor je závislý na geometrii telesa - čím je tvar telesa bližší prúdnicovému tvaru, tým viac klesá hodnota tvarového tlakového odporu.



Obr. 1 Rozloženie tlaku povrchu valca ideálneho prúdenia (vľavo) a reálneho prúdenia (vpravo) [1]

Obraz reálneho prúdenia obtekania a rozloženia tlaku v okolí telesa je ovplyvnené viacerými prvkami. Medzná vrstva má výrazný vplyv na obtekanie telesa. [1]

1.2.2 TRECÍ AERODYNAMICKÝ ODPOR

Trecí aerodynamický odpor sa vytvára ako následok trenia molekúl vzduchu o plochu karosérie počas obtekania. Závislosť veľkosti sa odvíja od vlastnosti povrchu karosérie, hlavne od jej drsnosti a takisto závisí aj od vlastnosti vzduchu. [1]

1.3 MEDZNÁ VRSTVA A REYNOLDSOVO ČÍSLO

V oblasti ovplyvnenej reálnou kvapalinou dochádza k zmenám rýchlostí v tesnej blízkosti povrchu počas obtekania. Túto oblasť nazývame medzná vrstva. [3] Hrúbka medznej vrstvy rastie so vzdialenosťou od povrchu telesa, ktoré je obtekané. Dochádza k zachytávaniu vzduchu o povrch telesa. Rýchlosť je kvôli zachytávaniu na povrchu telesa nulová a postupne rastie v medznej vrstve, do oblasti kde už na rýchlosť prestáva pôsobiť viskozita. Rýchlostný profil má parabolickú charakteristiku a úmerne rastie. K rozdeleniu medzných vrstiev sa využíva Reynoldsovo číslo.

REYNOLDSOVO ČÍSLO

Reynoldsovo číslo je bezrozmerná veličina, dávajúca do pomeru zotrvačné a viskózne sily pôsobiace pri prúdení tekutín. Taktiež sa pomocou Reynoldsovho podobnostného čísla určuje predpoklad prúdenia za daných fyzikálnych podmienok. Podľa hodnôt, ktoré nadobúda je možné určiť druh prúdenia. V hodnotách $Re < 2300$ je oblasť laminárneho prúdenia, naopak pri $Re > 2900$ je predpoklad turbulentného prúdenia pre trubku. Medzi hodnotami laminárneho a prechodného prúdenia sa nachádza prechodná oblasť. Prechodné hodnoty Reynoldsovho čísla sa však menia a sú rozdielne pre odlišné geometrie telies. [3]

Reynoldsovo číslo je definované ako [3]:

$$Re = \frac{vL}{\nu} = \frac{\rho vL}{\mu} \quad (1)$$

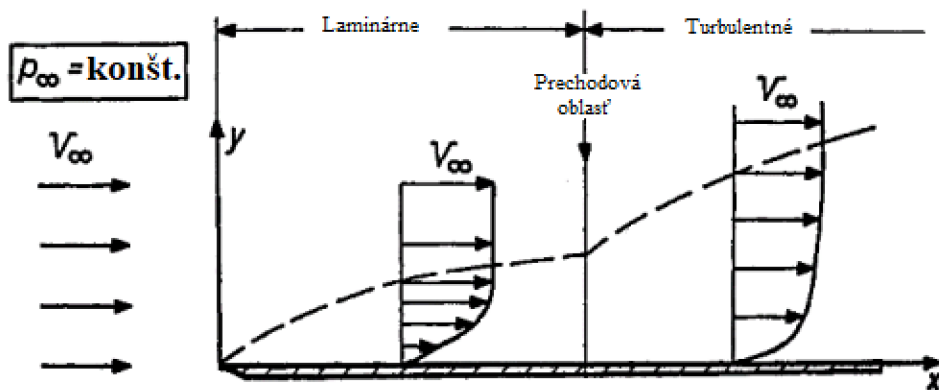
kde ρ je hustota tekutiny, v je rýchlosť obtekania tekutiny, L je charakteristický lineárny rozmer, ν je kinematická viskozita tekutiny a μ je dynamická viskozita tekutiny.

Medzné vrstvy delíme na laminárne a turbulentné podľa prúdenia [4]:

- Laminárne – pohyb tekutiny je usporiadaný, malá výmena energie a hmoty medzi jednotlivými vrstevnicami, hrúbka jednotlivých vrstiev je mnohonásobne menšia než u turbulentného prúdenia
- Turbulentné – pohyb tekutiny je „chaotický“ a dochádza k veľkej výmene energie a hmoty medzi jednotlivými vrstevnicami v zvislom smere, ktoré sa navzájom miešajú

Typ medznej vrstvy, ktorý vzniká závisí hlavne od rýchlosti obtekania vzduchu okolo karosérie. Obecne platí, že laminárna vrstva sa nachádza iba na samom počiatku karosérie. Táto laminárna vrstva sa postupne vyvíja do turbulentnej vrstvy, keď častice vzduchu prechádzajú po dĺžke karosérie vozidla. [1]

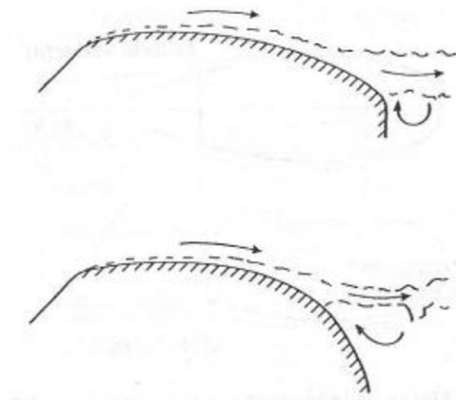
Počas obtekania dochádza k odtrhávaniu medznej vrstvy. K odtrhávaniu dochádza v mieste na povrchu telesa. Lokáciu miesta odtrhávania ovplyvňuje rýchlosť prúdenia, drsnosť povrchu, tlakový gradient a typ medznej vrstvy. Pokiaľ je medzná vrstva laminárna, odtrháva sa skôr než turbulentná. Tento jav spôsobuje to, že častice strácajú svoju kinetickú energiu pomalšie v turbulentnom prúdení, vďaka vyššiemu treniu medzi nimi. [4]



Obr. 2 postupný prechod z oblasti laminárneho prúdenia do oblasti turbulентného prúdenia [2]

1.4 ODRHNUTIE MEDZNEJ VRSTVY

Plochu karosérie automobilu delí plocha maximálneho pričného prierezu na dve oblasti. V prvej oblasti od začiatku kapoty a nárazníku až po oblasť najväčšieho prierezu sa prúd vzduchu urýchľuje, tlakový spád je záporný a klesá statický tlak. Tieto podmienky napomáhajú odtrhnutiu vzduchového prúdu. V druhej oblasti od maximálneho pričného prierezu po zadný nárazník sa obtekanie prúdu vzduchu spomaľuje, dochádza k zvýšeniu tlaku a tlakový spád je kladný. Tieto predpoklady vedú k tomu, že sa odtrháva prúd vzduchu, čo vedie k vytváraniu úplavu za automobilom. [2]



Obr. 3 Odtrhávanie prúdu vzduchu pri rôznych geometrických tvarovaniach strechy vozidla [1]

K čiastkovému odtrhávaniu prúdu dochádza aj v oblasti, kde sa spája koniec prednej kapoty a čelného skla. Veľkosť tejto oblasti závisí od uhlu, ktorý zvierá čelne sklo a kapota. V tejto oblasti sa vytvára ďalšie prúdenie tvorené vírmi, ktoré obtekajú okolo čelného skla do strán a posúvajú sa po dĺžke karosérie až za automobil. [2]

1.5 ÚPLAV ZA VOZIDLOM

Tvarovanie zadného profilu karosérie má vplyv na odtrhnutie vzduchového prúdu a na vznikanie oblasti úplavu za vozidlom. V tejto oblasti je narušené obtekanie a mieša sa turbulentný a vírový úplav, klesá rýchlosť prúdenia a negatívny tlak na zadnom profile karosérie. Tento negatívny tlak pôsobí na plochu v zmysle proti pohybu automobilu. Veľkosť tohto negatívneho tlaku je závislá na tvare a veľkosti zadnej časti automobilu, preto je snaha základnú plochu minimalizovať. [1]

Úplav má vplyv na znečisťovanie zadného profilu karosérie, na viditeľnosť za rôznych meteorologických podmienok a aerodynamicky zasahuje do obtekania prúdu vzduchu nasledujúcich vozidiel.

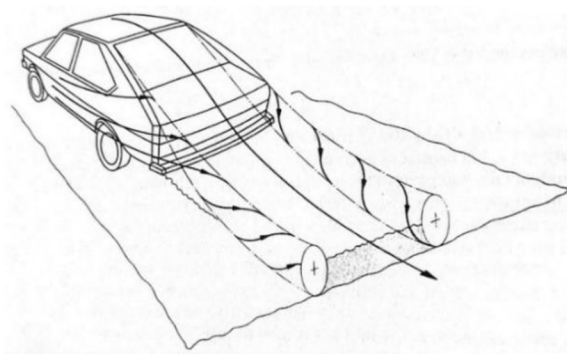
1.6 AERODYNAMICKÝ VZTLAK

Obtekajúci prúd horného povrchu karosérie urazí za ten istý čas väčšiu dráhu ako prúd, ktorý prechádza medzi podlahou vozidla a vozovkou na spodnej strane. Keďže prúd vzduchu na hornej strane karosérie vykonáva prúdenie väčšou rýchlosťou, tak pôsobí na plochu vozidla menším tlakom ako prúd na spodnej strane vozidla. Tento tlakový rozdiel medzi hornou a spodnou stranou karosérie vytvára vztlakovú silu. [1]

Vztlaková aerodynamická sila je kolmá na vozovku. Nadobúda kladných hodnôt, keď pôsobí smerom hore od vozovky. Tento jav sa nazýva prítlak. Kladný vztlak je nežiadúci z dôvodu nadľahčovania kolies na nápravách automobilu, čo neprenáša silové účinky pohonnej jednotky na vozovku, čím môže dochádzať k strate a nižšej účinnosti adhézie pneumatík v extrémnych prípadoch, ktoré potom neudržiavajú auto na vozovke pri vyšších rýchlostiach. Naopak je žiadaný prítlak, ktorý automobil pritláča k vozovke a dodáva zvýšenú kontrolu nad jazdnými vlastnosťami.

1.6.1 INDUKOVANÝ ODPOR V DÔSLEDKU AERODYNAMICKÉHO VZTLAKU

Pri pohybe automobilu pôsobí na plochu jeho karosérie statický tlak. Tento tlak nadobúda rôzne hodnoty v rôznych miestach karosérie. Prúdiaci vzduch má zámer prechádzať z oblastí vyšších hodnôt tlaku do oblastí nižších hodnôt. Tento prechod zvyčajne nastáva na bočnej strane karosérie. Pri prechode prúdenia sa vytvára rotačné vírenie, ktoré sa postupne šíri po dĺžke bočnej strany automobilu až za jeho zadnú časť, kde ho postupne pohlcuje úplav vytváraný na zadnej strane vozidla. Tento jav sme schopný sledovať napríklad počas sneženia. [1] Veľkosť a intenzita rotačného vírenia závisí od geometrie a tvarovania karosérie, taktiež závisí od rýchlosti, ktorej je priamo úmerný rozdiel tlakov medzi hornou a spodnou stranou karosérie.



Obr. 4 Indukovaný odpor vytváraný aerodynamickým vztlakom [2]

1.7 ODPOR ROTÁCIE KOLIES

Rotácia kolesa, ktoré je vystavené prúdeniu vzduchu vytvára aerodynamický odpor. Tento aerodynamický odpor sa skladá z vnikania turbulentného úplavu v oblasti za rotujúcim kolesom a vznikom vírov. Pri vysokých rýchlostiach sa rapídne odtrháva prúd vzduchu, zvyčajne sa to stáva ešte predtým, ako dôjde prúd ku vrcholu pneumatiky kolesa. Za týmto bodom sa formuje výrazný úplav a s ním spojený aerodynamický odpor.

Obtekanie po boku je spravidla veľmi neusporiadané, zahŕňa veľké množstvo vírov. Tieto víry smerujú dole, kam odtekajú a interagujú s ďalšími miestami v karosérii a vytvárajú ďalší aerodynamický odpor. Výrobcovia sa snažia zabrániť vytváraniu bočného vírenia pomocou umiestnenia puklíc na koleso, prípadne zakrytím otvoru blatníku vozidla.

Problematikou vplyvu veľkosti a tvarovania kolies sa zaoberá štúdia [90], v ktorej sa pomocou dojazdovej skúšky merali hodnoty koeficientu aerodynamického odporu pre vozidlo Tesla model S. Pri skúške sa testovali tri typy diskov a to základné otvorené disky veľkosti 19 palcov, aero disky s pridanými puklicami znižujúcimi prietokovú plochu základných diskov a dizajnové disky s veľkosťou 21 palcov.

Tab. 1 Vplyv kolies na koeficient aerodynamického odporu pre Tesla Model S [90]

Konfigurácia	Koeficient aerodynamického odporu C_D [-]	Rozdiel ΔC_D [-] k základným diskom	Rozdiel ΔC_D [-] k základným diskom
Základné 19“ disky	0,248	–	–
Aero 19“ disky	0,226	- 0,022	- 9,3 %
Style 21“ disky	0,295	+ 0,047	+ 17,3 %

Z hodnôt v Tab.1 možno vidieť vplyv aerodynamicky tvarovaných puklíc, ktoré napomohli znížiť koeficient aerodynamického odporu o 9,3 %. Naopak dizajnové disky s väčšou prietokovou plochou, ktorá napomáha prietoku vzduchu cez disky majú podstatný vplyv na aerodynamiku vozidla a zvýšili koeficient aerodynamického odporu o 17,3 %.

1.8 ODPOR PROSTREDIA

Odpor prostredia je sila, ktorá pôsobí proti smeru prúdenia. Vzniká ako dôsledok kontaktu častíc vzduchu s povrchom karosérie vozidla. Na vozidlo má brzdiaci účinok a pôsobí proti smeru pohybu.

Odporová sila prostredia je definovaná ako [5]:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (2)$$

kde A je čelná plocha kolmá na smer prúdenia a C_D je koeficient aerodynamického odporu.

Výrobcovia automobilov sa snažia dosiahnuť čoraz nižších hodnôt koeficientu aerodynamického odporu, s ktorým je predovšetkým spojená nižšia spotreba a tým znižujúce sa škodlivé emisie a zvyšujúci sa dojazd automobilu. Dosiahnutie nižších hodnôt odporovej sily sa realizuje pomocou zmenšovania čelnej plochy kolmej na smer prúdenia vzduchu a tvarovaním geometrie karosérie. Avšak aj keď má automobil nízky koeficient aerodynamického odporu, kvôli veľkej čelnej ploche môže na vozidlo pôsobiť veľký odpor prostredia. [9]

1.8.1 KOEFICIENT AERODYNAMICKÉHO ODPORU C_D A PODOBNOSTNÉ ČÍSLA

Koeficient aerodynamického odporu C_D [-] je bezrozmerná veličina, ktorá zohľadňuje riešenie tvaru karosérie vozidla z aerodynamického hľadiska. Hodnoty aerodynamického koeficientu sa zisťujú experimentálne v aerodynamickom tuneli, dojazdovou skúškou alebo výpočtom

pomocou CFD simulácií, treba však dodať, že výpočty pomocou CFD simulácie môžu byť dostatočne presné a ich hodnoty sa validujú a porovnávajú s hodnotami v aerodynamickom tuneli.

Pri rozdieloch mierky modelov, hodnota koeficientu tvarového odporu C_D však nemusí závisieť len od tvarovania geometrie telesa a zachovania rovnakých uhlov a pomerov dĺžok karosérie. V rôznych veľkostiach telies dochádza k odtrhávaniu medznej vrstvy v odlišných miestach od reálneho modelu v skutočnej veľkosti. Toto odtrhávanie je spôsobené nezachovaním proporcionality drsnosti povrchu na aerodynamických modeloch v mierke. K popisovaniu a zohľadneniu rozdielov sa využívajú podobnostné čísla, medzi ktoré patrí už vyššie spomenuté Reynoldsovo číslo, ale taktiež sa používa aj Machovo a Strouhalovo číslo. [2]

MACHOVO ČÍSLO

Machovo číslo je bezrozmerná veličina, ktorá udáva pomer medzi rýchlosťou pohybu telesa konkrétnym prostredím a rýchlosťou zvuku v rovnakom prostredí. V aerodynamike vyjadruje vplyv stlačiteľnosti vzduchu na prúdenie. Pokiaľ nadobúda hodnôt $Ma < 1$ ide o podzvukové prúdenie, keď však dosahuje vyšších hodnôt $Ma > 1$ jedná sa nadzvukové prúdenie s ktorým sa v automobilovom priemysle však nestretávame. [3]

Machovo číslo je definované ako [3]:

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (3)$$

kde c je rýchlosť zvuku v konkrétnom prostredí.

STROUHALOVO ČÍSLO

Strouhalovo číslo je bezrozmerné a využíva sa pri nízkych hodnotách Reynoldsovo čísla, pri hodnotách $Re < 300$ počas laminárneho prúdenia. Zohľadňuje frekvenciu vytvárania vírov v úplave za prekážkou počas prúdenia. [3]

Strouhalovo číslo je definované ako [3]:

$$Sr = \frac{fL}{u} \quad (4)$$

kde f je frekvencia uvoľňovania vírov.

2 AKTUÁLNE METÓDY AERODYNAMICKÉHO VÝVOJA

Správanie obtekajúceho vzduchu okolo tvaru karosérie vozidla je možné zistiť pomocou technického experimentu reálnej jazdy v premávke, prípadne pomocou CFD simulácie a testovaním v aerodynamickom tuneli. Tieto metódy sa využívajú na optimalizáciu aerodynamiky vozidiel a naplnenie rôznych požiadaviek na dynamické a komfortné vlastnosti. K skúmaniu tohto správania sa používajú aj referenčné modely, ktoré svojím tvarom pripomínajú vozidlá cestnej premávky.

