VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PŘÍSAVNÝ EFEKT V MOTORSPORTU

GROUND EFFECT IN MOTORSPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — PAVEL MLČOCH

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. ONDŘEJ ČAVOJ

SUPERVISOR

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Mlčoch

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Přísavný efekt v motorsportu

v anglickém jazyce:

Ground effect in motorsport

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracování přehledu využití přísavného efektu v závodních automobilních aplikacích v historii i současnosti.

Cíle bakalářské práce:

1. Charakteristika podstaty přísavného efektu.
2. Jeho historie u závodních automobilů.
3. Příklady moderního využití.
4. Příklady ostatních součástí vozu, které přísavný efekt ovlivňují.

Seznam odborné literatury:

[1] KATZ, J. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Cambridge: Bentley Publishers.
[2] ZHANG, X., W. TOET a J. ZERIHAN. Ground Effect Aerodynamics of Race Cars. Applied Mechanics Reviews [online]. Dostupné z: http://link.aip.org/link/AMREAD/v59/i1/p33/s1
[3] Mulsanne's Corner [online]. Dostupné z: http://www.mulsannescorner.com/

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Čavoj

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 28.10.2012

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zaměřuje na popis přísavného efektu, jeho vlivu na aerodynamiku vozidla a využití v motorsportu. Práce se zabývá závislostí tohoto způsobu vytváření přítlaku na konstrukci vozu a jeho nastavení, ale také na relativním pohybu prvků generujících přítlak vzhledem k povrchu při nasazení v závodech. Dále jsou uvedeny výhody a nevýhody využívání přísavného efektu. Také je vypracován stručný přehled historie použití přísavného efektu. Na konci práce je pozornost věnována moderním závodním i osobním automobilům využívajícím tohoto fenoménu.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika vozidel, aerodynamické síly, přísavný efekt, přítlak

ABSTRACT

This bachelor thesis describes ground effect, its influence on car aerodynamics and its use in motorsport. The thesis describes the dependence of downforce created by ground effect on the design and set-up of the race car, as well as on the downforce generating parts' relative movement in relation to the track during a race. Advantages and disadvantages of the use of ground effect aerodynamics are discussed as well. Next, there is brief summary of the use of ground effect throughout the history of motorsport. At the end, attention is paid to modern race and sport cars using the ground effect aerodynamics.

KEYWORDS

automotive aerodynamics, aerodynamic forces, ground effect, downforce

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MLČOCH, P. *Přísavný efekt v motorsportu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Čavoj.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Čavoje a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. května 2013 ……..……..……..

Pavel Mlčoch

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Ondřeji Čavojovi za ochotu, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Úvod 10
1 Základy aerodynamiky 11
1.1 Bernoulliho princip a jeho aplikace 11
1.2 Mezní vrstva 12
1.3 Úhel náběhu 12
1.4 Aerodynamické síly působící na závodní automobil 13
1.4.1 Odpor prostředí 14
1.4.2 Aerodynamický vztlak a přítlak 15
1.4.3 Boční síla 16
2 Přísavný efekt 17
2.1 Vznik a definice přísavného efektu 17
2.2 Přísavný efekt jako část přítlaku 18
2.3 Faktory ovlivňující využití přísavného efektu 18
2.3.1 Vzdálenost částí vytvářejících přísavný efekt od země 18
2.3.2 Proměnlivá výška vozidla nad povrchem při nasazení v závodech 19
2.4 Části automobilu nejvíce ovlivňující přísavný efekt 23
2.4.1 Přední přítlačné křídlo 25
2.4.2 Podlaha vozu 28
2.4.3 Zadní difuzor 31
2.4.4 Vliv pneumatik 35
3 Významné vozy z historie přísavného efektu 38
3.1 Chaparral 2J 38
3.2 Lotus 78 39
3.3 Brabham BT46B 40
3.4 Lotus 79 41
3.5 Lotus 80 43
4 Současné využití přísavného efektu 44
4.1 Příklady nezávodního a amatérského závodního využití 44
4.1.1 Lotus T125 44
4.1.2 Ferrari 360 Modena, Ferrari 430 44
4.1.3 Pagani Zonda R 46
4.2 Příklady profesionálního závodního použití 47
4.2.1 Formule 1 47
4.2.2 Monoposty Indycar 48
4.2.3 Vozidla Nascar 49

4.2.4 Prototypy Le Mans 50
Závěr 52
Seznam použitých zkratek a symbolů 59

ÚVOD

Lidská touha vytvořit co nejlepší možný produkt se projevovala, a stále projevuje, také v oblasti navrhování aerodynamiky závodních automobilů. Na konci 70. let minulého století dovedla tato touha inženýry mimo jiné i k návrhu vozu využívajícího aerodynamický jev zvaný přísavný efekt. Tento vůz byl z hlediska aerodynamiky revoluční a v tomto ohledu neměl ve startovním poli konkurenci.

Cílem této práce je především popis přísavného efektu, způsob jeho využití a analýza míry jeho historického a moderního použití. Přísavný efekt je velmi efektivní způsob vytváření přítlaku. Jeho efektivita spočívá především ve značné velikosti vytvořeného přítlaku, ale také v omezení negativních důsledků, které při vytváření aerodynamického přítlaku obvykle nastávají. Vůz využívající přísavný efekt má však i určité nedostatky, které jsou rozvedeny v této práci.

Přísavný efekt zůstává aktuálním tématem i dnes, a to především z hlediska jeho praktického využití v moderních závodních i nezávodních vozech. V posledních desetiletích hraje aerodynamika závodního vozidla pro jeho úspěch zcela zásadní a ničím nenahraditelnou roli. Přísavný efekt se na aerodynamickém výkonu automobilu, i přes nynější omezující technické předpisy, podílí podstatnou měrou.

1 ZÁKLADY AERODYNAMIKY

1.1 BERNOULLIHO PRINCIP A JEHO APLIKACE

Vznik vztlaku a vytváření přítlaku se řídí aerodynamickými principy, jedním z nich je princip Bernoulliho. Podstata uvedeného principu vychází ze zákona zachování energie a spočívá ve stanovení souvislosti mezi rychlostí proudícího vzduchu a tlakem.

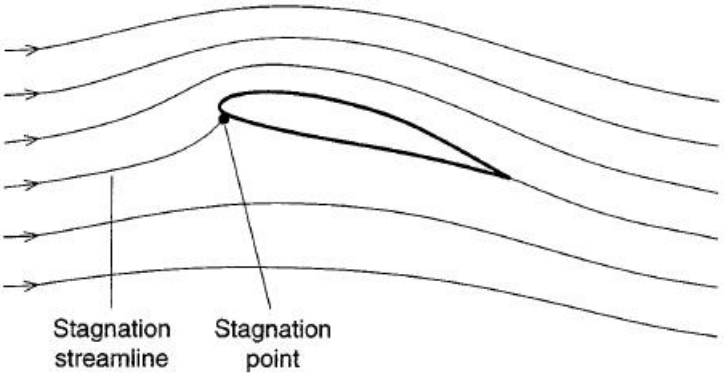
Bernoulliho princip je charakterizován rovnicí ve tvaru [1]:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = konst \tag{1}$$

kde p je tlak tekutiny v daném místě, ρ je hustota tekutiny a v je rychlost tekutiny v daném místě.

Z rovnice vyplývá, že pokud se rychlost tekutiny (v našem případě vzduchu) zvětší, pak se zmenší tlak tekutiny v daném místě. Přítlak (nebo vztlak) je vytvořen rozdílem tlaků v oblasti různých povrchů téhož pohybujícího se předmětu.

Vytvoření vztlaku je znázorněno na obr. 1. Vidíme typický tvar profilu křídla pohybujícího se zleva doprava. Princip vytváření vztlaku lze vysvětlit pomocí Newtonova zákona akce a reakce. Všimněme si bodu nulové rychlosti (Stagnation point), který leží na příslušné proudnici (Stagnation streamline). Snadno si představíme, že částice vzduchu pohybující se právě po této proudnici, se po nárazu do křídla zastaví, z čehož plyne, že křídlo muselo vyvinout určitou sílu, jejíž směr je proti směru pohybu částice. Tato síla vyvolala dle zákona akce a reakce stejně velkou a opačně orientovanou sílu, která má směr pokračování proudnice a tlačí tedy křídlo směrem vzhůru a dozadu. Jiná částice, která by se pohybovala mírně nad proudnicí nulové rychlosti, by na spodní straně křídla změnila směr ostře doleva, tím by se zpomalila a dle Bernoulliho zákona by zde vznikl nárůst tlaku. Ve chvíli, kdy se částice přemístí nad náběžnou hranu křídla, je nucena změnit svůj směr a pokračovat v pohybu nad křídlem. Naproti tomu částice pohybující se pod proudnicí nulové rychlosti by zaznamenala jen relativně malou změnu směru a malé zpomalení, a tím by zde vznikl menší nárůst tlaku, než u předchozích uvažovaných částic. Pokud se zaměříme na rychlosti částic nad a pod křídlem, tak se dle výše uvedené rovnice vytvoří nad horní plochou křídla oblast nízkého tlaku vzduchu a pod křídlem oblast vysokého tlaku vzduchu. Daný stav je označován jako vztlak. Popsaný princip dovoluje letadlům udržet se ve vzduchu. V případě, že potřebujeme vytvořit přítlak, použijeme tvar obrácený a tím vznikne nad horní plochou oblast vysokého tlaku vzduchu, která vůz tlačí k zemi.



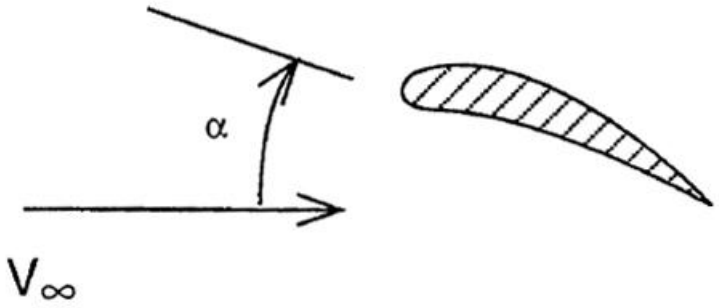
Obr. 1 Proudnice vzduchu při relativním pohybu křídla [2]

1.2 MEZNÍ VRSTVA

Mezní vrstva je vrstva proudící tekutiny (v našem případě vzduchu) bezprostředně blízká obtékanému povrchu. Vzniká v důsledku narušení proudění pohybujícím se předmětem, toto narušení má za důsledek rozdílné rychlosti částic proudění. Platí, že částice vzduchu nejbližší obtékanému povrchu mají nulovou rychlost. Rychlosti částic se při zvětšující se vzdáleností od předmětu zvyšují, až dosáhnou rychlosti nenarušeného proudění.

1.3 ÚHEL NÁBĚHU

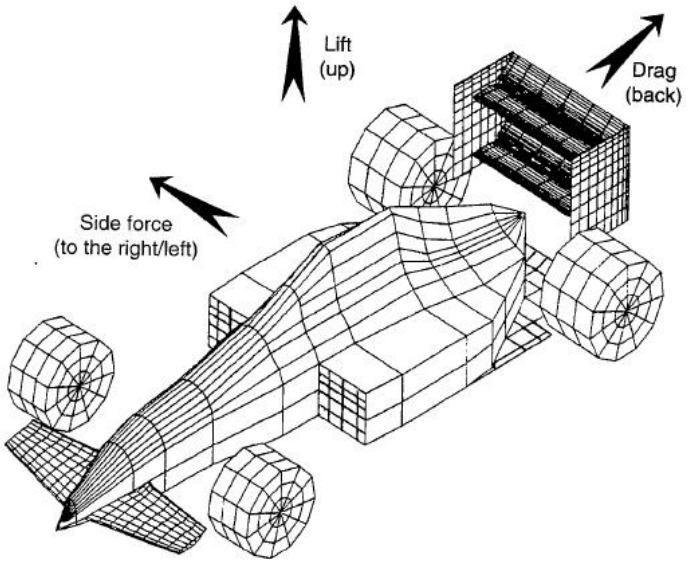
Úhel náběhu je úhel, který svírá směr proudu vzduchu s tětivou křídla. Tětiva je pomyslná úsečka spojující náběžnou a odtokovou hranu křídla. Při změně tohoto úhlu se změní také vztlak (přítlak) vyvolávaný křídlem i odpor křídla v prostředí. Pokud je úhel náběhu příliš vysoký, proudící vzduch již nestačí kopírovat jeho tvar, dojde k oddělení mezní vrstvy vzduchu od povrchu a vztlak (přítlak) generovaný křídlem rapidně klesá.



Obr. 2 Znázornění úhlu náběhu α [2]

1.4 AERODYNAMICKÉ SÍLY PŮSOBÍCÍ NA ZÁVODNÍ AUTOMOBIL

Během pohybu předmětu, například automobilu, skrze vzduch vznikají síly, které se snaží tomuto pohybu bránit či jej pozměnit. U běžných osobních automobilů vnímáme především odpor vzduchu (odpor prostředí) a ve vyšších rychlostech cítíme zhoršené chování automobilu, konkrétně jeho zvětšující se nestabilitu. Nestabilita je důsledkem aerodynamického vztlaku, který nadzvedává automobil a snižuje adhezi pneumatik. Při působení bočního proudění vzduchu, např. při bočním větru, vzniká také síla boční.



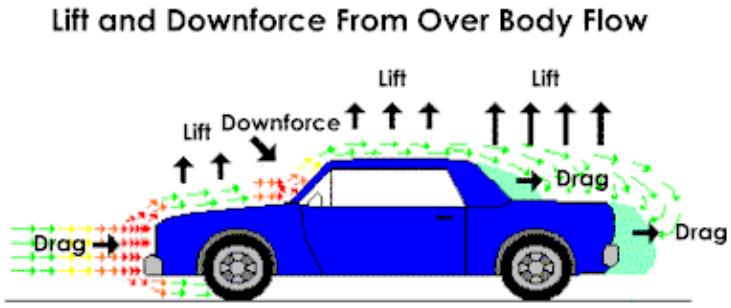
Obr. 3 Znázornění aerodynamických sil působících na monopost, Vztlak (Lift), Odpor prostředí (Drag), Boční síla (Side force) [2]

Dnes se konstruktéři se návrhu tvaru závodního automobilu soustředí právě na získání rovnováhy mezi účinky těchto sil. Snaží se o ideální rozložení působení přítlaku na přední a zadní kola tak, aby stabilita a ovladatelnost vozidla byla co největší. Přítlak je vytvářen přidáváním aerodynamických prvků (přítlačná křídla, žebrování, apod.) nebo pozměněním celkového tvaru vozidla.

Na obr. 4 můžeme vidět boční pohled na osobní automobil, jsou zde znázorněny povrchy podílející se na určité složce aerodynamických sil. Na obrázku není znázorněno proudění pod podlahou vozu, kterému je věnována kapitola 2.4.2. Pro závodní automobil platí stejné principy jako pro osobní automobil.

V oblasti před předním nárazníkem se nachází oblast zvýšeného tlaku, říkáme, že přední nárazník vytváří jakousi přehradu, která zadržuje vzduch, což způsobuje nárůst odporu prostředí. V tomto místě je tlak vzduchu větší než tlak atmosférický. Jev je způsoben molekulami vzduchu, které se při přiblížení přednímu nárazníku zpomalují a hromadí, a tím dochází ke zvýšení tlaku před automobilem. Molekuly se dle přírodních zákonů snaží zaujmout takovou pozici, ve které budou mít co možná nejmenší energii. Začínají tedy obtékat přední nárazník, přesunují se nad oblast kapoty, pohybují se kolem blatníků i pod podlahu automobilu. Nad kapotou i střechou automobilu vzniká oblast nízkého tlaku vzduchu, vytváří se vztlak. Na přechodu mezi kapotou a čelním sklem se vytváří oblast vysokého tlaku

vzduchu, vytváří se přítlak. Nutno upozornit, že pod běžným osobním automobilem vzniká v důsledku nepravidelného tvaru podlahy (vedení výfukového potrubí, různá prohnutí pro uložení náprav apod.) oblast turbulentního proudění a zvětšeného tlaku vzduchu. Takto je pod podlahou osobního automobilu generován vztlak. Na rozdíl od automobilů závodních jsou důsledky vztlaku (přítlaku) u běžných osobních automobilů méně podstatné. [2] [3]

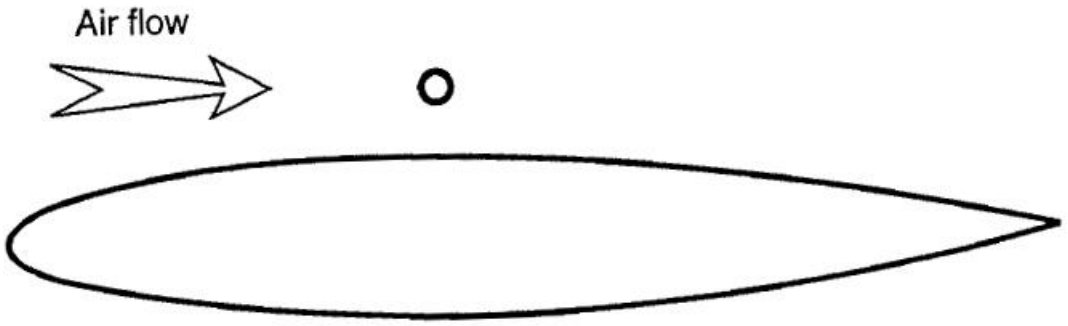


Obr. 4 Aerodynamické síly působící na automobil při pohybu [3]

1.4.1 ODPOR PROSTŘEDÍ

Je zprostředkován sílou, která brání předmětu, v našem případě závodnímu automobilu, v pohybu. Odpor prostředí je vytvářen zejména při oddělení mezní vrstvy proudu vzduchu, zpravidla od zadní části pohybujícího se předmětu. Čím déle proud vzduchu obtéká těleso bez odtržení, tím menší odpor na něj bude působit. Nejmenší odpor prostředí by pak zaznamenal proudnicový tvar (tvar slzy). Důležitost vhodného tvarování pohybujících se objektů ilustruje obr. 5. Jsou zde průřezy dlouhou tyčí a křídlem letadla, a ačkoli jsou rozměry křídla mnohonásobně vyšší než rozměry tyče, na oba předměty působí při pohybu stejně velký odpor prostředí. Snížení odporu prostředí je využíváno zejména v automobilovém a leteckém průmyslu s cílem snížení spotřeby paliva a dosažení vyšší možné rychlosti.