2.1 CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

CFD je odvetvie mechaniky tekutín, využívajúce numerickú analýzu a matematický algoritmus k riešeniu problematiky obtekania tekutín. V simuláciách sa využívajú rovnice, ktoré popisujú správanie tekutín (napr. Navier – Stokes rovnica, Rovnica continuity). [2] Riešením rovníc sú získané hodnoty ako rýchlosť tekutiny, teplota, tlak a ďalšie súvisiace veličiny. Dnes sa CFD najčastejšie používa na iteračný vývoj aerodynamických prvkov vozidla, avšak až po validácii hodnôt testovaných v aerodynamickom tuneli a zistení odchýliek od experimentálnych hodnôt a nastavení simulácie. [9] Simulácie majú určité obmedzenia, spôsobené zjednodušeniami, medzi ktoré patrí použitie modelu turbulencií prípadne veľkosť a prerozdelenie výpočtovej siete. Tieto zjednodušenia urýchľujú a znižujú výpočtovú náročnosť numerického výpočtu, avšak zapríčiňujú vytváranie určitých nepresností. Pomocou CFD sa simulujú aj rôzne dynamické úlohy, ako je zrýchľovanie a brzdenie vozidla a zmena smeru jazdy. Prípadne sa dajú stvárniť vonkajšie poveternostné podmienky, prítomnosť ďalších vozidiel alebo nasledovanie v úplave a aj deformácia dielov pod záťažou aerodynamických síl.



Obr. 5 Numerická CFD simulácia prúdenia vzduchu okolo vozidla Mercedes-Benz triedy A [8]

Pri aerodynamickom vývoji sa CFD používa aj na porovnávanie rôznych iterácií aerodynamických prvkov karosérie predtým, než sa realizuje výroba fyzickej súčasti karosérie, ktorá sa testuje a optimalizuje. Následne sa posiela do sériovej výroby. Simulácie CFD v dnešnom vývoji vozidiel zaberajú najväčší podiel vývoju. Spoločnosť Škoda Auto uvádza, že až 80 % z 3000 aerodynamických testov pri vývoji štvrtej generácie vozidla Fabia bolo prevedených pomocou CFD simulácií a bolo dosiahnuté zníženie koeficientu odporu vzduchu predošlej generácie $C_D = 0,32$ na hodnotu $C_D = 0,28$ aktuálne dostupnej štvrtej generácie. [9]

2.2 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Väčšina aerodynamických tunelov v automobilovom priemysle funguje na princípe vytvárania prúdenia pomocou ventilátoru, prípadne je použitá vysokotlaková nádoba. Jedna sa o vývojovú metódu, ktorá je jednoducho opakovateľná a umožní zistiť zložky jednotlivých síl a momentov pôsobiacich na vozidlo. Ďalšia výhoda aerodynamického tunelu je vizualizácia prúdenia pomocou metódy PIV (*Particle Image Velocimetry*) alebo metódy dymovej clony.



Obr. 6 Vizualizácia prúdenia vzduchu v aerodynamickom tuneli pomocou dymovej clony [8]

Testovanie v aerodynamických tuneloch sa praktizuje na reálnych vozidlách ale aj na modeloch v zmenšenej miere. V Európe sa zvykne používať mierka 1:4, prípadne 1:5. Pri používaní zmenšených modelov musia byť dodržané rovnaké veľkosti podobnostných čísel. Keďže v niektorých prípadoch je finančná náročnosť projektu veľmi výrazný faktor, oplatí sa ísť vývojovou cestou modelov v mierke. Možnosť zmenšených modelov využíva letecký priemysel alebo závodné monoposty Formule 1 za dodržania dynamických podobností pri akcelerácii a brzdení, prípadne deformáciu aerodynamických komponentov. Avšak veľkosť charakteristického rozmeru je menšia o hodnotu závislú na mierke, z čoho vyplýva že o hodnotu mierky musí byť zvýšená rýchlosť obtekajúceho vzduchu v tuneli. [2]

Aerodynamické tunely delíme na tieto typy [2, 6]:

- S otvoreným okruhom – Jedná sa o otvorenú sústavu kde je nový vzduch na vstupe neustále nasávaný z prostredia mimo aerodynamický tunel, po prejdení cez celú sústavu je vzduch vyfukovaný von. Výhodou je, že výfukové splodiny a vizualizačné látky opúšťajú tunel a zaberá menší priestor, nevýhodou je ovplyvňovanie vzduchu vonkajšími podmienkami na vstupe, ktoré sa komplikovanejšie kontrolujú. [2, 6]
- S uzavretým okruhom – Vzduch neustále cirkuluje v uzavretej sústave a nedochádza k výmene s okolím. Medzi výhody patrí jednoduchšie kontrolovanie podmienok prúdenia. Vďaka zachovaniu hybnosti vzduchu sú aj nižšie funkčné náklady, avšak treba vykonávať zámenu časť vzduchu z dôvodu hromadenia vizualizačných a výfukových látok. Jednou z nevýhod je potreba chladenia vzduchu pomocou tepelných výmenníkov, pretože sa vzduch zohrieva trením o steny tunelu. [2]

Aerodynamické tunely sú dnes štandardne vybavené pohyblivou vozovkou a rotáciou kolies. V niektorých výnimočných prípadoch existujú aj tunely spolu so simuláciou bočného vetru

alebo poryvu vetru, ktorý svojím správaním pripomína experiment jazdnou skúškou. Jednou z nevýhod aerodynamického tunelu je zložitosť replikovania teplôt rôznych oblastí automobilu ako sú brzdy, výfukové plyny alebo teplota povrchu vozovky. K riešeniu tejto problematiky sa využívajú CFD simulácie. Prípadne ešte uzavretá alebo otvorená meracia sekcia.

2.2.1 METÓDA VIZUALIZÁCIE PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY)

Metóda vizualizácie PIV umožňuje zaznamenávanie kompletného prúdenia častíc v rovine prietokového poľa v rozmedzí niekoľkých mikrosekúnd, čím poskytuje dôležité informácie o nestabilnom prúdení pomerne rýchlo a efektívne. Pomocou PIV metódy môžeme zaznamenávať pohyb častíc v širokom rozmedzí od rýchlostí turbulentného prúdenia menších ako 1 m/s až po vysoké rýchlosti nad 500 m/s. [7] Zaznamenávanie je realizované pomocou laseru a senzoru, ktorý je citlivý na svetelné pulzy. Jedná sa o pomerne často využívanú metódu vizualizácie prúdenia mimo povrchu karosérie vozidla.

2.2.2 METÓDA VIZUALIZÁCIE DYMOVOU CLONOU

Metóda vizualizácie dymovou clonou umožňuje zobrazenie prúdenia vrstiev vzduchu, ktoré sa nachádzajú ďalej od povrchu vozidla. Dym sa používa na odhalenie oblastí oddelených tokov obtekania a na zisťovanie oblastí vírenia. Výhodou tejto vizualizačnej metódy je finančná nenáročnosť a nevýhodou je, že spoľahlivo funguje iba pri nižších rýchlostiach obtekania. Na vytváranie dymu sa používajú čpavok, sírovodík prípadne para s tekutým dusíkom. [11] Metóda je pomerne stará a využíva sa od počiatkov aerodynamického vývoju, keďže je pomerne jednoduchá a lacná.

2.2.3 METÓDA VIZUALIZÁCIE POMOCOU BAVLNEÝCH NITÍ

Metóda vizualizácie pomocou nití funguje na princípe nalepenia viacerých polyesterových alebo bavlnených nití na kontrolovanú plochu karosérie. Nite môžu byť nafarbené fluorescentnými farbami na zvýšenie viditeľnosti pri zaznamenaní pomocou kamery a spätnú kontrolu. Nite musia byť narezané na správnu dĺžku a nesmú byť príťažké aby sa ich polohovanie zhodovalo s prúdnicami obtekajúceho vzduchu a nedochádzalo k odchýlkam. Výhodou metódy je jednoduché pozorovanie už voľným okom a finančná nenáročnosť. [11]

2.3 EXPERIMENT JAZDNOU SKÚŠKOU A DOJAZDOVÝ TEST

Počas jazdnej skúšky za prevádzky na vozovke pôsobia na automobil reálne podmienky, ktoré sa v aerodynamickom tuneli ťažko vytvárajú. Z týchto podmienok sa zbierajú informácie (On - board data), ktoré sú prínosné pri aerodynamickom vývoji. Medzi tieto podmienky patrí zmena smeru vplyvu poveternostných podmienok obtekania vzduchu alebo zmena rýchlosti a smeru jazdy.

Prúdové pole je možné zobrazit' pomocou farby *flow-vis* obsahujúcej fluorescentné častice rozpustené v oleji, znázorňujúce obtekanie prúdenia po nanosení na karosárske panely. Takisto sa používa aj veľmi jednoduchá metóda nalepených nití na karosárske panely vo veľkom množstve. Obidve tieto metódy majú výhodu vizualizácie a konštatovania výsledkov voľným okom. Ďalšia metóda je umiestnenie sústavy tlakových senzorov a Pitotových trubíc na kľetku ktorá sa pripevní na vozidlo a získava informácie v rôznych vzdialenostiach od panelov karosérie. Táto metóda je aj s metódou *flow-vis* používaná pri testovaní závodných monopostov Formule 1.



Obr. 7 Monopost Formula 1 s náterom flow-vis (vľavo) a sústavou senzorov (vpravo) [10]

Experiment jazdnou skúškou je limitovaný nízkou opakovateľnosťou a kontrolou poveternostných podmienok, množstvom meraných dát a finančnými nákladmi. Zvyčajne sa vykonáva až pri koncových fázach vývoja po tom, ako už existuje fyzicky funkčný prototyp vozidla s čím prichádza riziko priemyselnej špionáže. Automobilky sa proti tomu bránia pomocou rôznych kamufláží a oblepenia aerodynamických oblastí rôznymi vzorovanými fóliami, ktoré skrývajú aktuálny vzhľad vozidla.

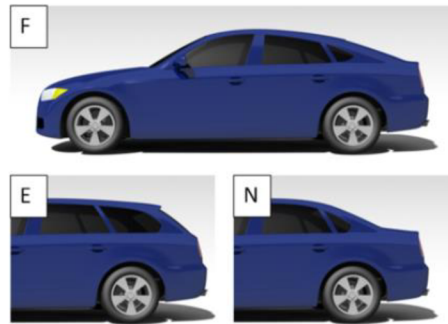
Medzi ďalšie testy patrí skúška citlivosti vozidla na bočný vietor, ktorou musí prejsť každý voz pred certifikáciou. Počas prúdenia, ktoré je kolmé na čelnú plochu automobilu je správanie obtekania takmer symetrické. K zmene dochádza pri prúdení bočného vetru, ktorý zapríčiňuje zmeny v tlaku na povrchu vozidla, veľkosti aerodynamického odporu a v rozložení tlaku v úplave za vozidlom. [93] Taktiež sa zvykne vykonávať dojazdová skúška z ktorej sa zisťuje koeficient aerodynamického odporu. Počas skúšky vykoná rozbehnutý automobil idúci po rovine dojazd v neutrálnom prevode na nižšiu rýchlosť. Pomocou zaznamenania času dojazdu sa zistí model síl, ktoré vyvolávajú straty pôsobiace na vozidlo. [94]

2.4 NORMOVANÉ REFERENČNÉ MODELY VOZIDIEL

Pre výskum aerodynamických vlastností a kalibráciu aerodynamických tunelov boli vytvorené referenčné modely vozidiel. Ako prvé prišli vo veľmi základných a jednoduchých tvarov SAE a Ahmed. [24, 25] Neskôr prišiel model Mira, ktorý svojím tvarom pripomínal reálny automobil. [23] V súčasnosti je však najviac rozšírený DrivAer, ktorý geometrickým tvarovaním do určitej miery zodpovedá produkčným vozom, prípadne AeroSUV. [12, 26]

2.4.1 DRIVAER MODEL

DrivAer je referenčný model vozidla vytvorený v roku 2011 spoluprácou medzi automobilkami Audi a BMW spolu s Technickou Univerzitou v Mníchove. Cieľom tohto projektu bolo vytvoriť referenčný model typického vozidla, ktorý bude používaný na účel nasledujúcich aerodynamických štúdií. DrivAer model je používaný automobilkami a zároveň aj v akademických štúdiách. [12]

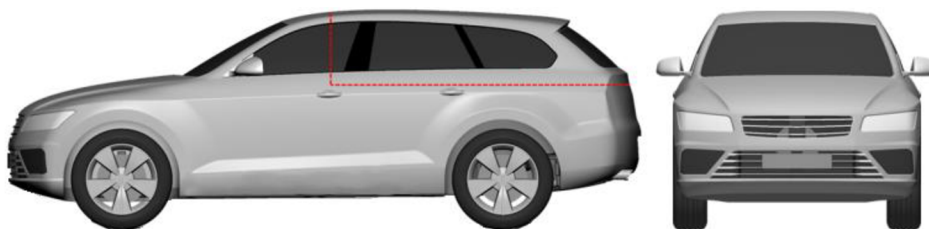


Obr. 8 DrivAer varianty Fastback (hore), Estateback (dole vľavo) a Notchback (dole vpravo) [12]

Referenčný model vznikol spojením vozu Audi A4 a BMW 3, svojou geometriou pripomína reálne vozidlo, avšak porovnaním s produkčným vozom je stále zjednodušený. Existujú 3 karosárske varianty. Fastback (označovaný F), Estateback (označovaný E) a Notchback (označovaný N). V detailoch je možné rozlíšiť až 18 rôznych konfigurácií. Model môže obsahovať dva chladiace otvory motorového priestoru vrátane chladiča, prevodovku, prepracovaný podvozok aj s výfukovým systémom. Taktiež je aj konfigurácia s jednoduchou plochou podlahou, motor a prevodovka sú nahradené korešpondujúcou geometriou všeobecného elektrického motoru a horná predná mriežka je zavretá, aby táto konfigurácia viacej pripomínala elektrické vozidlo. Táto varianta je vhodná na jednoduchšie a menej časovo náročné výpočty. Referenčný model je voľne dostupný. [12]

2.4.2 AEROSUV

S rastúcim podielom vozidiel kategórie SUV (Sport Utility Vehicle) na trhu sa v rámci skúmania aerodynamického správania tejto kategórie vytvoril aerodynamický referenčný model AeroSUV. Taktiež sa jedná o model pripomínajúci reálne vozidlo, avšak proti DrivAer modelu má väčšiu vzdialenosť od vozovky, aby spĺňalo špecifikácie MIG, ktoré požadujú minimálnu svetlú výšku 180 mm. Minimálna svetlá výška AeroSUV v oblasti náprav je 196 mm a v strede vozidla je to až 212 mm. Model je taktiež výškovo nastaviteľný o ± 50 mm, aby sa mohol prispôbovať k rôznym globálnym normám. [26]



Obr. 9 Referenčný model AeroSUV s vyznačenou oblasťou zadnej časti [26]

Jednou z výhod AeroSUV je aj zdieľanie zadnej časti referenčného modelu s DrivAer a využitie všetkých troch variant, čím je viac modulárny. Na Obr. 9 je AeroSUV so zadnou časťou typu Estateback nájdenou aj na referenčnom modeli DrivAer, ktorá je ohraničená prerušovanou červenou čiarou. Táto zadná časť vozidla môže byť nahradená aj variantami Fastback a Notchback, ktoré viac pripomínajú na trhu segment vozidiel Coupé SUV. [26]

3 POŽIADAVKY AERODYNAMIKY VOZIDLA

S odlišnými pohonnými jednotkami automobilu sa vytvárajú aj odlišné aerodynamické požiadavky pre využitie pohonu. Tieto požiadavky primárne zahŕňajú chladenie a tvar podlahy, ktorý vyplýva z rozloženia pohonného ústrojenstva vozidla.

3.1 POŽIADAVKY ELEKTROMOBILU

3.1.1 CHLADENIE A OTVORY V PREDNEJ MASKE

Otvory prednej masky vozidla so spaľovacím motorom slúžia na prístup studeného vzduchu k chladiču motora, prípadne môže byť vzduch pomocou kanálov vedení k brzdám vozidla. Avšak pri elektromobiloch nedochádza k vytváraniu až tak vysokých teplôt, čo má za následok zmenšovanie otvorov v prednej maske vozidla. Chladiaci systém elektromobilov sa zvyčajne napája na prvky ako hlavný chladič, batéria, kondenzátory, pumpy chladiacej kvapaliny a kompresory, ktoré potrebujú prísun vzduchu k dosiahnutiu optimálnych pracovných teplôt. Chladiace systémy môžu obsahovať viacero okruhov, medzi ktorými prúdi chladiaca kvapalina odvádzajúca teplo.