Z důvodu zmenšení odporu prostředí nemají části zavěšení monopostů (tzn. závodních automobilů s nekrytými koly) konstrukčně jednodušší kruhový průřez, ale jsou účelně tvarovány podobně jako na obr. 6.



Obr. 5 Aerodynamický odpor tyče a mnohonásobně rozměrnějšího křídla je stejný, je vyznačen Směr proudění vzduchu (Air flow)[2]

Obr. 6 Ukázka tvarování části zavěšení monopostu F1 v roce 2010 [4]

V současnosti se konstruktéři navrhující závodní automobily nesoustředí primárně na snížení odporu, protože odpor prostředí lze překonat výkonnějšími motory, ale věnují svou pozornost zvýšení aerodynamického přítlaku.

Odpor prostředí je popsán vztahem Newtonovy rovnice odporové síly [1]:

$$F = \frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \tag{2}$$

kde C je koeficient odporu, ρ je hustota tekutiny, ve které se předmět pohybuje (v našem případě vzduchu) a S je účinný průřez tělesa definovaný jako obsah největšího řezu tělesa rovinou kolmou k relativní rychlosti v.

KOEFICIENT ODPORU

Experimentálně zjištěná fyzikální veličina, která udává závislost odporu prostředí na tvaru tělesa a kvalitě jejího povrchu.

Koeficient odporu se v české literatuře většinou značí C, v anglické pak častěji C_D (Drag Coefficient).

1.4.2 AERODYNAMICKÝ VZTLAK A PŘÍTLAK

Přítlakem je označován takzvaný negativní vztlak. Slovo negativní má za úkol označit, že přítlak je opakem vztlaku, zatímco vztlak vozidlo nadlehčuje, přítlak jej tlačí k zemi. V automobilovém závodním průmyslu se snažíme o redukci vztlaku a vytváření přítlaku.

Aerodynamický přítlak zvyšuje svislé složky sil působící na jednotlivé pneumatiky. Zvýšením této normálové síly je zároveň zvýšena adheze mezi pneumatikou a povrchem, po kterém se automobil pohybuje. Z této souvislosti jasně vyplývá, že při zvýšení přítlaku je síla potřebná pro přerušení kontaktu mezi pneumatikou a povrchem také zvětšována. Za jízdy je akcelerace, brzdění a zatáčení přenášeno právě pomocí kontaktu pneumatiky s povrchem. Z praktických zkušeností víme, že snižováním odporu prostředí nedosahujeme tak velké redukce času potřebného pro absolvování jednoho kola závodního okruhu, jako při zvýšení přítlaku. Konstruktéři se vždy snaží dosáhnout ideálního poměru přítlaku k odporu prostředí pro daný okruh. Zkrácení času potřebného k objetí okruhu je možno dosáhnout zejména při vyšší možné rychlosti projíždění zatáček. Vytvořením zvýšeného svislého zatížení mají pneumatiky totiž dostatečnou přilnavost i při vyšších rychlostech, ve kterých působí při průjezdu zatáčkou vyšší odstředivé síly. Zatížení pneumatik je generováno jednak hmotností samotného automobilu, ale také dosaženým přítlakem, tedy i použitím přísavného efektu. Aerodynamický přítlak je výhodný proto, že zvětšuje zatížení pneumatik bez skutečného zvýšení hmotnosti automobilu.

Daná závislost maximálního možného zrychlení pro brždění a přetížení v zatáčkách může být vyjádřena jednoduchou rovnicí [5]:

$$a = g \cdot \mu_{max} + \frac{F_{přítlačná} \cdot \mu_{max}}{M} \tag{3}$$

kde g je gravitační zrychlení, μ_{max} je maximální velikost tření mezi pneumatikou a povrchem vozovky a M je hmotnost, kterou je zatížena pneumatika. Tato rovnice nám jasně ukazuje, jak důležitou roli v motorsportu hraje aerodynamika.

1.4.3 BOČNÍ SÍLA

Při návrhu závodních automobilů se obvykle pozornost zaměřuje na vytvoření dostatečného přítlaku a aerodynamická boční síla je považována za méně důležitou. Rychlost pohybu závodního automobilu je za běžných okolností mnohem větší, než je rychlost větru vyvolávajícího boční sílu. Přesto je žádoucí navrhovat tvar automobilu tak, aby při působení boční aerodynamické síly nevznikala přílišná nestabilita. [6]

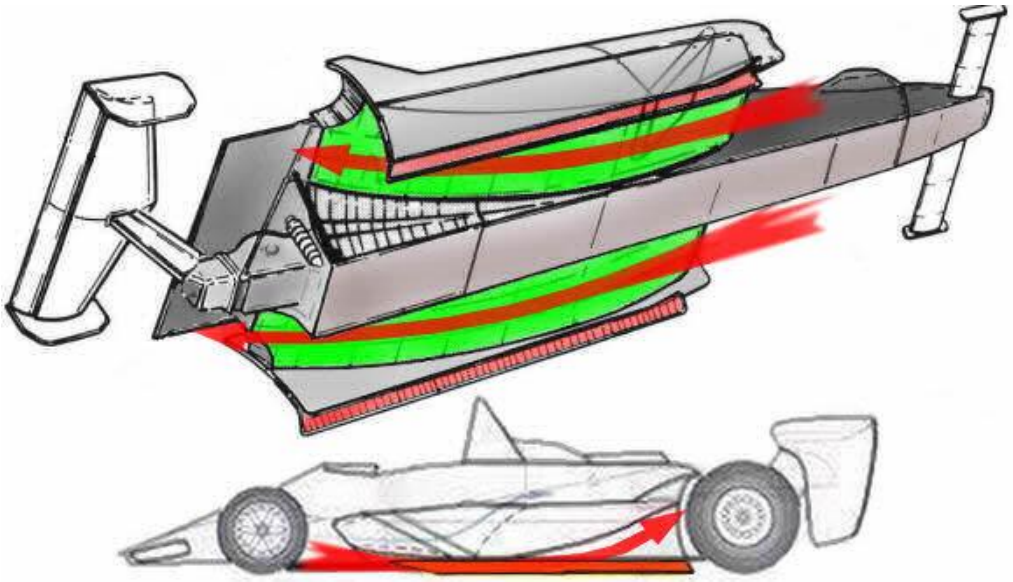
2 PŘÍSAVNÝ EFEKT

2.1 VZNIK A DEFINICE PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

Přísavným efektem (v angl. Ground effect) nazýváme situaci, kdy je v důsledku oblasti nízkého tlaku vzduchu mezi povrchem, po kterém se automobil pohybuje a částmi automobilu blízkými tomuto povrchu, závodní automobil přisáván k zemi. Můžeme tedy říct, že je touto cestou vytvářen přítlak. Oblast nízkého tlaku vzduchu je vytvořena zmenšením velikosti příčného průřezu oblasti kudy vzduch proudící pod podlahou závodního automobilu prochází, čímž se urychluje rychlost proudění a klesá tlak. [2] [5]

Části vozidla, které jsou umístěny v oblasti působení přísavného efektu, zejména podlaha vozu, nejvíce přispívají k aerodynamické účinnosti automobilu a způsobují menší odpor vůči prostředí ve srovnání s přítlačnými křídly či jinými aerodynamickými prvky. Mezi tyto části působící v oblasti blízké zemi řadíme přední přítlačné křídlo či přední nárazník, podlahu vozu, boční prahy, difuzory a zahrnujeme do nich rovněž vliv pneumatik. Zadní přítlačné křídlo a další aerodynamické prvky se přímo nepodílí na vytváření přítlaku přísavným efektem, ale působí na prvky automobilu v oblasti blízké zemi. Je třeba brát v potaz i tyto vzájemné aerodynamické vazby prvků, kterými se budou zabývat následující kapitoly. [5] [6]

Na obr. 7 je znázorněna podlaha vozu Lotus 69b. Zelenou barvou je označen typický profil pro využití přísavného efektu. Vidíme zde místo, kde dochází k omezení oblasti, kterou vzduch protéká a následné rozšiřování průřezu, kterým se odvádí vzduch z oblasti pod podlahou monopostu. Na kraji jsou patrné červeně vybarvené bočnice, které zamezují přístupu vzduchu pod podlahu z okolí, a tím zabraňují vyrovnání podtlaku pod podlahou. Dalším úkolem bočnic je zabránit rychle proudícímu vzduchu pod podlahou automobilu v unikání do okolí, proud vzduchu je tak veden přímo k zadní části podlahy.



Obr. 7 Podlaha vozu Lotus 79b, tvarování podlahy, tok vzduchu je znázorněn červenými šipkami [7]

Důležitost přísavného efektu, jako jednoho z nástrojů vytváření přítlaku, spočívá mimo jiné i tom, že při použití velké plochy podlahy vozu získáme velkou přítlačnou sílu již při malém podtlaku. Vytváření přítlaku cestou přísavného efektu je tedy velmi efektivní.

2.2 PŘÍSAVNÝ EFEKT JAKO ČÁST PŘÍTLAKU

Již od poloviny 60. let 20. století jsou, pro zvýšení přítlaku, v motorsportu běžně používány prvky tvaru obráceného křídla připevněné na karoserii vozu. Tento způsob vytváření přítlaku však nevyužívá přísavného efektu. [2]

Značnou část přítlaku můžeme vytvořit, pokud si uvědomíme, že země tedy povrch, nad kterým se automobil pohybuje, je také součástí aerodynamiky daného vozidla. Vozovku tedy můžeme využít jako jednu z ploch ohraničující prostor pro proudění vzduchu. Při vhodném tvarování podlahy pak docílíme, jak již bylo vysvětleno, přisávání automobilu k zemi. Unikátnost přísavného efektu, jako části přítlaku, tedy spočívá ve využití země jako aerodynamického prvku. [2] [5]

Aerodynamika vozidla, zvláště pak aerodynamika monopostů využívajících přísavného efektu, je záležitostí především experimentálních studií. Experimentální metody jsou nutné především z důvodu složitosti mechaniky proudění tekutin, která je ovlivněna například oddělením mezní vrstvy, pohybem zavěšení vedoucí k nestabilitám v proudění, vytvářením vírů a dalšími faktory.

Vliv blízkosti povrchu na aerodynamiku pohybujícího se předmětu byl nejdříve vypozorován u letadel. Pokud letadlo přistává nebo letí v malé výšce nad povrchem (např. hladina oceánu), výrazně se zvyšuje se vztlak generovaný křídly a snižuje se odpor prostředí. Tento efekt (resp. jeho protiklad s profilem obráceného křídla pro zajištění zvýšení přítlaku) byl později využit v motorsportu.

2.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VYUŽITÍ PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

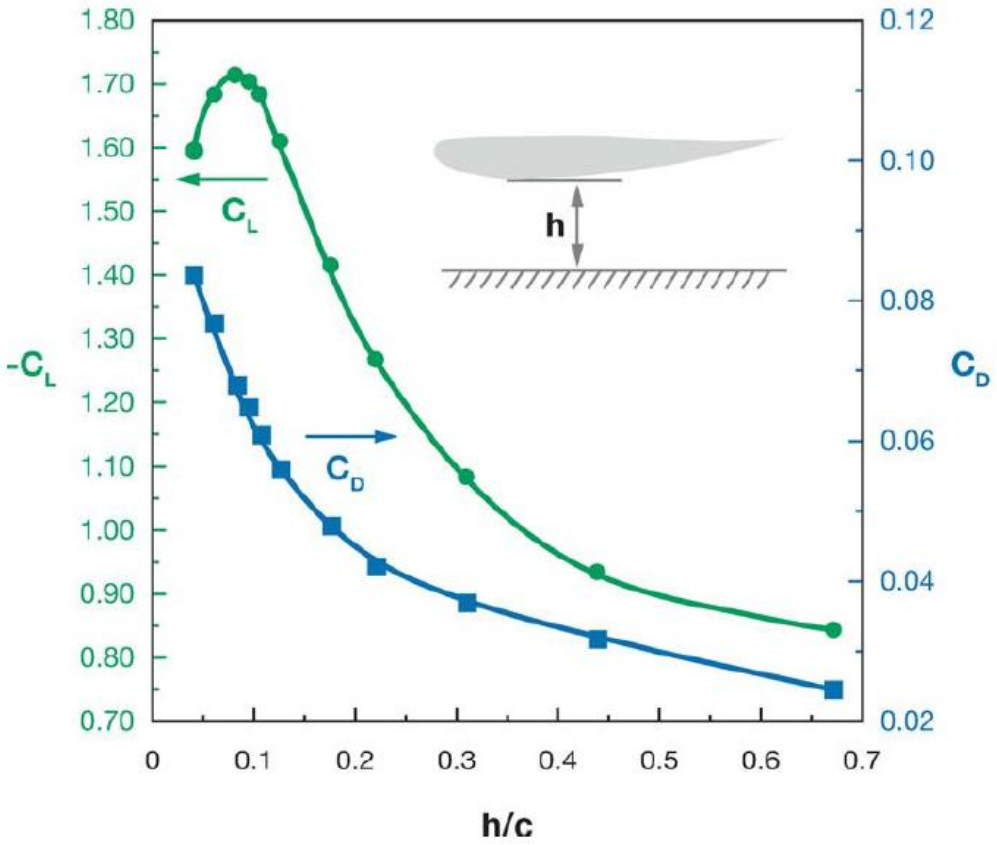
2.3.1 VZDÁLENOST ČÁSTÍ VYTVÁŘEJÍCÍCH PŘÍSAVNÝ EFEKT OD ZEMĚ

Jako příklad využití přísavného efektu můžeme, pro zjednodušení, uvažovat pouze křídlo pohybující se v blízkosti povrchu určitou rychlostí. Ačkoliv se v reálu samozřejmě pohybuje celý automobil, při zjednodušení jeho tvaru bychom dostali právě hrubý obrys obráceného křídla, který se s reálným závodním automobilem shoduje především ve spodní části.

Jak je již zmíněno v první kapitole, při proudění vzduchu kolem obráceného profilu křídla je generován přítlak. Jeho velikost se navíc výrazně umocňuje přiblížením zmíněného profilu k zemi, zvláště pak, pokud je mezera od země menší než čtvrtina délky tětivy křídla. Křídlo pak pracuje v oblasti působení přísavného efektu, který výrazně zvětšuje velikost vytvořeného přítlaku. Nevýhodou zmenšení vzdálenosti od povrchu je fakt, že vyšší přítlak je vykoupen větším odporem prostředí. Tato závislost je znázorněna na obr. 8. Vzdálenost profilu od země je značena jako h. Délka tětivy je označena jako c. Koeficient odporu prostředí je pojmenován C_D, koeficient negativního vztlaku, tj. přítlaku, je označen $-C_L$ a vyjadřuje míru zvětšení

přítlaku. Z obrázku je patrné, že pro závodní automobily typický poměr okolo *h/c=0,1* až *0,3* způsobuje velmi výrazný nárůst koeficientu přítlaku, ale také nárůst odporu prostředí. V uvedených mezích roste hodnota koeficientu negativního vztlaku až s exponenciální tendencí, s prudkým poklesem od hraničního bodu (*h/c = cca 0,1*) směrem k nižším poměrům *h/c*. Hodnoty C_L a C_D jsou závislé na konkrétních parametrech profilu křídla a úhlu náběhu. [6]

Tento pokles, který je nazýván downforce reduction phenomenon (fenomén poklesu přítlaku), je zapříčiněn vlastností tekutin – viskozity a z ní vyplývající mezní vrstvy. Při podrobnějším zkoumání bylo zjištěno, že nastává stav prudkého poklesu přítlaku způsobený oddělením mezní vrstvy z důvodů velkého podtlaku a vzniklého záporného tlakového gradientu, který způsobuje snahu proudu vzduchu změnit směr na opačný (dochází ke změně typu prodění z laminárního na turbulentní) a tedy zablokovat proud vzduchu. Toto vysvětlení bylo experimentálně ověřeno a nepotvrdilo dřívější předpoklad o poklesu přítlaku z důvodů splynutí mezní vrstvy obtékající podlahu vozidla a mezní vrstvy povrchu. [2] [8] [9]



Obr. 8 Závislost velikosti koeficientu přítlaku a koeficientu odporu prostředí na poměru vzdálenosti obráceného profilu křídla od povrchu a délky tětivy [6][6]

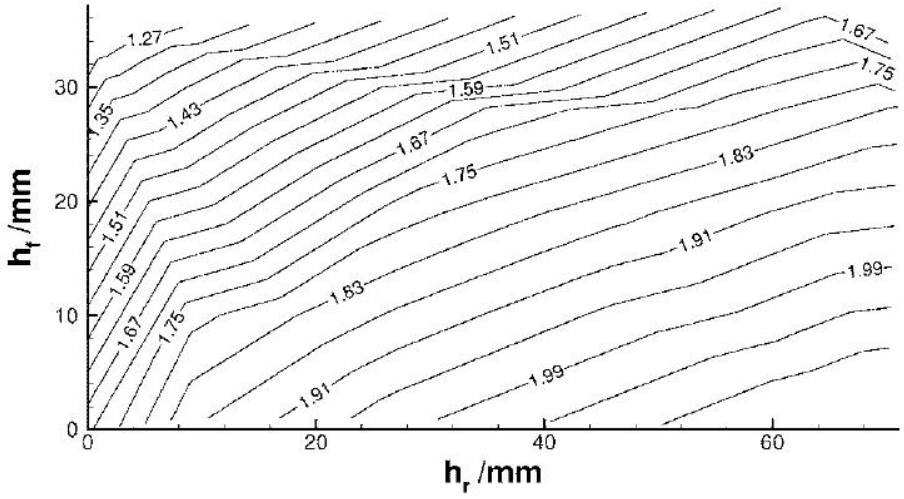
2.3.2 PROMĚNLIVÁ VÝŠKA VOZIDLA NAD POVRCHEM PŘI NASAZENÍ V ZÁVODECH

Vzdálenost podlahy vozu, předního přítlačného křídla a zadního difuzoru od povrchu je ovlivněna stlačením pružin zavěšení při brždění, akceleraci, zatáčení či přejezdu nerovností. Některé automobily mají také stavitelný podvozek, kterým se dá změnit základní výška automobilu od povrchu i tuhost zavěšení (míra stlačení při zatížení).