Spoločnosť Tesla využíva pri svojich vozidlách nepriame chladenie balíku batérií pomocou kvapaliny, ktorá je vedená v trubkách. Trubky prechádzajú v medzerách medzi jednotlivými batériami v celom balíku, čím zaručujú pomocou obehu kvapaliny odvod prebytočného tepla, ktoré by mohlo poškodzovať batériu. Systém je bezpečnejší, nakoľko sa jedná o uzavretý okruh a kvapalina neprichádza do kontaktu s batériou a efektívnejší ako napríklad chladenie pomocou vzduchu alebo priame chladenie kvapalinou, kedy sú batérie ponorené v chladiacom roztoku. [69]

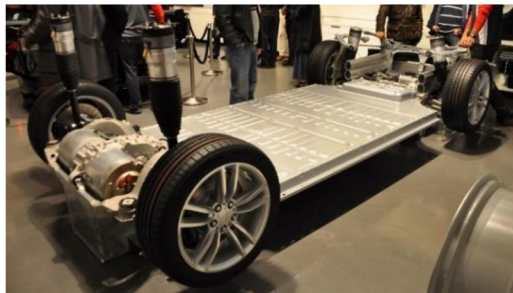
Z využitia kvapaliny vyplýva aj aerodynamické riešenie predného nárazníku pri vozidle Tesla model S. Keďže požiadavky na chladenie batérie a ostatných prvkov boli nižšie ako u automobilu so spaľovacím motorom, vozidlo má v prednej maske iba spodný chladiaci otvor za ktorým sa nachádza chladič. Spoločnosť Tesla rozmiestnenie v prednej časti vozidla vyriešila pomocou zablokovania prednej masky a umiestnenia dizajnového prvku, ktorý mal pripomínať konvenčný dizajn vozidla so spaľovacím motorom, keďže vozidlo vychádzalo na trh ešte v dobe keď boli elektromobily zriedkavé. Dizajnový prístup sa pri modernizovanej facelift verzii pozmenil a v maske sa nenachádza otvor v strede predného nárazníku. V prednej časti vozidla sa však nachádzajú otvory pre brzdové kanály a spodný otvor v strede. [70]



Obr. 10 Prvý vzhľad (vľavo) a neskorší facelift vzhľad (vpravo) vozidla Tesla model S [70]

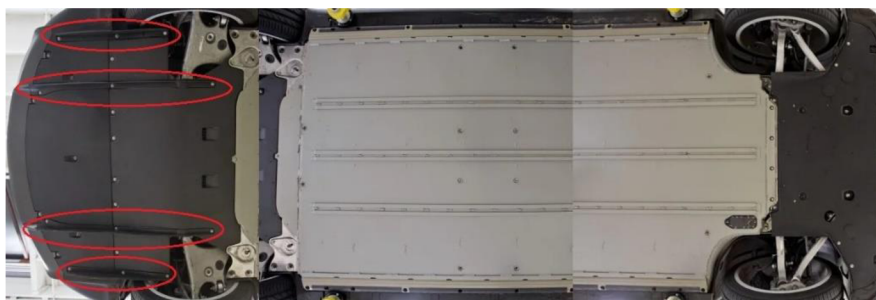
3.1.2 TVAR PODLAHY

Elektromobily potrebujú na pohon hnacieho ústrojenstva energiu uschovanú v batériách, ktoré sú zvyčajne umiestňované v podlahe vozidla a slúžia ako štrukturálny prvok karosérie. V roku 2012 automobilka Tesla predstavila model S, pri ktorom bol zvolený odlišný prístup umiestnenia batérie ako pri predošlom modeli Roadster. Model Roadster mal umiestnenú batériu v kufri, čo znižovalo batožinový priestor. Umiestnenie batérie medzi nápravy automobilu pri modeli S vytvorilo plochú podlahu, ktorá znižuje vytváranie aerodynamického odporu pod vozidlom a uľahčuje obtekanie vzduchu. Taktiež sa týmto zlepšili jazdné vlastnosti vďaka zníženému ťažisku vozidla medzi nápravami. Váha batérie pre verziu model S s 85 kWh je 544 kg. [73]



Obr. 11 Umiestnenie elektromotorov a batérie vozidla Tesla model S [74]

Elektromobil má taktiež plastové kryty, ktoré sa nachádzajú v oblasti prednej a zadnej nápravy. Zakrytie medzi nápravou a zadnou časťou vozidla je tvarované do tvaru difúzoru, ktorý sa postupne rozširuje, čím sa vytvára pozvoľný prechod medzi prúdením pod podlahou vozidla a úplavom za vozidlom. Z tohto dôvodu je možné použiť takú konfiguráciu podlahy, ktorá generuje dostatočný prítlak. Preto vozidlo nedisponuje značným zadným spojlerom, ktorý by zvyšoval aerodynamický odpor. Na Obr. 12 možno vidieť zadný plastový kryt, ktorý obsahuje taktiež štyri líniové výstupky ohraničené červenou farbou, ktoré usmerňujú obtekajúci vzduch pod vozidlom, čo umožní jeho opustenie podlahy do bočných smerov za zväčšovania objemu v rozširujúcej sa oblasti. [72]



Obr. 12 Zadný difúzor (vľavo), batéria (stred) a plastový kryt (vpravo) vozidla Tesla model S [72]

3.1.3 HLUK A VIBRÁCIE

Odlišne od vozidiel poháňaných spaľovacím motorom nemajú elektromobily poháňané elektromotorom problém s prenášaním rôznych oscilácií, vibrácií a mechanických zvukov z pohonnej spaľovacej jednotky vozidla, ktorá je spolu s výfukovým systémom hlavným zdrojom hluku. Veľa iných mechanických zvukov však naďalej ostáva prítomných pri elektromobiloch aj napriek absencii spaľovacieho motoru. Avšak absencia hluku z motoru

vytvára novú problematiku, keďže zvuky, ktoré boli pri vozidlách so spaľovacím motorom potláčané sú teraz výraznejšie a je potreba eliminácie a zníženia hluku. Medzi konkrétne problémy patrí aerodynamický hluk vytváraný obtekaním vzduchu okolo karosérie vozidla, odpor valenia pneumatík alebo posilňovač riadenia.

Spoločnosť Honda problematiku začala riešiť vybudovaním nového aerodynamického tunelu, ktorý je prispôsobený a vybavený aj pre požiadavky elektromobilov. Do aerodynamického tunelu umiestnili akustickú zostavu obsahujúcu mikrofóny a kamery, ktoré sú schopne precízne merať hluk a znižovať faktor NVH (Noise and Vibration Harshness). Taktiež pri návrhu znížili celý hluk tunelu, aby bola akustická zostava schopná ešte citlivejšie zachytiť zmeny hluku v reálnom čase. V testovacej sekcii tunela sa pri rýchlosti vzduchu 140 km/h vytvára hluk o intenzite 57 dB. [64]

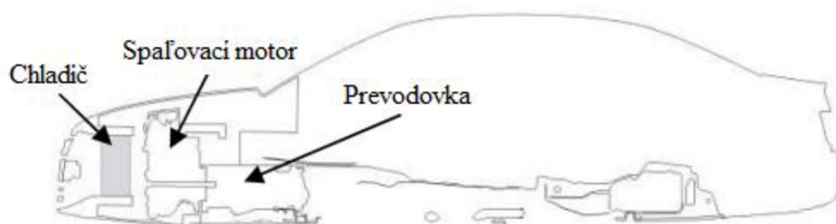
Automobilka Audi pri riešení aerodynamického hluku vozidiel rady e-Tron použila rôzne konštrukčné a materiálové riešenia, ktoré pomohli znížiť celkový hluk elektromobilov. Medzi konštrukčné riešenia patria špeciálne izolované a oddelené časti podvozku, ktoré by mohli vytvárať turbulentné vírenie v oblasti podlahy vozidla. Taktiež obklad podlahy je navrhnutý tak aby absorboval hluk. Medzi materiálové riešenia patrí umiestnenie mikrovlnového runa na povrchy rôznych konštrukčných otvorov a dutín. Mikrovlnka lemuje aj podbehy kolies a niektoré povrchy vozidla a podvozkové panely sú pokryté vrstvou materiálu, ktorá pohlcuje vibrácie. Avšak pri znižovaní hluku sa nejedná len o aerodynamické riešenia. Elektromotory Audi e-Tron sú umiestnené v obaloch, ktoré znižujú zvuk a v interiéri vozidla sú využité koberce, ktoré majú zo spodnej strany vrstvu peny, ktorá taktiež zabraňuje prenikaniu hluku do elektromobilu. [65]

Ďalšou technológiou používanou pre znižovanie hluku u vozidlách je aktívne potlačovanie hluku. Tento spôsob nevyužíva konštrukčné riešenia karosérie ale používa sústavu reproduktorov, ktorú už vozidlo obsahuje. Môže byť použitý v interiéri elektromobilu ako aj automobilu so spaľovacím motorom. Jedným z elektromobilov, ktoré takýto systém aktívneho potlačovania hluku využíva je Tesla Model S. Vozidlo má v interiéri umiestnené dva mikrofóny, ktoré v reálnom čase odpočúvajú mechanické a priestorové zvuky. Sústava reproduktorov vozidla následne hrá frekvencie zvuku s opačnou amplitúdou, čo ruší vlnenie zvuku a vytvára tiché prostredie vnútri vozidla. [67]

3.2 POŽIADAVKY AUTOMOBILU SO SPALOVACÍM MOTOROM

3.2.1 CHLADENIE SPALOVACIEHO MOTORU

Pri vznetových spaľovacích motoroch sa približne 60% energie obsiahnutej v palive premení na odpadové teplo. Z odpadového tepla odchádza 30% energie výfukovým systémom motoru a zvyšných 30% energie je odvádzaných chladiacim systémom vozidla. [88] K chladeniu spaľovacieho motoru sa v dnešnej dobe zvyčajne používajú chladiče s malými otvormi, cez ktoré v uzavretom okruhu prúdi kvapalina. Chladič však potrebuje k udržiavaniu efektívnych teplôt prisun vzduchu. Táto požiadavka vytvára v prednej maske vozidla otvory, ktoré zvyšujú aerodynamický odpor vozidla. Horúci vzduch v motorovom priestore môže taktiež ovplyvňovať obtekanie vzduchu okolo podlahy vozidla, kde sa postupne mieša so studeným vzduchom a tým vytvára zmeny v tlakoch na jednotlivých miestach podlahy vozidla. [68]



Obr. 13 Schéma uloženia motorového priestoru pre vozidlo s motorom vpredu [68]

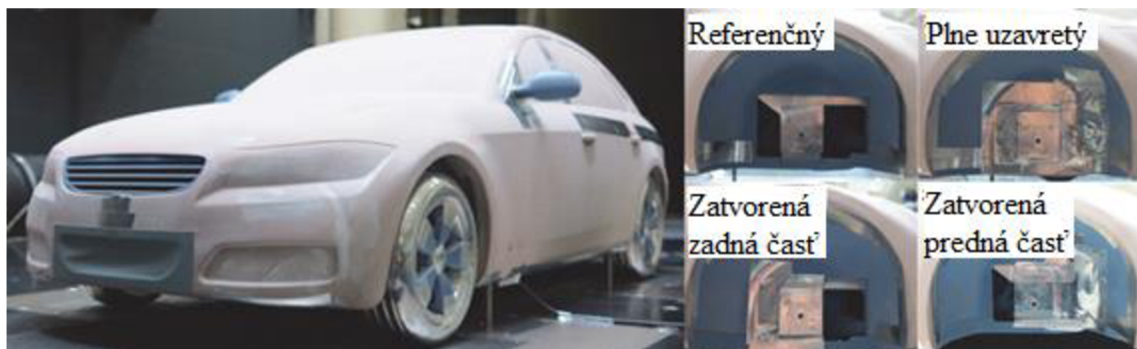
Odlíšne konštrukčné riešenie má napríklad vozidlo Porsche 911 GT3 RS, ktoré má umiestnený motor za zadnou nápravou a chladič sa nachádza za predným nárazníkom. Teplý vzduch z predného chladiča, ktorý vystupuje cez otvory v kapote narušoval prúdenie studeného vzduchu okolo karosérie, čo viedlo k zníženiu výkonu motora. [28]



Obr. 14 Aerodynamické otvory a prvky vozidla Porsche 911 GT3 RS [28]

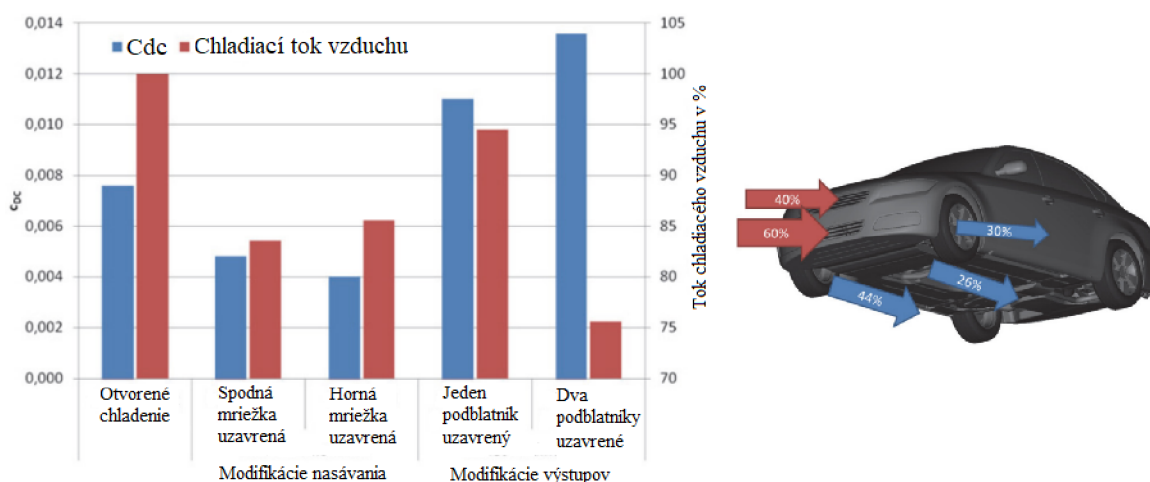
Na Obr. 14 je žltou farbou ohraničený otvor v prednom nárazníku vozidla, za ktorým sa nachádza hlavný chladič umiestnený v prednej maske. Cez hlavný chladič prúdi vzduch a následne vystupuje z dvoch otvorov, ktoré sa nachádzajú na prednej kapote. Cez tieto otvory, ktoré sú na obrázku ohraničené červenou farbou odchádza z chladiča teplý vzduch, ktorý následne prúdi okolo čelného skla a strechy automobilu, kde narazí na deflektory. Deflektory označené modrou farbou na obrázku odklonia obtekajúci vzduch do strán mimo karosérie a tým vytvoria v označenej zelenej oblasti pod zadným krídlom miesto, v ktorom nie je vzduch na vstupe do nasávania ovplyvňovaný teplým vzduchom z chladiča a nestráca sa výkon motora. Toto komplexné riešenie na seba kontinuálne nadväzuje a jednotlivé prvky postupne ovplyvňujú prúdenie vozidla z prednej časti až po zadný nárazník. Riešenie problematiky využitím deflektorov je spôsobené vďaka aerodynamickým požiadavkám prispôbeným umiestneniu a chladeniu spaľovacieho motora. [28]

Rozmiestnenie otvorov a ich rôzne kombinácie otvorenia a uzatvorenia je možné simulovať pomocou CFD simulácie na referenčnom modeli DrivAer v mierke 1:4, ktorý disponuje otvormi v prednej maske. Tieto vstupné otvory sa môžu uzatvoriť do rôznych kombinácií spolu s výstupmi, ktoré sa nachádzajú v motorovom priestore. Medzi tieto otvory patrí otvor pri prevodovke vozidla, cez ktorý môže vzduch z motorového priestoru prúdiť von. Ďalší otvor, cez ktorý opúšťa vzduch motorový priestor je v oblasti zavesenia nápravy v podblatníkoch. Model DrivAer môže týmito kombináciami približne napodobniť vozidlo so spaľovacím motorom a taktiež aj vozidlo s elektromotorom. [71]



Obr. 15 DrivAer s uzatvorenou spodnou mriežkou (vľavo) a otvory podblatníkov (vpravo) [71]

V CFD simuláciách uvedených v štúdií [71] došlo k nasledujúcim výsledkom. Pri vstupe do mriežok prednej masky má vyššiu rýchlosť vzduch pri spodnom otvore v porovnaní s horným otvorom. V oblasti spodnej mriežky vstupuje do motorového priestoru približne 60 % objemu studeného vzduchu. Zvyšných 40 % vstupuje v nižšej rýchlosti hornou mriežkou. Tento rozdiel je významný a aj napriek väčšej ploche hornej mriežky vstupuje viac studeného vzduchu spodnou mriežkou. Taktiež sa simuláciou zistilo, že 74 % teplého vzduchu opúšťa motorový priestor cez otvory v ledoch podblatníkov a zvyšných 26 % prúdi smerom von z motorového priestoru cez oblasť podlahy a otvor pri prevodovke. Otvorením mriežok modelu DrivAer došlo k zvýšeniu koeficientu odporu vzduchu chladenia o $\Delta C_{DC} = 0,013$ pri verzii referenčného modelu Notchback. Taktiež bol zaznamenaný nárast vo vztlaku na prednej náprave a zvýšenie prítlaku na zadnej náprave.

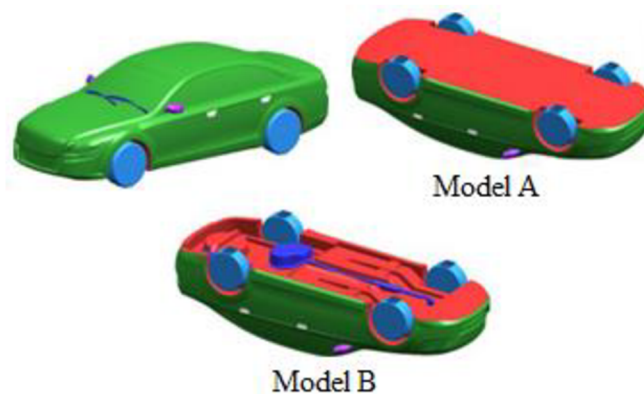


Obr. 16 Grafické znázornenie správania DrivAer v rôznych konfiguráciách uzatvorenia modelu [71]

3.2.2 TVAR PODLAHY

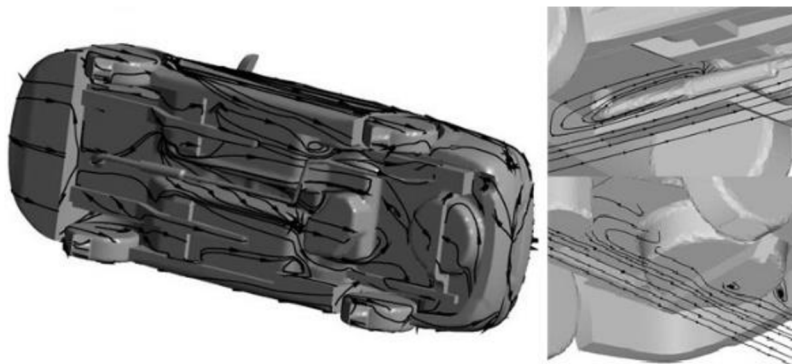
Pri automobiloch so spaľovacím motorom dochádza k zvýšeniu aerodynamického odporu, ktoré je spôsobené konštrukčným riešením podlahy vozidla. Aerodynamické obtekanie vzduchu narušujú rôzne prvky ako navrhnutie nosných častí, rezervné koleso, obal diferenciálu, palivová nádrž alebo výfuk umiestnený pozdĺžne karosérie spolu s tlmičom umiestneným väčšinou naprieč. Toto narušuje laminárnu vrstvu obtekajúceho vzduchu a prispieva k vyvinutiu turbulentného prúdenia okolo podlahy automobilu, čo vedie k zvyšovaniu celkového aerodynamického odporu vozidla.

Prúdením medzi vozovkou a podlahou vozidla sa zaoberala štúdia [66], v ktorej boli porovnávané referenčné modely UG A a B. Model A bol vytvorený s plochou podlahou, ktorá svojím tvarom pripomína elektromobily. Naopak model B bol vytvorený s podlahou, ktorá pripomína auto so spaľovacím motorom a obsahuje prvky ako výfuk, rezervné koleso alebo nosníky karosérie. Z CFD simulácie boli výstupné hodnoty $C_D = 0,259$ pre referenčný model A a $C_D = 0,319$ pre referenčný model B. Z výsledkov možno vyvodit' záver, že všeobecne vozidlá s plochou podlahou majú nižší koeficient odporu vzduchu ako vozidlá s interferujúcou podlahou. Hodnota koeficientu aerodynamického odporu je pre referenčný model A o takmer 20 % nižšia ako hodnota referenčného modelu B. Je však potrebné dodať, že hodnoty z CFD simulácie sa mierne líšia od hodnôt zistených v aerodynamickom tuneli, ktoré boli experimentálne zisťované.



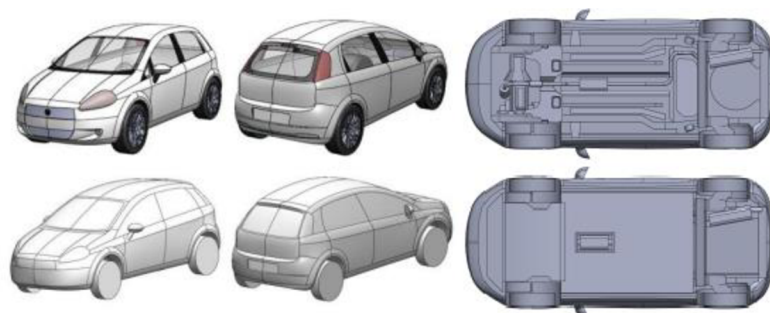
Obr. 17 Referenčný model s plochou (Model A) a interferenčnou podlahou (Model B) [66]

Na Obr. 18 je znázornené prúdenie vzduchu a detaily vytvárania turbulentného prúdenia v oblasti tvarovania umiestnenia rezervného disku (vpravo dole) a správanie obtekania vzduchu pri výfuku pohonnej jednotky vozidla (vpravo hore). Taktiež možno pozorovať postupnú trajektóriu jednotlivých prúdnic a vytváranie vírenia v zadnej časti vozidla (vľavo).



Obr. 18 Vizualizácia prúdenia podlahy vozidla so spaľovacím motorom pomocou CFD simulácie [66]

V ďalšej štúdií [91] bol porovnaný referenčný model DrivAer vo všetkých troch verziách zadnej časti karosérie. Porovnanie bolo medzi verziou s plochou a detailnou podlahou vozidla. Výsledky uvedené v Tab. 2 na konci kapitoly sú zo simulácie modelu so spätnými zrkadlami a kolesami, za predpokladu simulovania vozovky. Pri štúdií [89] bolo použité vozidlo kategórie Hatchback a to Fiat Grande Punto, kde prebehla simulácia so zakrytou a nezakrytou podlahou. Obidve možnosti neboli dokonale hladké, ako pri predošlých štúdiách DrivAer a UG.



Obr. 19 Referenčný model Fiat Grande Punto [89]

3.3 POROVNANIE VPLYVU ROZDIELNÝCH POHONNÝCH JEDNOTIEK NA AERODYNAMIKU VOZIDLA

3.3.1 VPLYV PODLAHY NA AERODYNAMIKU VOZIDLA

V nasledujúcej tabuľke je prevedené porovnanie koeficientov aerodynamického odporu referenčných modelov s plochou a detailne tvarovanou podlahou vozidla:

Tab. 2 Porovnanie referenčných modelov s detailnou a plochou podlahou [66, 89, 91]

Referenčný model	Detailná podlaha vozidla C_D [-]	Plochá podlaha vozidla C_D [-]	Rozdiel medzi podlahami ΔC_D [-]	Rozdiel medzi podlahami ΔC_D [%]
UG	0,319	0,259	0,060	20,8 %
DrivAer Notchback	0,277	0,246	0,031	11,9 %
DrivAer Estateback	0,319	0,292	0,027	8,8 %
DrivAer Fastback	0,275	0,243	0,032	12,4 %
Fiat Grande Punto	0,340	0,296	0,044	13,8 %

Z výsledkov jednotlivých štúdií porovnania rôznych spodných častí vozidla môžeme vyvodit' záver, že vplyv na koeficient aerodynamického odporu sa pri konkrétnych referenčných modeloch pohybuje od 8,8 – 20,8 %. Aj keď je rozsah odlišný, pre najmenšie rozdiely je zásadný. Rovnomernejšiu podlahu zvyknú mávať vozidlá s elektrickým pohonom a v tejto strane majú značnú výhodu oproti ich protikladom so spaľovacím motorom.

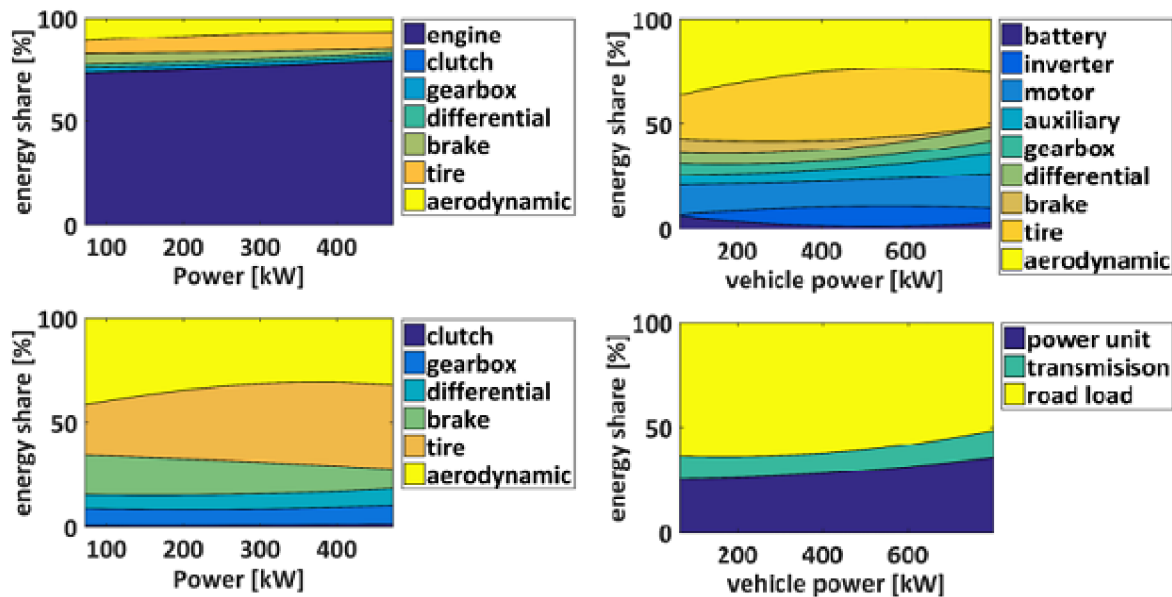
3.3.2 VPLYV OTVOROV V PREDNEJ MASKE NA AERODYNAMIKU VOZIDLA

Otvory v prednej maske automobilov slúžiace chladeniu zvyšujú koeficient aerodynamického odporu a tým prispievajú k znižovaniu aerodynamickej účinnosti. Pri ICE (Internal Combustion Engine) vozidlách sa zhruba iba 16 – 25 % energie z paliva využije na pohon vozidla a 58 – 62 % sa premení na tepelné straty, z ktorých približne polovica odchádza výfukovým systémom a zvyšné teplo sa ochladzuje v chladiacom systéme. Na druhej strane BEV (Battery Electric Vehicle) vozidlá dosahujú vyššej účinnosti 77 – 82 % s regeneratívnym brzdením a 60 – 65 % bez regeneratívneho brzdzenia, keďže elektrický pohon nadobúda straty iba 16 % a väčšina z týchto strát sú tepelné. [95]

Efektívne chladenie ovplyvňujú aj spádové teploty oproti teplotám okolia, ktoré sú pri ICE významne vyššie ako pri BEV. Optimálne teploty ICE sa pohybujú v hodnotách 85 – 110 °C a pri BEV sú pracovné teploty < 60 °C. Rozdiel v teplotnom spáde teplôt ICE a BEV vplyva

na tepelný tok prechádzajúci v hladičoch vozidla. [96] Všeobecne pri vyšších teplotách okolia približne 40 °C, môžeme vyvodit' záver, že teplotný spád pri ICE vozidlách je 2 – 3,5 krát väčší ako pri BEV vozidlách.

Na Obr. 20 môžeme vidieť všeobecné prerozdelenie energie pre ICE vozidlá (vľavo) a energetickú bilanciu pre BEV vozidlá (vpravo). Stratová energia spotrebovaná spaľovacím motorom sa pohybuje približne v hodnotách 75 % a zo zvyšujúcim sa výkonom stúpa. Naopak pri BEV sa podiel stratovej energie pohonnej jednotky pohybuje približne v nízkych hodnotách 25 % .



Obr. 20 Bilancia energií pre ICE a BEV vozidlá [92]

Hodnoty uvedené vyššie poukazujú na rozdiely medzi vozidlami s pohonom ICE a BVE. Vďaka nižšej operačnej teplote elektrických pohonov vozidiel, je efektívnosť chladenia pri rovnakých podmienkach, s rovnakým chladičom približne polovičná pre elektrický pohon, ktorý na rozdiel od spaľovacieho motoru prenesie približne o polovicu menšie teplo. Znížený prenos tepla spôsobuje nižší teplotný spád, ktorý je charakteristický pre elektrické vozidlá. Avšak aj keď je tepelný tok prenášaný chladičom približne polovičný, vďaka vysokej účinnosti BEV pohonov je to v poriadku a vozidlá sú schopné optimálne pracovať aj s menším chladičom ako ICE verzie pohonov. Veľkosť chladičov ovplyvňuje aj veľkosť otvorov v prednej maske vozidla, čo vedie k zvýšeniu aerodynamického odporu. Pri energetickej bilancii treba však brať do úvahy aj iné faktory ako sú napríklad účinnosť rozdiely jednotlivých pohonných benzínových a naftových jednotiek, chladenie batérií u BEV, medzichladič a rozdielne prúdenie v motorovom priestore.

4 AKTÍVNE AERODYNAMICKÉ PRVKY SÉRIOVÝCH VOZIDIEL

Aktívne aerodynamické prvky sa používajú na zmenu a prispôsobovanie jazdných vlastností vozidla rôznym poveternostným a dynamickým jazdným situáciám v reálnom čase. K docieleniu týchto vlastností sa využívajú rôzne spojler, panely, klapky a komponenty. Tieto prvky sú pohyblivé a môžu byť ovládané šoférom automobilu alebo pomocou riadiacej jednotky, ktorá berie do úvahy rôzne parametre zo senzorov rozmiestnených na vozidle a rýchlosť vozidla.

4.1 AKTÍVNY PREDNÝ SPOJLER

Aktívny predný spojler, inak nazývaný aj *Active Air Dam* sa využíva k odklopeniu prúdenia pod vozidlom a zmenšenia vzdialenosti medzi predným nárazníkom, na ktorom býva zvyčajne umiestnený a vozovkou. Vysunutím predného spojleru sa vytvára v prednej časti vozidla v mieste prednej nápravy oblasť zníženia tlaku, ktorá vytvára prítlak a zvyšuje odozvu riadenia a trakciu vozidla voči vozovke. [14]



Obr. 21 Predný spojler Porsche 911 Turbo S v zasunutej (vľavo) a vysunutej polohe (vpravo) [20]

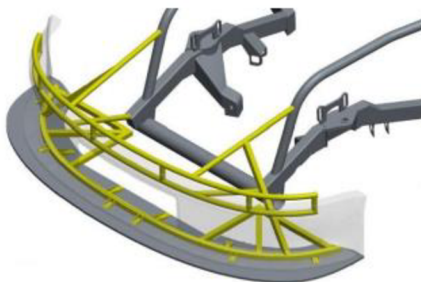
Výhodou používania tohto predného spojleru je jeho spätné zasunutie naspäť do nárazníku, čo umožňuje s využitím aktívneho podvozku, ktorý je schopný zvyšovať svoju svetlú výšku (napr. hydraulický alebo magnetický) jednoduchšie manévrovanie s automobilom počas parkovania alebo pri prechode cez spomaľovač.



Obr. 22 Predný spojler vozidla Ford F-150 v zasunutej (vľavo) a vysunutej polohe (vpravo) [19]

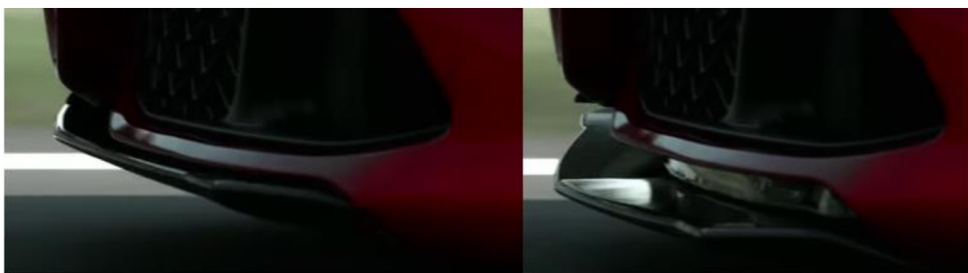
4.2 AKTÍVNY PREDNÝ SPLITTER

Predný splitter je plochý aerodynamický prvok, ktorého účelom je zväčšovať plochu podlahy vozidla voči vozovke vysunutím dosky materiálu, ktorá po priblížení k vozovke vytvára tlakový rozdiel. Zhora na splitter pôsobí za obtekania vzduchu väčší tlak a na spodnej strane je naopak oblasť nižšieho tlaku. Tento tlakový rozdiel vytvára prítlak k vozovke, čo zaručuje stabilitu prednej nápravy aj v ostrých zákrutách.



Obr. 23 Názorná poloha a umiestnenie splitteru na automobile [12]

Splitter sa zvyčajne používa u pretekárskych áut v neaktívnej forme, avšak v bežnej premávke je tento aerodynamický prvok ojedinelý, nakoľko je ostrá hrana pod predným nárazníkom nebezpečná pre chodcov. [6] Ojedinelým prípadom je však vozidlo Alfa Romeo Giulia vo výbave Quadrifoglio, ktorá pri rýchlosti 100 km/h tento aktívny predný splitter vysunie pomocou dvoch aktuátorov, za účelom zlepšenia jazdných vlastností pri vyšších rýchlostiach s využitím dodatočného aerodynamického odporu a prítlaku. Naopak v neaktívnej polohe vytvára iba zanedbateľný odpor. [15]



Obr. 24 Alfa Romeo Giulia Quadrifoglio so zasunutým (vľavo) a vysunutým (vpravo) splitterom [16]

4.3 AKTÍVNE MRIEŽKY PREDNÉHO NÁRAZNÍKU

Uzatváranie chladiacich otvorov motorového priestoru a kanálov brzd umiestnených na prednom nárazníku môže viesť k zvýšeniu efektivity dojazdu a k úspore pohonných hmôt. Jednotlivé otvory sú uzatvárané pomocou mriežok obsahujúcich aktívne dielce, ktoré pomocou rotácie alebo vysúvania uzatvárajú tieto otvory za využitia aktuátorov. Riadiaca jednotka vozidla rozhoduje pomocou dát získaných zo senzorov teplôt o stave otvorenia alebo zatvorenia dielcov mriežky a reguluje aktuálny stav v motorovom priestore.

Uzavreté mriežky predovšetkým obmedzujú prietok motorovým priestorom a chladičmi, čo vedie k nižším tepelným stratám. Výhodou uzavretých mriežok je znížene vytváranie turbulentného vírenia v prednej časti vozidla a znižovanie aerodynamického odporu. Ďalšou výhodou je aj rýchlejšie dosiahnutie prevádzkových teplôt za znížených teplôt okolia, počas rôznych ročných období. Spoločnosť Škoda Auto uvádza, že na ich vozidle Fabia 4. generácie dochádza za stavu uzavretých spodných mriežok predného chladiča v motorovom priestore a rýchlosti 120 km/h k úspore až 0,2 l/100 km. Týmto sa zlepšujú aj emisie vozidla, ktoré vypúšťa do ovzdušia o 5 g CO₂ menej na každý urazený kilometer. [9]

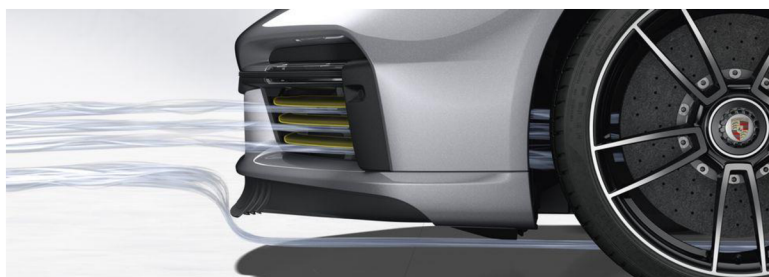
Ďalším príkladom aktívnych mriežok predného nárazníku, sú mriežky BMW 7. rady umiestnené vyššie pred chladičom motorového priestoru v úrovni predných svetiel. Tieto aktívne mriežky uložené v prednej maske, spolupracujú so spodnými mriežkami a môžu spolu

nakombinovať až päť rôznych polôh, ktoré sa určujú podľa požiadaviek chladenia, senzorov teploty v motorovom priestore a rýchlosti vozidla. Mriežky BMW *Active Kidney Grill* sú plne zavreté v zahrievacej fáze a v prevádzke pri nízkej záťaži. Týmto uzavretím sa zvyšuje efektívnosť motoru a aerodynamická účinnosť vozidla. [41]



Obr. 25 Aktívne mriežky BMW 7 G12 v zatvorenej (vľavo) a otvorenej (vpravo) polohe [41]

Konštrukčné riešenie chladenia brzd na športových vozidlách taktiež zahŕňa otvorenie predných mriežok chladenia brzdových kanálov. Tieto mriežky ostávajú otvorené, čím umožnia prístup vzduchu, ktorý chladí kotúčový disk. Aktívne mriežky na Porsche 911 Turbo S sú taktiež ovládané pomocou riadiacej jednotky vozidla a sú schopné pomôcť znížiť koeficient odporu vozidla na $C_D = 0,33$. Toto číslo sa pohybuje v kategórii športových áut v nízkych hodnotách. [20]

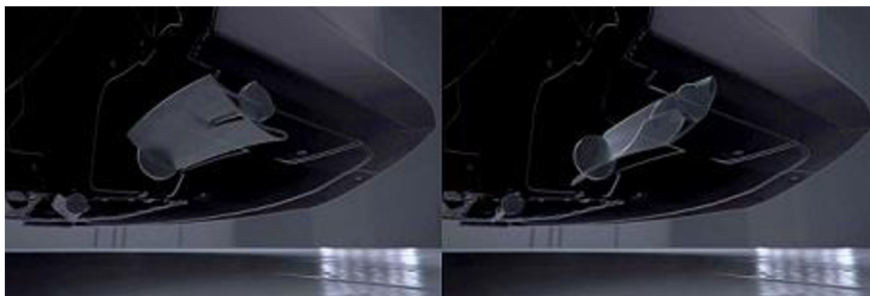


Obr. 26 Porsche Turbo S s otvorenými mriežkami v prednej maske [20]

4.4 AKTÍVNE PODVOZKOVÉ PANELY A KLAPKY

Ďalším aktuálne využívaním aktívnym aerodynamickým prvkom sú podvozkové panely, ktoré slúžia na zmenu správania obtekania vzduchu pod vozidlom. Zvyčajne sú umiestnené na jednej hrane v rotačnej väzbe a pomocou elektromotoru sa poháňajú a menia uhol naklonenia. Za vysokých rýchlostí bývajú zvyčajne vyklopené rovnobežne s podlahou, nakoľko sa zväčšuje plocha podlahy, ktorá vytvára prítlak k vozovke. Naopak pri nízkych rýchlostiach sú zaklopené, keďže nie sú až tak potrebné a môže dôjsť k ich odretiu a poškodeniu o prekážky na nekvalitnej vozovke.