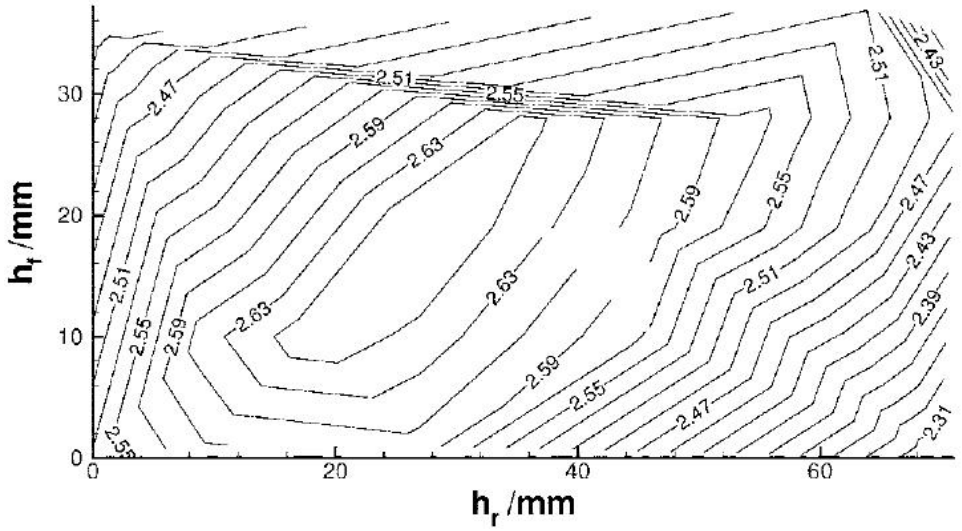
Brzděním a akcelerací se přenáší zatížení na jednotlivé nápravy. Při brzdění se zatížení přenáší na nápravu přední a při akceleraci na nápravu zadní. Nápravy či jednotlivá kola jsou zavěšena na podvozku a mohou se pohybovat ve vertikálním směru stlačením či odlehčením pružících prvků jednotlivých náprav. Tím dochází ke změně vzdálenosti mezi přední a zároveň i zadní částí vozidla od povrchu. Tento jev je zřetelný především při prudkém brzdění automobilu, kdy vidíme snížení přední části automobilu a zvýšení zadní. Nejmarkantnější rozdíly ve velikosti vytvořeného přítlaku logicky zaznamenáme u částí, pro které bude relativní změna vzdálenosti největší. To znamená pro součásti nejblíže zemi, kterými jsou aerodynamické prvky využívající mechanismu přísavného efektu.

Při brzdění (např. před zatáčkou) se přední část automobilu přibližuje k zemi a přední přítlačné křídlo zvyšuje svůj přítlak působící na přední nápravu. Naopak ve chvíli, kdy automobil akceleruje (např. při výjezdu ze zatáčky) se tento trend obrací. Ačkoli je trend zvýšení přítlaku předního přítlačného křídla při brzdění konzistentní a monotónní, pro zvyšování přítlaku součástmi umístěnými v zadní polovině automobilu při akceleraci je závislost mnohem složitější a vykazuje lokální maximum. Tento rozdíl v průbězích je způsoben rozdílnou reakcí aerodynamických prvků v zadní části vozu. Zadní přítlačné křídlo totiž pracuje z větší části v prostředí neovlivněném přísavným efektem, podlaha automobilu a difuzor jsou však silně závislé na proudu vzduchu procházejícího mezi zemí a těmito prvky, a proto jsou výrazným způsobem ovlivňovány polohou a nastavením předního přítlačného křídla. Pokud je přední přítlačné křídlo příliš blízko zemi, omezuje se proud vzduchu proudící pod automobilem, tedy i do difuzoru, čímž se omezuje jeho funkce. Pokud nastane kombinace zvýšení přítlaku předního přítlačného křídla a zároveň zmenšení přítlaku zadního difuzoru projeví se to přetáčivým chováním vozidla. Tento jev se snažíme eliminovat, a to buď použitím aktivního elektronicky ovládaného zavěšení vozidla, které udržuje konstantní výšku nad povrchem (a dnes je již v motorsportu zakázáno) nebo použitím dostatečně tuhého naladění zavěšení, čímž se zmenší vertikální pohyb celého vozidla a tím i jeho aerodynamických prvků. [1][2] [5]

Vykreslení mapy vytvářeného přítlaku (resp. koeficientu přítlaku), měřeného v místě osy předních kol monopostu klasické konstrukce, můžeme vidět na obr. 9. Zaznamenáme zmíněnou monotónnost zvyšování přítlaku při zmenšování mezery mezi předním přítlačným křídlem a povrchem. Na obr. 10 je naopak znázorněno lokální maximum působícího přítlaku, měřeného v místě osy zadních kol. Koeficienty přítlaku jsou změřeny pro určitý tvar, geometrii a nastavení vozidla, proto je můžeme brát pouze jako orientační.



Obr. 9 Koeficient přítlaku měřeného na ose předních kol v závislosti na výšce zadní části vozu od země h_f a výšce přední části vozu od země h_f [5]

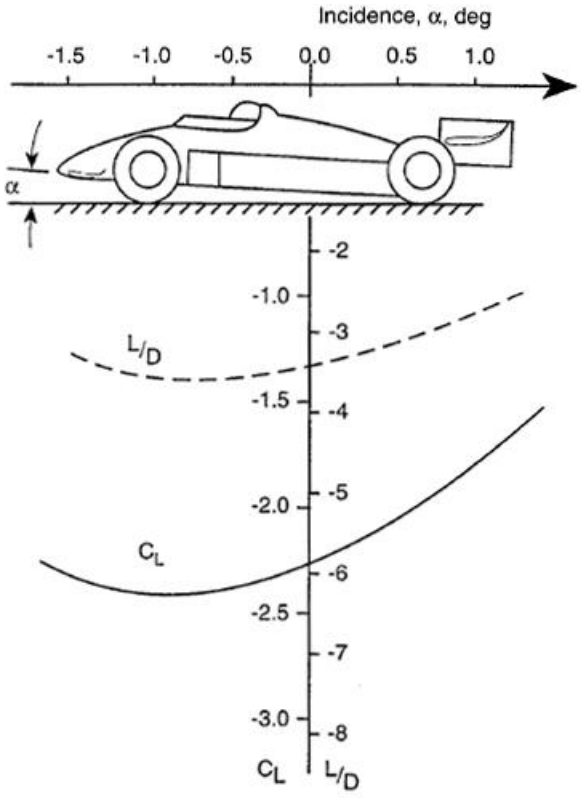


Obr. 10 Koeficient přítlaku měřeného na ose zadních kol v závislosti na výšce zadní části vozu od země h_r a výšce přední části vozu od země h_f [5]

Jak již bylo uvedeno, výška vozidla nad povrchem je během jízdy z důvodů setrvačnosti proměnná. Dále je pak nutno si uvědomit, že každý závodní automobil je v základu nastaven pro určitý úhel sklonu, což je úhel mezi vodorovným povrchem a podlahou vozidla. Je tedy jasné, že při působení zmíněných zrychlení se bude měnit i tento úhel. Na obr. 11 vidíme graf závislosti vztlaku (v záporných hodnotách, jedná se tedy o přítlak) a poměru vztlaku (resp. přítlaku) k odporu prostředí, na úhlu sklonění závodního automobilu využívajícího přísavný efekt pomocí tunelů v podlaze. Vidíme, že ideální poměr přítlaku a odporu prostředí dostaneme pro stejný náklon, jaký vyvolává největší přítlak – tento náklon je záporný. Obecně tedy platí, že větší přítlak je generován, pokud je přední část vozidla k povrchu blíže, než část zadní. Celá podlaha vozidla tak má v podstatě tvar difuzoru s malým úhlem. Nevýhodou však je zvětšení vzdálenosti samotného zadního difuzoru od povrchu, čímž snižujeme přítlak

difuzoru. Pro dosažení největšího výkonu je tedy třeba vzít do úvahy oba tyto vlivy. Konkrétní hodnoty v grafu jsou uvedeny pro určitou geometrii vozidla, slouží tedy pouze orientačně.

Společně se změnou sklonu se mění také úhel náběhu předního a zadního přítlačného křídla a úhel difuzoru. Následkem je změna velikosti vytvářeného přítlaku i změna velikosti odporu vyvolaného prostředím, což způsobuje další navýšení komplexity navrhování aerodynamiky závodního vozu.



Obr. 11 Závislost poměru vztlaku k odporu prostředí (L/D) a koeficientu vztlaku (C_L) na náklonu vozidla α (Incidence) [2]

Zmíněné sklonění je používáno v praxi a je jasně patrné na obr. 12, kde je zvětšující se vzdálenost podlahy monopostu od povrchu znázorněna žlutou barvou. Jedná se o monopost F1 týmu Red Bull Racing-Renault s označením RB9, který tomuto týmu přinesl vítězství v Poháru konstruktérů F1 v roce 2011. [10]

Obr. 12 Ukázka sklonu podlahy vozidla F1[11]

PROBLÉMY PŘI POUŽITÍ PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

Problémy vyskytující se při použití aerodynamického přítlaku vytvořeného mechanismem přísavného efektu spočívají v jeho silné závislosti na efektivní vzdálenosti prvků od povrchu. Pro řidiče se tak dostupný přítlak při přejezdu nerovností a horizontů na trati, případně při vjetí na obrubníky, těžko předvídatelně mění z důvodů rychle se měnících parametrů (rychlost, úhel nájezdu, aktuální pozice kol). Tyto skutečnosti způsobují nežádoucí výkyvy ve velikosti vytvářeného přítlaku, což vede k destabilizaci závodního automobilu a možnému omezení ovladatelnosti vedoucí k nebezpečným situacím a v extrémních případech až k vážným haváriím. [12]

Dalším velkým problémem při využívání přísavného efektu je poskakování (v angl. porpoising). Poskakování je situace, kdy je přítlak vytvářený závodním automobilem extrémně citlivý na změnu výšky od povrchu. Důsledkem je aerodynamické poskakování, tedy situace, kdy se zvětší negativní úhel sklonu vozu, čímž se zvětší i přítlak vytvářený předním přítlačným křídlem. Nastává další zvětšení stlačení předního zavěšení až do té míry, kdy je značně omezen proud vzduchu procházející pod předním křídlem a následně i pod podlahu vozu. Vytratí se tak velká část generovaného přítlaku a přední část vozidla se odlehčí a nadzvedne, čímž se vytvářený přítlak zase zvýší. Tento cyklus se opakuje a závodní automobil pak viditelně poskakuje. [13]

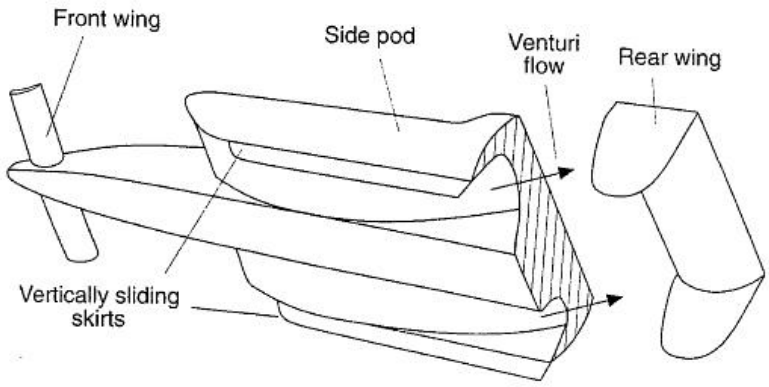
Některé automobily vykazovaly tak velkou náchylnost k poskakování, že měly při prvních testech ve větrných tunelech tendenci vyskočit ze svého upevnění (např. LeMans prototyp Courage LC75). Existuje několik možností jak omezit či úplně odstranit poskakování. Nejjednodušší způsob spočívá v tužším nastavení zavěšení, které ale přináší nevýhody ve formě omezeného komfortu pro řidiče. Dalším častým způsobem bývá změnit tvar podlahy vozu tak, aby byla oblast nejmenšího tlaku vzduchu dosahována mezi osami předních a zadních kol, stlačení zavěšení je pak rovnoměrnější. [14] [15]

2.4 ČÁSTI AUTOMOBILU NEJVÍCE OVLIVŇUJÍCÍ PŘÍSAVNÝ EFEKT

Části nejvíce ovlivňující přítlak vytvořený přísavným efektem jsou podlaha vozu, přední přítlačné křídlo (front wing) a tunely v podlaze či difuzor na konci podlahy. Tyto části společně se zadním přítlačným křídlem (rear wing) jsou znázorněny na schématu automobilu

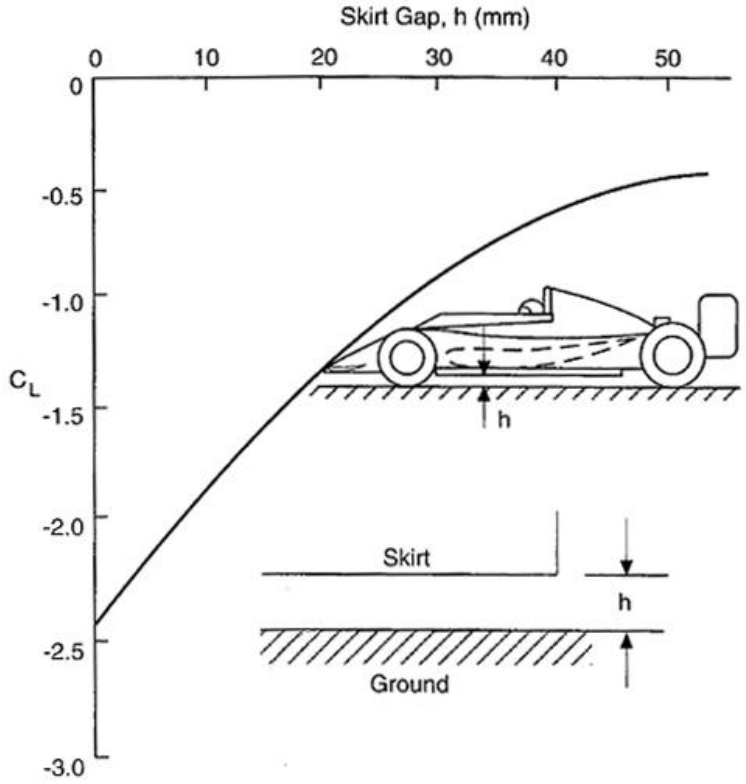
na obr. 13. Všimněme si bočních vertikálně posuvných prahů (vertically sliding skirts). Je zde zaznačena i boční část monopostu (side pod). Zvláštností pak je proud vzduchu v zadní části podlahy, tj. v tunelu v podlaze (difuzoru), který je označen jako Venturi flow (Venturiho proudění).

Tento název pochází z podobnosti tunelu ke známé Venturiho trubici, jejíž vliv na změnu charakteristik proudění tekutiny je obdobný. Trubice má zužující se část, následovanou částí rozšiřující se. Pokud bychom trubici rozřízli v podélné rovině, dostali bychom tvar obdobný vyobrazenému tunelu, který je tvořen plochou zvedající se směrem od země a ohraničen bočnicí na každé straně. Proud vzduchu jím protékající se pak nese jeho název.



Obr. 13 Zjednodušené znázornění monopostu se zvýrazněním aerodynamických částí podílejících se na využívání přísavného efektu [2]

Na obr. 14 pak vidíme závislost celkového vytvořeného přítlaku, resp. koeficient negativního vztlaku, v závislosti na vzdálenosti posuvných prahů od země (skirt gap), která je označena *h*. I přestože je zde vynesen celkový vygenerovaný přítlak, tzn. i s podílem přítlaku vytvořeného zadním přítlačným křídlem, trend zároveň znázorňuje i průběh závislosti velikosti přítlaku vytvořeného přísavným efektem na vzdálenosti bočnic od země, protože zadní přítlačné křídlo v tomto případě téměř nevyužívá přísavného efektu a tudíž se s měnící se mezerou nemění. Z průběhu diagramu je patrné, že přítlak je značně citlivý na změnu výšky posuvných bočnic. Tento graf je platný pro monopost používající části, které jsou znázorněny na obr. 13, a je dán konkrétní geometrií vozidla.