Príkladom využitia je pár aktívnych panelov v prednej časti vozidla Porsche 911 GT3 RS, ktoré môžu meniť polohy rotujúcim pohybom o viac ako 80° za čas 0,3 s. [34] Klapka nachádzajúca sa vo vrchnej polohe vytvára maximálny prítlak, avšak v zníženej polohe rovnobežnejšej s vozovkou vytvára menší aerodynamický odpor. Tento rotačný panel sa používa spolu aj s nižšie spomenutou klapkou pri iniciovaní DRS (Drag Reduction System) režimu, za účelom zníženia aerodynamického odporu a dosiahnutím vyššej maximálnej rýchlosti. [28]



Obr. 27 Klapka v normálnej polohe (vľavo) a v režime DRS (vpravo) [34]

4.5 AKTÍVNY ZADNÝ SPOJLER

Aktívny zadný spojler slúži na vytváranie prítlaku, ktorý pôsobí na zadnú nápravu. Tento prítlak zaručuje väčšiu stabilitu vozidla za vyšších rýchlostí a v zákrutách. V dnešnej dobe sa začínajú viac využívať spojler, ktoré majú viacero polôh natočenia a tým optimalizujú aerodynamický prítlak v rôznych rýchlostiach.

Jedným z aktuálnych automobilov, ktoré využíva takýto spojler je aj Mercedes-Benz AMG triedy SL, ktorého zadné krídlo má 5 nasledujúcich polôh [13]:

- Pozícia 0 (-11° uhol) – Pri rýchlostiach 0 až 80 km/h je zadný spojler v polohe, ktorá je úplne zarovnaná so siluetou karosérie a nenarušuje vzhľad vozidla. Jedna z výhod je že počas parkovania je vnútorný mechanizmus spojleru chránený voči prachu a vonkajším vplyvom.
- Pozícia 1 ($+6^\circ$ uhol) – Počas rýchlostí 80 až 140 km/h, ktoré sú najviac využívané v bežnej premávke má vozidlo najmenší koeficient odporu vzduchu, ktorý je dokonca menší ako v nultej polohe, čím sa dosahuje dobrá aerodynamická efektívnosť a nízka spotreba pohonných hmôt.
- Pozícia 2 ($+11^\circ$ uhol) – V rýchlostiach 140 až 160 km/h je v tomto uhle natočenia zadného spojleru optimálny balans medzi stabilitou riadenia vozidla a nízkym odporom vzduchu za hodnôt stále využiteľného stredného dojazdu.
- Pozícia 3 ($+17^\circ$ uhol) – Pri vysokých rýchlostiach od 160 km/h až po maximálnu rýchlosť vozidla sa v tejto polohe dosiahne optimálna stabilita riadenia.
- Pozícia 4 ($+22^\circ$ uhol) – Od rýchlosti 120 km/h až po maximálnu rýchlosť vozidla sa spojler nachádza v dynamickej pozícii, ktorá je rozpoznaná riadiacou jednotkou vozidla. V tejto pozícii vytvára zadný spojler najväčší možný prítlak a zaručuje najlepšiu trakciu a jazdné vlastnosti. Táto dynamická pozícia môže byť taktiež spustená šoférom vozidla bez zásahu riadiacej jednotky vozidla.



Obr. 28 Zadný spojler vozidla AMG SL vo vysunutej (vľavo) a zasunutej polohe (vpravo) [32]

Umiestnenie zadného aktívneho spojleru tak, aby nenarušoval prúdenie vzduchu a bol súčasťou karosérie je využívané najčastejšie. Zaujímavé konštrukčné riešenie zvolila spoločnosť Ford pri modeli Ford GT, ktorý využíva tvar karosérie vozidla k vytváraniu prítlaku, aj keď je spojler zasunutý a splyva s karosériou. Pre docielenie vytvárania prítlaku aj v zasunutej polohe sú do karosérie vozidla zabudované dva kanály, cez ktoré prúdi vzduch priamo k zadnému spojleru. Tieto kanály sú zobrazené na obrázku nižšie, kde sú zobrazené aj ďalšie polohy spojleru, ktoré sú docielené aktivovaním spojleru a jeho vysunutím prípadne natáčaním. Zadný spojler má aj funkciu aerodynamickej brzdy, ktorá napomáha pri brzdení vozidla. [29]



Obr. 29 Polohy spojleru Ford GT – minimálny odpor, maximálny prítlak a aerodynamická brzda [30]

Ďalším zaujímavým konštrukčným riešením je aktívny zadný spojler na vozidle Porsche Panamera Turbo. Zadný spojler splyva s karosériou vozidla a je zložený z troch častí, ktoré sa vysunú z vozidla zároveň do výšky a aj do šírky. Dve bočné časti sa vysúvajú do strán a stredová časť sa vysunie z karosérie vozidla. Toto riešenie umožňuje umiestnenie celého mechanizmu do dverí batožinového priestoru, aj keď je v aktivovanom stave spojler široký 147 cm. [37]



Obr. 30 Postupné vysúvanie aktívneho zadného spojleru Porsche Panamera Turbo [38]

4.5.1 AKTÍVNA AERODYNAMICKÁ BRZDA

Aerodynamická brzda napomáha brzdnému systému vozidla pri znižovaní rýchlosti naklopením zadného krídla do polohy s väčšou čelnou plochou. Zvyčajne je poháňaná pomocou hydraulického systému a je jednou z polôh zadného krídla, avšak môže byť umiestnená aj v iných oblastiach vozidla (viď. Podkapitola 4.6). Hlavnou z výhod umiestnenia v zadnej časti vozidla je dodatočné vytváranie prítlaku na zadnú nápravu ktorá sa zvykne pri brzdení nadľahčovať, čím automobil stráca trakciu. Ďalšia z výhod je prenášanie časti sily, ktorá je generovaná aerodynamickým odporom na zadné krídlo, čo vedie k menšej záťaži na pneumatikách automobilu.

Jedným z vozidiel, ktoré používa aerodynamickú brzdu je aj Bugatti Chiron, ktoré je schopné zväčšiť svoj koeficient odporu vzduchu z hodnoty $C_D = 0,36$ na hodnotu $C_D = 0,60$.

Navýšenie sa dosiahne pomocou natočenia zadného krídla z jazdného režimu *Top Speed*, kedy je krídlo natočené pod uhlom 3° k horizontálnej rovine a následnom brzdení, kedy sa pomocou hydraulického ovládania natočí na 49° . [31]



Obr. 31 Zadné krídlo Bugatti Chiron v polohe *Top Speed* (vľavo) a počas brzdenia (vpravo) [27]

4.5.2 DRS (DRAG REDUCTION SYSTEM)

DRS (Drag Reduction System) je technológia, ktorá slúži na znižovanie aerodynamického odporu automobilu. Toto zníženie býva zvyčajne docielené pomocou hydraulicky ovládanej klapky v zadnom spojleri, ktorá sa po stlačení spínača nastaví do horizontálnej polohy, ktorá je viacej rovnobežná s prúdnicami obtekajúceho vzduchu a tým umožní dosiahnutia vyššej rýchlosti na rovinkách vďaka zníženiu čelnej plochy spojleru, kolmej na tok prúdenia. [17]

Tento systém sa najprv používal v pretekárskych sériách, avšak neskôr našiel svoje využitie aj v dnešnej cestnej premávke a do svojej štandardnej aerodynamickej výbavy ho zahŕňa viac výrobcov ako v minulosti. Zvyčajne sa však nachádza na športových a super športových kategóriách vozidiel. Jedným z týchto vozidiel je aj aktuálny model Porsche 911 GT3 RS, ktoré tento systém využíva k zvyšovaniu prítlaku na zadnej náprave vozidla a zmenšovaniu čelnej plochy zadného spojleru. DRS klapka má rozsah klopenia až 34 stupňov. Pokiaľ senzor ťažového preťaženia zistí presiahnutie hodnoty 0,9 G v zákrute, riadiaca jednotka vyšle signál na uzatvorenie klapky DRS v krídle. Pokiaľ je DRS systém otvorený a vozidlo začne agresívne brzdiť, dôjde k uzatvoreniu DRS klapky už za 0,35 s a následnému použitiu ako aerodynamická brzda. [18]



Obr. 32 Zadný spojler so zavretým (vľavo) a otvoreným (vpravo) DRS [28]

Spojler je uchytený k vozidlu pomocou *Swan Neck* uchytenia, ktoré nenarušuje obtekanie na spodnej hrany spojleru, čo vedie k maximalizovaniu vytváraného prítlaku. [28]

4.6 AKTÍVNE AERODYNAMICKÉ KLAPKY

Aktívne aerodynamické klapky sú podobne ako aktívne aerodynamické podvozkové panely umiestnené rotačne na jednej hrane klapky a pripevnené ku karosérii vozidla. Pri rôznych rýchlostiach a jazdných situáciách menia svoju polohu a tým aj optimalizujú obtekanie vzduchu okolo automobilu pre docielenie optimálnych jazdných vlastností.

Jedným z vozidiel, ktoré využíva aktívne aerodynamické klapky je aj Pagani Huayra, ktoré má umiestnené dve klapky v prednej časti vozidla. Pred aktivovaním týchto predných klapiek sú zarovnané s prednou kapotou, čím nenarušujú aerodynamiku a línie vozidla. Pagani Huayra má taktiež umiestnené dve klapky v zadnej časti vozidla, ktoré môžu slúžiť ako zadné krídlo ale aj aerodynamická brzda pri spomaľovaní. Všetky štyri klapky sú ovládané nezávisle od seba pomocou riadiacej jednotky, čím ovládajú odporovú a vztlakovú silu pôsobiacu na vozidlo. Riadiaca jednotka dostáva a spracúva informácie o rýchlosti vozidla, pozícií plynového pedálu, uhlu natočenia kolies a bočné zrýchlenie aby rozhodla o optimálnom natočení jednotlivých klapiek. [35]



Obr. 33 Aerodynamické klapky automobilu Pagani Huayra [36]

4.7 AKTÍVNY ZADNÝ DIFÚZOR

Úlohou zadného difúzoru je vytvárať pozvoľný prechod obtekajúceho prúdu vzduchu pod automobilom v zúženej časti od podlahy a jeho postupné spomalenie pri rozšírení na konci vozidla. Ako difúzor berieme iba rozširujúcu sa časť. Zvyčajne býva umiestnený medzi zadnou nápravou, odkiaľ sa postupne rozširuje až po spodnú hranu zadného nárazníku. Týmto rozšírením vytvára opúšťajúci vzduch za automobilom oblasť, v ktorej nedochádza k priveľkému odtrhávaniu medznej vrstvy a prechod je plynulejší a taktiež znižuje vytváranie turbulentného prúdenia v oblasti úplavu, kde je rýchlosť prúdenia nízka a nachádza sa za vozidlom. Optimálny dizajn difúzoru maximalizuje prítlak, prítlak však vytvára podlaha vozidla efektom prisávania, ktorej napomáha difúzor.

Aktívny difúzor sa nachádza aj vo výbave automobilu Ferrari F8 Tributo, avšak samotný difúzor nie je aktívny. V jednotlivých kanáloch difúzoru sa nachádzajú klapky, ktoré sa môžu nachádzať v dvoch polohách a tým ovplyvňujú geometriu a správanie difúzoru. V základnej polohe keď sú klapky zdvihnuté hore a zasunuté v difúzore neovplyvňujú správanie obtekajúceho vzduchu. Po spustení klapiek sa však smer obtekajúceho vzduchu mení a smerujú vodorovne s vozovkou čo znižuje aerodynamický odpor. Táto poloha znižuje prítlak na zadnej náprave a využíva sa hlavne pri rýchlej a priamej jazde, kde nie je potrebný až tak veľký prítlak ako v zákrutách. [22]



Obr. 34 Klapky difúzoru Ferrari F8 Tributo v základnej (vľavo) a aktivovanej (vpravo) polohe [22]

4.8 AKTÍVNE NASTAVITELNÝ PODVOZOK

Svetlá výška vozidla ovplyvňuje obtekanie prúdu vzduchu medzi vozovkou a podlahou vozidla. Nižšie nastavenie podvozku vytvára oblasť, v ktorej obteká vzduch rýchlejšie, čo vytvára nízky tlak pod podlahou automobilu. Oblasť nízkeho tlaku vytvára tlakový rozdiel s tlakom pôsobiacim na vrchnú stranu karosérie, čo vedie k vytváraniu prítlaku a pritláčaniu automobilu k vozovke, čo zlepšuje jazdné vlastnosti pri rôznych dynamických podmienkach. Obecné platí že čím menšia je vzdialenosť medzi vozovkou a podlahou vozidla, tým dlhšie bude trvať, kým sa laminárne prúdenie začne meniť na turbulентné. [1]

Ovplyvňovanie prúdenia pod vozidlom sa uskutočňuje pomocou výškovo nastaviteľných podvozkov. Automobil Ford GT využíva hydraulický výškovo nastaviteľný podvozok, ktorý dokáže rýchlo meniť svetlú výšku vozidla, ktorá je spojená s jazdnými režimami. Tieto jazdné režimy zaručujú flexibilitu využitia vozidla [33]:

- Jazdný režim *Wet* – Najmenej agresívne nastavenie podvozku, základná svetlá výška vozidla je 120 mm a tlmiče sú nastavené na mätko. Vodič môže prepnúť tlmiče do komfortnejšieho nastavenia po stlačení tlačidla *Comfort*.
- Jazdný režim *Normal* – Svetlá výška 120 mm je stále nezmenená. Aerodynamika obtekania vzduchu okolo vozidla ostáva zachovaná a mení sa odozva plynového pedálu, kontrola trakcie a rýchlosť radenia prevodovky je v základnom nastavení.
- Jazdný režim *Sport* – Svetlá výška naďalej ostáva 120 mm avšak dochádza k tuhšiemu nastaveniu tlmičov, čo vytvára odpor voči aerodynamickým silovým a momentovým účinkom. V jazdnom režime *Sport* je zadné krídlo zasunuté a splýva s karosériou vozidla, čo znižuje aerodynamický prítlak na zadnej náprave. K vyrovnaniu rozdelenia prítlaku sa otvoria v prednej časti vozidla mriežky. Tieto mriežky usmernia vzduch do dvoch kanálov, ktoré smerujú k zadnému krídlu a boli už vyššie spomenuté v podkapitole 4.5 o zadných spojleroch.
- Jazdný režim *Track* – V tomto móde sa hydraulický podvozok zníži na 70 mm, no mriežky ktoré ovplyvňovali tok vzduchu do kanálov sa zatvoria a vysunie sa taktiež zadný hydraulicky ovládaný spojler, ktorý upravuje rozdelenie prítlaku na karosériu vozidla.
- Jazdný režim *Vmax* – Hydraulický podvozok ostáva v svetlej výške 70 mm, avšak dôjde k tuhšiemu nastaveniu tlmičov a aktívne aerodynamické prvky sa nastavujú do polôh s najmenším odporom vzduchu aby vozidlo dosahovalo rýchlostí vyšších ako 300 km/h.



Obr. 35 Ford GT v jazdnom režime Normal (hore) a Track (dole) [34]

4.9 SYSTÉMY AKTÍVNEJ AERODYNAMIKY

Aktívne aerodynamické prvky spomenuté v tejto kapitole sa zvyčajne používajú nakombinované vo viacerých jazdných režimoch, prípadne sa nepoužívajú vôbec, aby nenarušovali obtekanie vzduchu vozidla počas jazdy. Zvyčajne sú s týmito aerodynamickými prvkami kombinované aj rôzne nastavenia podvozku.