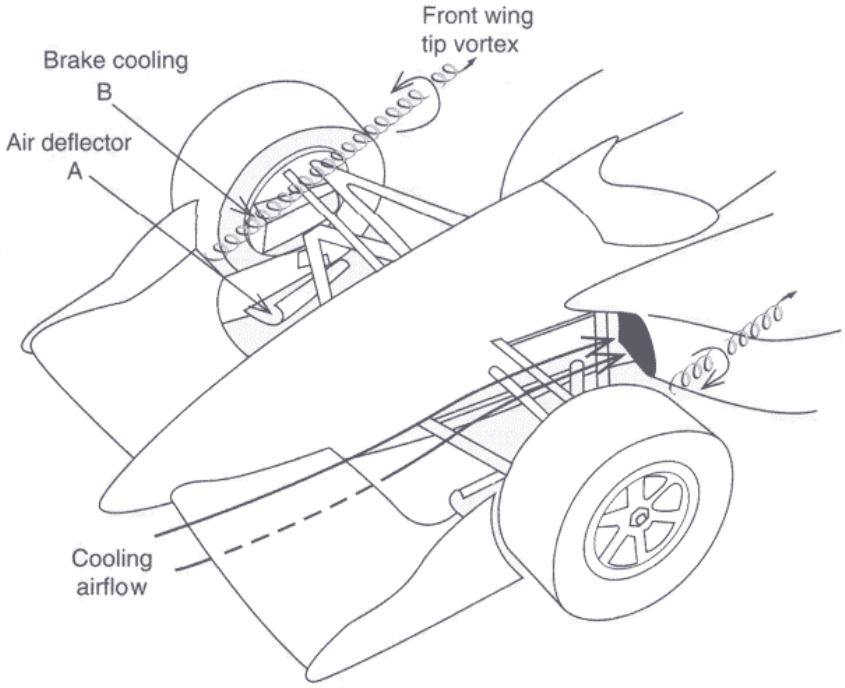


Obr. 14 Závislost vzdálenosti h mezi spodním okrajem bočnice (Skirt) a povrchem (Ground) na celkovém přítlaku působícím na vozidlo [2]

2.4.1 PŘEDNÍ PŘÍTLAČNÉ KŘÍDLO

Jedná se o jeden z nejdůležitějších aerodynamických prvků automobilu. Jeho podíl na vytváření přítlaku je z důvodu umístění v oblasti působení přísavného efektu značný a odhaduje se na 25-30% z celkového přítlaku závodního automobilu. [5]

Přední přítlačné křídlo je u monopostů lehce rozeznatelné a jeho typické tvarování v jednoduché schématické podobě můžeme vidět na obr. 15. Protože je přední přítlačné křídlo vozů s nekrytými koly ovlivňováno jejich přítomností, je opatřeno deflektory vzduchu. To jsou povrchy, které mají za úkol odklonit proudění od rotujících kol a přivádět proud vzduchu za přední kola, čímž se snižuje odpor prostředí. Podobné deflektory se používají taktéž k přívodu chladícího vzduchu do oblasti brzd. V případě automobilu se zakrytými koly je přední přítlačné křídlo často „skryté“ a jeho definice je problematičtější. [2]



Obr. 15 Schématické znázornění jednoduchého předního přítlačného křídla. Vidíme proud vzduchu vtékající do prostoru chladiče motoru (Cooling airflow), vír vzniklý na špičce křídla (Front wing tip vortex), deflektor pro přívod vzduchu za kolo (Air deflector A) a deflektor pro přívod vzduchu za účelem chlazení brzd (Brake cooling B).[2]

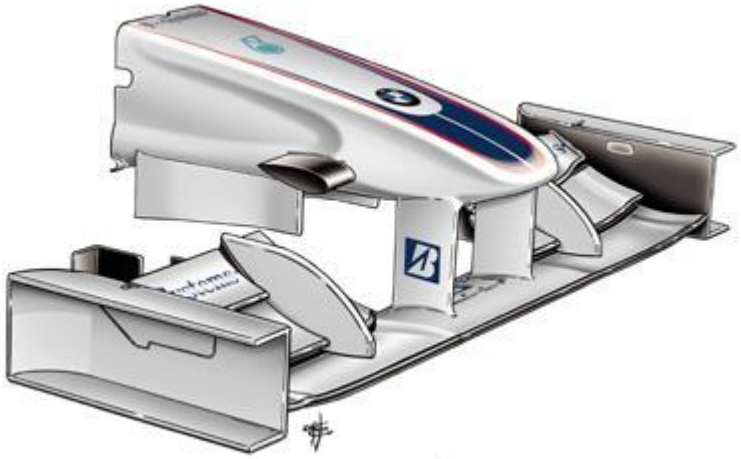
Při pohledu na dnešní automobily bychom zjistili, že u moderních přítlačných křídel se používá tvar dvojitého obráceného kužele - při pohledu seshora se křídlo zužuje od okraje směrem k jeho středu. Přítlaku generovaný takovýmto křídlem je pak nejmenší ve středu, což jej činí méně náchylným k oddělení mezní vrstvy a ztrátě přítlaku. [2]

Pro vytvoření přítlaku se v minulosti považovalo za nejlepší, aby mělo přední přítlačné křídlo co možná největší šířku, dokonce ještě přesahující samotnou šířku vozidla a co nejmenší výšku nad povrchem (pro využití zvýšení přítlaku v blízkosti vozovky). Platí totiž přímá úměra mezi šířkou křídla a přítlakem jím generovaným (stejně tak pro jeho vzdálenost od povrchu). Později, po objevení vlivu předního přítlačného křídla na ostatní aerodynamické prvky vozu, bylo zjištěno, že takto široké a nízko položené křídlo způsobuje pokles přítlaku vytvářený aerodynamickými prvky umístěnými ve spodní části vozidla (podlaha, difuzor či tunely) a navíc činí vozidlo náchylnější ke změnám ve vytvořeném přítlaku při změně výšky nad povrchem z důvodů přejezdu nerovností (viz kap. 2.3). [2]

Přední přítlačné křídlo je, jako jediná z aerodynamických částí pracujících v oblasti působení přísavného efektu, umístěno v proudění neovlivněném předchozími prvky. Toto samozřejmě neplatí pro případ dvou či více závodních automobilů jedoucích těsně za sebou, kdy je proudění narušeno a aerodynamické působení se mění. Vzhledem k narušení proudění se snižuje vytvářený přítlak a snižuje se odpor prostředí působící na vozidlo, které jede jako druhé, či některé z dalších.

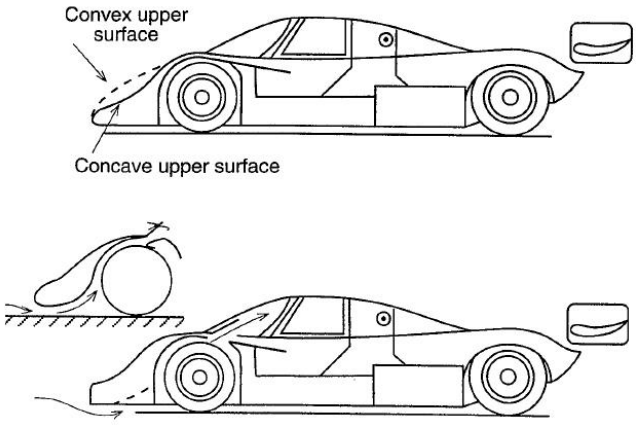
Přední přítlačné křídlo je opatřováno svislými zakončeními a dalšími prvky, které mají za úkol zvyšování generovaného přítlaku, snižování odporu prostředí či případné vytváření pozitivně působících vírů a jejich usměrnění na další aerodynamické prvky vozu či jejich

odklon od karoserie vozidla. Komplexně tvarované přítlačné křídlo skutečného závodního monopostu (Formule 1, r. 2009) vidíme na obr. 16. [2] [6]



Obr. 16 Tvarování skutečného předního přítlačného křídla [16]

Přední část automobilu se zakrytými koly bývá tvarována tak, aby generovala přítlak. Takovýto nos pak bývá nazýván předním přítlačným křídlem, i když je jeho identifikace a podobnost s přítlačným křídlem tak, jak jej známe obtížnější a bývá i předmětem sporů. Schématicky jsou nejčastější typy tvarování nosu vozidla znázorněny na obr. 17. Je logické, že konkávní tvary způsobují vytváření většího přítlaku než tvary konvexní. Obvykle je spodní strana přední části automobilu tvarována podobně jako křídlo, tedy jako plocha směřující směrem vzhůru pod určitým sklonem.

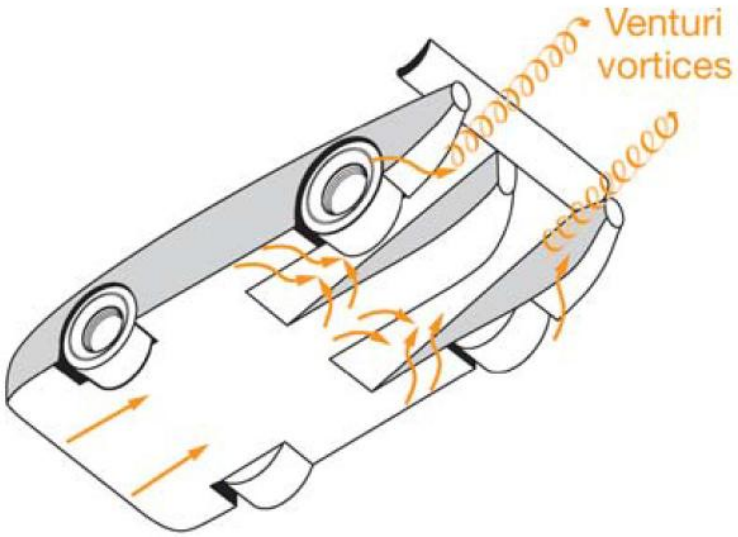


Obr. 17 Příklady tvarování přední části vozidla se zakrytými koly, na spodním obrázku je zaznačen tvar spodní části nosu vozidla [2]

2.4.2 PODLAHA VOZU

Tvarování podlahy vozu je z hlediska její velké plochy, těsné blízkosti povrchu a v mnoha případech i značného proudění vzduchu pod vozidlem důležitou součástí aerodynamiky celého vozidla. U závodních automobilů, ale i u sportovně laděných osobních automobilů bychom se pro dosažení lepší celkové aerodynamiky vozu měli snažit přinejmenším o zakrytování mechanických částí nacházejících se v oblasti podvozku vozidla tak, aby byla vytvořena rovinná či mírně skloněná plocha bez dutin pro uložení náprav, prvků zavěšení apod. Tím se zamezí vytváření turbulentních proudění a již samotná rovná část podlahy bude snižovat vytvářený vztlak a při mírném sklonění dokonce malou mírou generovat přítlak.

Pokud použijeme vhodně tvarované tunely v podlaze bez vertikálně posuvných bočnic, bude do tunelů vstupovat i vzduch ze stran automobilu. V tunelech dojde k vytvoření silných vírů (Venturi vortices). Ukázalo se, že víry stabilizují proudění vzduchu v tunelech a udržují mezní vrstvu více přilnavou k povrchům tunelů. Z důvodu proudění vzduchu z boku je vhodné, aby okraje tunelů (zvláště pak okraje vnější) nebyly zaobleny, ale naopak tvořily ostrou hranu podporující vznik těchto vírů. Vizualizace proudění a vznikajících proudů je znázorněna na obr. 18. [2] [6]



Obr. 18 Vizualizace proudění pod podlahou závodního vozu skupiny C (1992) [6]

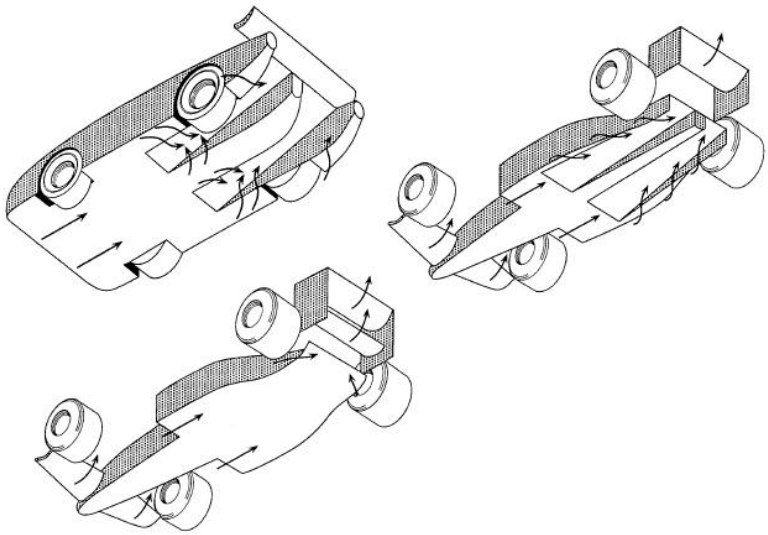
Přestože se ukázalo, že použití přísavného efektu je nejúčinnější s posuvnými bočnicemi, které napomáhají udržovat oblast nízkého tlaku vzduchu pod podlahou vozidla, dnešní závodní vozidla, ale i osobní automobily, mohou využívat přísavného efektu v omezené míře i bez bočnic, a to především vhodným tvarováním podlahy vozu. Při odstranění bočnic sice klesá přítlak generovaný cestou přísavného efektu, ale získáme větší nezávislost přítlaku na vzdálenosti vozidla od povrchu a přítlak je tedy vytvářen bezpečnější cestou. [2] [6]

VLIV UMÍSTĚNÍ ZADNÍHO PŘÍTLAČNÉHO KŘÍDLA NA PŘÍTLAK VYTVOŘENÝ PODLAHOU VOZIDLA

Interakce mezi difuzorem (případně tvarovanou podlahou s tunely) a zadním přítlačným křídlem je jedna z nejsilnějších vazeb, která se dá v motorsportu využít. Interakcí karoserie s

vhodně umístěným přítlačným křídlem můžeme dokonce získat ještě větší množství přítlaku, než by generovalo samotné křídlo umístěné v nenarušeném proudění. Zadní přítlačné křídlo můžeme umístit tak, aby příznivě ovlivňovalo proudění pod podlahou vozu, která pracuje v oblasti působení přísavného efektu. Toho se dosahuje umístěním přítlačného křídla v určité výšce nad difuzorem tak, aby oblast nízkého tlaku vzduchu pod povrchem spodní hrany křídla vyvolala savý efekt v difuzoru, oddalovala zde oddělení mezní vrstvy a zvyšovala průtok. Zadní přítlačné křídlo tedy může fungovat jako určitý druh pumpy. Důsledkem těchto jevů je značné zvýšení přítlaku cestou přísavného efektu. [2]

V závislosti na regulích jednotlivých šampionátů (např. F1, Indy car, Le Mans) pro tvarování podlahy a zadních přítlačných křídel se setkáváme nejčastěji se třemi typy konfigurací znázorněných na obr. 19. V levé horní části vidíme podlahu prototypu automobilu se zakrytými koly pro závod Le Mans, kde jsou implementovány mohutné tunely v podlaze vozu, nad nimi je umístěno jednoduché zadní přítlačné křídlo. V sérii Indy car (vpravo nahoře) se používaly monoposty rovněž s tunely v podlaze, umožněna však byla pouze jednoduchá verze přítlačného křídla. Pro závody F1 (dole) je dovoleno pouze použití menšího tvarování podlahy a krátkého difuzoru, zato se používají dvojitá přítlačná křídla, kde nižší z nich slouží pro zlepšení proudění v difuzoru a vyšší využívá klasické cesty vytváření přítlaku. Ačkoli by se na první pohled mohlo zdát, že si auta nejsou příliš podobná, tak všechna tato uspořádání podlaha – zadní přítlačné křídlo využívají zlepšené proudění difuzorem (tunely) v důsledku vhodného umístění zadního přítlačného křídla. Z důvodů pozice těchto prvků v blízkosti povrchu se zvyšuje přítlak vytvářený v oblasti působení přísavného efektu.



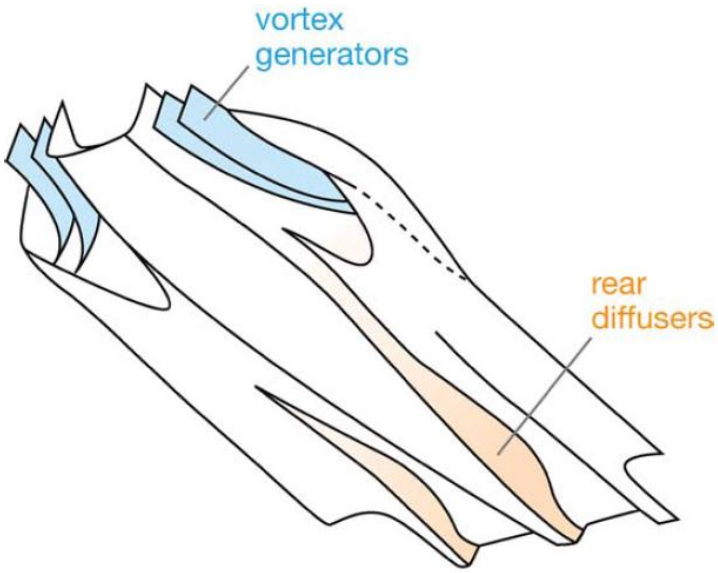
Obr. 19 Typické konfigurace umístění zadního přítlačného křídla pro zlepšení proudění pod podlahou automobilu [2]

VORTEX GENERATORS

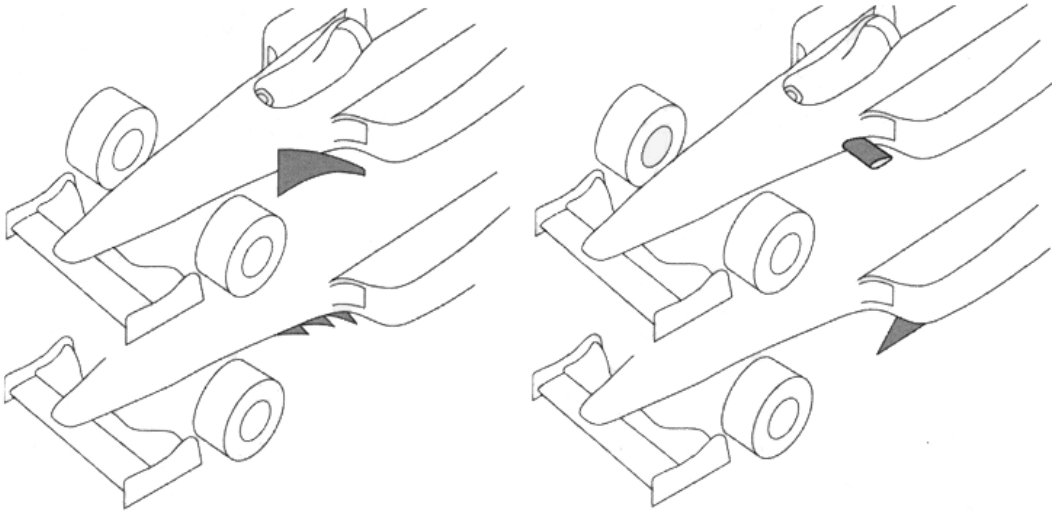
Vortex generators (generátory víru) používané v motorsportu jsou aerodynamické prvky, které se umisťují na jiné části vozidla, zpravidla na začátek podlahy vozu u monopostů, a to tak, aby se za nimi vytvářely víry směřující pod podlahu vozidla. Jejich typická podoba pro monoposty je znázorněna na obr. 20, kde vidíme dvě poměrně velké zahnuté plochy na každé

straně. Vytvářejí se dva vzájemně propletené víry, které se dostávají pod podlahu vozu a kvůli velké rychlosti proudění okolo jejích středů jsou obklopeny oblastmi nízkého tlaku vzduchu, čímž se zvyšuje přítlak. [6]

Propletené víry mají na proudění pod podlahou vozu menší vliv. Při snižování výšky se však přítlak vytvářený podlahou opatřenou generátory vírů zvětšuje, což je způsobeno zvětšujícím se vlivem přísavného efektu, který rozplétá víry pokračující rovnoběžně se zemí. Víry proudí v úzké mezeře mezi povrchem a podlahou, kde zároveň dochází i k jejich zesílení. Stejně jako u podlahy s difuzorem nepoužívající tyto generátory, i zde existuje limitní vzdálenost vozidla od povrchu, při jejímž dalším snižování dochází z důvodu kolapsu vírů k prudkému poklesu generovaného přítlaku a zvětšení odporu prostředí. [6]



Obr. 20Podlaha vozu Indy car (r. 2000), kde jsou modře vyznačeny generátory vírů a oranžově jsou vyznačeny boční plochy tunelů v podlaze – zadních difuzorů (rear diffusers) [6]



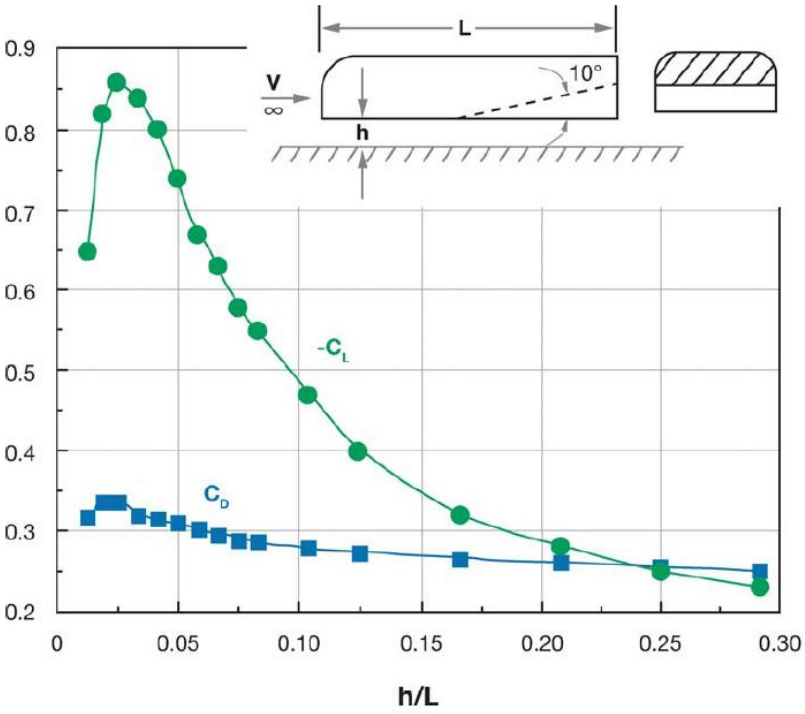
Obr. 21 Ukázka několika různých tvarů generátorů vírů, které jsou schopny zlepšit proudění vzduchu pod podlahou vozidla [2]

2.4.3 ZADNÍ DIFUZOR

Difuzor je prostředek pro konverzi kinetické energie proudění tekutiny na zvýšení jejího tlaku. Pro podzvukové rychlosti, kterými se pohybují závodní automobily v motorsportu, se tohoto efektu dosahuje výškově rozšiřujícím se tvarem zadní části podlahy, která pak tvoří difuzor. Difuzor je tvořen skloněnými plochami vedoucími od podlahy vozu směrem vzhůru, čímž se zvětšuje jeho průřez. Po stranách je difuzor ohraničen bočními pláty. U závodních automobilů je difuzor umístěný v blízkosti povrchu a využívá umocňování vytvářeného přítlaku přísavným efektem. V dnešní době je difuzor, stejně jako téměř celá karoserie, zpravidla vyroben z karbonových kompozitních materiálů.

Na začátku 80. let minulého století byly boční vertikálně posuvné prahy ve většině druhů motorsportu zakázány. Studie zabývající se prouděním vzduchu v difuzorech u závodních automobilů tak byly prováděny až několik let poté, co byly takovéto difuzory běžně používány v závodech. Na obr. 22 můžeme vidět zjednodušený, ale obecně použitelný tvar difuzoru (doplněn o přední část). Vpravo pak vidíme tvar těla modelu s difuzorem při pohledu z pravé strany. Potvrdilo se, že těleso s difuzorem obdobných tvarů způsobuje vytváření značného přítlaku i bez použití posuvných bočnic doléhajících k zemi. Zvláště pak při malé vzdálenosti mezi podlahou vozu a povrchem, tedy právě v oblasti působení přísavného efektu. [2] [6]

Z grafu je patrné, že při zmenšování poměru vzdálenosti difuzoru od povrchu k délce modelu dochází ke zvětšení přítlaku. Můžeme si všimnout také kritického místa, kde dochází k fenoménu poklesu přítlaku ze stejných důvodů, jaké byly popsány při popisu modelu křídla pohybujícího se nad povrchem. Žádoucí zvýšení přítlaku je kompenzováno zvětšením odporu prostředí. Vynesená závislost platí, konkrétní hodnoty negativního vztlaku a odporu prostředí ale samozřejmě závisí na specifické geometrii daného difuzoru a objektu (závodního automobilu) jako celku.



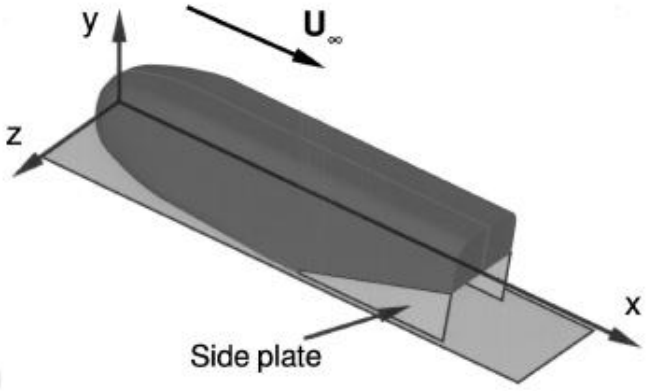
Obr. 22 Závislost přítlaku na poměru vzdálenosti difuzoru od povrchu k délce modelu [6]

Velikost vytvořeného přítlaku pomocí difuzoru je také výrazně ovlivněna úhlem sklonění difuzoru. Při pokusech bylo zjištěno, že pro větší úhly (při zachování ostatních parametrů) nastává pokles přítlaku z důvodu odtržení mezní vrstvy již při větší vzdálenosti od země. Pro představu, při určité geometrii difuzoru způsobí nárůst úhlu z 10° na 15° změnu polohy hraničního bodu z *h/L=0,02* na *h/L=0,22*, což představuje více než desetinásobný nárůst vzdálenosti od země. Zvětšená vzdálenost mezi podlahou vozu a povrchem je od určité úrovně nežádoucí, pro velké úhly difuzorů se dostatečně nevyužívá možností přísavného efektu a dochází k poklesu generovaného přítlaku. [6]

Největší podtlak existuje právě v místě vstupu proudícího vzduchu do difuzoru, význam tohoto zjištění spočívá ve faktu, že posunutím tohoto vstupu dopředu či dozadu lze ovlivnit polohu působiště aerodynamických sil (Center of pressure). Působiště je místo, kudy prochází výsledná síla vyvolaná vlivem tlaků na dané těleso, a kolem kterého nepůsobí žádný výsledný moment sil vyvolaných tlakovým působením. Můžeme jej tudíž výpočtem a důležitostí přirovnat k jakési obdobě těžiště tělesa. Posouváním centra tlaku je totiž značně ovlivněna aerodynamická stabilita vozidla. Pro závodní automobil pohybující se poměrně vysokými rychlostmi je tedy vhodné, aby se působiště aerodynamických sil nacházelo až za těžištěm tělesa (při orientaci po směru jízdy). Přejezd nerovností totiž vyvolá změnu ve velikosti působícího přítlaku a tedy moment, který by při nepříznivé poloze působiště zhoršoval stabilitu a ovladatelnost vozidla zmenšením zatížení působícího na přední pneumatiky. Pokud je působiště aerodynamických sil umístěno za těžištěm tělesa, automobil nazýváme aerodynamicky stabilním. [2] [17]

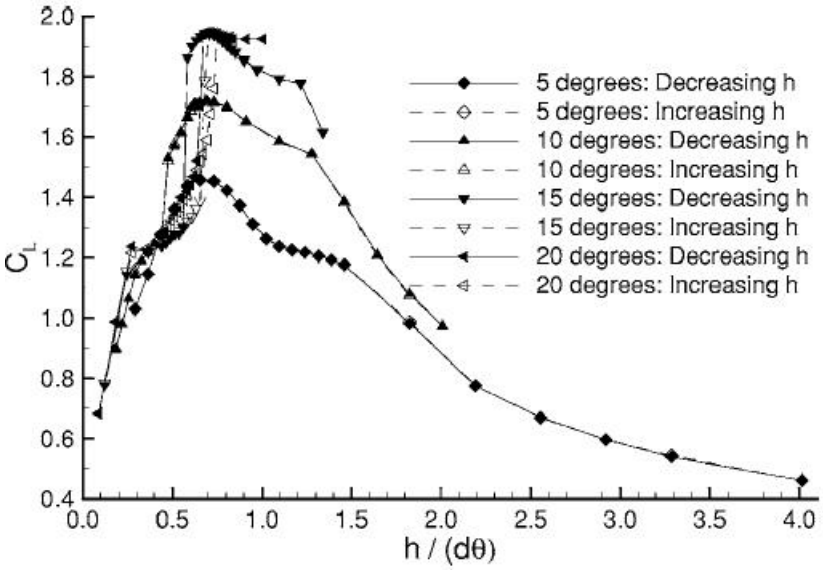
U vozů Formule 1 a dalších monopostů přispívá obvykle difuzor vytvořením zhruba třetiny celkového přítlaku, důležitá je však i jeho interakce s předním přítlačným křídlem, případně aerodynamickými prvky nacházejícími se v přední části vozu a především se zadním přítlačným křídlem. Podíl přítlaku vytvořený touto cestou se mění také v závislosti na nastavení vozidla pro různé okruhy či podmínky. Můžeme říci, že zadní difuzor nejvíce ovlivňuje a řídí celkové proudění vzduchu pod vozidlem. U vozů se zakrytými koly (typicky prototypy Le Mans či vozy série NASCAR) je vliv difuzoru na vytvářený přítlak také značný. [5]

Přítlak vytvořený difuzorem umístěným v oblasti působení přísavného efektu je ovlivněn poměrem jeho vstupního a výstupního příčného průřezu, délkou, šířkou, úhlem sklonění, vstupními a výstupními podmínkami a dalšími vlivy. [5]



Obr. 23 Těleso s difuzorem (Bluff body model) s bočnicemi (Side plate) [18]

Při testování na modelech s tělesy opatřenými difuzory, které lze vidět na obr. 23, byl měřen vytvořený přítlak. Poté byla do grafu (obr. 24) vynesena závislost vygenerovaného přítlaku na poměru $\mathrm{h}/(\mathrm{d}\cdot\theta)$, kde h je výška tělesa nad povrchem, d je polovina šířky difuzoru a θ je úhel sklonu difuzoru v radiánech. Maximální přítlak vytvořený difuzorem pracujícím v oblasti vlivu přísavného efektu zaznamenáme při poměru okolo $\mathrm{h}/(\mathrm{d}\cdot\theta) = 0{,}7$. Tento údaj může v praxi pomoci jako odrazový můstek při navrhování šířky difuzoru, pokud známe jeho povolenou vzdálenost od povrchu. V grafu vidíme i jisté hysterezní chování, které bude popsáno později v této podkapitole. [18]

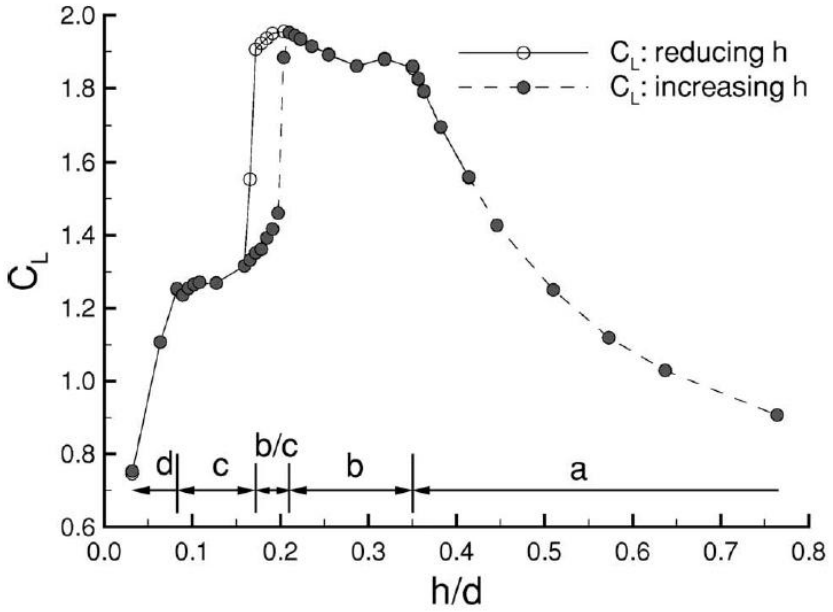


Obr. 24 Koeficient negativního vztlaku v závislosti na poměru $h/(d\cdot\theta)$ pro různé úhly difuzorů a snižování i zvyšování výšky difuzoru nad povrchem [5]

Při testech difuzorů s různými úhly byly zjišťovány průběhy závislosti koeficientu přítlaku na podílu výšky vstupní hrany difuzoru nad zemí a poloviny šířky difuzoru. Testy ukázaly, že existují dva různé druhy proudění, které závisí na úhlu sklonu difuzoru. Měřily se vždy dvě sady hodnot a to jak při zvyšování výšky difuzoru nad povrchem (v obrázcích increasing h), tak při jejím snižování (v obrázcích decreasing h). Rozlišujeme difuzory s velkým sklonem (úhel větší než 10°) a difuzory s malým úhlem (úhel menší než 10°), kde difuzor s úhlem 10° vykazuje prvky chování z obou těchto skupin a je jakýmsi dělícím bodem. Obě skupiny difuzorů však vykazují některé společné znaky, které se ale se zmenšující se vzdáleností od země vytrácejí. Při změně výšky nad povrchem se totiž sklony křivek mění a to znamená, že nastávají fyzikální změny v proudění difuzorem. [5][1] [18]

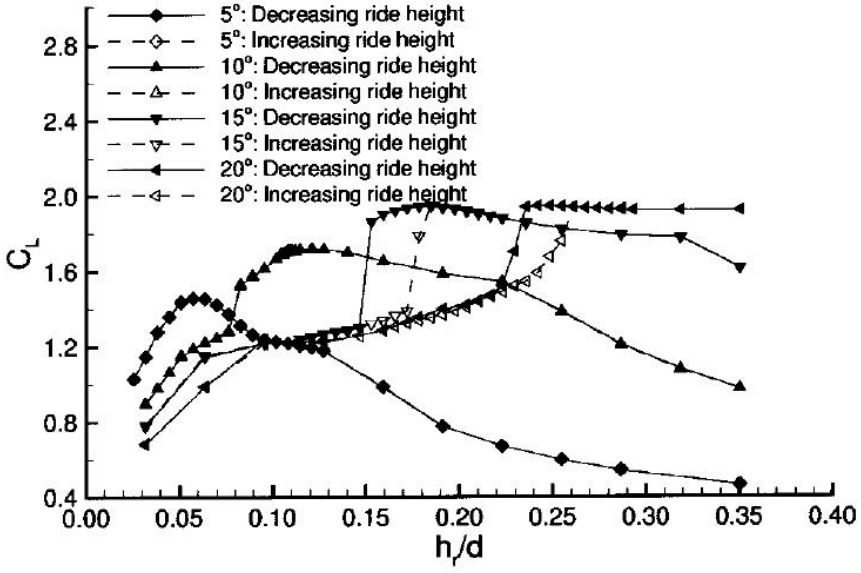
Závislost vytvářeného přítlaku na výšce difuzoru (s velkým úhlem 17°) nad povrchem můžeme vidět na obr. 25. Křivka přítlaku může být rozdělena do 4 základních oblastí: (a) navýšení přítlaku, (b) konstantní oblast, (c) pokles přítlaku a (d) ztráta přítlaku. Mezi oblastmi (b) a (c) pozorujeme hysterezní chování. Zjistilo se, že část smyčky s vyšším změřeným přítlakem je nestabilní a již při malém narušení proudění bude difuzor vykazovat chování dle

části smyčky s nižším přítlakem, proud vzduchu je v této oblasti nestabilní (stejně jako v části oblasti (b) a oblastech (c) a (d)). [5]



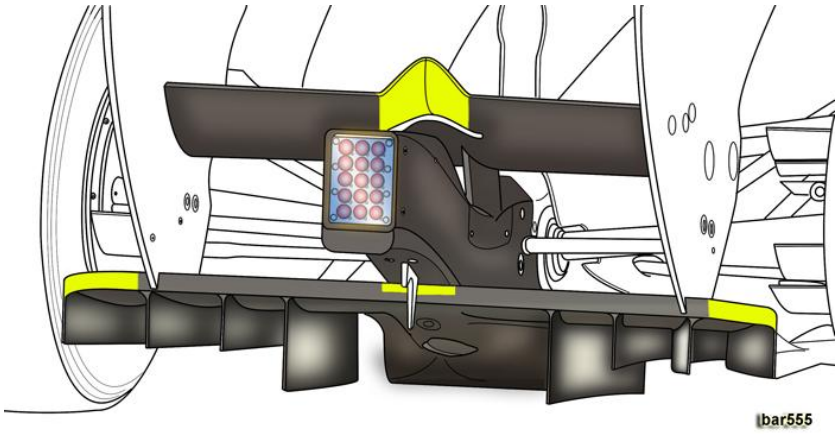
Obr. 25 Závislost koeficientu přítlaku (C_L) difuzoru na poměru výšky difuzoru nad povrchem (h) a poloviny šířky difuzoru (d), jsou zde vyznačeny základní oblasti křivky [5][1]

Pro difuzory s malým úhlem bychom viděli podobný tvar křivky, ale bez hysterezní smyčky a oblast poklesu a ztráty přítlaku by nebyla tak výrazná. Tyto rozdíly jsou nejlépe vidět na obr. 26., kde se hodnoty součinitele přítlaku, změřené jak při zvyšování, tak při snižování výšky difuzoru nad povrchem pro difuzory s úhly 5° a 10° překrývají. Naopak difuzory s úhly 15° a 20° mají jasně patrné hysterezní smyčky. Stejné rozdíly bychom našli i pro koeficienty odporu prostředí. [18]



Obr. 26 Závislost průběhu přítlaku na poměru výšky difuzoru nad povrchem (h_r) k polovině šířky difuzoru (d) pro různé úhly difuzoru [18]