Jedným z automobilov používajúcich nastaviteľný podvozok je aj Mercedes-Benz AMG One, ktorý má šesť rôznych jazdných režimov. Medzi týmito jazdnými režimami sú zdieľané tri rôzne nastavenia aktívnej aerodynamiky [39]:

- Režimy *Highway*, *Race*, *Race safe*, *EV* a *Individual* – Mriežky na predných blatníkoch sú zatvorené, aktívne klapky predného difúzoru sú vysunuté, zadný spojler je zasunutý a splýva s vozidlom, čím neovplyvňuje aerodynamické vlastnosti a zachováva dizajn.
- Režimy *Track*, *Race Plus* a *Strat 2* – Tieto jazdné režimy môžu byť používané iba na uzavretom okruhu. Mriežky predných blatníkov sa plne otvoria, čím dopomôžu vytvoriť oblasť nízkeho tlaku v ledoch blatníkov. Vytvorením tejto oblasti nízkeho tlaku zvyšujú prítlak na prednej náprave, ktorá sa v týchto jazdných režimoch zníži o 37 mm. Taktiež sa aj vysunie zadné krídlo do najagresívnejšej polohy aj spolu s dodatočnou nastaviteľnou klapkou, ktorá maximalizuje prítlak na zadnej náprave. Zadná náprava sa tiež zníži o 30 mm, čím sa zvyšuje celkový prítlak vozidla. Spoločným využitím vyššie spomenutých aktívnych aerodynamických prvkov dochádza k zvýšeniu prítlaku vozidla na päť krát vyššie hodnoty v závislosti od rýchlosti vozidla.
- Režim *Race DRS* – Po stlačení tlačidla dochádza v jazdných režimoch určených na uzavretý okruh k zníženiu celkovému prítlaku vozidla o 20 %. Zadná nastaviteľná klapka sa zasunie do zadného spojleru a mriežky blatníkových lemov sa zatvoria. Deaktivovanie týchto aerodynamických prvkov umožní zníženie odporu vzduchu a zvýšenie maximálnej rýchlosti vozidla na rovinkách. Tento režim je automaticky ukončený po tom ako šofér začne brzdiť a vozidlo sa vráti naspäť do aerodynamických nastavení s vysokým prítlakom.



Obr. 36 Mercedes-Benz AMG ONE v normálnych (vľavo) a okruhových (vpravo) režimoch [39]

5 AERODYNAMIKA VOZIDIEL ROVNAKEJ MODELOVEJ RADY

V súčasnej prechodnej dobe, kedy spoločnosť postupne prechádza z automobilov so spaľovacím motorom na elektromobily za účelom zníženia lokálnych emisií sa na trhu vytvára podskupina vozidiel, ktoré sú súčasne dostupné so spaľovacím a aj elektrickým motorom. Toto riešenie je finančne výhodné, nakoľko automobilky nemusia financovať vývoj ďalšej karosárskej platformy. Stačí vytvorenie jednej platformy, ktorá sa môže modulárne prispôbiť požiadavkám elektromobilu, prípadne automobilu so spaľovacím motorom. Treba však podotknúť že automobilky postupne prechádzajú k vývoju elektromobilov na špeciálnych karosárskych platformách, ktoré sú usporiadané na ich konkrétne požiadavky. V tejto kapitole sa porovnáva aerodynamika týchto vozov rovnakej modelovej rady a prístup výrobcov k rôznym požiadavkám ako je dojazd a chladenie.

5.1 KATEGÓRIA HATCHBACK

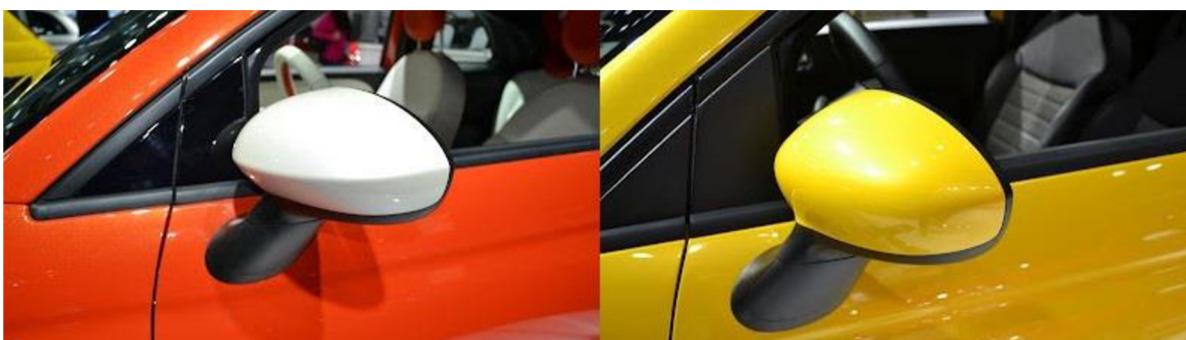
FIAT 500E A FIAT 500 LOUNGE

Jedným z príkladov v kategórii Hatchback je vozidlo Fiat 500, ktoré sa robí vo variante 500e s elektrickým pohonom, ktoré je navrhnuté a vychádza z karosérie Fiat 500 Lounge so spaľovacím motorom. Koeficienty aerodynamického odporu vozidiel sú $C_D = 0,311$ pre elektrickú verziu a $C_D = 0,359$ pre verziu so spaľovacím motorom. [54]

Výrobca docielil toto zníženie C_D pre elektrickú verziu pomocou týchto zmien v exteriéri vozidla [55, 57]:

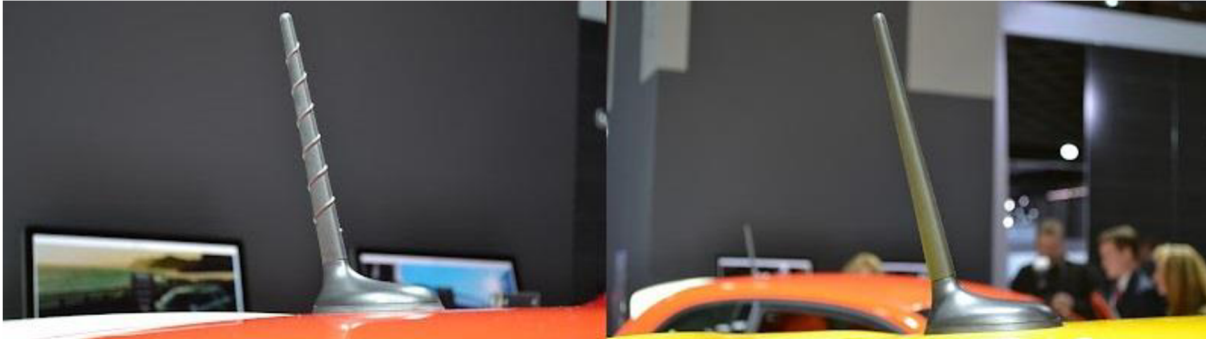
- Zmenou dizajnu a priechodnosti predného nárazníku vozidla
- Použitím 15 palcových aerodynamickejšie tvarovaných kolies
- Tvarovanie spätných zrkadiel
- Rovnomernejšou podlahou vozidla
- Tvarovanie bočných prahov vozidla
- Vytvorením zadného nárazníku s menším aerodynamickým odporom
- Použitím zadného spojleru umiestneného na kufrových dverách

Na Obr. 37 je zobrazený rozdiel medzi spätným zrkadlom na elektrickej verzii 500e a 500 Lounge so spaľovacím motorom. Spätné zrkadlo má na prednej strane ostrejšiu hranu, ktorá napomáha k zníženiu aerodynamického odporu a zároveň znižuje hluk obtekajúceho vzduchu, čo je pri elektromobiloch jedna z požiadaviek na komfort. Keďže je chod vozidla pomerne tichý oproti spaľovaciemu motoru, treba brať do úvahy aj hluk, ktorý vytvárajú interferujúce aerodynamické prvky.



Obr. 37 Spätné zrkadlo na Fiat 500e (vľavo) a 500 Lounge (vpravo) [56]

Ďalším využitým prvkom bola anténa umiestnená na streche vozidla. Tvar bol upravený špirálovým dizajnom pre elektrickú verziu 500e. Tento upravený tvar oproti pôvodnému dizajnu znižoval hluk a vibrácie prenášané na karosériu vozidla, čím sa ďalej naplňali požiadavky komfortu. [56]



Obr. 38 Anténa použitá na verzii 500e (vľavo) a verzii 500 Lounge (vpravo) [56]

VOLKSWAGEN E-UP! A UP!

Spoločnosť Volkswagen vytvorila malé mestské vozidlo s elektrickým pohonom e-UP! a koeficientom odporu vzduchu $C_D = 0,31$ [48], ktoré zdieľa štvordverovú karosériu s verziou so spaľovacím motorom UP! a koeficientom aerodynamického odporu $C_D = 0,32$ [49]. Tento rozdiel bol dosiahnutý primárne pomocou tvarovania podlahy pri elektrickej verzii vozidla, ktorá je plochejšia medzi nápravami vozidla a tým znižuje koeficient odporu vzduchu. Podlaha vozidla má odlišný tvar z dôvodu umiestnenia vzduchom chladenej batérie, ktorá má plochý tvar. Výrobca taktiež premiestnil ťažké komponenty ako napríklad nabíjačku, elektromotor, reduktor a diferenciál do motorového priestoru benzínovej verzie, čím umožnil umiestnenie batérie medzi nápravy vozidla. [47]



Obr. 39 Umiestnenie batérie vozidla Volkswagen e-UP! medzi nápravami [47]

VOLKSWAGEN E-GOLF A GOLF

Elektrické vozidlo e-Golf postavené na rovnakej karosárskej platforme ako je Golf 7. generácie bolo vytvorené so zameraním na zníženie aerodynamického odporu a zvýšenie dojazdu. E-Golf má koeficient aerodynamického odporu $C_D = 0,281$ a výrobca udáva pokles tejto hodnoty až o 10% oproti verzii so spaľovacím motorom. [50] Verzia Golfu so spaľovacím motorom má koeficient odporu $C_D = 0,30$. [51] Toto zníženie bolo dosiahnuté pomocou zredukovania vzduchu prichádzajúceho prednou mriežkou pomocou čiastočného zablokovania. [50]



Obr. 40 Predná maska vozidla e-Golf (vľavo) [52] a vozidla Golf 7. generácie (vpravo) [53]

Ďalším spôsobom zníženia aerodynamického odporu bolo zakrytie podvozku vozidla plastovými panelmi, zmena zadnej časti vozidla v oblasti výfuku a použitie aerodynamických elementov, ktoré boli pripevnené o zadný kufr a spojler v oblasti C stĺpika karosérie vozidla. Tieto elementy (tzv. finlety) ovplyvňujú vznikanie úplavu za vozidlom a turbulentné prúdenie za vozidlom. [50]



Obr. 41 Finlety v oblasti stĺpika pre e-Golf (vľavo) [52] a C stĺpik benzínovej verzie (vpravo) [53]

Volkswagen taktiež vytvoril úplne nové disky kolies, ktoré sú viac aerodynamicky tvarované a zarovnané s lemmami blatníkov, čím sa dosiahla väčšia aerodynamická efektívnosť vozidla. Tieto kolesá boli navrhnuté pre elektrickú verziu, ktorá nepotrebuje veľký prísun studeného vzduchu počas brzdenia, keďže elektromotor disponuje funkciou regeneratívneho brzdenia. [52]



Obr. 42 Aero kolesá e-Golfu (vľavo) [52] a kolesá bežnej verzie vozidla Golf (vpravo) [53]

MINI COOPER SE A MINI COOPER S

Spoločnosť Mini disponuje na trhu s kompaktnými vozidlami dvojicou automobilov Cooper SE a Cooper S. Cooper SE s elektromotorom dosiahol koeficientu aerodynamického odporu vzduchu $C_D = 0,28$ [75] zatiaľ, čo jeho verzia so spaľovacím motorom Cooper S dosahuje vyšších hodnôt $C_D = 0,31$ [76].

Toto zníženie bolo u elektrickej verzii vozidla dosiahnuté pomocou vytvorenia špecifickej masky predného nárazníku, ktorá je viacej uzavretá oproti spaľovacej verzii. Elektrické Mini taktiež nedisponuje výfukovým systémom, ktorý by mohol narúšať obtekanie vzduchu zo spodnej strany vozidla. Taktiež bolo vylepšené odtrhávajúce vzduchu v oblasti zadnej nápravy využitím plastových krytov. K zníženiu aerodynamického odporu taktiež prispelo tvarovanie kolies, ktoré je špeciálne pre elektrickú verziu. [77]



Obr. 43 Zadné nárazníky a liatinové disky elektrickej (vľavo) [77] a benzínovej (vpravo) [78] verzii

5.2 KATEGÓRIA SEDAN

BMW i4 eDRIVE40 A 430i GRAN COUPÉ

Typickým predstaviteľom v kategórii Sedan je BMW 4. rady aktuálnej generácie, ktoré je dostupné s elektrickým pohonom vo výbave i4 eDrive40, prípadne so spaľovacím motorom v podobe 430i Gran Coupé. Koeficienty odporu vzduchu sú $C_D = 0,24$ [85] pre elektromobil a $C_D = 0,28$ [86] pre automobil so spaľovacím motorom.

Výrobca docielil zníženie odporu vzduchu u elektrickej verzii i4 eDrive40 úplným zablokovaním prednej masky v oblasti, kde sa vo verzii 430i nachádzajú chladiče motorového priestoru. [86] Mriežky sa nachádzajú iba na spodnej časti nárazníku, kde sa podľa potrieb chladenia elektrického pohonu, vysoko napäťovej batérie, brzd a systému klimatizácie môžu nastaviť až do 10 rôznych polôh. [85]



Obr. 44 Predný nárazník a mriežky BMW i4 (vľavo) [85] a BMW 4 Gran Coupé (vpravo) [87]

Na Obr. 44 môžeme vidieť aj odlišné tvarovanie bočných mriežok vozidla, ktoré sú pri verzii 430i so spaľovacím motorom väčšie. Elektromotorové vozidla majú schopnosť regeneratívneho brzdenia, nie je potrebné vytvárať väčší otvor nakoľko sa brzdy nezvyknú prehrievať tak často, ako u benzínovej verzie vozidla. Obidva automobily majú približne rovnaký výkon, avšak vozidlo so spaľovacím motorom potrebuje viac chladenia pohonnej jednotky čím sa vytvárajú rozdiely v nárazníkoch.

Ďalším spôsobom, ktorým výrobca zvýšil aerodynamickú efektivitu vozidla bolo špeciálne tvarovanie kolies, ku ktorým sa dodávali vloženia, ktoré viacej uzatvárali oblasti medzi jednotlivými lúčmi kolesa a tým zaistili hladšie obtekanie vzduchu. Vplyv na dojazd elektrickej verzie má aj veľkosť kolies. Vo verzii i4 eDrive40 s veľkosťou kolies 18 palcov je vozidlo schopné dojazdu 484 km a s 19 palcovými kolesami iba 454 km, podľa testu EPA (Environmental Protection Agency). [85]



Obr. 45 Disky BMW i4 obsahujúce vnútorné vloženia [85]

BMW i7 M70 A 760i xDRIVE

Ďalším predstaviteľom vozidiel s dlhším rázvorom v kategórii sedan je BMW i7 v elektrickej verzii a BMW 7. rady so spaľovacím motorom. Elektrická verzia i7 xDrive60 má koeficient odporu vzduchu $C_D = 0,24$, zatiaľ čo jeho protiklad so spaľovacím motorom 760i nadobúda vyšších hodnôt $C_D = 0,26$. [79] Elektromobil sa taktiež vyrába v športovej verzii i7 M70 xDrive, ktorá má odlišný predný nárazník, ktorý prispieva k zvýšeniu aerodynamického odporu na hodnotu $C_D = 0,26$. [80] Tento športovejší nárazník je taktiež dostupný na verzii 760i xDrive so spaľovacím motorom, ktorá má koeficient odporu vzduchu $C_D = 0,26$ zhodný s verzou M70 xDrive. [79]



Obr. 46 predný nárazník verzie i7 M70 (vpravo) [80] a 760i xDrive (vľavo) [79]

Športovejšie verzie M70 xDrive a 760i xDrive majú vo svojej výbave rozdielne tvarované kolesá, ktoré sú viac otvorené oproti základným verziám, aby mohol cez bočnú plochu prúdiť vzduch slúžiaci na chladenie bŕzd vozidla. Taktiež sa na športovejších verziách nachádzajú rozdielne tvarované spätné zrkadlá. Výrobca BMW zvolil pre verzie s odlišnými pohonnými jednotkami rovnaké aerodynamické prvky za účelom znižovania emisií vozidla a zvyšovania dojazdu. Ďalším aerodynamickým prvkom využitých na všetkých vozidlách 7. rady sú kľučky dverí, ktoré nevytrčajú z profilu karosérie a nenarušujú obtekanie vzduchu okolo vozidla. [79] Je potrebné však dodať, že tieto nárazníky a rôzne aerodynamické prvky sa líšia od rôznych výbav vozidla, ktoré sa prispôbujú rôznym požiadavkám. Podobne to je aj pri predošlom vozidle BMW i4, kde boli porovnávané dve vozidlá s približne rovnakým výkonom, napriek tomu mali rozdielne aerodynamické prvky a tým pádom aj koeficienty aerodynamického odporu.



Obr. 47 Kľučka dverí BMW 7. rady a spätné zrkadlo športovejších verzií [80]

5.3 KATEGÓRIA SUV

Volvo XC40 RECHARGE A XC40

Príkladom dostupného vozidla v segmente vozidiel SUV je Volvo XC40 Recharge v plne elektrickej verzii a jeho verzia so spaľovacím motorom XC40. Vozidlá majú koeficienty odporu vzduchu $C_D = 0,32$ [63] pre elektromobil a $C_D = 0,34 - 0,37$ [83] pre verziu so spaľovacím motorom podľa konkrétnej výbavy. Pri jednomotorovej verzii sa pri testoch WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure) dosiahlo dojazdu až 425 km, ktoré bolo dosiahnuté vďaka zníženiu aerodynamického odporu. [60] Výrobca zvolil prístup zmenšenia otvoru prednej masky, avšak veľkosť masky ostala zachovaná, čím sa zachovala aj identita dizajnu vozidla.



Obr. 48 Predná mriežka XC40 Recharge (vľavo) [62] a XC40 (vpravo) [61]

Ďalšou zmenou pri elektromobile bola podlaha vozidla, ktorá je pri elektrickej verzii plochejšia. Cez podlahu neprechádza pozdĺžny tunel v ktorom je na variante so spaľovacím motorom umiestnený výfuk vozidla, ktorý ide od motorového priestoru vozidla v prednej časti až po zadný nárazník. [58] Vďaka tejto plochej podlahe dochádza k postupnému vytváraniu turbulentného prúdenia vo väčšej vzdialenosti od predného nárazníku ako vo verzii so spaľovacím motorom. Spaľovacia verzia obsahuje aj NACA navádzač umiestnený v spodnom kryte motorového priestoru. Taktiež vďaka absencii výfukového systému môže byť optimalizovaný zadný difúzor elektromobilu.