Zmíněné rozdíly v chování pro difuzory s malými a velkými úhly jsou způsobeny komplexními jevy, především oddělením mezní vrstvy od povrchu a zánikem vírů. Kombinace těchto faktorů vede k chování, kdy se pro difuzory s velkými úhly, při snižování a zvyšování vzdálenosti difuzoru od povrchu, mezní vrstva odtrhává či ulpívá na plochách difuzoru v jiných místech (zejména v podélném směru). U difuzorů s malými úhly se tento jev neprojevuje. [18]

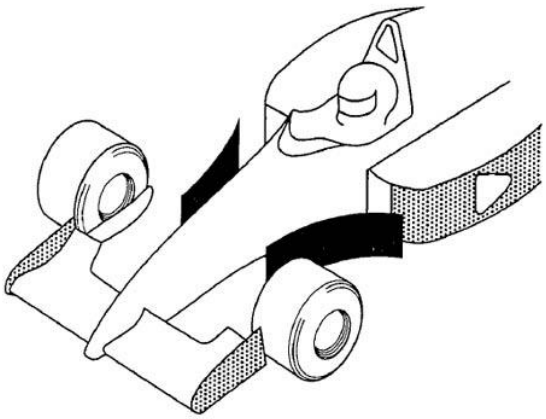


Obr. 27 Praktická ukázka difuzoru na kresbě zadní části vozu Formule 1 (2011) [19]

2.4.4 VLIV PNEUMATIK

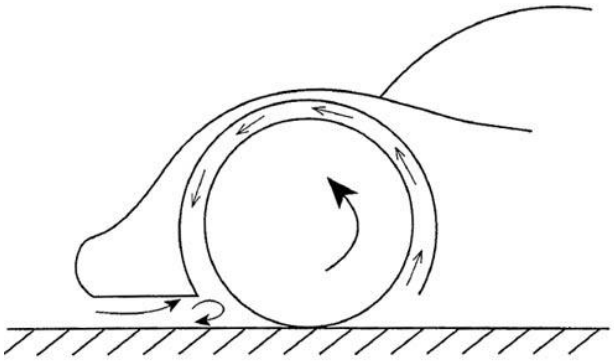
Kola samozřejmě nejsou primárně aerodynamickým prvkem, existují jako technická nutnost a jejich aerodynamicky nevýhodný tvar se nedá měnit. Pneumatiky však mají na aerodynamiku vozidla podstatný vliv. Způsobují především odpor prostředí, jejich druhotným vlivem je vytvoření vztlaku. Na vozidlech s odkrytými koly se mohou na celkovém aerodynamickém odporu podílet až 40%. Kromě vlivu samotných pneumatik jako rotujících objektů, ovlivňují pneumatiky ostatní aerodynamické prvky vozidla a obráceně. Jedná se především o zpravidla negativní ovlivnění proudění vzduchu kolem předních přítlačných křídel, narušení podtlaku pod podlahou automobilu, a tím i ovlivnění proudění v zadním difuzoru. Jedná se o interakce s prvky působícími v oblasti využívání přísavného efektu. O pneumatikách závodního automobilu můžeme říci, že také pracují v oblasti přísavného efektu. [2] [5]

K odklonění proudu vzduchu od pneumatik, případně k přivedení proudu vzduchu za pneumatiky používají závodní monoposty deflektory na přídavných křídlech (diskutovány dříve) a deflektory umístěné na samotné karoserii vozu (obr. 28).



Obr. 28 Příklad deflektorů umístěných na karoserii vozidla [2]

U vozidel se zakrytými koly vytváří rotující pneumatiky v podběžích víry a turbulentní proudění (obr. 29), což má za následek nárůst odporu prostředí a také vznik vztlaku. Vztlak vyvolaný rotující pneumatikou je menší, než vztlak vyvolaný pneumatikou nerotující, která je obtékána vzduchem. Jev kdy rotace pohybujícího se objektu ovlivňuje proudění a tím i síly na objekt působící se nazývá Magnusův efekt. Pro omezení negativních důsledků vyplývajících z rotujících pneumatik se používá takzvané žebrování. Žebrování je seskupení ventilačních otvorů, které mají za úkol odvádět vzduch o vyšším tlaku vyvolaném rotací pneumatik z podběhů automobilu, čímž přispívají k omezení vztlaku a odváděním vzduchu dokonce pozitivně ovlivňují proudění vzduchu pod vozidlem. Typické změny koeficientů vztlaku a odporu prostředí jsou $\Delta C_l \approx -0{,}005$ *a* $\Delta C_d \approx 0{,}004$. Názorný příklad žebrování můžeme spatřit na obr. 30, kde je vyobrazeno Porsche GT3 R (2013). [2]

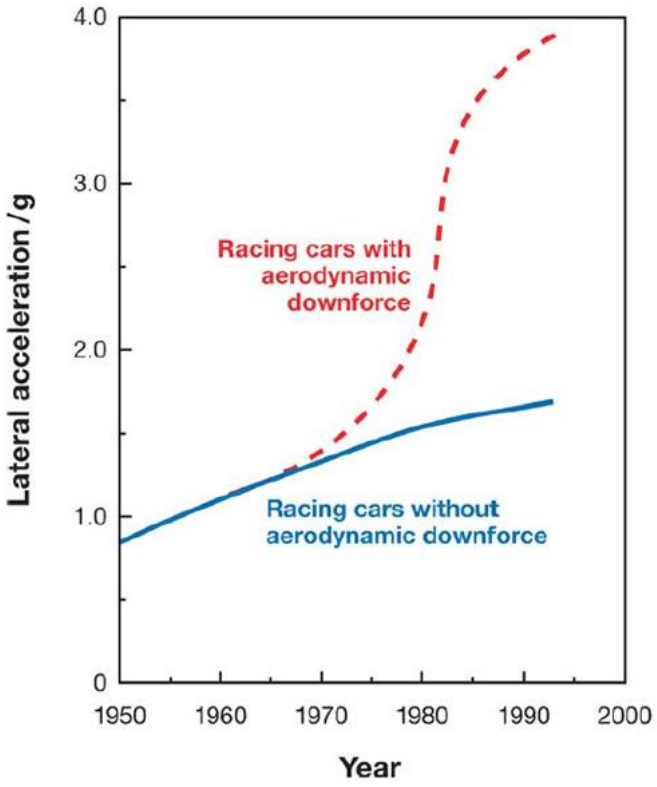


Obr. 29 Znázornění proudění vyvolaného rotací pneumatiky v podběhu automobilu se zakrytými koly [2]

Obr. 30 Typická ukázka žebrování nad podběhem karoserie závodního automobilu se zakrytými koly [20]

3 VÝZNAMNÉ VOZY Z HISTORIE PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

Vytváření přítlaku pomocí přítlačných křídel se poprvé objevilo v 60. letech minulého století. Z grafu vidíme, že největší nárůst bočního zrychlení (lineárně závislé na rychlosti projíždění zatáček) nastal na konci 70. a začátku 80. let minulého století, kdy docházelo k využívání přísavného efektu v největší míře (červená čára). Mírné zvýšení možné rychlosti průjezdu zatáček při nevyužití aerodynamického přítlaku je dáno zlepšováním vlastností pneumatik (modrá čára).



Obr. 31 Historie vývoje dosahovaného bočního zrychlení závodních automobilů [6]

V následujících podkapitolách bude popsáno několik automobilů, u kterých nastal buď největší vývoj ve využití aerodynamiky přísavného efektu, nebo u kterých byl podtlak pod podlahou automobilu vyvozen netradiční cestou.

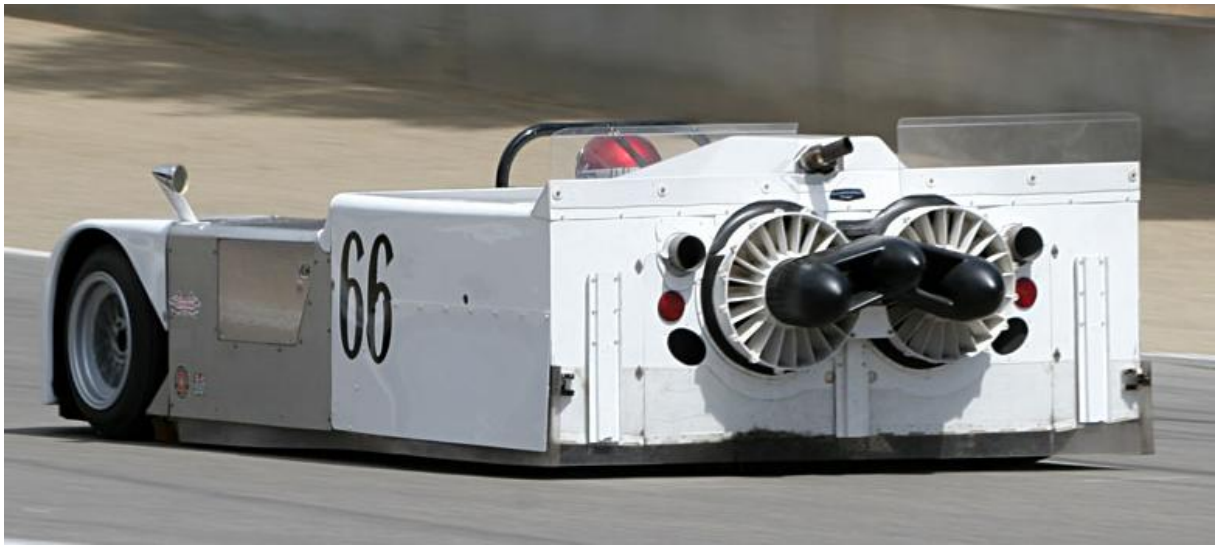
3.1 CHAPARRAL 2J

Jednalo se o unikátní závodní automobil vyvinutý Jimem Hallem pro sérii závodů Can-Am v roce 1970. Vůz, přezdívaný také jako vysavač byl vytvořen tak, aby produkoval značný přítlak nezávisle na rychlosti automobilu, což představovalo velkou výhodu patrnou zejména při průjezdu ostrých zatáček. Oproti ostatním vozům série mohl Chaparral 2J projíždět zatáčky s větším přetížením (až o *0,5g*), což mu také zaručilo v závodech, kterých se zúčastnil, porážet svou konkurenci o více než 2 vteřiny za kolo. Bohužel jej ale provázely

technické problémy, a tak dokončil pouze dva závody. Na konci sezóny 1970 byla podobná technická řešení zakázána a Chaparral J2 se podobných závodů již nikdy nezúčastnil. [21]

Přítlak byl generován pod podlahou vozu, která byla ze všech stran izolována od okolí posuvnými bočnicemi, které doléhaly až k zemi a zabraňovaly přístupu vzduchu z okolí. Izolovaná část podlahy začínala těsně za předními koly a zcela obklopovala kola zadní. Vzduch byl z izolovaného prostoru vysáván dvěma mohutnými ventilátory o průměru přes 400mm, umístěnými v zadní části vozu. Ventilátory byly poháněny nezávislým motorem původem ze sněžného skútru. Zajímavostí bylo sledovat dění při nastartování motoru, karoserie se totiž ihned po startu viditelně snížila v důsledku stlačení pružin zavěšení. [22]

Ačkoli vytváření přítlaku cestou vysávání vzduchu pod automobilem nevyužívá aerodynamický fenomén přísavného efektu jako takový, bývá Chaparral J2 často přiřazován k tomuto jevu, neboť také využívá nízkého tlaku pod podlahou a přisání vozidla k zemi.



Obr. 32 Chaparral 2J [23]

3.2 LOTUS 78

Lotus 78 byl monopost F1 používaný v letech 1977 a 1978. Hlavní konstruktér Colin Chapman měl revoluční myšlenku využít tvarovanou podlahu automobilu jako hlavní aerodynamický prvek pro vytvoření přítlaku. Automobily využívající tento prvek byly nazývány Wing Cars (Křídlová auta). Lotus 78 je považován za první automobil, který skutečně využíval přisávání automobilu k zemi využitím přísavného efektu. [24]

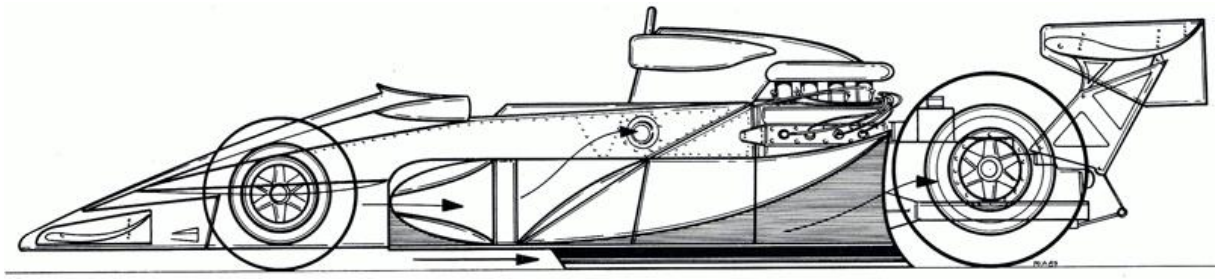
V podlaze vozu se nacházel na každé straně mohutný Venturiho tunel zasahující do boků vozu. Horní část tunelu měla tvar obráceného křídla, čímž byl pod vozidlem urychlován proud vzduchu. Zespod automobilu tak byl vysáván vzduch a došlo k přisávání monopostu k zemi. Vůz byl také vybaven gumovými posuvnými bočnicemi zakončenými kartáči, které klouzaly po povrchu vozovky a tím zamezovaly přístupu vzduchu pod automobil tak, aby nebyl narušen vytvořený podtlak. Výsledky použití takové profilace podlahy v kombinaci s bočnicemi byly strhující. Při vyšších rychlostech vytvářela podlaha vozu větší hodnoty

přítlaku a způsobovala menší odpor prostředí oproti předchozímu modelu. Důsledkem bylo výrazné navýšení možné rychlosti v zatáčkách a zvýšení ovladatelnosti. [24] [25]

Pro další zvýšení přítlaku byly chladiče motoru umístěny tak, aby horký vzduch z nich vystupující obtékal horní stranu karoserie, kde vytvářel oblast zvýšeného tlaku. [26]

Obr. 33 Pohled na Lotus 78 [27]

Celkový tvar karoserie monopostu se zvláštním zřetelem na tvar tunelů v, včetně zaznačeného směru proudění, můžeme vidět na obr. 34.



Obr. 34 Lotus 78 [28]

3.3 BRABHAM BT46B

Brabham BT46B byl monopost vyvinut pro závody F1 v roce 1978 konstruktérem Gordonem Murraym v reakci na velmi úspěšný Lotus 78 a jeho převratnou aerodynamiku využívající přísavný efekt. Návrh tohoto monopostu byl inspirován Chaparralem J2 a jeho systémem vysávání vzduchu z oblasti pod podlahy vozu pomocí ventilátorů. Ačkoliv byly aktivní aerodynamické prvky ve formuli 1 zakázány, našel konstruktér vozu kličku v pravidlech a prohlásil tento ventilátor na zadní části vozu, který byl na první pohled zcela jasně prvkem pro zvýšení aerodynamického přítlaku, za zařízení primárně chladící. Ventilátor byl totiž umístěn tak, aby zvyšoval průtok vzduchu chladičem motoru. Byl poháněn samotným motorem vozidla a dal se ovládat pomocí mechanické spojky. Spodní část monopostu byla izolována od okolí bočnicemi. Přítlak generovaný tímto vozem tak byl nezávislý na rychlosti

jízdy a karoserie se při zapnutí ventilátoru, v důsledku vytvoření přítlačné síly, viditelně přisála k zemi. Přísavná síla – měla stejnou velikost, jako přítlačná síla působící na původní model BT46 při rychlosti téměř 300 km/h. [29] [30]

Vůz se zúčastnil jen několika závodů, jednoho z nich vítězně. Během této doby byl podrobován kritice také proto, že za sebou díky ventilátoru vytvářel silný proud vzduchu, který na vozidla jedoucí za ním metal drobné kameny a další nečistoty z trati. I přestože vyhovoval všem technickým pravidlům, byl z „politických“ důvodů, po 4 závodech dobrovolně stažen vlastníkem týmu Bernie Ecclestonem (ke značné nelibosti hlavního konstruktéra Gordona Murrayho). Brabham BT46B je dodnes mnohými považován za jeden z nejkontroverznějších automobilů v historii F1. [29] [30]

Obr. 35 Brabham BT46B [29]

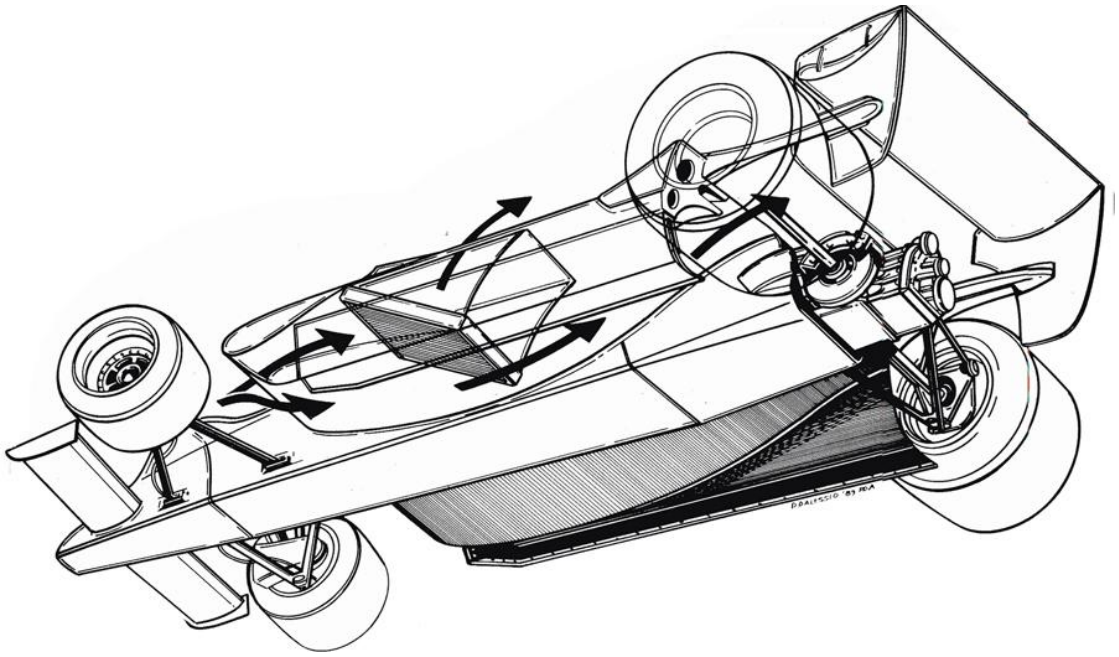
3.4 LOTUS 79

Lotus 79, monopost F1, použitý v letech 1978 a 1979 byl vyvíjen na základě zkušeností s předchozím modelem 78 a cílem bylo lepší využití potenciálu přísavného efektu. Automobil, označovaný společně se svým předchůdcem 78 za jeden z nejvýznamnějších počinů v oblasti navrhování závodních automobilů, byl pro své hladké a elegantní tvary přezdíván Černá kráska. Lotus 79 neměl, díky své pokročilé aerodynamice využívající přísavný efekt, konkurenci. Jeho jezdci Andretti a Peterson se umístili v celkovém pořadí roku 1978 na prvním resp. druhém místě a Lotus s velkým náskokem vyhrál také pohár konstruktérů. [24] [25]

Lotus 79 byl svému předchůdci velmi podobný. Došlo pouze ke změnám již existujících částí při snaze o lepší rozložení a dalším navýšení vytvářeného přítlaku. Změny ve velikosti přítlaku byly značné, vůz dosahoval koeficientu vztlaku $C_L = -2{,}6$. Hodnoty přítlaku pro různé rychlosti jsou uvedeny v tab. 1. [2]

Tab. 1 Závislost generovaného přítlaku Lotusu 79 na rychlosti automobilu [31]

Relativní rychlost vozu [mph] ([km·h^{-1}])	Vytvářený přítlak [kg]
150 (241)	1136
180 (290)	1636
200 (322)	2020



Obr. 36 Nákres Lotusu 79 se znázorněnými tvary tunelů v bočnících a s naznačeným prouděním vzduchu [32]

Obr. 37 Lotus 79 [33]

3.5 LOTUS 80

Pro sezónu 1979 plánoval Lotus představit další model, který měl posunout hranice využívání přísavného efektu do maximální možné míry. Jednalo se o revoluční monopost, neboť vůz neměl být vybaven předním ani zadním přítlačným křídlem. Přítlak získaný tunely v podlaze vozu, které byly protaženy až daleko za osu zadních kol, měl generovat dostatečné množství přítlaku a odstraněním přítlačných křídel se výrazně snížil odpor prostředí. Při testech se ale ukázalo, že tato konfigurace nepřináší kýžený výsledek. Ačkoli vůz generoval velké množství přítlaku, trpěl závažným poskakováním a choval se nestabilně a nepředvídatelně. Pro kompenzaci byly přidány přední a zadní přítlačné křídlo, z revolučního tvaru monopostu tak zbyly pouze protažené boky automobilu. Poskakování a nestabilita vozu byla zmírněna jen částečně, vůz navíc doprovázely další technické problémy, a proto se tým Lotus rozhodl nasadit po zbytek sezóny 1979 původní verzi 79. [34]

Obr. 38 Lotus 80 – pozdější návrh již využívající přítlačná křídla [35]

Ostatní týmy se snažily napodobit úspěchy Lotusů z posledních let a přicházely s vlastními verzemi monopostů využívajícími přísavného efektu. Kvůli nezdaru modelu 80 byl tým Lotus nucen použít starší model 79, který, ač stále kvalitní, již nedokázal porážet novější vozy konkurence. Kvůli stále rostoucím rychlostem v zatáčkách se závody stávaly nebezpečnými a docházelo k vážným nehodám při náhlé ztrátě přítlaku (diskutováno v kap. 2.3). V letech 1981-1982 Mezinárodní automobilová federace zakázala jak používání posuvných bočnic, tak dosud využívané extenzivní modifikace podlahy vozů. Byl povolen difuzor menších rozměrů a podlaha musela být mezi nápravami rovná. Později byla dokonce zavedena povinnost mít pod podlahou připevněnou kluznou desku o tloušťce 10 mm, která zvyšovala světlou výšku vozu, a která je povinná dodnes. [25]

4 SOUČASNÉ VYUŽITÍ PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

4.1 PŘÍKLADY NEZÁVODNÍHO A AMATÉRSKÉHO ZÁVODNÍHO VYUŽITÍ

V této kapitole budou uvedeny příklady vozidel, která využívají přísavný efekt a z něj plynoucí výhody, a která zároveň jsou nebo byla volně dostupná ke koupi.

4.1.1 LOTUS T125

Jedná se o vůz velmi podobný monopostu F1, a to jak podobou aerodynamickou, tak po technické stránce (motor, převodovka). Lotus T125 si lze koupit, nemůžete sis jej však postavit do garáže a volně jej přesouvat. Vůz si, společně s trenérem pilotáže (zpravidla bývalý pilot F1) a podpůrným týmem, vlastně objednáte a určíte, kdy a kam jej chcete dopravit. [36]

Vůz vytváří mnohem větší přítlak než současné monoposty F1. Podlaha s difuzorem, pracující v oblasti přísavného efektu, má na vytváření přítlaku více jak 60% podíl. Podlaha začíná blíže předním kolům a je širší ve srovnání s dnešními monoposty F1, od kterých se liší také difuzorem výrazně větších rozměrů. Automobil je také téměř ideálně vyvážen, netrpí aerodynamickou nestabilitou ani poskakováním a je, ve srovnání s vozy F1, mnohem méně náročný na řidičské dovednosti. [36] [37]

Obr. 39 Lotus T125, pohled na zadní část vozu s rozšířenou podlahou a difuzorem [38]

4.1.2 FERRARI 360 MODENA, FERRARI 430

Při návrhu Ferrari 360 Modena (1999-2005) se inženýři nechali inspirovat svými úspěšnými vozy ve Formuli 1. Využití aerodynamiky s přísavným efektem bylo odvozeno přímo z monopostů F1. Podlaha vozu je tedy tvarovaná tak, aby se pod ní vytvářela oblast nízkého tlaku vzduchu a generoval se přítlak. V zadní části vozu se nachází poměrně velký difuzor. Z

tohoto důvodu je automobil stabilní i při vysokých rychlostech, a to bez potřeby použití přítlačných křídel. [39]

Pro aerodynamiku celého vozidla hrají významnou roli dva velké přívody vzduchu ke chladičům, které jsou umístěny v přední části automobilu. Přívody usměrňují proudění vzduchu pod plochou část podlahy a vedoucí do difuzoru. V rychlosti 180 mp/h (288 km/h) dosahuje velikost přítlaku 180 kg, který je rovnoměrně rozložen na obě nápravy. Tato hodnota je při zvážení faktu, že se jedná o osobní automobil, velmi působivá. Udávaný součinitel přítlaku pak je 0,25. [39]

Obr. 40 Pohled na tvarování podlahy a difuzoru Ferrari 360 Modena [40]

Ferrari 430 (2004-2009) vzniklo jako nástupce F360, technologicky došlo k výrazným vylepšením především v oblasti nového motoru a elektronického diferenciálu. Z aerodynamického hlediska pak byla přepracována podlaha se zadním difuzorem. Podle údajů výrobce vytváří F430 při rychlosti 186 mp/h (300km/h) o 50% více přítlaku než model 360. [41] [42]

Obr. 41 Pohled na tvarování podlahy a difuzoru Ferrari F430 [43]

4.1.3 PAGANI ZONDA R

Jedná se o závodní automobil odvozený ze silniční verze Pagani Zonda. Aerodynamické vlastnosti automobilu se dají nastavit dle předpokládaného použití, v režimu maximálního přítlaku vytváří automobil až 1500 kg přítlaku při rychlosti 300 km/h. Při nastavení na maximální rychlost se automobil může pohybovat rychlostí až 350 km/h. Přítlak je generován zadním přítlačným křídlem a z velké části také podlahou umístěnou v oblasti působení přísavného efektu, začínající předním lízátkem a končící mohutným difuzorem. [44]

Obr. 42 Pohled na zadní část s difuzorem vozu Pagani Zonda R [45]

4.2 PŘÍKLADY PROFESIONÁLNÍHO ZÁVODNÍHO POUŽITÍ

4.2.1 FORMULE 1

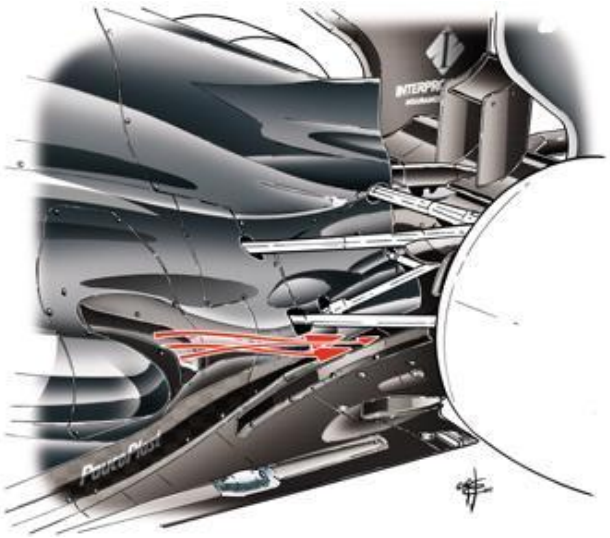
Jak již bylo zmíněno, monoposty Formule 1 využívají k vytvoření přítlaku především části umístěné v oblasti působení přísavného efektu (přední přítlačné křídlo a podlaha vozu zakončená difuzorem). Na vytváření přítlaku se také podílí zadní přítlačné křídlo, jež má zásadní vliv na proudění pod podlahou vozu.

OVLIVŇOVÁNÍ PROUDĚNÍ V DIFUZORU POMOCÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Technické předpisy přesně stanovují povolený tvar podlahy, snahy o lepší využití přísavného efektu se tak v posledních letech projevují nepřímo – prostřednictvím využití ostatních částí vozidla. Jako příklad lze uvést jeden z nejmodernějších trendů, a to ovlivnění proudění vzduchu v difuzoru prostřednictvím vývodu výfukového potrubí umístěného tak, aby horký a rychle proudící plyn, který z něj vystupuje, obtékal difuzor, tím urychloval vzduch do něj vstupující a potlačoval vnikání vzduchu ze stran do difuzoru. [46]

Pro sezónu 2012 byla místa karoserie určena k vyústění výfukového potrubí blíže specifikována technickými předpisy tak, aby se omezila účinnost těchto návrhů. Nicméně dle vyjádření jednoho z konstruktérů mají vhodně umístěná výfuková potrubí stále pozitivní, ač zmenšený, vliv na proudění vzduchu v difuzoru. [47]

Ukázku můžeme nalézt na obr. 43, kde je proudění plynu z výfukového potrubí směrem k zadnímu difuzoru znázorněno červenými šipkami.



Obr. 43 Vyústění výfukového potrubí monopostu Sauber C32 [48]

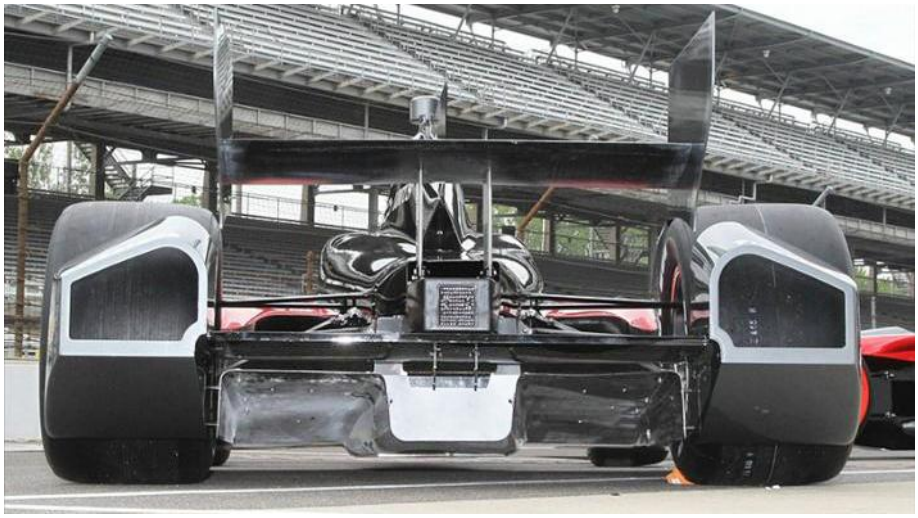
ÚVAHY PRO SEZÓNU 2013 O POVOLENÍ VĚTŠÍHO VYUŽITÍ PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

Původně připravovala Mezinárodní automobilová federace pro letošní sezónu (2013) změny v pravidlech, které by týmům umožnily využit vytvarování podlahy vozu v daleko větší míře, než bylo doposud možné. Úvahy vznikly na základě požadavku na snížení odporu prostředí, čímž by se zmenšila spotřeba paliva vozů a závodění by se stalo ekologičtějším. Právě využitím přísavného efektu totiž lze, jak již bylo řečeno, dosáhnout zvýšení generovaného přítlaku jen za cenu malého zvýšení odporu prostředí. Přítlak vytvořený podlahou by tak částečně nahradil přítlak vytvářený přítlačnými křídly, která generují značný aerodynamický odpor. Jednotlivé týmy se však postavily na odpor, neboť byly přesvědčeny, že by vývoj a testování takto tvarovaných podlah byl až příliš nákladný a nevyzpytatelný. Technický ředitel Williamsu Sam Michael dokonce řekl, že velikost přítlaku vytvořeného přísavným efektem pomocí tunelů v podlaze vozu nelze jednoduše předpovídat či vypočítat, a že inženýři nemají s tímto jevem mnoho zkušeností. Po následné dohodě se tedy prozatím zavedla pouze pravidla nařizující aerodynamické změny menšího rozsahu, které budou znamenat snížení odporu prostředí, ale zachovají plochý tvar podlahy zakončený difuzorem. [49]

4.2.2 MONOPOSTY INDYCAR

Monoposty série závodů Indycar svým vzhledem vždy připomínaly monoposty F1. Používaly i stejné aerodynamické prvky pro vytvoření přítlaku (jen s větším povoleným difuzorem tvořícím Venturiho tunely). Od roku 2012 byla, z důvodů nákladů na vývoj aerodynamiky monopostů, zavedena povinnost použití jednotné karoserie, respektive jejího jádra, označení DW12, od výrobce Dallara. Týmy by pak měly tento základ osadit svými přítlačnými křídly a částmi boků, podlaha vozu měla zůstat pro všechny stejná. Pro sezónu 2012 však byly tyto prvky dodány taktéž jednotně, povolení vlastních prvků, opět z finančních důvodů, bylo naplánováno až na sezónu 2014. Mezi největší změny patří částečně zakrytá zadní kola a širší podlaha, pracující v oblasti působení přísavného efektu, která vytváří větší množství přítlaku než u dřívějších modelů. Cílem úprav bylo zmenšení odporu prostředí a větší využití podlahy pro generaci přítlaku. Pohled na samotný díl podlahy s difuzorem lze vidět na obr. 44, reálný pohled na difuzor současného vozu Indycar pak je na obr. 45.[50] [51]

Obr. 44 Dvoudílná podlaha monopostu Indycar na platformě DW12 (2012/2013) [52]



Obr. 45 Pohled na difuzor vozu Indycar na platformě DW12 (2012 a 2013) [53]

4.2.3 VOZIDLA NASCAR

Vozy série závodů NASCAR vycházejí svou konstrukcí z automobilů osobních. Přítlak těchto vozidel je generován předním nárazníkem s lízátkem, podlahou vozu zakončenou difuzorem a zadním přítlačným křídlem či spoilerem.

Pření nárazník je opatřen lízátkem, které je položeno v těsné blízkosti země, a které zasahuje až před nárazník. Před nárazníkem se pak vytváří oblast vysokého tlaku vzduchu a proudění vzduchu, které je usměrněno mezi zemí a lízátkem urychleno. Tím vytváří tento prvek přítlak na přední část automobilu. Rychle proudící vzduch o nízkém tlaku, který je pod podlahou udržován díky bočnicím (umístěným pouhých 10-12 cm od země), je zespod podlahy automobilu odváděn difuzorem. Všechny tyto prvky pracují v oblasti působení přísavného efektu. [54] [55]

Obr. 46 Boční pohled na vozidlo NASCAR [56]

4.2.4 PROTOTYPY LE MANS

Ještě v 90. letech používaly některé prototypy Le Mans mohutné tunely v podlaze vozu využívající přísavného efektu pro dosažení velkého přítlaku. Postupem času byl tvar podlahy upraven až do dnešní podoby, kdy musí být podlaha mezi osami kol plochá, vybavena kluznou deskou a smí být zakončena pouze difuzorem přesně stanovených rozměrů. Kvůli své nízké výšce nad vozovkou pracuje podlaha i difuzor v oblasti působení přísavného efektu. Dodržování minimální výšky prototypu nad povrchem je kontrolováno, kromě měření statického, také pomocí měření opotřebení kluzné desky po závodě, a to právě proto, aby bylo využití přísavného efektu limitováno. [57] [58]

NISSAN DELTAWING

Pravděpodobně nejzajímavější moderní počin v oblasti využívání přísavného efektu na závodě 24 hodin Le Mans přinesl automobil Nissan DeltaWing, který se závodu zúčastnil v roce 2012. Vůz nezávodil v klasických kategoriích, ale měl vyhrazeno místo pro experimentální automobily. Výjimečnost vozu spočívá především v mimořádně aerodynamickém trojúhelníkovém tvaru, nepoužití přítlačných křídel a implementování přísavný efekt využívajících Venturiho tunelů do podlahy automobilu. Tato kombinace garantovala dostatečnou velikost přítlaku a výrazně sníženou hodnotu odporu prostředí. Vůz byl srovnatelně rychlý se svými nepřímými konkurenty – vozy kategorie LMP2, oproti kterým nabízel přibližně poloviční výkon (300 bhp), ale zato poloviční koeficient odporu prostředí (0,35) a poloviční hmotnost (500 kg s plnou nádrží). [59] [60]

Obr. 47 Nissan DeltaWing [61]

Obr. 48 Nissan DeltaWing, pohled na vyústění tunelů v podlaze [62]

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce je shrnutí poznatků o jednom z nejvýraznějších aerodynamických fenoménů – přísavném efektu. Přísavným efektem nazýváme situaci, kdy je pod podlahou vozu vytvořena oblast nižšího tlaku vzduchu ve srovnání s okolím a automobil je přisáván k zemi. Jedná se o mimořádně efektivní způsob vytváření přítlaku.