Obr. 49 Podlaha XC40 Recharge (vľavo) [59] a XC40 (vpravo) [58]

OPEL MOKKA-E A MOKKA

Odlišnou cestou aerodynamického vzhľadu sa vydala automobilka Opel so svojimi modelmi Mokka-e a Mokka. Obidve varianty pohonu majú rovnaký udávaný koeficient aerodynamického odporu s hodnotou $C_D = 0,32$ [42] s veľkosťou náporovej čelnej plochy $2,27 \text{ m}^2$ [43]. Predné masky vozidiel vyzerajú rovnako a vo výškovej úrovni predných lúčov sa nachádza nepriechodný panel, ktorý plní svoju dizajnovú funkciu. V spodnej časti prednej masky sa nachádza otvor, v ktorom sú zabudované aktívne mriežky. Tieto aktívne mriežky sa otvárajú, keď je hnacie ústrojenstvo vozidla pod záťažou, prevažne v jazde do kopca alebo za zvýšených okolitých teplôt. [44] Opel Mokka-e a Mokka taktiež disponujú aj bočnými otvormi predného nárazníku *Air Curtains*, ktoré optimálne nasmerujú prúdiaci vzduch a zabraňujú bočnému rastu turbulentného prúdenia. [44] Je potrebné však dodať, že výrobca uvádza iba jednu hodnotu koeficientu aerodynamického odporu pre obidve verzie vozidla. Táto hodnota môže byť dostatočná z homologizačných dôvodov.



Obr. 50 Bočný otvor predného nárazníku Air Curtain vozidla Opel Mokka [44]

HYUNDAI KONA ELECTRIC A KONA

Spoločnosť Hyundai zvolila pre svoje vozidlá Kona Electric a Kona vzhľadovo aj konštrukčne odlišné nárazníky, ktoré značne odlišujú vzhľad aj koeficient odporu vzduchu oboch vozidiel. Pre elektrickú verziu bolo pomocou uzavretejších otvorov predného nárazníku dosiahnutého nízkeho koeficientu $C_D = 0,29$ [81], zatiaľ čo verzia so spaľovacím motorom s otvorenejšou maskou disponuje koeficientom odporu vzduchu $C_D = 0,34$ [82]. Tento rozdiel je u verzie so spaľovacím motorom spôsobený požiadavkou chladenia spaľovacieho motoru, ktorá má umiestnený chladič za predným nárazníkom. Elektrická verzia má v tejto oblasti umiestnený otvor pre konektor nabíjania a nižšie v maske sa nachádzajú aktívne mriežky, ktoré možno detailne vidieť na obrázkoch na ďalšej strane, zhotovených na univerzitnom vozidle VUT v laboratóriu.



Obr. 51 Predný nárazník vozidla Kona Electric (vľavo) a Kona (vpravo) [84]

Odlišné sú aj disky elektrickej verzie a verzie so spaľovacím motorom. Na Obr. 52 je možné vidieť rozdiel tvarovania diskov elektrickej verzie, ktorá má na diskoch pripevnené aero vložky medzi jednotlivé lúče, ktoré znižujú prietokovú plochu disku a tým znižujú aerodynamický odpor. Verzia so spaľovacím motorom má úplne odlišné disky, do ktorých sa nekladajú tieto elementy.



Obr. 52 Disky verzie Kona Electric (vľavo) a Kona (vpravo) [84]

Kona Electric disponuje aerodynamickými prvkami na podlahe vozidla, medzi ktoré patrí kryt pod motorom v prednej časti vozidla, deflektory kolies, ktoré usmerňujú obtekajúci vzduch a zadný difúzor. Výrobca však musel spraviť aj určité kompromisy v rámci znižovania nákladov. Elektromobil neobsahuje kryt medzi zadnou nápravou a batériou čím môže vzniknúť oblasť nízkeho tlaku a následne aj úplav.



Obr. 53 Predné deflektory diskov (vľavo) a zadný difúzor (vpravo) elektromobilu Kona Electric

Medzi ďalšie aerodynamické prvky patrí aktívna mriežka chladičov, nachádzajúca sa v prednom nárazníku pod evidenčným číslom vozidla. Taktiež sú na Hyundai Kona umiestnené deflektory pred zadnou nápravou, ktoré ovplyvňujú smer obtekajúceho vzduchu.



Obr. 54 Aktívne mriežky v prednej maske (vľavo) a deflektory zadných kolies (vpravo)

BMW iX1 A X1

Automobilka BMW vyrába vozidlo X1 patriace do kategórie menších SUV. Vozidlo je dostupné s elektrickým pohonom ako iX1 xDrive30 s koeficientom odporu vzduchu nadobúdajúcim hodnotu $C_D = 0,26$. [45] Karosériu s elektrickou verziou zdieľa aj verzia so spaľovacím motorom xDrive23, ktorá má koeficient odporu $C_D = 0,27$. [46] Tento rozdiel je spôsobený zablokovanou prednou mriežkou vozidla, ktorá nie je pri elektrickej verzii potrebná. Na Obr. 55 je možné vidieť vľavo mriežku prednej masky elektrickej verzie, ktorá je nepriechodná a vpravo aktívne mriežky umiestnené v prednej maske, ktoré sú súčasťou výbavy verzie so spaľovacím motorom. [45]



Obr. 55 Mriežka elektromobilu iX1 xDrive30 (vľavo) a automobilu X1 xDrive23 (vpravo) [45]

5.4 PREHLAD HDNÔT KOEFICIENTOV AERODYNAMICKÉHO ODPORU

Tab. 3 Porovnanie vozidiel v 5. kapitole. [42, 45, 46, 48–51, 54, 63, 75, 76, 79–83, 85, 86]

Model automobilu	Koeficient aerodynamického odporu $C_D[-]$	Rozdiel v koeficientoch $\Delta C_D[-]$	Percentuálne vyjadrenie rozdielu $\Delta\%$
Fiat 500e	0,311	0,048	14,3 %
Fiat 500 Lounge	0,359		
Volkswagen e-UP!	0,31	0,01	3,2 %
Volkswagen UP!	0,32		
Volvo XC40 Recharge	0,32	0,02-0,05	6,1-14,5 %
Volvo XC40	0,34-0,37		
Opel Mokka-e	0,32	0	0 %
Opel Mokka	0,32		
Hyundai Kona Electric	0,29	0,05	15,9 %
Hyundai Kona	0,34		
BMW iX1 xDrive30	0,26	0,01	3,8 %
BMW X1 xDrive23	0,27		
BMW i4	0,24	0,02	8 %
BMW 4 Gran Coupé	0,26		
Mini Cooper SE	0,28	0,03	10,2 %
Mini Cooper S	0,31		
Volkswagen e-Golf	0,281	0,019	6,5 %
Volkswagen Golf	0,30		
BMW i7 xDrive 60	0,26	0	0 %
BMW 760i	0,26		

Z hodnôt v Tab. 3 vidno, že rozdiel v koeficientoch aerodynamických odporov sa pohybuje od 0 – 15,9 %. Rozdiel 0 % môže byť zapríčinený využívaním rovnakých aerodynamických prvkov karosérie vozidla ako tomu je napríklad pri vozidlách BMW 7. rady. Naopak najväčšia diferenciacia v hodnotách je pri vozidlách Hyundai Kona, kde sa na významnom rozdiel podieľa tvarovanie prednej masky a podlaha elektromobilu. Hodnoty zmien v koeficientoch aerodynamického odporu približne odpovedajú zmenám spomenutých v 3. kapitole. Aj keď veľkosť odchýlky medzi verziou so spaľovacím motorom a elektromotorom je trocha menšia v jednotlivých karosárskych kategóriách vozidiel. Zmena môže byť zapríčinená podlahou, ktorá je v CFD simuláciách dokonale hladká, čo pri reálnom elektromobile nie je možné. Ďalším významným rozdielom je simulácia motorového priestoru a jeho otvorov, ktorý nie je v CFD referenčných modelov až tak detailný ako v realite a vytvára ďalšie straty. Hodnoty sú v Tab. 3 uvádzané na dve až tri desatinné miesta, počet desatinných miest v hodnotách závisí od publikácie automobiliek.

ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo vykonať rešerš aktuálne používaných aktívnych aerodynamických prvkov osobných vozidiel, uviesť odlišné aerodynamické požiadavky elektromobilu a automobilu so spaľovacím motorom. Ďalším cieľom bolo previesť prieskum trhu aktuálnych variant vozidiel s odlišnými pohonnými jednotkami a ich následné porovnanie z perspektívy aerodynamického vplyvu jednotlivých prvkov.

Aktívne aerodynamické prvky sa v dnešných osobných vozidlách vyskytujú stále častejšie a do budúcnosti možno očakávať nárast využívania týchto prvkov v bežnej premávke. Jedná sa o záležitosť vyššej strednej, luxusnej a športovej cenovej skupiny vozidiel, ktorá ovplyvňuje množstvo jednotlivých aerodynamických elementov na vozidle. Pre bežné masovo vyrábané vozidla výrobcovia zvyčajne využívajú aktívne prvky v podobe aktívnych mriežok prednej masky, ktoré výrazne nezlepšujú dynamické vlastnosti, naopak znižujú náklady na prevádzku automobilu. Podobná ideológia je využitá aj pri elektromobiloch, pri ktorých sa kladie hlavný dôraz na efektívny dojazd a využívajú sa pri vozidlách aktívne alebo pasívne aerodynamické prvky. Pri športových vozidlách sa naopak znižuje efektívnosť aerodynamického odporu a vozidla sa navrhujú s dôrazom na vytváranie prítlaku, ktorý napomáha zlepšovať dynamické vlastnosti vozidla. Zvyčajne sa zvyknú používať aerodynamické prvky ako predný a zadný spojler, aktívny difúzor alebo celé aerodynamické systémy v ktorých spolupracuje viacero aktívnych prvkov naraz. Výhodou je aj dodatočné vytváranie aerodynamického prítlaku v potrebných situáciách a prípadné zvyšovanie maximálnej rýchlosti, keď sú aktívne prvky zasunuté v karosérii. Nevýhodou je zvyšovanie spotreby pohonných hmôt, pridávanie hmotnosti a komplikovanosť aerodynamických prvkov majúcich rôzne pohyblivé časti a aktuátory, ktoré potrebujú pravidelnú údržbu. V prípadoch, kedy sa neberie dôraz na spotrebu alebo dojazd automobilu sa tieto negatívne vplyvy zanedbávajú, zvyčajne u športových vozidiel straty dorovnáva pohonná jednotka vozidla.

Pri rešerši aktuálneho trhu vozidiel dostupných v elektrickej a spaľovacej verzii možno vyvodit' záver, že rozdiely medzi jednotlivými vozidlami rovnakej modelovej rady môžu byť markantné ale aj zanedbateľné. Odlišnosti môžu byť spôsobené dizajnovým a aj konštrukčným riešením, zvoleným pri vývoji vozidla. Hlavnou výhodou elektromobilu je ploché tvarovanie podlahy vozidla a uzavretie hornej prednej mriežky, ktorá je nepotrebná z dôvodu nižších požiadaviek chladenia a vyššej účinnosti elektrického pohonu. Medzi ďalšie výhody patrí aj využitie špeciálne vyvinutých aerodynamických prvkov, ktoré sa dodávajú k elektromobilom a môžu sa neskôr objaviť aj na spaľovacích verziách vozidiel. Je však potrebné dodať, že výrobcovia v dnešnej dobe postupne opúšťajú konštrukčné riešenie vytvorenia jednej platformy, ktorá slúži na všetky variácie pohonných jednotiek a postupne prechádzajú na vytváranie rozdielnych karosárskych platform. Tieto nové platformy sú schopné lepšie naplniť požiadavky na výrobu daného vozidla.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] KOVANDA, Bohuslav a Jan KOVANDA. Aerodynamika vozidel. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01942-X.
- [2] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. London: Butterworths, 1987. ISBN 04-080-1422-9.
- [3] SCHLICHTING (DECEASED), Hermann a Klaus GERSTEN. Boundary-Layer Theory. 9th ed. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2016. ISBN 3662529173.
- [4] ŠILAR, Josef. Zařízení pro měření proudění vzduchu pod vozidlem. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Vančura. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/39759/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [5] REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. Encyklopedie fyziky [online]. fyzika.jreichl.com, 2006, [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/130-zaklady-fyziky-letu>
- [6] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 08-376-0142-8.
- [7] KOMPENHANS, J., M. RAFFEL, L. DIETERLE, et al. Particle Image Velocimetry in Aerodynamics: Technology and Applications in Wind Tunnels. Journal of visualization [online]. 2000, 2(3-4), 229-244 [cit. 2023-02-23]. ISSN 1343-8875. Dostupné z: https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1pt3lf4/TN_cdi_crossref_primary_10_1007_BF03181440
- [8] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamik des Automobils. 6. dopl. Mníchov: Springer, 2013. ISBN ISBN 978-3-8348-1919-2.
- [9] ŠKODA FABIA: nejlepší aerodynamika ve své třídě. Škoda Storyboard [online]. Mladá Boleslav: Škoda Auto, 2021 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-zpravy-archiv/skoda-fabia-nejlepsi-aerodynamika-ve-sve-tride/>
- [10] From aero rakes to sandbagging – F1 testing slang and jargon explained. In: Formula1.com [online]. Bahrain International Circuit: Formula One World Championship Limited, 2021, 12 Mar 2021 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/article.from-aero-rakes-to-sandbagging-f1-testing-slang-and-jargon-explained.4EYLIFpKJVu4JTUk6Ow8mn.html>
- [11] HALL, Nancy, ed. Smoke and Tufts. NASA.gov [online]. Cleveland: NASA, 2021, 13 May 2021 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvsmoke.html>
- [12] DrivAer Model. Chair of Aerodynamics and Fluid Mechanics [online]. Technical University of Munich, 2011 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.epc.ed.tum.de/en/aer/research-groups/automotive/drivaer/>

- [13] The new Mercedes-AMG SL: aerodynamics. Mercedes-Benz Group Media [online]. Affalterbach: Mercedes-Benz Group, 2021, Oct 28 2021 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/ko/The-new-Mercedes-AMG-SL-aerodynamics.xhtml?oid=51730592>
- [14] OBIDI, T. Yomi. Theory and applications of aerodynamics for ground vehicles. ISBN 978-0-7680-2111-0
- [15] ALFA ROMEO GIULIA QUADRIFOGLIO. Alfaromeo.com [online]. Torino: Alfa Romeo, 2022 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.alfaromeo.com/models/quadrifoglio/giulia-quadrifoglio>
- [16] Alfa Romeo Giulia Quadrifoglio – The embodiment of our soul. YouTube [online]. 2015 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://youtu.be/m0gMnPeWSyg>
- [17] What is DRS in F1, how does it work and is it automatic?. Motorsport.com [online]. Miami: Motorsport Network, 2023, 1 Mar 2023 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/f1/news/what-is-drs-in-f1-how-does-it-work-is-it-automatic/10437677/>
- [18] POWELL, Derek. Every Ridiculous High-Tech Feature on the 2023 Porsche 911 GT3 RS. Jalopnik [online]. New York: G/O Media, 2022 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://jalopnik.com/2023-porsche-911-gt3-rs-performance-features-explained-1849612711>
- [19] 2021 Ford F-150 Active Air Dam. YouTube [online]. 2020 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://youtu.be/3ftjRcGnj28>
- [20] WARNER, Robin. How Porsche's Active Aero Works on the New 911 Turbo S: The Stuttgart-based carmaker uses active aerodynamics on the 2021 911 Turbo S to improve both economy and performance. Autoweek.com [online]. Hearst Autos, 2020, APR 23, 2020 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.autoweek.com/news/sports-cars/g32226310/porsches-claims-are-a-bunch-of-hot-airand-cold-air-too/>
- [21] NASA Splitter. Miata Turbo [online]. 2017 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: https://www.miataturbo.net/attachments/race-prep-75/144379-post-your-diy-aero-pics-80-nascarsplitter_1b90756e3f10a9547ddf05bc592268d43519ab09.jpg?dateline=1436809699
- [22] Ferrari F8 Tributo – Aerodynamics. YouTube [online]. 2019 [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: https://youtu.be/RQJ_F9ADV2Y
- [23] ČAVOJ, Ondřej. Výpočet aerodynamických charakteristik vozidla s vybočením. Brno, 2012. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55347. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedúci práce Jan Vančura.