Velikost přítlaku vytvořeného pomocí využívání přísavného efektu se vyznačuje citlivostí na vzdálenosti vozu od povrchu. Tato skutečnost vyplývá z podstaty přísavného efektu, který využívá povrch jako jednu z ploch ohraničujících prostor pro proudění vzduchu. Použití tvarovaných podlah vozů pro vytváření přítlaku má oproti použití klasických přítlačných křídel výhodu v menším nárůstu odporu prostředí. Podlaha vozu pracuje nejefektivněji, pokud je na bocích izolována posuvnými bočnicemi doléhajícími k zemi.

Největší rozmach používání přísavného efektu nastal na konci 70. let minulého století. Použití bylo značně experimentální a chování automobilu bylo sledováno až při testech a závodech. Při využívání tohoto fenoménu se objevily určité problémy, jejichž řešení bylo z důvodu neúplného porozumění přísavného efektu realizováno metodou pokus - omyl. Automobily využívající tvarované podlahy se stávaly z důvodů změn ve velikosti generovaného přítlaku při přejezdu nerovností a zejména při poškození izolujících bočnic značně nebezpečné. Později byla napříč motorsportem zavedena technická pravidla značně omezující jeho účinnost, a tak neexistovaly požadavky na podrobné studie a experimenty s aerodynamikou vozidla, které by tohoto efektu maximálně využívalo. Výzkum přísavného efektu pro použití v motorsportu byl prováděn pouze v omezené míře.

Můžeme očekávat, že na organizace pořádající automobilové závody bude vyvíjen čím dál větší ekologický nátlak na snižování spotřeby paliva. Současně bude nutné udržet atraktivitu závodů pro diváky, k čemuž je nezbytné zachování či dokonce navýšení rychlosti vozů. Jedno z možných řešení této situace, pokud pomineme použití účinnějších motorů či rekuperačních systémů, je implementace tunelů vhodného tvaru do podlahy závodního vozu tak, abychom vytvořili dostatečný přítlak. Mohli bychom tak omezit použití jiných aerodynamických prvků vytvářejících přítlak, především přítlačných křídel, což zmenší celkový odpor prostředí. Existuje tak reálný předpoklad povolení využití přísavného efektu prostřednictvím výrazně tvarovaných podlah. Reálné aplikaci na závodní vozy bude muset předcházet dlouhý a nákladný vývoj s provedením rozsáhlých experimentů zajišťujících bezpečné a efektivní využívání přísavného efektu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Brno: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.

[2] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: Designig for speed*. 2nd rev. ed. Cambridge: Bentley Publishers, 2006, 307 s. ISBN 08-376-0142-8.

[3] Tips: Aerodynamics. *Build Your Own Race Car* [online]. © 1999 [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: http://www.gmecca.com/byorc/dtipsaerodynamics.html

[4] Vettel 2010 F1 Car RB6 in Mayfair London – ns front suspension. *Revival Sports Cars* [online]. 2011 [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: http://revivalsportscars.com/gallery/vettel-2010-f1-car-rb6-in-mayfair-london-ns-front-suspension/

[5] ZHANG, Xin, Willem TOET a Jonathan ZERIHAN. Ground Effect Aerodynamics of Race Cars. In: *Applied Mechanics Reviews* [online]. 2006, roč. 38,s. 33-49. [cit. 2013-02-09]. ISSN 00036900. DOI: 10.1115/1.2110263. Dostupné z: http://eprints.soton.ac.uk/42969/1/GetPDFServlet.pdf

[6] KATZ, Joseph. Aerodynamics of Race Cars. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* [online]. 2006, roč. 38, č. 1, s. 27-63 [cit. 2013-02-16]. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016. Dostupné z: http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATA4SD/2012-2013-I/hallgatok/dohar/annurev.fluid.38.050304.092016.pdf

[7] Ground effect. *Formula 1 Dictionary* [online]. [2012] [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/ground_effect.html

[8] Angle of Attack. *The Aviation History Online Museum* [online]. [2009] [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: http://www.aviation-history.com/theory/angle_of_attack.htm

[9] ZERIHAN, Jonathan a Xin ZHANG. Aerodynamics of a Single Element Wing in Ground Effect. In: *Journal of Aircraft* [online]. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000, roč. 37, č. 6 [cit. 2013-02-23]. Dostupné z : http://aero.calpolysae.org/technical/Aerodynamics%20of%20a%20Single%20Element%20Wing%20in%20Ground%20Effect.pdf

[10] Team results 2011. *Formula 1® - The Official F1® Website* [online]. 2011 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.formula1.com/results/team/2011/

[11] Red Bull Formula 1 Car HD desktop wallpaper. *WallpapersWide.com* [online]. 2011 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://wallpaperswide.com/red_bull_formula_1_car_2-wallpapers.html

[12] HANSEN, David. Mercedes CLR Flip at Le Mans. *Mulsanne's Corner: Technical analysis of contemporary sports prototype racing cars* [online]. 2001 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.mulsannescorner.com/techarticle1.htm

[13] MARTIN, J. A. a Michael J. FULLER. *Inside IMSA's legendary GTP race cars: the prototype experience*. Minnesotta: Motorbooks, 2008, 256 p. ISBN 07-603-3069-7. Dostupné také z: http://books.google.cz/books?id=tPnXCAmIKwEC

[14] KIVEKAS, Juha. Juha Kivekas' Post Card from Le Mans 2004. *Mulsanne's Corner: Technical analysis of contemporary sports prototype racing cars* [online]. 2004 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.mulsannescorner.com/juha5.html

[15] FULLER, Michael J. 2007-2011 Acura/HPD ARX-01a, b, c, d, e, & g. *Mulsanne's Corner: Technical analysis of contemporary sports prototype racing cars* [online]. [2011] [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.mulsannescorner.com/AcuraARX-01.html

[16] Technical: BMW Sauber F1.09 - front aero package. *Formula 1® - The Official F1® Website* [online]. 2009-02-03 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.formula1.com/news/technical/2009/0/624.html

[17] Center of Pressure definition in the Free Open Encyclopedia. *Dictionary, Encyclopedia and Thesaurus - The Free Dictionary* [online]. 2003 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Center+of+Pressure

[18] RUHRMANN, Andreas a Xin ZHANG. Influence of Diffuser Angle on a Bluff Body in Ground Effect. In: *Journal of Fluids Engineering* [online]. 2003, roč. 125, č. 6, s. 332-338 [cit. 2013-03-19]. ISSN 00982202. DOI: 10.1115/1.1537252. Dostupné z: http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JFEGA4/27184/332_1.pdf

[19] MICHALIS, K. Lotus Renault R31 – updated diffuser before season starts. *Formula 1 technology and art* [online]. 2011-03-19 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://formula1techandart.wordpress.com/2011/03/22/lotus-renault-r31-updated-diffuser-before-season-starts/

[20] Porsche 911 GT3 R – Extensive changes for the 2013 season. *Porsche Everyday Dedeporsches Blog* [online]. 2012 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: http://dedeporsche.com/2013/03/13/porsche-911-gt3-r-extensive-changes-for-the-2013-season

[21] BLOXHAM, Michael J. Chaparral 2J. *Http://antholonet.com/* [online]. [2010] [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: http://antholonet.com/EngineersCars/Chaparral2J/Chaparral2J.html

[22] Chaparral 2J. *Permian Basin Petroleum Museum* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://www.petroleummuseum.org/Gallery/Chaparral2J.html

[23] FORDHAM, Mike. HIGH ON THE CHAPARRAL. *Influx magazine* [online]. 2010-04-24 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://www.influx.co.uk/wordpress/blog/high-on-the-chaparral/

[24] History of Formula 1 - Grand Prix Cars - Lotus-Ford 79. *History of Formula 1 - Grand Prix History* [online]. [2010] [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://www.grandprixhistory.org/lotus79.htm

[25] ALLIANZ. Williams F1 - History of Aerodynamics: Evolution of aerodynamics. *Williams F1* [online]. 2003-03-30 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://www.f1network.net/main/s107/st22394.htm

[26] Lotus 78. In: *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2008-2013, 2013-03-05 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Lotus_78

[27] MORIO. Takuma Sato demonstrating Lotus 78 2010 Japan. In: *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2010 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Takuma_Sato_demonstrating_Lotus_78_2010_Japan.jpg

[28] TURBUTT, Mel. Your Top Five: Lotus Grand Prix cars. *Classic motorsport, cars, motorcycles and gear* [online]. 2010-09-10 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://www.motorsportretro.com/2010/09/your-top-five-lotus-grand-prix-cars/

[29] Brabham BT46B: The Crazy Sucker Car. *Motorsport University* [online]. 2010 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: http://www.motorsportsuniversity.com/2010/06/brabham-bt46b-crazy-sucker-car.html

[30] MURRAY Gordon. Interview. In: *How to Go Faster and Influence People: The Gordon Murray F1 Story*. TV, BBC Four. 8. července 2012, 20:00 GMT. Dostupné také z: http://www.youtube.com/watch?v=pukIEuzgd3U

[31] Mulsanne's Corner Race Car Aerodynamics Database: 1978 Lotus 79. *Mulsanne's Corner: Technical analysis of contemporary sports prototype racing cars* [online]. © 2004 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: http://www.mulsannescorner.com/aerodatabaselotus78.html

[32] LÁSZLÓ, Gönczi. Top 10: innováció. *Forma 1, Formula 1, F1 - mindegy minek nevezed, az életed része* [online]. 2010-06-20 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: http://forma1-f1.hu/index.php/forma1/olvas/639

[33] Lotus 79 cosworth. Best photos and information of modification. *Amazing pictures and exciting ratings by cars and motorcycles* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: http://www.motorstown.com/images/lotus-79-cosworth-04.jpg

[34] MELISSEN, Wouter. 1979 Lotus 80 Cosworth - Images, Specifications and Information. *Ultimatecarpage.com - Powered by knowledge, driven by passion* [online]. 17.10.2005 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: http://www.ultimatecarpage.com/car/2488/Lotus-80-Cosworth.html

[35] MELISSEN, Wouter. Lotus 80 Cosworth. *Ultimatecarpage.com - Powered by knowledge, driven by passion* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: http://www.ultimatecarpage.com/pic/2488/Lotus-80-Cosworth_2.html

[36] *Top Gear*, řada 17, epizoda 5. TV, BBC HD. 24. července 2011, 20:00 GMT.

[37] Type 125 | Lotus Cars. *Home | Lotus Cars* [online]. Group Lotus PLC. © 2013 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: http://www.lotuscars.com/gb/racing/type-125

[38] LIPMAN, James. Welcome to Jean Alesi's driving school - BBC Top Gear. *Top Gear: cars, driving, supercars and the TV show - BBC Top Gear - BBC Top Gear* [online]. 2011-07-01 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: http://uat.topgear.com/uk/photos/alesi-2011

[39] Ferrari Approved Car Locator: 360 Modena. FERRARI S.P.A. *Ferrari Approved Car Locator united Kingdom* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: http://www.ferrariapproved.co.uk/model/Ferrari-360-Modena#selectedView=MODELINFO/0/1

[40] Www.myrx7.com - Damian Dela Huerta's 3rd Gen Mazda RX-7. *Www.myrx7.com - Damian Dela Huerta's Mazda RX-7* [online]. [2000] [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: http://www.myrx7.com/images/speedlab_ferrari_5.jpg

[41] HowStuffWorks Ferrari 360 and F430. *HowStuffWorks Learn how Everything Works* [online]. © 1998-2013, [2007] [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://www.howstuffworks.com/ferrari-360.htm

[42] Ferrari Approved Car Locator: F430 Coupe. FERRARI S.P.A. *Ferrari Approved Car Locator united Kingdom* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://www.ferrariapproved.co.uk/model/Ferrari-430-Coupe#selectedView=MODELINFO/0/2

[43] Cantrell Motorsports. *Cantrell Motorsports: John performing some service work for this 2005 Ferrari F430* [online]. 2013-01-23 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: https://www.facebook.com/photo.php?fbid=541359789217361&set=pb.164305153589495.-2207520000.1369162490.&type=3&theater

[44] Pagani Automobili | Zonda | Zonda R. PAGANI AUTOMOBILI S.P.A. *Pagani Automobili* [online]. © 2011 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://www.pagani.com/en/zonda/zonda_R/default.aspx

[45] Pagani Automobili | Zonda | Zonda R. PAGANI AUTOMOBILI S.P.A. *Pagani Automobili: Download* [online]. © 2011 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://storage.pagani.com/view/1024/3-4-retro-basso-6.jpg

[46] Blowing hot and cold - the off-throttle diffuser debate. *Formula 1® - The Official F1® Website* [online]. 2011-06-15 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: http://www.formula1.com/news/features/2011/6/12186.html

[47] BEAMER, John. McLaren's exhaust solution examined. *F1 Fanatic - The Formula One blog and F1 fans' community* [online]. 2013-02-28 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: http://www.f1fanatic.co.uk/2012/02/28/2012-exhaust-innovations-mclaren/

[48] Sauber C32 - rear bodywork updates. *Formula 1® - The Official F1® Website* [online]. 2013-03-23 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: http://www.formula1.com/news/technical/2013/894/1048.html

[49] BENSON, Andrew. Formula 1 teams agree to abandon 2013 rules revolution. *BBC - Homepage* [online]. 2011-05-16 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: http://www.bbc.co.uk/sport/0/formula1/13412925

[50] MILLER, Robin. INDYCAR: Owners Reject Aero Kits For 2012. *SPEED - The Motor Sports Authority* [online]. 2011-05-03 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: http://auto-racing.speedtv.com/article/indycar-owners-reject-aero-kits-for-2012/

[51] 2012 IndyCar Series season. In: *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2010-2013, 2013-05-19 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/2012_IndyCar_Series_season

[52] PRUETT, Marshall. INDYCAR Technical Photos From The 2012 Indy 500 Photo Gallery. *SPEED - The Motor Sports Authority* [online]. 2012-05-23 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://photos.speedtv.com/gallery/INDYCAR_Technical_Photos_From_The_2012_Indy_500/slideshow/2012_Indy_500_Technical_Photos/0929dYr5NxfjK

[53] MCQUEENEY, Ron. DW12 rear wheel guards tweaked for ovals Photo Picture Archive | IndyCar | Feb 2012 | Page 3. *Crash.Net | F1 & MotoGP | Motorsport News* [online]. 2011-05-10 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.crash.net/indycar/picturearchive/177217/3/photos

[54] HALL-GEISLER, Kristen. HowStuffWorks "NASCAR Racing Physics 101". *HowStuffWorks "Learn how Everything Works!"* [online]. [2008] [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://auto.howstuffworks.com/auto-racing/nascar/history/nascar-downforce1.htm

[55] POCKRASS, Bob. New rules could create less downforce, more passing for Sprint Cup drivers - NASCAR - Sporting News. *Sporting News - Real Insight. Real Fans. Real Conversations.* [online]. 2012-11-05 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://aol.sportingnews.com/nascar/story/2012-05-11/nascar-rules-change-downforce-passing-lift-off-sprint-cup-teams

[56] NASA Developed Hydration Formula: The Right Stuff adopted by NASCAR driver Michael McDowell. *Press Release Distribution - Submit Press Releases Online - PRWeb* [online]. 2012-10-21 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.prweb.com/releases/2012/8/prweb9819482.htm

[57] *Technical Regulations LM P: 2013 Technical Regulations for Prototype* [online]. 2012 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.24h-lemans.com/wpphpFichiers/1/1/ressources/ Pdf/2013/24-heures-du-mans/regulations/2013-technical-regulations-lm-p.pdf

[58] Porsche 962C. *SUPERCARS.NET - Comprehensive Specifications, Galleries & Forums since 1996* [online]. © 1996-2013 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.supercars.net/cars/3823.html

[59] CUPLER, Justin. 2012 Nissan DeltaWing - Top Speed. *Car News and reviews, videos, wallpapers, pictures, free games and more.* [online]. 2012-10-23 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.topspeed.com/cars/nissan/2012-nissan-deltawing-ar126260.html

[60] Deltawing - News - NISSAN DELTAWING THRILLS LE MANS FANS DESPITE EARLY FINISH. *Deltawing - Home* [online]. 2012-06-16 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.deltawingracing.com/news/2012/6/16/nissan-deltawing-thrills-le-mans-fans-despite-early-finish.html

[61] Nissan DeltaWing Le Mans Race Car (2012) - Picture 3 of 10 - 1600 x 1200 - Gallery. NISSAN. *GotBroken.Com - Tuning, Custom, Modified and Concept Car News* [online]. 2012-04-01 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.gotbroken.com/2012-nissan-deltawing-le-mans-race-car/2012-nissan-deltawing-le-mans-race-car-front-angle

[62] Highcroft Racing - Galleries - Nissan DeltaWing Sebring Testing #2. *Highcroft Racing - Home* [online]. [2012] [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://www.highcroftracing.com/galleries/nissan-deltawing-sebring-testing-2/

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

C	[-]	koeficient odporu (česká literatura)
C_D	[-]	koeficient odporu (anglická literatura)
C_L	[-]	koeficient vztlaku
D	[-]	koeficient odporu
F	[N]	síla odporu prostředí
$F_{přítlačná}$	[N]	přítlačná síla na pneumatiku
L	[m]	délka tělesa difuzoru (pokud není uvedeno jinak)
M	[kg]	hmotnost vozidla rozložena na pneumatiku
S	[m^2]	účinný průřez tělesa
a	[$m \cdot s^{-2}$]	boční zrychlení
c	[mm]	délka tětivy profilu křídla
d	[mm]	polovina šířky difuzoru
g	[$m \cdot s^{-2}$]	tíhové zrychlení
h	[mm]	výška prvku od povrchu (pokud není uvedeno jinak)
h_f	[mm]	výška osy předních kol od povrchu
h_r	[mm]	výška osy kol zadních od povrchu
p	[Pa]	tlak tekutiny v daném místě
v	[$m \cdot s^{-1}$]	rychlost proudící tekutiny
v_∞	[$m \cdot s^{-1}$]	rychlost okolního vzduchu
α	[°]	
ΔC_d	[-]	přírůstek koeficientu odporu prostředí
ΔC_l	[-]	přírůstek koeficientu vztlaku
θ	[rad]	úhel sklonu difuzoru
μ_{max}	[-]	maximální součinitel tření
ρ	[$kg \cdot m^{-3}$]	hustota tekutiny