- [24] BUSCARIOLO, Filipe F., Spencer J. SHERWIN, Gustavo R. S. ASSI a Julio R. MENEGHINI. Spectral/hp Methodology Study for iLES-SVV on an Ahmed Body. In: SHERWIN, Spencer J., David MOXEY, Joaquim PEIRÓ, Peter E. VINCENT a Christoph SCHWAB, ed. Spectral and High Order Methods for Partial Differential Equations ICOSAHOM 2018 [online]. Cham: Springer International Publishing, 2020, 2020-08-12, s. 297-311 [cit. 2023-03-08]. Lecture Notes in Computational Science and Engineering. ISBN 978-3-030-39646-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-39647-3_23
- [25] PAGE, Gary J. 1st Automotive CFD Prediction Workshop: : SAE Reference Notchback Model [online]. Loughborough University, 2019, 7 November 2019 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://autocfd1.s3.eu-west-1.amazonaws.com/Presentations/Case1-descriptionv0p6.pdf>
- [26] TANNEBERGER, Max, Chenyi ZHANG, Timo KUTHADA, Felix WITTMEIER, Jochen WIEDEMANN a Juliane NIES. Development of an SUV reference model for aerodynamic research. In: BARGENDE, Michael, Hans-Christian REUSS, Andreas WAGNER a Jochen WIEDEMANN, ed. 19. Internationales Stuttgarter Symposium [online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, 2019-05-25, s. 427-442 [cit. 2023-03-08]. Proceedings. ISBN 978-3-658-25938-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-658-25939-6_37
- [27] BUGATTI Chiron 0-400-0 km/h in 42 seconds – A WORLD RECORD. YouTube [online]. 2017 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=PkkV1vLHUvQ&ab_channel=Bugatti
- [28] Variable wing elements generate high levels of downforce. Newsroom The Media Portal by Porsche [online]. Stuttgart: Dr. Ing. h.c. F. Porsche, 2022 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://media.porsche.com/mediakit/911-gt3-rs/en/911-gt3-rs/aerodynamic>
- [29] The Ford GT. Ford.com [online]. Dearborn: Ford Motor Company, 2016 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.ford.com/performance/gt/>
- [30] Wind Tunnel Testing:Functional Design and Active Aerodynamics. YouTube [online]. 2016 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=OY1_HRSzx8U&ab_channel=FordPerformance
- [31] Bugatti Chiron. Bugatti Media [online]. Molsheim: Bugatti Automobiles S.A.S. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://www.bugatti.com/fileadmin/media/Media/MediaKit/180301_Bugatti_Chiron_en.pdf

- [32] The new Mercedes-AMG SL: The new edition of an icon. In: Mercedes-Benz Group Media [online]. Affalterbach: Mercedes-Benz Group, 2021, Oct 28, 2021 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/picture/Mercedes-AMG-SL-Technology-and-Design.xhtml?oid=51719145&ls=L2VuL2luc3RhbmNIL2tvL1RoZS1uZXctTWVyY2VkZXMtQU1HLVNMLVRoZS1uZXctZWRpdGlvb1vZi1hbi1pY29uLnhodG1sP3JzPTAmcmVsSWQ9MTAwMSZmcm9tT2lkPTUxNzE3OTMyJnJlc3VsdEluZm9UeXB1SWQ9MTcyJnN0eWxlSWQ9NTEzMSZ2aWV3VHlwZT1ncmlkbnNvcnREZWZpbml0aW9uPVBVQkxJU0hFRF9BVC0yJm9pZD01MTcxNzkzMiZ0aHVtYINjYWxlSW5kZXg9MSZyb3dDb3VudHNJbmRleD01JmZyb21JbmZvVHlwZUlkPTQwNjMwI3ByZXZjZD01MTcxOTE0NQ!!&rs=2>
- [33] SOROKANICH, Bob. An In-Depth Explanation of the 2017 Ford GT's Five Drive Modes: It's all about that aero. Road & Track [online]. New York: Hearst Autos, 2017, Mar 28, 2017 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.roadandtrack.com/new-cars/first-drives/a31820/explaining-the-ford-gts-five-drive-modes/>
- [34] 2017 Ford GT Track & V-MAX Mode. YouTube [online]. 2017 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=vzoYWYwrlmU&ab_channel=DPCcars
- [35] KORZENIEWSKI, Jeremy. Pagani Huayra makes its official web debut. Autoblog.com [online]. Yahoo, 2011, Jan 25th 2011 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://www.autoblog.com/2011/01/25/pagani-huayra-makes-its-official-web-debut/?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEub3JnLw&guce_referrer_sig=AQAAALzSvIW-T4DRqd0pZRPbK06twUfI1mWvm5xHNHnA1mZCKDtvFVo16iTiphRNPrJw9XtEbef-C0HilKxZK1FedbtFmNTIGH2Z0kTIEBZiwHhMpzE5NunIyTxR69RaN2hW7vaWuBB1sDR11W17zqSe2MrE-1KvCb_ix_IQ5XVvLpKO
- [36] Pagani Huayra – Active Aerodynamics. YouTube [online]. 2013 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=T1zXCAPbJYk&ab_channel=SumeshPatil
- [37] Porsche Panamera Rear Spoiler Explained. YouTube [online]. 2023 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=i77gkmBkU08&t=8s&ab_channel=DPCcars
- [38] The new Panamera Turbo and Panamera 4S in motion. YouTube [online]. 2016 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=-QfRAwg3gkM&ab_channel=Porsche
- [39] The new Mercedes-AMG ONE: Formula 1 technology for the road. Mercedes-Benz Group Media [online]. Affalterbach: Mercedes-Benz Group, 2022, Jun 1, 2022 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/ko/The-new-Mercedes-AMG-ONE-Formula-1-technology-for-the-road.xhtml?oid=53396743&ajaxRequestsMade=1>

- [40] New 2023 Porsche 911 GT3 RS Active Aerodynamics Development. YouTube [online]. 2022 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=fNiDTQmm1N8&ab_channel=DPCcars
- [41] The All-New BMW 7 Series. Bmw Group Press [online]. Woodcliff Lake: BMW Group, 2015, 10.06.2015 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0221442EN_US/the-all-new-bmw-7-series?language=en_US
- [42] Opel Mokka: Press Kit. Opel [online]. Rüsselsheim: Opel Automobile, 2023 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.opel.com.cy/opel-news/mokka-press-kit/?0=>
- [43] New Opel Mokka: Top Aero for Higher Efficiency and Lower Emissions. Media Stellantis [online]. Rüsselsheim: Stellantis, 2021, 13 Jan 2021 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.media.stellantis.com/em-en/opel/press/new-opel-mokka-top-aero-for-higher-efficiency-and-lower-emissions>
- [44] SCHRÖCK, David. The Drag Factor. Opel Post [online]. Rüsselsheim: Opel Automobile, 2021 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.opelpost.com/03/2021/the-drag-factor/>
- [45] The all-new BMW X1 and the first-ever BMW iX1. Bmw Group Press [online]. Munich: BMW Group, 2022, 01.06.22 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0393974EN/the-all-new-bmw-x1-and-the-first-ever-bmw-ix1>
- [46] BOERIU, Horatiu. 2023 BMW X1 and iX1 – We take you behind the scenes to learn about the design. Bmwblog.com [online]. BMW Blog, 2022, June 2 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.bmwblog.com/2022/06/02/2023-bmw-x1-and-ix1-we-take-you-behind-the-scenes-to-learn-about-the-design/>
- [47] BINGLEY, Lem. Batteries included: VW e-Up driven. Green Motor [online]. GreenMotor.co.uk, 2014, 30 January 2014 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <http://www.greenmotor.co.uk/2014/01/volkswagen-electric-up-review.html>
- [48] The e-up! – taken to a new level: International vehicle presentation. In: Volkswagen Newsroom [online]. Valencia: Volkswagen, 2019, 11/19/19 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/the-e-up-taken-to-a-new-level-5583>
- [49] Up! four-door – up! exterior. Volkswagen Newsroom [online]. Volkswagen, 2012, 03/15/12 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/up-four-door-driving-presentation-3073/up-four-door-up-exterior-3092>
- [50] Aerodynamics and rolling resistance. Volkswagen Newsroom [online]. Volkswagen, 2014, 03/07/14 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/international-driving-presentation-of-the-new-e-golf-2858/aerodynamics-and-rolling-resistance-2900>

- [51] New Golf is launched with high-tech standard equipment. Volkswagen Newsroom [online]. Volkswagen, 2019, 11/26/19 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/the-new-golf-international-vehicle-presentation-5609/new-golf-is-launched-with-high-tech-standard-equipment-5617>
- [52] Volkswagen electrifies Europe's most successful car As always, entire drive system is a Volkswagen development. Volkswagen Newsroom [online]. Berlin: Volkswagen, 2014, 03/07/14 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/international-driving-presentation-of-the-new-e-golf-2858>
- [53] International Driving Presentation: The new Golf. - Body I – styling. Volkswagen Newsroom [online]. Porto Cervo: Volkswagen, 2012, 10/02/12 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/the-new-golf-das-auto-international-driving-presentation-2797>
- [54] PRESS KIT: 2015 FIAT 500E. Stellantis Media [online]. Auburn Hills: FCA Group, 2014, September 1, 2014 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://media.stellantisnorthamerica.com/newsrelease.do?id=15964&mid=351>
- [55] Fiat 500e. NetCarShow.com [online]. Net Car Show, 2014 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.netcarshow.com/fiat/2014-500e/>
- [56] Fiat 500e at the Detroit Auto Show. Fiat500USA [online]. Fiat500USA, 2013, January 20, 2013 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <http://www.fiat500usa.com/2013/01/fiat-500e-at-detroit-auto-show.html>
- [57] Fiat 500 and Abarth Drag Coefficients. Fiat500USA [online]. Fiat500USA, 2022, January 20, 2022 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <http://www.fiat500usa.com/2022/01/fiat-500-and-abarth-drag-coefficients.html>
- [58] Raise the car [online]. Volvocars.com [online]. Volvo Car Corporation, Updated 10/14/2022 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.volvocars.com/en-th/support/car/xc40/article/451d453a70100f64c0a801517f9f2716>
- [59] Hoisting the vehicle. Volvocars.com [online]. Volvo Car Corporation, Updated 2020-11-20 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.volvocars.com/en-ca/support/car/xc40-recharge-pure-electric/2020w37/article/a02527b2b0d20e38c0a80151381428a3>
- [60] Technical Data. Volvo Cars Global Newsroom [online]. Volvo Car Corporation, 2023 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/models/xc40-recharge/2023/specifications>
- [61] Images. Volvo Cars Global Newsroom [online]. Volvo Car Corporation, 2020, Apr 02, 2020 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/models/xc40/2021/photos>
- [62] Volvo XC40 Recharge P8 AWD in Glacier Silver. Volvo Cars Global Newsroom [online]. Volvo Car Corporation, 2019, Oct 16, 2019 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/search/results?SearchType=0&Status=-1&SearchByDate=0&SortBy=0>

- [63] MAN, Henry. 2023 Volvo XC40 Recharge price and specs. Zecar.com [online]. Zecar, 2023, February 6, 2023, UPDATE 6/2/23 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://zecar.com/reviews/2023-volvo-xc40-recharge-price-and-specs-detailed-for-australia>
- [64] TEGLER, Eric. This Badass Wind Tunnel Could Clear the Way for the Quietest, Most Aerodynamic Vehicles Yet. Popular Mechanics [online]. Hearst Magazine Media, 2022, JUN 23, 2022 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.popularmechanics.com/cars/a40178489/honda-wind-tunnel-aerodynamic-car-testing/>
- [65] Audi's sound philosophy is bringing acoustic harmony into the car. Audi MediaCenter [online]. Ingolstadt: Audi, 2021, 05/06/21 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacyber.com/en/press-releases/audis-sound-philosophy-is-bringing-acoustic-harmony-into-the-car-13933>
- [66] YUAN, Zhiqun a Yiping WANG. Effect of underbody structure on aerodynamic drag and optimization. Journal of Measurements in Engineering [online]. 2017, 5(3), 194-204 [cit. 2023-04-13]. ISSN 2335-2124. Dostupné z: doi:10.21595/jme.2017.19210
- [67] NEDELEA, Andrei. Tesla Introduces Active Road Noise Reduction For New Model S, X. InsideEVs [online]. Motorsport Network, 2021, Dec 18, 2021 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/555369/tesla-active-road-noise-reduction/>
- [68] BAEDER, Dirk, Thomas INDINGER, Nikolaus ADAMS a Peter UNTERLECHNER. Aerodynamic Investigation of Vehicle Cooling-Drag [online]. In: . 2012-04-16, - [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-0170
- [69] Battery Cooling Techniques in Electric Vehicle. CFD Flow Engineering [online]. CFD Flow Engineering [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://cfdfloengineering.com/battery-cooling-techniques-in-electric-vehicle/>
- [70] Tesla Model S Facelift vs. Pre-facelift. Tesladriver.net [online]. Tesladriver.net, 2016 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://tesladriver.net/tesla-model-s-facelift-vs-pre-facelift/>
- [71] WITTMEIER, Felix a Timo KUTHADA. Open Grille DrivAer Model - First Results. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems [online]. 2015, 8(1), 252-260 [cit. 2023-04-24]. ISSN 1946-4002. Dostupné z: doi:10.4271/2015-01-1553
- [72] EDMUNDS, Dan. 2012 Tesla Model S Signature Performance Suspension Walkaround. Edmunds [online]. Edmunds.com, 2012, September 26th, 2012 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.edmunds.com/car-reviews/track-tests/2012-tesla-model-s-signature-performance-suspension-walkaround.html>
- [73] How Much Does A Tesla Battery Weigh?. Uetechnologies.com [online]. UniEnergy Technologies Battery [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.ue technologies.com/how-much-does-a-tesla-battery-weigh/>

- [74] GILLET, Martin. Tesla Model S - Body [foto]. In: . Santa Clara, 2012, March 11, 2012 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/mgillet/7021792613>
- [75] 2022 MINI Cooper SE Resolute Edition. Conceptcarz [online]. conceptcarz.com, 2022 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.conceptcarz.com/s32149/mini-cooper-se-resolute-edition.aspx>
- [76] Technické údaje MINI 3 door, platné od 03/2015. Bmw Group Press [online]. BMW Group, 2015 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/czech/article/detail/T0222071CS/technick%C3%A9-%C3%BA-daje-mini-3-door-platn%C3%A9-od-03/2015?language=cs>
- [77] The new MINI Cooper SE. In: Bmw Group Press [online]. BMW Group, 2019 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0298292EN/the-new-mini-cooper-se?showMedia=video>
- [78] The original – new every time: The MINI 3-door, the MINI 5-door, the MINI Convertible. In: Bmw Group Press [online]. BMW Group, 2021 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0324748EN/the-original-%E2%80%93-new-every-time:-the-mini-3-door-the-mini-5-door-the-mini-convertible?language=en>
- [79] The new BMW 7 Series. Bmw Group Press [online]. BMW Group, 2022, 20.04.2022 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0380173EN/the-new-bmw-7-series?language=en>
- [80] The BMW i7 M70 xDrive. Bmw Group Press [online]. BMW Group, 2023, 17.04.2023 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0412894EN/the-bmw-i7-m70-xdrive>
- [81] 2019 Hyundai Kona Electric Recalibrates Eco CUV Formula with an Impressive 250 Miles of Estimated Range. Hyundai Newsroom [online]. New York: Hyundai Motor Company, 2018, Mar. 28 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.hyundai.com/worldwide/en/company/newsroom/2019-hyundai-kona-electric-recalibrates-eco-cuv-formula-with-an-impressive-250-miles-of-estimated-range-0000015737>
- [82] CHARETTE, Benoit. 2019 KONA ELECTRIC FIRST DRIVE: AS SURE A THING AS YOU'RE GOING TO GET!. Auto123.com [online]. Los Angeles: AUTO123, 2018, 2018-10-16 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.auto123.com/en/car-reviews/premier-essai-kona-%C3%A9lectrique-2019/65211/>
- [83] Volvo XC40 Technical Specifications 2019. Volvoclub.org.uk [online]. Volvo Car Corporation, 2017 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://www.volvoclub.org.uk/pdf/xc40/214612_Technical_Specifications_new_Volvo_XC40.pdf

- [84] Hyundai Kona: 2019 Motor Trend SUV of the Year Finalist. Motortrend [online]. MOTOR TREND GROUP, 2018, Nov 8, 2018 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/news/hyundai-kona-2019-suv-of-the-year-finalist>
- [85] The New 2022 BMW i4 eDrive40 and i4 M50. Bmw Group Press [online]. Woodcliff Lake: BMW Group, 2021, June 1, 2021 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0334247EN_US/the-new-2022-bmw-i4-edrive40-and-i4-m50
- [86] TOCK, Alex. Second-Generation BMW 4 Series Gran Coupé Unveiled. Bimmer Life [online]. BimmerLife, 2021, June 10, 2021 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://bimmerlife.com/2021/06/10/new-bmw-4-series-gran-coupe-unveiled/>
- [87] The all-new BMW 4 Series Gran Coupé. Bmw Group Press [online]. BMW Group, 2021, 09.06.2021 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/latin-america-caribbean/article/detail/T0334919EN/the-all-new-bmw-4-series-gran-coup%C3%A9?language=en>
- [88] STUBAN, Norbert a Adam TOROK. Utilization of exhaust gas thermal energy – theoretical investigation. In: 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010 [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 268-272 [cit. 2023-05-17]. ISBN 978-1-4244-7849-1. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2010.5547301
- [89] HEIDEMANN JR, R., A. F. A. RODRIGUES, A. BOHRER, C. L. GERTZ a A. CERVIERI. Underbody aerodynamics: Drag coefficient reduction in road vehicles [online]. In: . 2018-09-03, - [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: doi:10.4271/2018-36-0291
- [90] PALIN, Robert, Vincent JOHNSTON, Shaun JOHNSON, Andrew D'HOOGHE, Bradley DUNCAN a Joaquin Ivan GARGOLOFF. The Aerodynamic Development of the Tesla Model S - Part 1: Overview [online]. In: . 2012-04-16, - [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-0177
- [91] HEFT, Angelina I., Thomas INDINGER a Nikolaus A. ADAMS. Introduction of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations [online]. In: . 2012-04-16, - [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-0168
- [92] HOLJEVAC, Nikola, Federico CHELI a Massimiliano GOBBI. A simulation-based concept design approach for combustion engine and battery electric vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering [online]. 2019, 233(7), 1950-1967 [cit. 2023-05-23]. ISSN 0954-4070. Dostupné z: doi:10.1177/0954407018777350
- [93] WIESER, Dirk, Christian Navid NAYERI a Christian Oliver PASCHEREIT. Wake Structures and Surface Patterns of the DrivAer Notchback Car Model under Side Wind Conditions. Energies [online]. 2020, 13(2) [cit. 2023-05-22]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13020320

- [94] CAI, Zeit, Jeremy WORM a Drew BRENNAN. Experimental Studies in Ground Vehicle Coastdown Testing. In: 2012 ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings [online]. ASEE Conferences, 2012, 25.613.1-25.613.17 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: doi:10.18260/1-2—21370
- [95] KANE, Mark. BEVs Are Efficient: Use 80% Of Energy To Move Car Down The Road. InsideEVs [online]. Motorsport Network, 2018, Sep 06, 2018 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/339502/bevs-are-efficient-use-80-of-energy-to-move-car-down-the-road/>
- [96] PREVIATI, Giorgio, Giampiero MASTINU a Massimiliano GOBBI. Thermal Management of Electrified Vehicles—A Review. Energies [online]. 2022, 15(4) [cit. 2023-05-23]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15041326

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

μ	[Pa·s]	Dynamická viskozita
A	[m ²]	Čelná plocha
c	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť zvuku prostredia
C _D	[-]	Koeficient aerodynamického odporu
C _{DC}	[-]	Koeficient aerodynamického odporu chladenia
f	[Hz]	Frekvencia uvoľňovania vírov
F _D	[N]	Odporová sila
L	[m]	Charakteristický lineárny rozmer
Ma	[-]	Machovo číslo
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
Sr	[-]	Strouhalovo číslo
v	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť obtekania
v	[m ² ·s ⁻¹]	Kinematická viskozita
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota tekutiny
BEV		Battery Electric Vehicle
CFD		Computational Fluid Dynamics
DRS		Drag Reduction System
EPA		Environmental Protection Agency
ICE		Internal Combustion Engine
NVH		Noise and Vibration Harshness
PIV		Particle Image Velocimetry
SUV		Sport Utility Vehicle
WLTP		Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure