

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2011

Milan Kubíček

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Aerodynamika vozidel

Milan Kubíček

Bakalářská práce

2011

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Milan KUBÍČEK**
Osobní číslo: **D10621**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**
Název tématu: **Aerodynamika vozidel**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Historie aerodynamiky
Aerodynamika
Odpor proti pohybu vozidla - odpor vzdušný
Aerodynamické tunely
Experimentální část

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Janalík, J.: Obtékání a odpor těles. Ostrava, VŠB - TU Ostrava, 2008

Koreis, J, Koreisová, G., Bayer, Z.: Termomechanika a tepelné stroje. 2009

R.H. Barnard : Road Vehicle Aerodynamic Design. 1996

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Gabriela Koreisová, Ph.D.

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **25. února 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2011**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



Ing. Ivo Šefčík, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2011

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Králíkách dne 20. 4. 2011

Milan Kubíček

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi s touto prací pomohli. Mé velké díky patří vedoucí bakalářské práce, paní Ing. Gabriele Koreisové, Ph.D, a panu prof. Ing. Josefu Koreisovi, CSc, za jejich cenné rady, odborné vedení a čas, který mi vždy ochotně věnovali. Dále bych chtěl poděkovat rodině, mé přítelkyni a svým kamarádům ze školy, za jejich podporu a pomoc ve studiu. Na závěr bych chtěl poděkovat svým rodičům za jejich oporu, a že mi umožnili studovat na této škole.

ANOTACE

Tato práce je soustředována na aerodynamiku vozidel. Jako prostředek objasnění aerodynamiky byl použit model Nissan 350Z v měřítku 1:10, který byl testován v aerodynamickém tunelu. V práci jsou popsány úpravy aerodynamického tunelu i modelu, potřebné ke zjištění obtékání vzduchu, měření vzdušného odporu a aerodynamického tlaku na nápravy. Díky výsledkům z měření je pak popsáno, jak spolu působící účinky na model, úzce souvisí.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika, aerodynamický tunel, aerodynamický koeficient C_x , Nissan 350Z

TITLE

Vehicles aerodynamics

ANNOTATION

This work is focused on automobile aerodynamics. For study of aerodynamics was used Nissan 350Z model, in scale 1:10, which was tested in a wind tunnel. The work describes the various modifications of the wind tunnel and the model that are necessary for airflow examination, measurement of air resistance and air pressure to axles. Thanks to measurement results are described close connections of force effects that act on model.

KEYWORDS

aerodynamics, wind tunnel, aerodynamic coefficient C_x , Nissan 350Z

Obsah

Úvod	10
1 Historie aerodynamiky	11
2 Aerodynamika	14
2.1 Základní pojmy aerodynamiky	14
2.1.1 Hustota a vazkost tekutin	14
2.2 Základní pojmy aerodynamiky působící na vozidlo	16
2.2.1 Silové pole.....	16
2.2.2 Proudnice	17
2.2.3 Mezní vrstva.....	18
2.2.4 Odtržení proudu	19
2.2.5 Úplav.....	20
2.2.6 Koeficient aerodynamického odporu C_x	20
2.2.7 Odpor rotujících kol	21
2.3 Aerodynamika na vozidlech	23
2.3.1 Moderní aerodynamické prvky automobilů	24
3 Odpor proti pohybu vozidla	26
3.1 Složky aerodynamického odporu.....	26
3.1.1 Tvarový odpor.....	26
3.1.2 Indukovaný aerodynamický odpor	26
3.1.3 Odpor způsobený různými rušivými detaily	26
3.1.4 Odpor rotujících kol	26
3.1.5 Odpor vzniklý průchodem vzduchu do automobilu	27
3.2 Soustava aerodynamických sil.....	27
4 Aerodynamické tunely	28
4.1 Aerodynamický tunel koncernu General Motors	29
4.1.1 Parametry větrného tunelu General Motors	29
4.2 Aerodynamický tunel BMW.....	30
4.3 Aerodynamický tunel na DFJP	32
5 Experimentální část.....	34
5.1 Model automobilu.....	34
5.1.1 Naklonění přítláčného křídla	35
5.2 Obtékání karoserie modelu	36
5.2.1 Vyhodnocení výsledků	38
5.3 Měření aerodynamického odporu	39
5.3.1 Vyhodnocení výsledků	42
5.4 Měření aerodynamického přítlaku na nápravách	43

5.4.1	Vyhodnocení výsledků	45
Závěr		46
Seznam použitých zdrojů		47
Příloha grafu , (Graf 1).....		49
Příloha grafu , (Graf 2).....		50

Úvod

Aerodynamikou se začalo lidstvo zabývat již v dávné historii. V dobách, kdy lidé začali toužit a uvažovat nad možností létání. Největší rozvoj však zažívá aerodynamika v posledních desítkách let, kdy se používá ve všech oborech, které využívají obtékání tělesa v tekutém prostředí. Mezi obory, které aerodynamiku využívají a neustále zdokonalují můžeme zařadit zejména kosmonautiku, letectví, automobilový průmysl, stavebnictví, sport, textilní průmysl atd.. Zkrátka vše, co může aerodynamika nějakým způsobem ovlivnit.

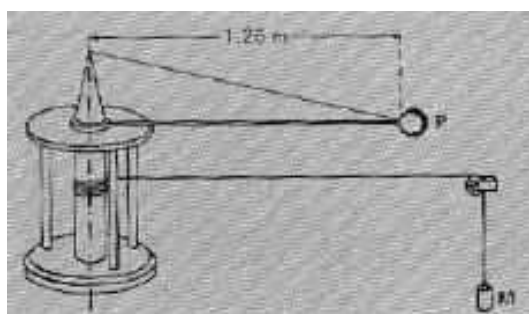
Z neznalostí chování objektů v tekutém prostředí plyne mnoho negativních důsledků. Počínaje kolapsem stavebních konstrukcí a konče vysokými energetickými ztrátami při pohybu těles po zemi, ve vzduchu, nebo ve vodě. Z této konsekvence kladou inženýři vývojových center na aerodynamiku velký důraz. Jelikož aerodynamika zasahuje do důležitých vlastností výrobku (ekonomičnost, bezpečnost, design atd.), které firmám poskytují přednosti v konkurenčním boji.

Významným prostředkem realizování vylepšení aerodynamiky ve vývojových centrech je aerodynamický tunel. Zařízení je schopné vyvinout pohyb vzduchu využitelný pro působení na dané těleso. Znalost účinků na těleso vyvolané tímto proudem v tunelu zjednodušuje zkoumání a ulehčuje návrh produktu, jak po designérské stránce, tak i po finanční.

1 Historie aerodynamiky

Nápadem, jak sestavit přístroj na zkoumání aerodynamických vlastností se zabývali badatelé již v počátcích výzkumu aerodynamiky. Využívali přirozeného proudu vzduchu, buď větru, nebo stabilnějšího průvanu vanoucího jeskyněmi. Později došli k principu, kdy sami pohybovali zkoumaným předmětem v proudu vzduchu. Stále však byl problém, jak měřit přímo na zkoumaném předmětu, když se pohybuje. Výsledky měření byly také ztíženy velkou chybou způsobenou turbulencí. Postupem času tak vznikaly aerodynamické tunely, kde byl zkoumaný objekt nehybný a vzduch se pohyboval okolo něj.

V letech 1707 až 1751 Angličan Benjamin Robins zkoumal aerodynamické vlastnosti různých předmětů na přístroji (*Obr. 1*), který byl poháněn závažím, kde se zkoumaný předmět (*P*) pohyboval v kruhu a byl upevněný na rameni. Předměty měly různé tvary a byly různě nastaveny proudu vzduchu. Jeho přístroj dosahoval rychlosti do 3 m/s. Robins tak formuloval první teorie o vztahu odporu, tvaru, orientaci v prostoru a rychlosti pohybu zkoumaného předmětu.



Obr. 1 - Přístroj, kterým Robins zkoumal aerodynamické vlastnosti předmětů [1]

Později Sir George Cayley (1773-1857) zkoumal na přístroji stejného principu jako Benjamin Robins odpor a vztlak různých leteckých profilů. Dosahoval rychlostí 3-7 m/s. Díky zkouškám různých profilů se mu povedlo sestavit první úspěšný létající stroj těžší než vzduch, (malý kluzák). Před Cayleyem se všichni, kdo uvažovali o motorovém letu, zaměřovali na vyvození vztlaku pomocí pohonné jednotky, podobně jako vrtulník nebo kolmostartující letadla. Cayley však zveřejnil poznatek, že pohonná jednotka bude překonávat odpor letadla a vztlak budou vyvozovat křídla. Oddělil tak funkci tahu a vztlaku a ukončil éru pokusů s mávavými křídly.[1]

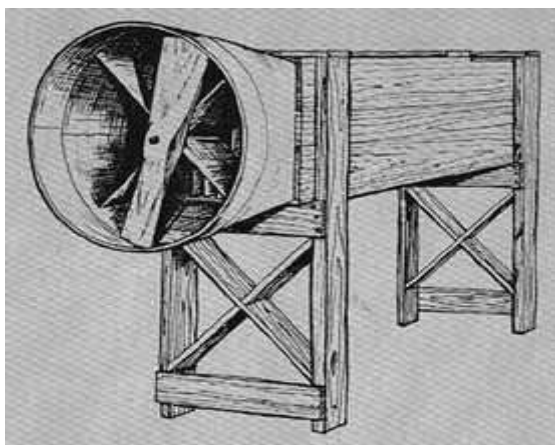
Angličan Osborne Reynolds (1842-1912), z University Manchester experimentálně prokázal, že účinek proudění vzduchu přes zmenšený model je stejný, jako pro vozidlo

reálné velikosti. Tento faktor, nyní známý jako Reynoldsovo číslo, je základní parametr v popisu všech obtékaných předmětů. Jedná se o vědecké zdůvodnění pro použití modelů v aerodynamických tunelech, aby simuloval skutečné podmínky.

Sir Hiram Maxim (1840-1916), zkonstruoval v Anglii zkušební zařízení (stále stejný princip jako Robins), o průměru 20 m. Měřil rychlost, vztlak a odpor. Poté však postavil aerodynamický tunel 4 m dlouhý o průměru 1 m. Parní stroj hnál vzduch rychlostí až 80 km/h.[1]

První uzavřený aerodynamický tunel na světě projektoval a sestavil člen rady pro letecké společnosti Velké Británie, Francis Herbert Wenham (1824-1908). Wenhamův aerodynamický tunel používal Carl Rickard Nyberg, při navrhování parního letounu Flugan (1897), který ve skutečnosti nikdy nevzlétl.[1]

V roce 1901 sestrojili bratři Wrightové v USA tunel s průřezem 400 x 400 mm. (Obr. 2), ve kterém studovali aerodynamické vlastnosti různých profilů křídel.



Obr. 2 - Aerodynamický tunel bratří Wrightů [1]

Do první světové války se vývoj aerodynamických tunelů odehrával převážně v Evropě. Hnaly ho dopředu zbrojní programy. První nadzvukový aerodynamický tunel (Obr. 3) postavili konstruktéři nacistického Německa roku 1938 v Pennemünde. Byl určený k testování a vývoji „zázračných zbraní“ třetí říše a značně urychlil rychlost zálohy německých leteckých sil.



Obr. 3 - Německá letecká laboratoř, 1933 [2]

Již ve dvacátých letech minulého století uvažovali automobiloví konstruktéři o využití poznatků z experimentální aerodynamiky v automobilovém průmyslu. Byly to ale pouze opatrné zkoušky, u kterých se výrobci většinou potýkali s nepřekonatelnými problémy, takže zůstávali u osvědčených tvarů, které měly sice své nevýhody, ale po technické stránce byly praktičtější. Základní kámen k sériové výrobě aerodynamických automobilů položil muž jménem Edmund Rumpler. V roce 1921 představil na berlínském autosalonu svůj první vůz typového označení OA 104, známější pod názvem Tropfenwagen. Tento vůz vzbudil obrovskou senzací a dodnes patří ke světovým unikátům. Byl to první vážný pokus o sériovou výrobu aerodynamického automobilu. [3]

Na konci 80. let byl změřen u jediného dochovaného exempláře Tropfenwagenu s uzavřenou karosérií součinitel odporu vzduchu C_x . Celý motoristický svět byl šokován výslednou hodnotou, která činila $C_x=0,28$. Těchto automobilů bylo vyrobeno pravděpodobně kolem sta kusů, z nichž se dochoval jediný. Ten je vystaven v Deutsches Museum v Mnichově.



Obr. 4 - Historický automobil Tropfenwagen [3]

2 Aerodynamika

Aerodynamika je specializovaný obor fyziky, který zkoumá silové působení na obtékané těleso. Tento obor má veliký význam v letectví i automobilismu a zabývá se obtékáním (prouděním) tekutiny kolem těchto těles. Obecně platí, že čím nižší je aerodynamický odpor vzduchu vozidla, tím hospodárnější je jeho provoz. Velikost aerodynamického odporu je charakterizována pomocí součinitele aerodynamického odporu vzduchu C_x . Hodnota tohoto součinitele je měřítkem kvality tvarů vozu, z hlediska obtékání jeho karoserie vzduchem. Aerodynamika úzce souvisí s designem, protože veškeré aerodynamické prvky budí estetický dojem.

Výstupem z aerodynamické analýzy bývá rozložení silového pole, tvar proudnic a hodnota koeficientu aerodynamického odporu C_x .

2.1 Základní pojmy aerodynamiky

2.1.1 Hustota a vazkost tekutin

2.1.1.1 Hustota tekutiny

Hustota tekutiny (hmotnost/jednotka objemu), označovaná obvykle symbolem ρ , má při standardních atmosférických podmínkách a při nulové nadmořské výšce hodnotu hustoty vzduchu $\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$. Většinou se neuvažuje o velkých změnách této hodnoty, ale při velkých teplotních rozdílech např. od -60°C v arktických oblastech, až po $+50^\circ\text{C}$ na rovníku je však potřeba už s jinou hustotou počítat. Hustota se také mění s nadmořskou výškou, při nadmořské výšce 3000m dosahuje hustota vzduchu 75% hodnoty, než při nulové nadmořské výšce. Protože jsou aerodynamické odpory závislé i na hustotě, mají změny hodnot hustoty vliv na charakteristiky vozidla [4]. Pro výpočet hustoty ρ za jiné nadmořské výšky a teploty nám slouží vztahy (1) a (2). Kde u vzorce (1) dt/dh je pokles teploty s výškou, který se považuje do výše 11 km za stálý, $dt/dh = -0,0665 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$ [5].

$$p = p_0 \cdot \left(1 + \frac{dt}{dh} \cdot \frac{h}{T_0 + t} \right)^{5,225} \quad [\text{Pa}] \quad (1), \quad \rho = \frac{\rho_0 \cdot p}{(1 + (\Delta t / T_0)) \cdot p_0} \quad [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (2),$$

p - atmosférický tlak,

dt/dh - pokles teploty s výškou,

p_0 - atmosférický tlak na hladině moře,

T_0 - teplota měřená ve $^\circ\text{K}$,

t - teplota ve $^{\circ}\text{C}$,

ρ - hustota,

h - nadmořská výška,

ρ_0 - hustota na hladině moře.

2.1.1.2 Vazkost tekutiny

Na rozdíl od ideální tekutiny nejsou reálné tekutiny dokonale tekuté. Při laminárním proudění reálné tekutiny trubicí se zvyšuje její rychlost směrem ke středu trubice. Vrstva tekutiny mající vyšší rychlost se snaží zrychlovat vrstvu pomalejší, a naopak pomalejší vrstva brzdí rychlejší. Mezi vrstvami tekutiny, jež se pohybují různou rychlostí, vzniká tečné napětí τ a dochází tak k jevu nazývanému vnitřní tření v reálné tekutině. Veličinou, jež charakterizuje míru tohoto tření, je součinitel dynamické viskozity μ . Je vlastně konstantou úměrnosti ve vztahu vyjadřující přímou úměrnost mezi velikostí tečného napětí τ , a rychlostním spádem (neboli gradientem rychlosti) dv/dy (3). Tento rychlostní spád je přitom dán poměrem přírůstku velikosti rychlosti dv ve vrstvách vzdálených od sebe o dy . Podíl dynamické viskozity μ a hustoty ρ dané kapaliny pak definuje další charakteristickou veličinu reálných kapalin, kinematickou viskozitu (4). [6]

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3), \quad v = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4),$$

τ - tečné napětí,

v - kinematická viskozita,

μ - dynamická viskozita,

ρ - hustota,

dv/dy - gradient rychlosti.

2.1.1.3 Bernoulliho rovnice

Je to základní rovnice mechaniky tekutin, která vychází ze zákona zachování energie. Slouží k porovnání rychlostí, tlaků a výšek ve dvou různých bodech jednoho proudění. Z rovnice (5) vyplývá, že proudí-li vzduch z oblasti vyššího statického tlaku do oblasti nižšího statického tlaku, vzduch akceleroje. Když vezmeme předchozí větu v úvahu, logicky dojdeme k faktu, že čím se tlak zmenšuje, tím větší je pak rychlost obtékání. Pokud se jedná o spojitě proudění s konstantní hustotou proudící tekutiny, lze Bernoulliho rovnici použít v kterémkoliv bodě proudění.

$$h_A + \frac{p_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2} = h_B + \frac{p_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2} \quad , \quad (5)$$

p - tlak,

v - rychlost proudění,

ρ - hustota média,

h - výška.

2.1.1.4 Reynoldsovo číslo

Je to číslo, které dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu, tedy odpor prostředí v důsledku vnitřního tření. Pomocí Reynoldsova čísla (6) se zjišťuje, je-li proudění laminární, či turbulentní. Přechodný bod, nebo tzv. bod zvrtný, je bod, kde se mění laminární mezní vrstva proudění na turbulentní mezní vrstvu. Dochází k němu v určitém bodě, kdy je hodnota Re u daného tvaru obtékaného předmětu rovna kritické hodnotě $Re_{krit.}$. Kritická hodnota se obvykle pohybuje kolem hodnoty 2000. Kritické hodnoty Re čísla jsou pro jakýkoliv materiál i podmínky různé, viz. vztah (6). U složitějších tvarů se hodnota vzdálenosti zvrtného bodu určuje experimentálně. [7]

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad , \quad (6)$$

v - rychlost proudění,

l - charakteristický rozměr průtočného profilu,

ν - kinematická viskozita proudící kapaliny.

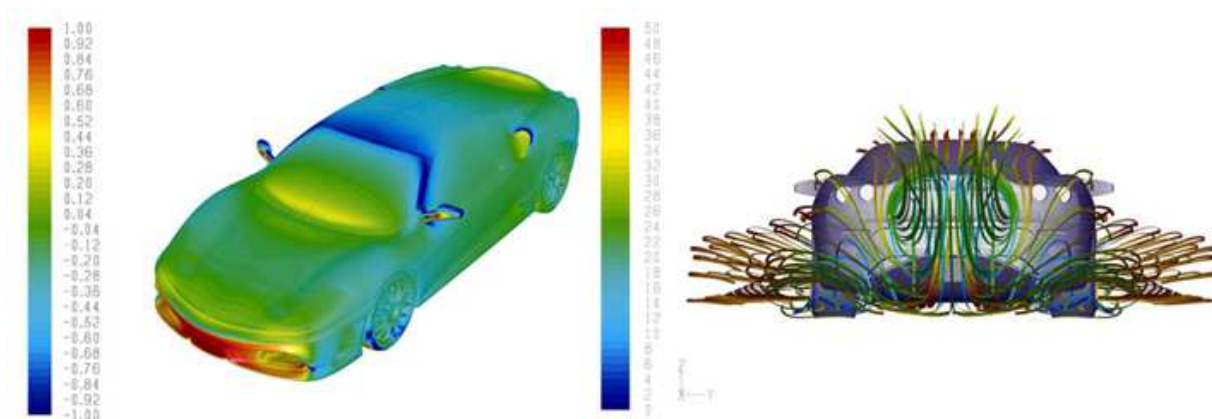
2.2 Základní pojmy aerodynamiky působící na vozidlo

2.2.1 Silové pole

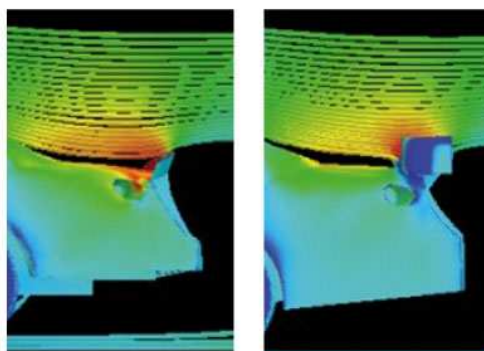
Silové pole ukazuje, v jakých místech je zvýšený tlak na karoserii (Obr. 5). Průběh a velikost působícího tlaku se mění společně s rychlostí obtékání.

Aerodynamický tlak rozlišujeme:

- statický
- dynamický
- celkový (součet statického a dynamického)



Obr. 5 - Tlakové pole a tvar proudnic automobilu Ferrari F430 Scuderia [8]



Obr. 6 - Tlakové pole v oblasti přítláčného křídla [9]

2.2.2 Proudnice

Proudnice je dráha vybrané částice obtékající tekutiny, např. vzduchu. Proudnice se spojují do tzv. proudového svazku. Podle tvaru proudnic můžeme proudění rozdělit na laminární proudění, turbulentní proudění a mezní vrstvu.

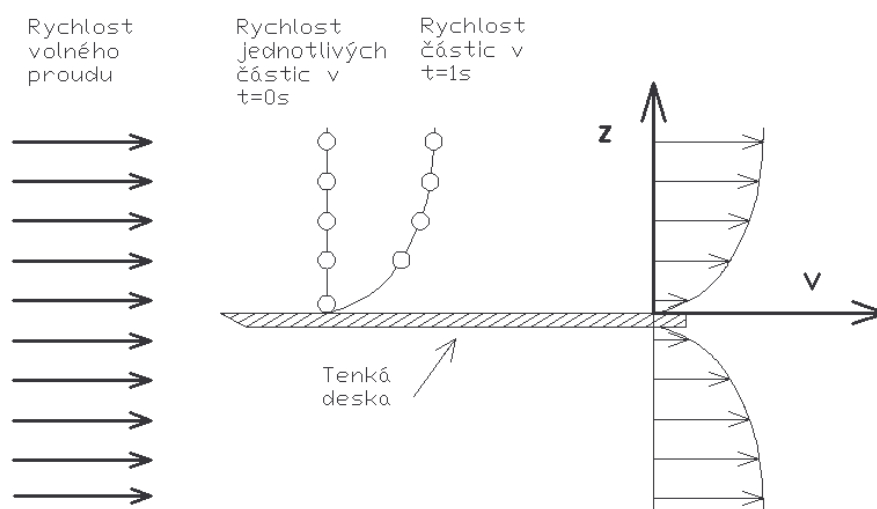
Laminární proudění (ustálené) – Proudnice jednotlivých částic tekutiny se pohybují navzájem přibližně rovnoběžně, jejich dráhy se vzájemně nekříží.

Turbulentní proudění (vířivé) – Turbulentní proudění je proudění jednotlivých částic tekutiny, jejíž proudnice se navzájem promíchávají. Jednotlivé částice tekutiny vykonávají kromě posuvného pohybu i vlastní obecný pohyb, který způsobuje vznik vířů. Rychlost částic v jednotlivých místech turbulentního proudění je různá, tzn., že turbulentní proudění je nestacionární. K turbulentnímu proudění dochází při dosažení určité hodnoty Reynoldsova kritického čísla.

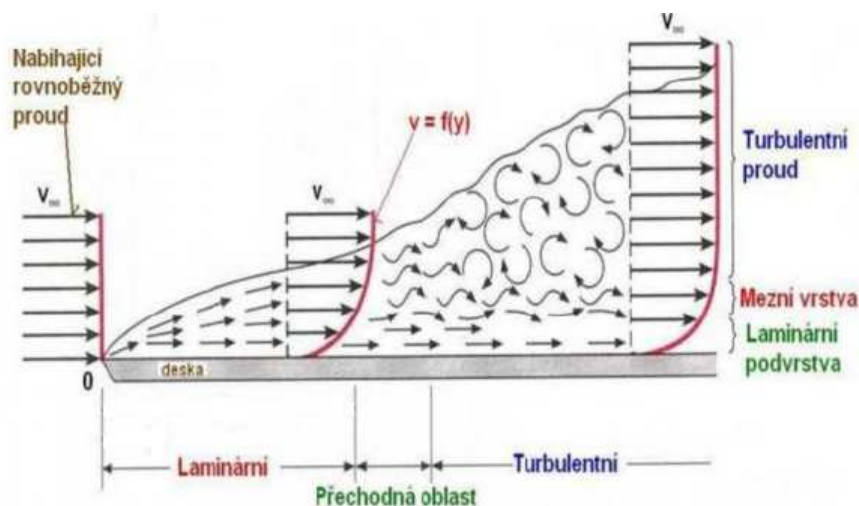
2.2.3 Mezní vrstva

Mezní vrstva vzniká v reálném prostředí na povrchu každé obtékané součásti. Tloušťka mezní vrstvy roste se vzdáleností od počátku obtékaného tělesa. Při obtékání těles dochází k ulpívání tekutiny na povrchu obtékaného tělesa. Rychlost uvnitř mezní vrstvy se mění od nulové hodnoty na povrchu tělesa, k rychlosti na vnějším okraji mezní vrstvy, kde není ovlivněna vazkostí. Vlivem ulpívání na povrchu obtékaného tělesa mají částice tekutiny nulovou rychlost. Rychlostní profil se tedy parabolicky zvětšuje úměrně s rostoucí vzdáleností od povrchu tělesa, (*Obr. 7*).

Změna rychlostního průběhu uvnitř vrstvy určuje, jde-li o laminární nebo turbulentní mezní vrstvu, jak je znázorněno na (*Obr. 8*). Obvyčně na obtékaném tělese začíná mezní vrstva vždy jako laminární, ale s narůstající délkou součásti se proudění mění na turbulentní.



Obr.7 - Parabolicky se zvyšující rychlost



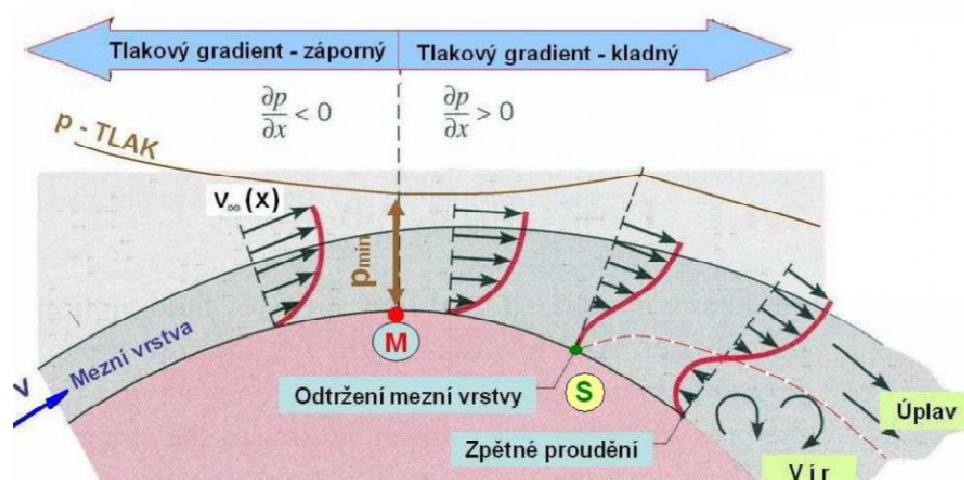
Obr.8 - Vývoj mezní vrstvy při obtékání rovinné desky [10]

Na (Obr. 8), s počátečním prouděním V_∞ , je názorně vidět, jak se počáteční laminární mezní vrstva, přetváří v přechodné oblasti na mezní vrstvu s turbulentním prouděním, která se rozšíří, jak do volného proudu, tak i směrem k desce. V její těsné blízkosti však stále zůstává laminární podvrstvi. Ke zvratu laminární mezní vrstvy na turbulentní mezní vrstvu dochází v místě, kde kritické Reynoldsovo číslo dosáhne určité hodnoty, která je závislá na drsnosti a tvaru tělesa, i na míře turbulence a viskozitě v přicházejícím proudu tekutiny.

2.2.4 Odtržení proudu [10]

Při obtékání rovinné desky se statický tlak podél desky nemění. Jiná situace nastává při obtékání těles zaoblených (např. válec, koule, letecký profil apod.), kde dochází ke změně rychlosti na povrchu tělesa. Protože platí Bernoulliho rovnice, mění se i tlak.

V oblasti rostoucího tlaku, (Obr. 9 - mezi bodem M a S), jsou částice tekutiny přibížděny vnitřním třením a právě i větším tlakem, který na ně působí. Rychlost v mezní vrstvě klesá až do hodnoty, kdy je rychlostní profil roven nule. V tomto okamžiku se částice tekutiny zastaví (bod S). V dalším průběhu dochází k odtržení mezní vrstvy. Je to dáno tím, že účinkem kladného tlaku, který směřuje proud u stěny proti smyslu proudění, se při styku se základním proudem promíchává a tím vzdaluje pohybující se částice od stěny. Od bodu (Obr. 9 - bod S) se tedy mezní vrstva odděluje od tělesa a vzniká úplav. O tom, zda se mezní vrstva odtrhne a ve kterém místě, rozhoduje tlakový gradient podél povrchu tělesa a rovněž skutečnost, jestli je v mezní vrstvě proudění laminární či turbulentní. V žádném případě však nemůže nastat odtržení mezní vrstvy při obtékání zakřivené stěny v její první části, tzn. na náběžné ploše.

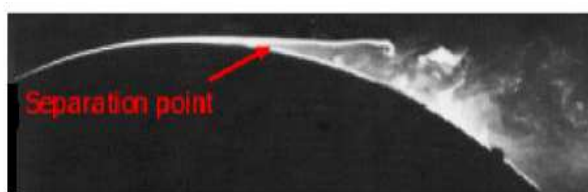


Obr. 9 - Rychlostní profily v jednotlivých fázích obtékání válce [10]

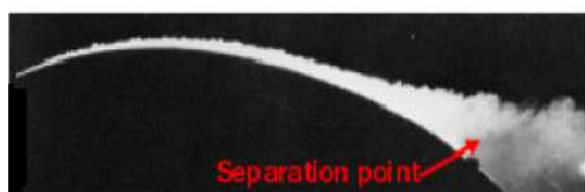
2.2.5 Úplav

Úplav je oblast zvířeného proudění za obtékaným tělesem, vytvořená z částic mezních vrstev unášených proudem z povrchu tělesa, popřípadě z částic odtrženého proudu.

Je-li mezní vrstva turbulentní, vzniká intenzivní výměna hybnosti mezi částicemi tekutiny, protože se turbulencí přivádí do mezní vrstvy více energie. Proto i při zvýšeném tření částice tekutiny ztrácejí kinetickou energii pomaleji. Z tohoto důvodu se turbulentní mezní vrstva odtrhne později než laminární. Turbulentní mezní vrstva má tedy větší odolnost proti odtržení, proto se bod odtržení na obrázku (*Obr. 10 - „Separation point“*), přemísťuje ve směru proudu, současně tak zmenšuje velikost úplavu, a tím se součinitel odporu C_x snižuje. [11]



a)



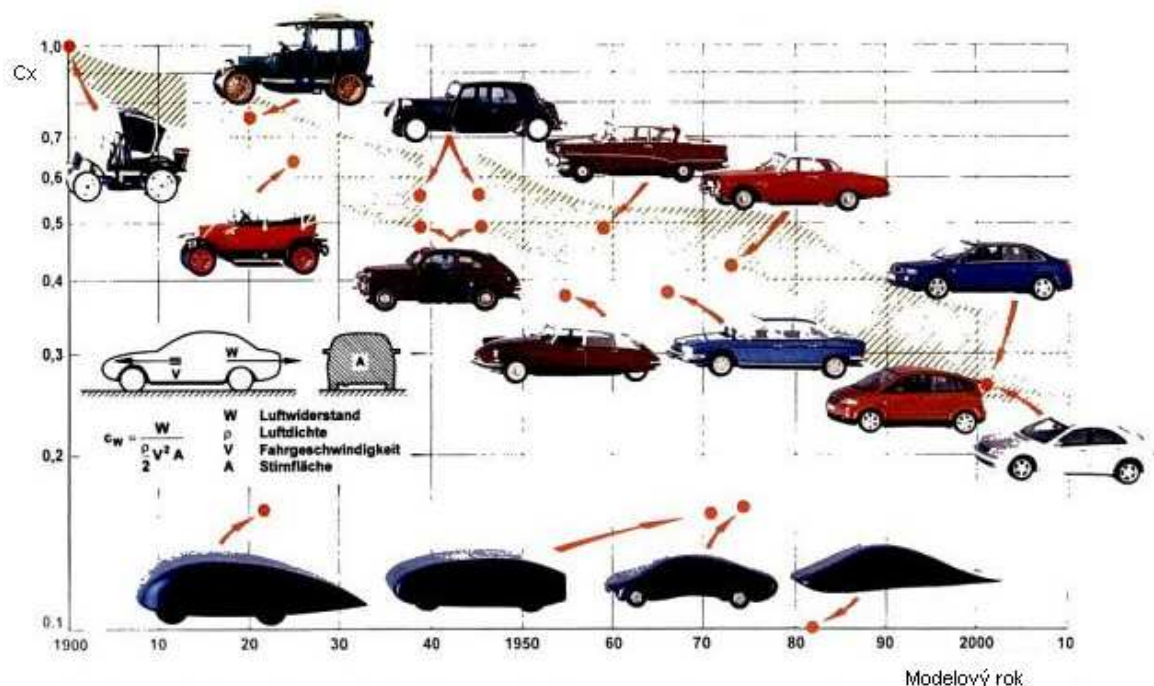
b)

Obr. 10 - a) - Laminární mezní vrstva s širokým turbulentním úplavem
b) - Turbulentní mezní vrstva s úzkým turbulentním úplavem [11]

2.2.6 Koeficient aerodynamického odporu C_x

Tvarový koeficient C_x [-], neboli také součinitel aerodynamického odporu je bezrozměrná veličina, která určuje kvalitu aerodynamického řešení tvaru vozidla. Na základě znalosti této hodnoty a čelní plochy vozidla lze stanovit po dosazení do jednoduchého vzorce i jeho celkový aerodynamický odpor při dané rychlosti, (více v kapitole 3, *Odpor proti pohybu vozidla*). Hodnota tvarového součinitele je zjišťována v aerodynamických tunelech a jeho velikost je shodná pro malý přesný model, tak i pro skutečný vůz. To znamená, že nezávisí na velikosti, ale pouze na tvarových vlastnostech vozu.

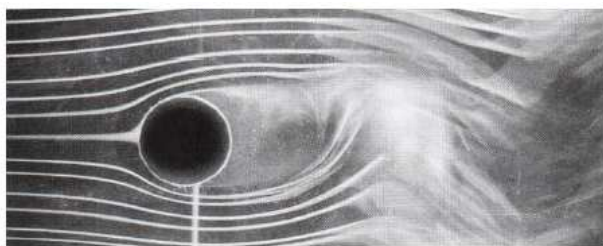
Z hlediska dosažení dobrých dynamických vlastností a nízké spotřeby je kladen požadavek na snižování hodnoty aerodynamického odporu, které lze dosáhnout zlepšením aerodynamických vlastností vozu a malou čelní plochou vozidla, která je ovšem limitována požadavkem na pohodlnou přepravu cestujících a nákladů ve vozidle. U současných vozidel se hodnota C_x pohybuje v rozmezí 0,26–0,35.



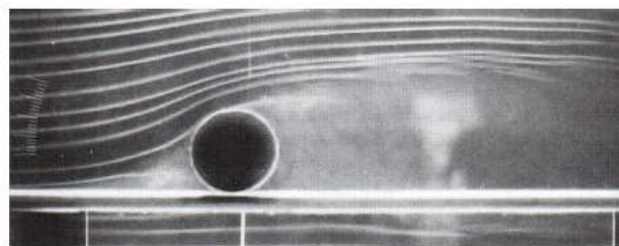
Obr. 11 - Snižující se hodnoty C_x na vozidlech [12]

2.2.7 Odpor rotujících kol

Kola automobilu vystavená proudu vzduchu produkují aerodynamický odpor v důsledku vzniku vírů a turbulentního úplavu. Rozdíl obtékání rotujícího válce ve volném prostoru a obtékáním válce s přítomností vozovky je znázorněn na (Obr. 12), na kterém je zachycen otáčející válec ve směru otáčení hodinových ručiček.



Obr. 12 - a) V prostoru

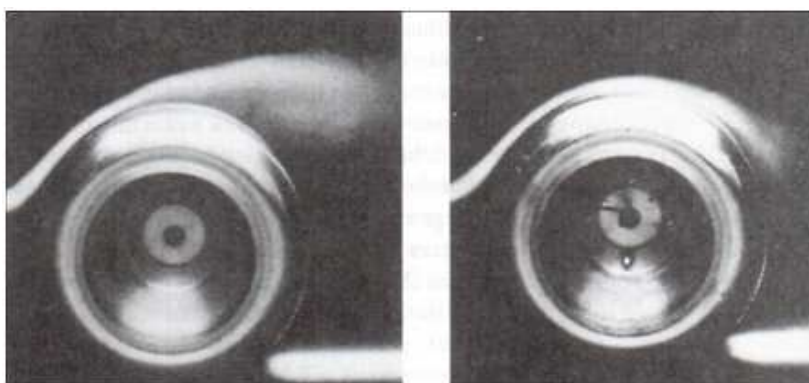


Obr. 12 - b) Na vozovce [13]

Z obrázku (Obr. 12 - a)) vyplývá, že úhlová rychlost válce strhává jednotlivé proudnice vzduchu více ve směru jeho rotace. Z toho je zřejmé, že proudnice mají větší

rychlost, tudíž i podle Bernoulliho rovnice na válec ve vrchním bodě působí menší tlak. Na spodní polovině proudí vzduch pomaleji, tlak je tedy vyšší. Z rozdílu potenciálu tlaků je dané, že vztlačová síla bude působit směrem nahoru. Vznik vztlačové síly vlivem rotujícího tělesa je nazýván Magnusův jev. Tohoto jevu se v praxi využívalo v různých experimentech. Nejznámější je Flettnerova pokusná loď, která měla místo plachet dva rotující válce. Rozdíl mezi rotujícím válcem ve volném prostoru a rotujícím válcem s vozovkou, pak můžeme vidět na (Obr. 12 - b)), protože se válec odvaluje po vozovce, je vzduchu bráněno obtékání v obou směrech.

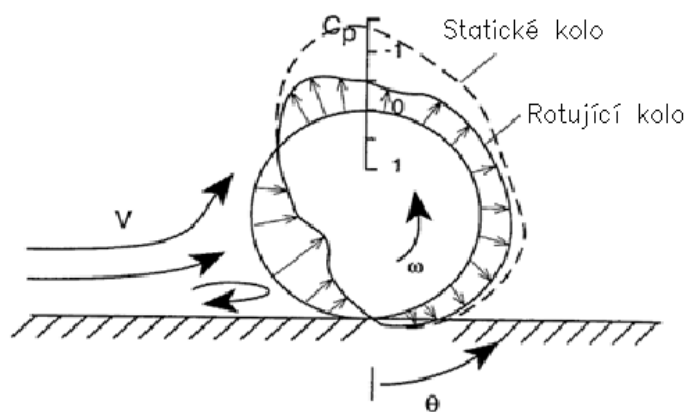
Otáčivý pohyb kola způsobuje ventilační ztráty, velikost čelní plochy pneumatiky, (tudíž všech), není zanedbatelná. Navíc musí být bráno na zřetel, že kola svou rotací značně ovlivňují proudění v podběžích a pod automobilem. Na obrázku (Obr. 13), jsou znázorněny kola s vozovkou. U stojícího kola (Obr. 13 - b)) jde vidět pozdější odtržení přilnutého proudu vzduchu. U rotujícího kola (Obr. 13 - a)) se proud vzduchu odtrhává dříve, zpravidla ještě před vrcholem kola. Dřívějšímu odtržení proudu pak odpovídá velký úplav a vysoký aerodynamický odpor. Boční obtékání je velice komplikované, poněvadž obsahuje množství vírů, které způsobují další aerodynamické odpory.



Obr.13 -a) - Rotující kolo

Obr.13 - b) - Statické kolo [13]

Obtékání kola také způsobují aerodynamický vztlak, což může lépe objasnit (Obr. 14). U stojícího kola je hodnota koeficientu tlaku C_p záporná a u vozovky na náběžné straně je hodnota C_p kladná, což způsobuje na jeho horní straně vztlak. U rotujícího kola dosahuje C_p výrazně nižších hodnot.



Obr. 14 - Rozložení tlaků u rotujícího a statického kola [13]

2.3 Aerodynamika na vozidlech

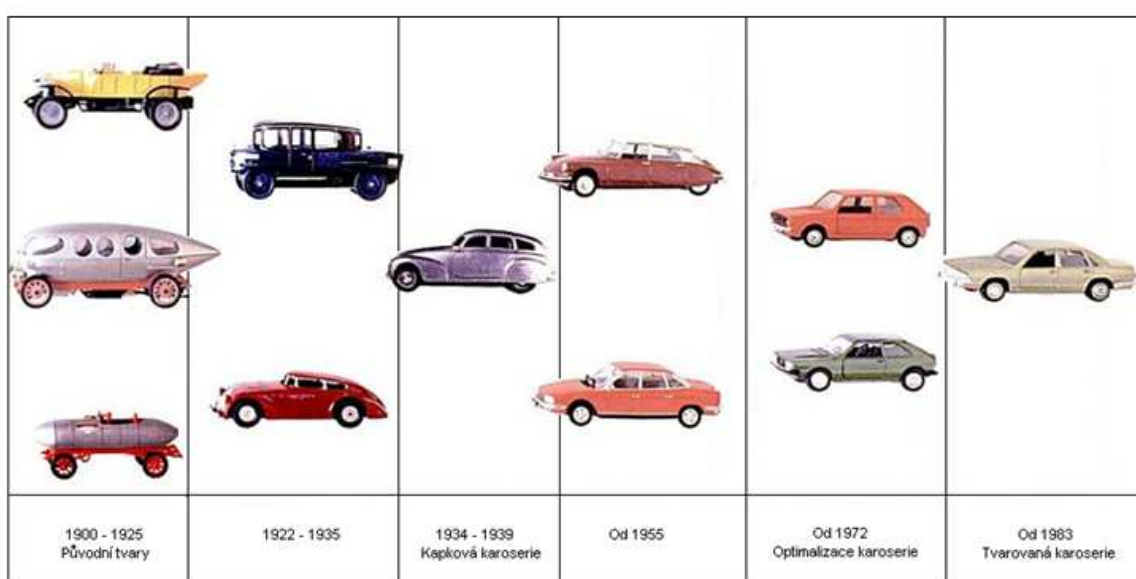
Aktuální snaha o snižování spotřeby paliva a zároveň také emisí CO_2 se alespoň navenek odehrává z velké části v oblasti vylepšování účinnosti hnacího agregátu. Technici však pracují mimořádně intenzivně také na snižování jízdních odporů vozidla. Nemusí-li automobil překonávat velké jízdní odpory, energetická úspora se projeví menší spotřebou pohonných hmot.

Fyzikální zákony říkají, že odpor valení zůstává se zvyšující se rychlostí stejný, zatímco aerodynamický odpor roste s její druhou mocninou. Znamená to, že s narůstající rychlostí vozidla se stále více prosazuje odpor vzduchu. Bývaly doby, že pokud bylo třeba získat vyšší jízdní výkony, vyměnil se motor za výkonnější. Aerodynamika vozu byla většinou pouze záležitostí okrajovou. Této benevolenci udělala přítrž až ropná krize v sedmdesátých letech minulého století, kdy automobilky povolaly na pomoc specialisty na aerodynamiku, kteří měli kvalitnějším proudovým řešením vozů plýtvání drahocennou energetickou surovinou zabránit.

Tato krize přinesla do aerodynamického zpracování automobilů mnoho vylepšení. Mezi tyto vylepšení patří např. plastové kryty kol, zadní odtrhovací hrana vozidla, udržující proud vzduchu bez víření až za automobil, nebo čelní spoilery, omezující proudění vzduchu pod členitou oblast podlahy. Nové modely přicházely s nízkým čelem, díky němuž se objevily problémy se světlomety, jejichž klasické provedení se do čela nevešlo. Řešení přinesla až projekční světla s malými výstupy. Typické pro automobily ze sedmdesátých let byly také pozvolné přechody mezi kapotou motoru a čelním sklem, které v tomto místě do jisté míry eliminovaly charakteristickou silnou přetlakovou zónu. Samozřejmě stírače se skryly za zvýšený plechový lem, u čelního skla zmizelo objemné

pryžové těsnění, boční skla se dostala do jedné roviny s plechem karoserie, zpětná zrcátka a dveřní kliky přestaly vytvářet divokou turbulenci proudícího vzduchu a i plechové díly karoserie se podařilo pospojovat s minimálními mezerami.

Za nekvalitní aerodynamiku si však mohou řidiči často sami. Stačí nechat otevřená okna předních dveří a koeficient C_x naroste o 0,01 až 0,02, otevřená posuvná střecha navyšuje C_x o 0,005 až 0,010. U automobilů se úspory jednotlivými aerodynamickými úpravami neuvádějí, ale např. při prezentaci Mercedesu modelu E, zástupci prozradili, že snížení hodnoty C_x o 0,01, vede při rychlosti 130 km/h ke snížení spotřeby paliva o 0,15 l/100 km.



Obr. 15 - Vývoj tvaru a designů karoserií [12]

2.3.1 Moderní aerodynamické prvky automobilů

Jak již bylo zmíněno výše, konkurenční boj automobilových výrobců žene neustále vývoj automobilů mílovými kroky dopředu. Jednotlivé značky představují stále nové aerodynamické prvky, které zmenšují koeficient C_x , tudíž pak i spotřebu pohonných hmot. V této době, ve které ekonomiku postihuje krize za krizí, je co nejnižší spotřeba nejvíce žádaným faktorem při koupi nového vozu.

Optimalizované proudění obtékajícího vzduchu se začíná odvíjet na přední vozu, tato část pak velice ovlivňuje aerodynamiku vozidla, tedy i jeho celkový vzdušný odpor. U tohoto prvku se prosadila v poslední době nejvíce značka Chevrolet s modelem Volt. Kde přední maska tohoto modelu patří mezi neaerodynamičtější, díky uzavřené mřížce chladiče a aerodynamicky optimalizovanému spodnímu nasávacímu otvoru. Tyto oba aerodynamické prvky rovněž také přispívají ke snížení spotřeby. Výsledkem intenzivní

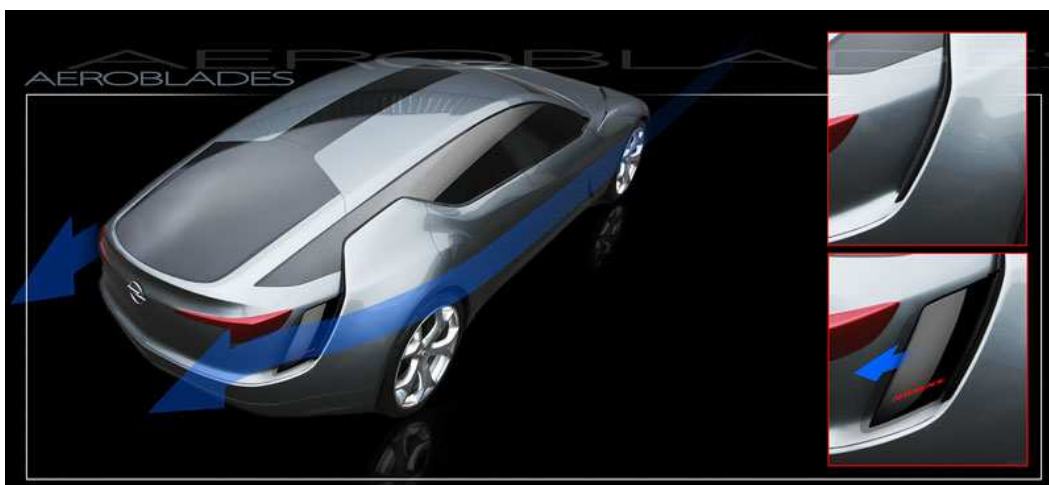
péče věnované aerodynamice je také delší dojezdová vzdálenost na čistě elektrický pohon Chevroletu Volt.



Obr. 16 - Přední mřížka Chevroletu Volt [14]

Důkazem toho, že se spotřeba pohonných hmot a vylepšení aerodynamiky vozidel bere v úvahu ve světovém měřítku, je i americký Pickup GMC Siera All Terrain HD, který byl představen v lednu na Detroit Motor Show 2011. Vývojoví inženýři tohoto vozu přispěli zajímavým aerodynamickým prvkem, automaticky vysunovatelné nástupní prahy, které jsou ukryty v prazích a vysouvají se jen při nastupování a vystupování z vozu. Tímto výrazně ovlivňují obtékání vzduchu podél automobilu.

Nový aerodynamický prvek zadní části automobilu přináší koncept modelu značky Opel Flextreame GT/E. Tento čtyřsedadlový pětidvéřový sedan, se pyšní variabilním obtékáním zádě Aeroblades (*Obr. 17*), což velkám podílem přispívá k malému součiniteli odporu vzduchu $C_x = 0,22$. Po překročení rychlosti 50 km/h se ze zadních boků automobilu vysunou 350mm vysoké boční spoilery, které redukuje vznik turbulentního proudění. Flextreame GT/E zaujme na první pohled absencí jakýchkoliv výběžků karoserie. Místo klik dveří, Opel použil světelné senzory (dveře se otevřou po zakrytí senzoru rukou), zpětná zrcátka nahradily malé kamery.



Obr. 17 - Proměnné obtékání zádě s výsuvnými spoilery Aeroblades [15]

3 Odpor proti pohybu vozidla

Proti pohybu vozidla působí aerodynamický odpor, odpor valení kol, nebo odpor stoupání. Z hlediska aerodynamiky je důležitý celkový aerodynamický odpor, který se skládá ze složek, které působí rozdílnými účinky na vozidlo.

3.1 Složky aerodynamického odporu [4]

3.1.1 Tvarový odpor

Při obtékání vozidla proudí větší část vzduchu kolem horní části karosérie a část se musí protlačit prostorem mezi spodní částí vozidla a povrchem vozovky. Proudnice se za vozidlem neuzavírají, nastává tedy víření. Tím vzniká aerodynamický odpor, který je brán jako výslednice normálových tlaků vzduchu působících na povrch karoserie (50-80%) a třecích sil (5-10%), které v tečném směru proudění vzduchu působí na karosérii.

Jelikož je pohyb relativní, odpor prostředí je stejný, ať už se vozidlo pohybuje v nehybném vzduchu, nebo je vozidlo v klidu a je obtékáno proudícím vzduchem. V součtu záleží pouze na relativní rychlosti mezi vozidlem a vzduchem.

3.1.2 Indukovaný aerodynamický odpor

Nestejným tlakem pod vozidlem a nad vozidlem, (nad vozidlem podtlak, pod vozidlem mírný přetlak), má vzduch tendenci se přemisťovat z míst s vysokým tlakem do míst s nižším tlakem. Proto má vzduch proudící pod vozidlem snahu přejít, a spojit se, se vzduchem obtékající boční povrch karoserie. Dochází tak k víření vzduchu v příčné rovině vozidla, které je další složkou celkového aerodynamického odporu (3-10%).

3.1.3 Odpor způsobený různými rušivými detaily

Je to ovlivnění proudění vzduchu po povrchu dalším členem, který rozrušuje aerodynamický tok, například zpětné zrcátko, nebo kliky dveří na povrchu karoserie automobilu. Velikost této složky odporu je (10-20%).

3.1.4 Odpor rotujících kol

Tato problematika je podrobně popsána již výše v kapitole (2.2.7) a k celkovému aerodynamickému odporu vozidla přispívá měrou (3-5%).

3.1.5 Odpor vzniklý průchodem vzduchu do automobilu

Tento odpor (10-20%) vzniká průchodem vzduchu do systému chlazení, topení a větrání. Dále pak do karoserie, do motorového prostoru a brzd.

3.2 Soustava aerodynamických sil

Celková aerodynamická síla má obecný směr a velikost. Pro posouzení jejího vlivu na zatížení vozidla je potřeba ji vhodně rozložit. Nejčastěji je rozkládána do směrů os souřadného systému vozidla (Obr. 18). Jelikož nás zajímají velikosti aerodynamických sil vzhledem k těžišti, je nutné tyto síly přepočítat. Celkové aerodynamické účinky lze tedy rozdělit do šesti složek, a to do tří silových a tří momentových. Silové složky jsou aerodynamický odpor působící proti ose X , aerodynamický vztlak působící v ose Z a aerodynamická boční síla působící v ose Y . Momentové složky se dělí na klonný, stáčivý a klonivý moment.

$$F_{vz} = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot S_{\epsilon} \cdot v^2, \quad (7)$$

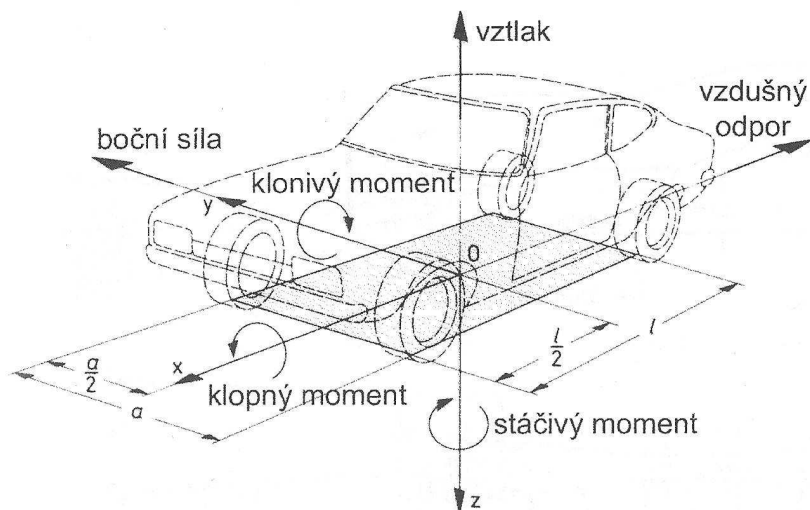
F_{vz} - aerodynamický odpor,

S_{ϵ} - průřez čelní plochy,

ρ - hustota vzduchu,

v - rychlost,

C_x - koeficient aerodynamického odporu.



Obr.18 - Souřadný systém pro aerodynamická měření sil a momentů [16]

U osobních vozidel se čelní plocha S_{ϵ} pohybuje okolo $2m^2$. K určení čelní plochy se v současnosti používají metody snímání obrysu laserem, dříve se plocha zjišťovala projekcí, kdy byl automobil osvětlen polarizovaným světlem.

4 Aerodynamické tunely

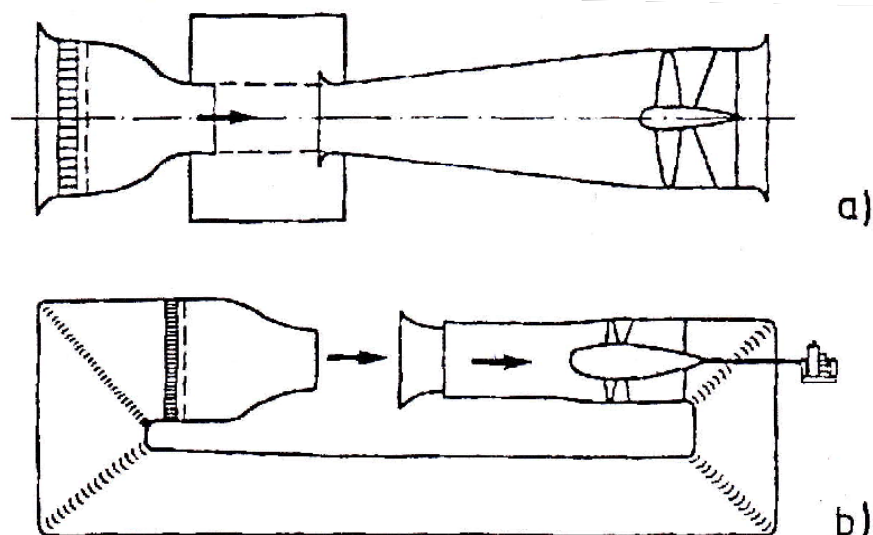
Aerodynamický tunel je výzkumné zařízení, jež umožňuje vytvářet ovladatelný proud vzduchu, který slouží ke zkoumání aerodynamických vlastností těles. Využívá se například v leteckém a automobilovém průmyslu.

Aerodynamické tunely jsou důležitým zařízením pro vývoj motorových vozidel. Význam uplatnění aerodynamiky při vývoji silničních vozidel ovlivňují rozhodujícím způsobem dva faktory, jednak snaha o dosažení optimální hospodárnosti, zejména co nejmenší energetické spotřeby při požadované přepravní kapacitě osob a nákladů, a jednak úsilí konstruktérů co nejvýše zvýšit aktivní bezpečnost vozidel. V aerodynamickém tunelu se neřeší jenom kvalita proudění, ale mimo jiné také problém se vztlakovými silami, které při vyšších rychlostech způsobují odlehčení kol, jemuž je třeba vhodnými aerodynamickými opatřeními zabránit.

Základní zkoušky aerodynamiky se provádí nejčastěji v malých aerodynamických tunelech na modelech vozidel ve zmenšeném měřítku $1:5$, nebo $1:10$. Pro zachování *Re-čísla* se tyto menší modely ofukují zvýšenou rychlostí. Pro dokonalejší zkoušky jsou nezbytné velké aerodynamické tunely, které umožňují měření aerodynamických a zároveň klimatických vlastností skutečných vozidel. Jedním z hlavních důvodů používání aerodynamických tunelů je optimalizace tvaru vozidla, a to u osobních i užitkových karoserií, s cílem dosažení nejmenšího aerodynamického odporu. Přitom je nutno zároveň zvažovat bezpečnostní otázky, jakými jsou, řiditelnost vozidla, citlivost na boční vítr, pohodlí pro posádku, co nejmenší hlučnost a trvanlivost (dostatečné chlazení motoru či brzd).

V aerodynamických tunelech se používá vizualizace proudění, díky které se pomocí kouřových sond znázorňují průběhy proudění, zjišťuje se tak kvalita obtékání, jako celku nebo kritické oblasti, kde dochází k lokálním energetickým ztrátám, místa lze pak individuálně kouřovou sondou pečlivě prověřit. Poté je na designérovi, aby na detailu provedl odpovídající zásah. Mezi další důležité úlohy patří teplotní zkoušky vozidlových agregátů, chlazení motoru, brzd, výfukového zařízení, větrání vnitřního prostoru, klimatizace, aerodynamického hluku, proudění spalin, znečištění stěrače atd.. Mezi výhody aerodynamického tunelu patří vysoce přesné měřicí zařízení a zpracování dat.

Aerodynamické tunely se staví buď s otevřeným okruhem, (proud vzduchu není po průchodu tunelem veden zpět do jeho okruhu), nebo s uzavřeným okruhem (vzduch proudí v uzavřeném okruhu).



Obr. 19 - Aerodynamický tunel

a) Otevřený

b) Uzavřený [17]

4.1 Aerodynamický tunel koncernu General Motors [18]

Před třiceti lety otevřel koncern General Motors svou aerodynamickou laboratoř. Tato laboratoř disponuje největším aerodynamickým tunelem sloužícím k testování automobilů na světě, snaží se snižovat aerodynamický odpor automobilů a zvětšovat tak jejich efektivitu. Aerodynamická laboratoř GM ve Warrenu u Detroitu (Michigan, USA) využívá aerodynamický tunel, ve kterém je generován pohyb vzduchu turbínami se šesti dřevěnými lopatkami s průměrem rotoru $13,1\text{ m}$. Je to první větrný tunel v automobilovém průmyslu USA, postavený pro zkoušky vozidel i ve skutečné velikosti.

Po dostavbě velkého tunelu ve Warrenu poskytl také jeho služby národním lyžařským týmům Kanady a USA, tvůrcům lodí America's Cup, rychlostním cyklistům, týmu solárních vozidel Sunrayce atd.. Všechna nová vozidla General Motors nyní procházejí aerodynamickým vývojem právě v tomto tunelu.

4.1.1 Parametry větrného tunelu General Motors

Proudění vzduchu rychlostí do 250 km/h v uzavřeném okruhu vytváří šestilistá vrtule o $\phi\ 13,1\text{ m}$ dřevěné lepené konstrukce, kterou na otáčky až 2700 min^{-1} roztáčí mohutný stejnosměrný elektromotor o největším výkonu 2984 kW , resp. trvalém 2238 kW . K dispozici jsou dvojce šestikomponentní váhy (pro modely a pro vozy ve skutečné velikosti), jež umožňují také úhlové natočení objektu proti proudu vzduchu; měřicí sekce je dlouhá $21,3\text{ m}$, široká $10,4\text{ m}$ a vysoká $5,4\text{ m}$. Pro snížení hlučnosti jsou stěny obloženy

perforovanými panely, proudění usměrňují otočné klapky. Během let byl zdokonalen počítačový kontrolní systém a všechna nová vozidla General Motors procházejí aerodynamickým vývojem v největším tunelu, jaký pracuje v automobilovém průmyslu.

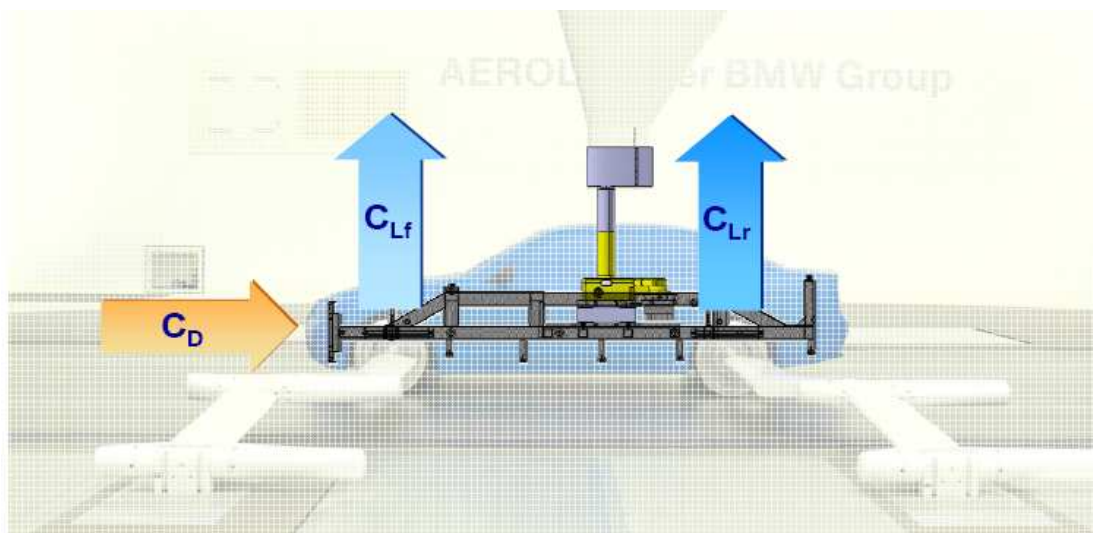


Obr. 20 - Aerodynamický tunel General Motors [18]

4.2 Aerodynamický tunel BMW

Toto moderní testovací aerodynamické centrum postavené v Mnichově se stavělo necelé 3 roky, tunel byl zprovozněn v prosinci 2007 a je považován za nejmodernější v Evropě. Značka BMW do tunelu investovala nemalé finanční prostředky, okolo 170 milionu Euro.

Pohyblivý pás pod měřeným objektem, jenž navozuje proudění vzduchu v oblasti podlahy a kol, je široký $3,2\text{ m}$ a 9 m dlouhý, což umožňuje měření i dvou modelů v měřítku $1:2$ vedle sebe, simulujících například předjíždění. Lze zjistit i síly působící na model v různém vychýlení; speciálním zařízením je možno měnit geometrii kol, anebo světlou výšku. Hodnoty naměřené na modelech se přenášejí na vozy v originální velikosti, neboť přepočítávací formule vychází z teorie podobnosti, tedy zachování stejného Reynoldsova čísla, kdy součin délky objektu a rychlosti proudící tekutiny musí být stejný. Modely v měřítku $1:2$ je tedy třeba ofukovat dvojnásobnou rychlostí než $1:1$; vzhledem k dosahované rychlosti proudění 300 km/h , to stačí na podmínky reálného provozu do 150 km/h . Aerodynamický odpor lze zjistit v aerodynamické laboratoři prostřednictvím šestikomponentních vah, měřících síly a momenty způsobené prouděním vzduchu ve třech směrech. V laboratoři jsou šestikomponentní váhy umístěny přímo v modelu (*Obr. 21*), kola s modelem nejsou propojena.



Obr.21 - Šestikomponentní váhy přímo v modelu [19]

Automobilka BMW Group postavila v blízkosti mnichovského výzkumného střediska, ještě nové zkušební centrum, pro oblast energií a životního prostředí v hodnotě 130 milionů Euro. Zde na ploše 15000 m^2 vzniklo středisko se třemi termickými vzduchovými tunely a dvojicí zkušeben ve formě rozměrově menších komor. Testovaná vozidla v tomto komplexu mohou během pouhých osmi hodin projet všemi klimatickými zónami, a to s neobyčejně velkým přiblížením realitě.

Tři termické vzduchové tunely jsou koncipovány identicky s dmychadlem umístěným 15 metrů nad měřicím prostorem, ale každý z nich plní jiné úkoly. V tepelném tunelu se sleduje především výkonnost chlazení, a tak je rozsah teplot regulován mezi $+20$ až $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž dmychadlo dovoluje v prostoru měření největší rychlost vzduchu 280 km/h . V klimatickém tunelu má rychlost vzduchu maximum 250 km/h , ale lze tam simulovat extrémní zrychlování velmi rychle nastavitelnými kompozitovými lopatkami rotoru dmychadla. Kromě testů bezpečného provozu vozidla ve velkém rozsahu teplot -10 až $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ je značná pozornost věnována na chlazení brzd a účinnosti klimatizace. Teplotní maximum zajišťuje čtyřicet zářičů o výkonu 1200 W/m^2 . Vzduchový tunel životního prostředí simuluje všechny faktory jež život na světě ovlivňují tak, že teplota pokrývá spektrum od -20 do $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vytvářejí se v něm podle potřeby kombinace větru, deště, slunečního záření, nebo i sněžení. Lze dokonce pracovat s různými druhy sněhu, jež se ve skutečnosti vyskytují. Velmi krutá je zima v nízkoteplotní komoře, kde musí testované vozidlo prokázat, jak se s mrazem jeho systém topení a klimatizace vypořádá, a jak rychle třeba odstraní led a zamlžení z oken. Mimořádně zajímavé jsou zkoušky v tlakové komoře zkoumající vliv atmosférického tlaku při změnách nadmořské výšky. Tam je možné pracovat s tlaky jako při výstupu z oblasti Death Valley pod hladinou moře,

až do velehor s nadmořskou výškou do 4200 metrů. Změna tlaku je zvláště důležitá pro motory přepřňované turbodmychadly, aby byl zajištěn optimální výkon při co nejmenší spotřebě paliva. V řídkém vzduchu přepřňované motory výrazně ztrácejí na výkonu.



Obr. 22 - Testování za různých klimatických podmínek [20]

4.3 Aerodynamický tunel na DFJP

V prostorách Dopravní fakulty Jana Pernera je v laboratořích katedry DPD provozovaná vzduchová trať, vybudovaná vlastními silami podle návrhu prof. Lánského.



Obr. 23 - Aerodynamický tunel na DFJP

Vzduchová trať je postavena na principu otevřeného proudění. Tunel je 12m dlouhý a je tvořen plechovým tělesem o čtvercovém průřezu 250x250mm. V místě měření je plechové pole nahrazeno plexisklem, s průtočnou plochou 300x300mm. Vzduchová trať je vyrobena bez usměrňovače vzduchu, který brání tvoření turbulentního proudění v tunelu. Základem tohoto experimentálního tunelu je ventilátor, který je poháněný

asynchronním elektromotorem MEZ Mohelnice s výkonem 22 kW, který dokáže vzduch v trati rozpohybovat rychlostí až 47 m/s. Součástí ventilátoru je škrtková klapka, která svým natáčením umožňuje regulovat rychlost vzduchu v tunelu. Sání ventilátoru je přes otevřené okno z ulice a výstup vzduchové trati je na nádvoří fakulty. Vzduchová trať slouží jako výukový prostředek pro základní měření tlaku a rychlosti proudění. Dále pak pro měření koeficientu aerodynamického odporu C_x , na modelech osobních vozidel v měřítku 1:10 a pro měření aerodynamického přítlaku kol, ke kterému slouží tenzometrické digitální váhy.

5 Experimentální část

Tuto experimentální část, lze rozdělit do třech bodů, kterými jsem se zabýval na modelu Nissan 350Z. Prvním bodem je vizualizace obtékání karoserie modelu proudem vzduchu, druhým bodem je měření aerodynamického odporu modelu při různých rychlostech a stanovení koeficientu aerodynamického odporu C_x . Posledním bodem této praktické části je měření aerodynamického přítlaku na nápravách. Výsledky z těchto měření, je pak možno pomocí modelové rozměrové analýzy převést v měřítku na skutečný automobil.

Měření probíhalo již ve zmíněném aerodynamickém experimentálním tunelu na Dopravní fakultě Jana Pernera, viz. výše kapitola 4.3.

5.1 Model automobilu

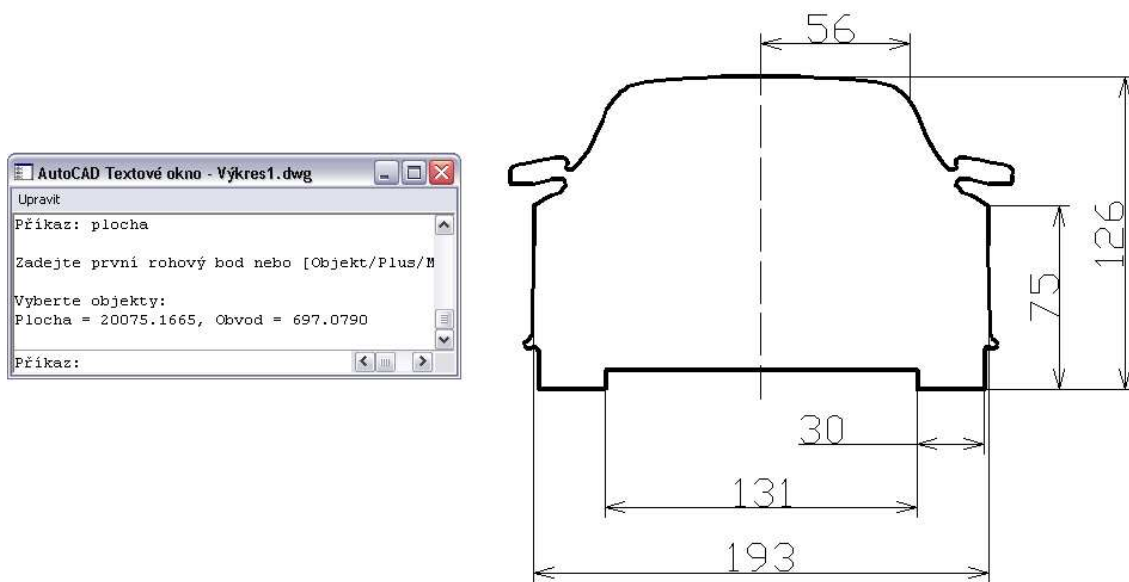
Experimenty se prováděly na modelu osobního vozu Nissan 350Z Kupé, ve zmenšeném měřítku 1:10, (Obr. 24) s rozměry, šířka 193mm, výška 126 mm, délka 455mm a hmotnost 922g. Karoserie má tuningovou úpravu, rozšířené lemy, přední přítláčný spoiler, tuningové prahy a přítláčné zadní křídlo, které má sklon 12°. Model je určen jako karoserie RC modelu na dálkové ovládání. Stejný prototyp je pak možno vidět i v reálné velikosti 1:1. Karoserie je propracovaná do detailu, obsahuje zpětná zrcátka, stěrače, kliky dveří, výfuk atd.. Pro přesnější měření byla do karoserie instalována podlaha s předními podběhy z tvrdého kartónu, aby nedocházelo k proudění vzduchu do modelu.



Obr. 24 - RC model Nissan 350Z

Pro výpočet vzdušného odporu je zapotřebí znát plochu největšího čelní příčného průřezu, tento průřez jsem zjistil osvětlením vozidla paralelním světlem, obkreslením a

vypočtením plochy v měřítku, v programu *AutoCAD 2009*, pomocí příkazu *Plocha\Objekt*, (Obr. 25). Program poté vypočetl hodnotu plochy, $S_c=20075,2 \text{ mm}^2$. To stejné jsem provedl bez zrcátek a předního spoileru, v tomto případě byla čelní plocha $S_c=18828 \text{ mm}^2$. Nastavení křídla se na S_c neprojevalo.



Obr. 25 - Výpočet S_c pomocí programu AutoCAD

5.1.1 Naklonění přitlačného křídla

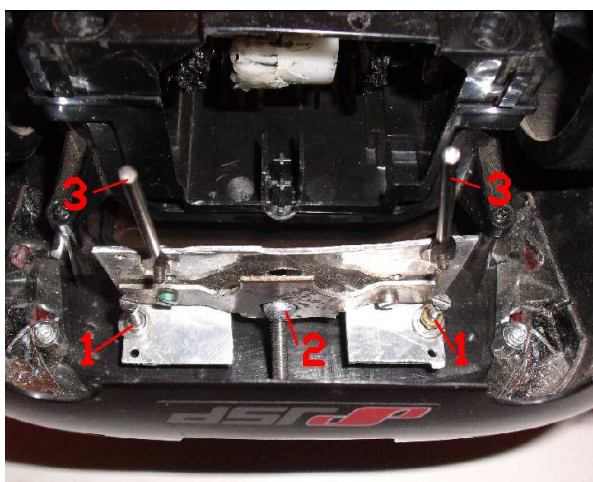
Účinky působící na karoserii byly měřeny na modelu s různým nakloněním zadního přitlačného křídla. Jelikož pro měření ve vyšších rychlostech bylo zapotřebí křídlo v dané poloze dostatečně zafixovat, byl pro tento účel sestrojen v zadní části karoserie mechanismus (Obr. 26), pomocí kterého jde křídlo nastavit do čtyř poloh. Pro tuto úpravu, která vyžadovala zástavbové místo, bylo nutné z RC modelu demontovat motorek a rozvodovku. Mechanismus byl sestrojen na principu uchycení tří pevných bodů, jehož nosná část byla vyrobena z plechu $1,5 \text{ mm}$ do tvaru L . V původních úchytech křídla byly vyrobeny závity $M3$, pomocí nichž se křídlo přimontovalo šrouby k nosné části mechanismu, (Obr. 26 - bod 1).

Prvním pevným a zároveň pohyblivým bodem bylo uchycení mechanismu ke karoserii díky šroubu $M5$ (Obr. 26 - bod 2), který umožňoval fixaci křídla po jeho vysunutí o 7 mm . Hlava šroubu byla pro snadnější změnu naklonění křídla, uložena v zadní části karoserie místo znaku Nissan (Obr. 24), šroub byl poté závitem spojen s kuličkou, která se mohla volně natáčet v konzolce, jenž byla pevně spojena s nosnou částí mechanismu. Tento šroub tedy umožňoval fixaci po změně vysunutí křídla.

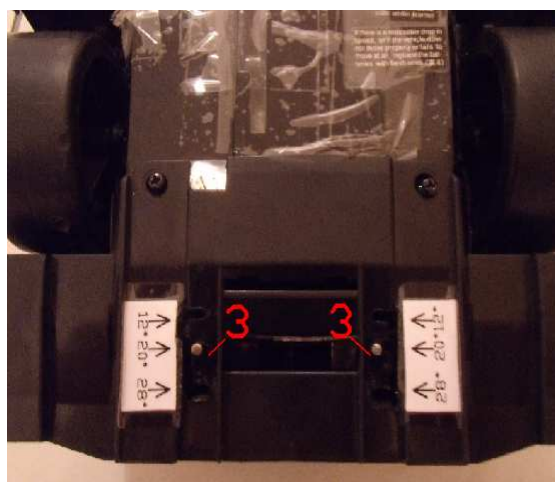
Druhým a třetím pevným bodem (*Obr. 26 - bod 2*), byly pomocí závitů připevněné dvě tyčky, jenž se mohly otáčet tak, aby zapadly do drážek vybroušených v krytu podlahy motorku (*Obr. 27*). Tyto dvě tyčky zajišťovaly na modelu pevnou fixaci úhlu naklonění přitlačného křídla.

Možnosti změn poloh naklonění křídla:

- původní křídlo 12°
- vysunutá poloha křídla o 7mm s nakloněním 12°
- střední úhel naklonění křídla 20°
- maximální naklonění přitlačného křídla 28°



Obr. 26 - Polohovací mechanismus



Obr. 27 - Drážky v krytu motorku

5.2 Obtékání karoserie modelu

V této praktické části jsem chtěl zachytit aerodynamické vlastnosti modelu pomocí kouře. Pro naše podmínky jsem zvolil výrobek mlhoviny pracující na principu odpaření oleje, od firmy Skytec s výkonem 700W, pro dobré zobrazení byla do přístroje vybrána jako náplň těžká mlhovina. V počátcích experimentu bylo zařízení vyzkoušeno v tunelu se zapnutým ventilátorem a redukční klapkou nastavenou na nejmenší rychlost proudění. Ovšem rychlost tlačného vzduchu cca 10 m/s , mlhovinu trhala. Proto bylo nutné vymyslet jiné řešení, a to takové, že bylo změněno tlačné proudění na pomalejší proudění sací. Díky tomuto východisku byl na výstup vzduchové tratě namontován sací ventilátor MEZ Náchod o výkonu 30W s průtokností $Q=0,05\text{ m}^3/\text{s}$. Aby bylo proudění ustálené a bez velkého sacího odporu, byla vymontována jedna část vzduchové tratě a před model byla přidána do celého průřezu síťka, která napomáhala proudění rovnoměrně usměrnit (*Obr. 28*). Při spuštění ventilátoru byla rychlost proudění $v=0,56\text{ m/s}$, dle vztahu (8), v místě měření o průtočném průřezu S . Při experimentu byl na modelu měněn

úhel naklonění přítláčného křídla a obtékání karoserie kouřem bylo zachyceno na digitální fotoaparát, viz. obrázky (Obr.29 - Obr.33).

$$v = \frac{Q}{S} = [m / s] , \quad (8)$$

v - průtočná rychlost,

Q - průtočnost ventilátoru,

S - průtočný průřez.



Obr.28 - Úpravy vzduchové tratě pro experiment s mlhovinou



Obr.29 - Pohled na přední kapotu modelu



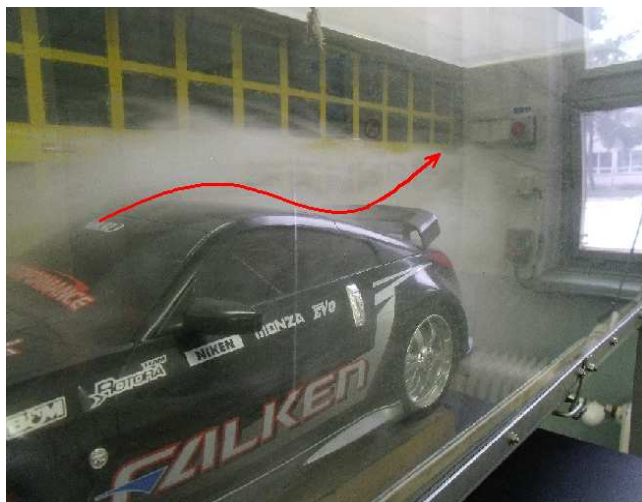
Obr.30 - Karoserie bez křídla



Obr.31 - Původní křídlo



Obr.32 - Vysunuté křídlo o 7mm



Obr.33 - Přítlačné křídlo nakloněno na 28°

Na obrázcích v této praktické části je znázorněno proudění při různém naklonění křídla. Proudění je vyznačeno červenými šipkami, modré šipky znázorňují jeho směr proudění, ale ten je v těchto případech zcela jasný.

5.2.1 Vyhodnocení výsledků

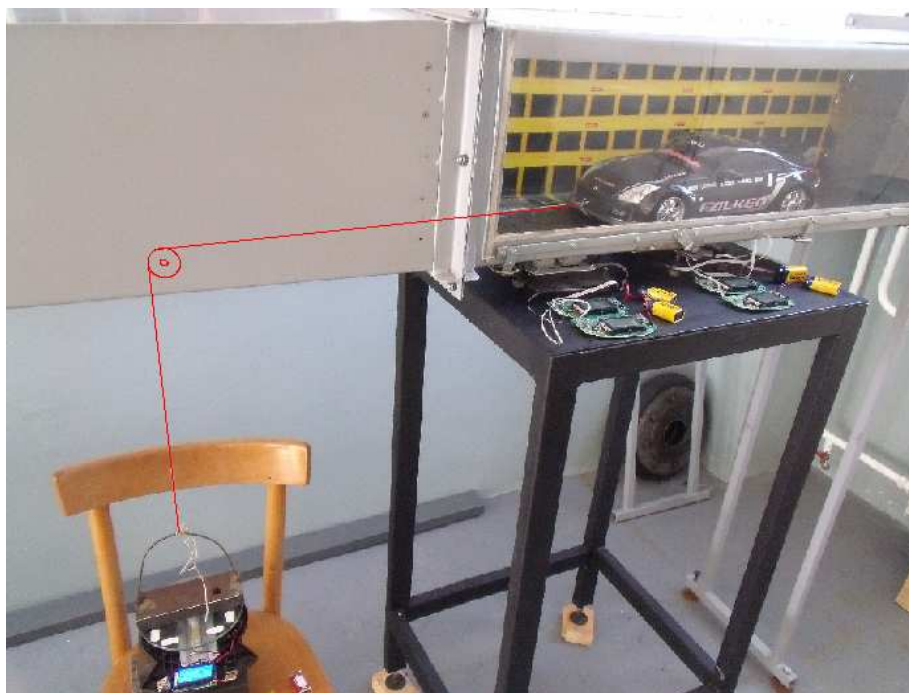
Z pohledu na obtékání přední části karoserie (Obr. 29) vyplývá, jak tvarovaná přední kapota modelu rozděluje obtékání do dvou hlavních toků proudění. Z aerodynamického hlediska může mít tento jev souvislost např. s čištěním hledí řidiče při špatných povětrnostních podmínkách. Tento aerodynamický prvek na kapotě tak napomáhá aktivní bezpečnosti vozidla. Z obrázku (Obr. 30) je zřejmé, jak model bez křídla vzduch obtéká s malým úplavem, aerodynamický odpor by měl být z těchto případů nejmenší. Ve vzduchovém vaku těsně za automobilem se tvoří turbulence, která je

znázorněna rozptýlenými šipkami. Na ostatních obrázcích je křídlo s různým nakloněním, jehož účinkem vzniká jiné usměrnění toku obtékajících proudnic (na obrázcích červené šipky). Při tomto usměrnění působí na křídlo na náběžné straně větší tlak, který křídlo tlačí po směru proudícího vzduchu, vzniká tak větší aerodynamický odpor. Tím, že jsou proudnice usměrňovány nad vozidlo, vzniká za vozidlem větší úplav. Díky tomu má křídlo s větším nakloněním větší aerodynamický odpor. Pro snažší pochopení tlakového pole slouží již uvedený obrázek (*Obr. 6*). Toto usměrnění proudnic je potom ale důležité pro aerodynamické přítlaky na nápravách.

5.3 Měření aerodynamického odporu

Pro měření aerodynamického odporu byla vzduchová trať skompletována. Experiment probíhal za rychlostí 10, 20, 30, 40 a 46 [m/s], které se měřily pomocí digitálního přístroje *AIRFLOWTM PVM100*. Rychlosti se regulovaly z větší míry redukční klapkou ventilátoru, doladění rychlosti se pak provádělo dvěma otvory v přední části tunelu, které jsou opatřeny kryty v podobě šoupátek. Jak jsem již zmiňoval výše, tunel nemá vzduchové usměrňovače a rychlost při experimentu byla doladována šoupátkem, které pravděpodobně také turbulencím v tunelu napomáhaly. Při měření, díky turbulencím obzvláště ve vyšších rychlostech, docházelo k výchylkám naměřených hodnot, proto bylo nutné zapisovat více hodnot v určitém časovém intervalu, naměřené hodnoty se poté zprůměrovaly.

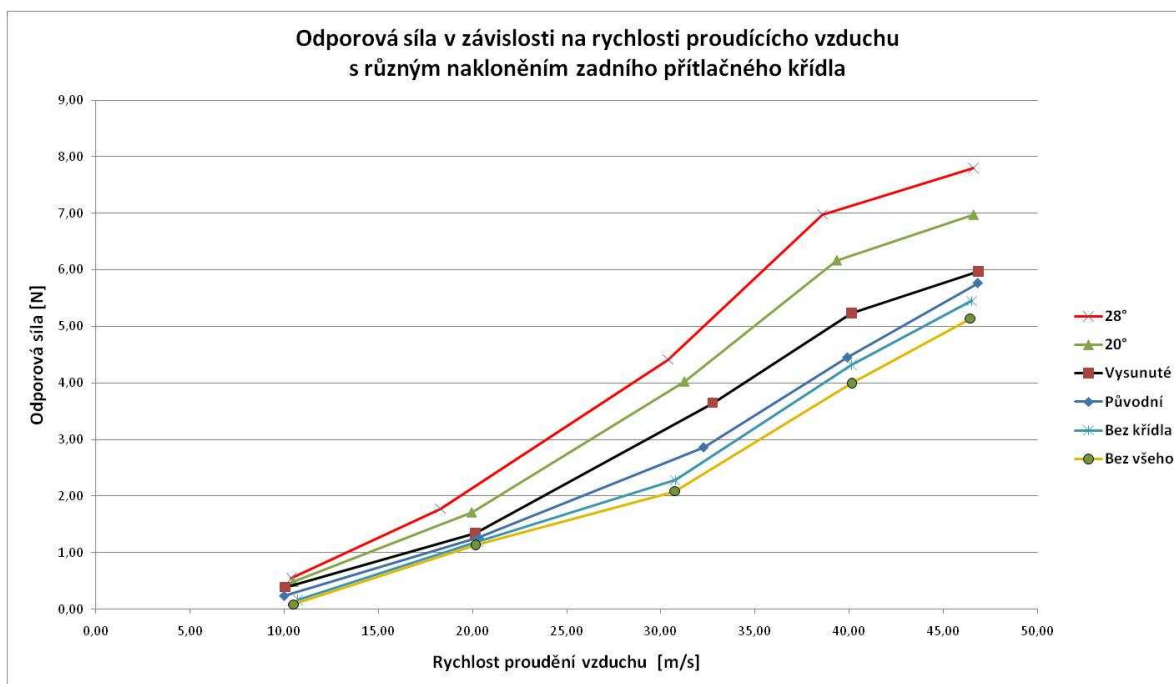
Samotné měření probíhalo tak, že automobil byl připevněn za přední mřížku modelu pevným provázkem, u kterého nedocházelo při působení tahu k velkému rozpínání. Provázek byl poté veden přes pohyblivou kladku, která byla připevněna k tělu vzduchové trati. Otvorem u kladky byl provázek vyveden z tratě a na jeho druhém konci bylo přivázáno závaží o hmotnosti 1,6 kg, které bylo položeno na digitální váhy (*Obr. 34*). Při působení odporové síly, která tlačila vozidlo směrem dozadu, bylo závaží nadzvedáváno a digitální váhy tedy ukazovaly odporovou sílu.



Obr. 34 - Princip měření odporové síly

Při prvních zkouškách měření odporové síly se model s původní hmotností 922g, při vyšších rychlostech choval velmi nestabilně. Tento jev byl ještě markantnější při měření u modelu bez přítlačného křídla. Z tohoto důvodu bylo nutné model dostatečně zatížit, do karoserie bylo přidáno závaží, pomocí kterého se zvýšila hmotnost modelu na 2443g. Při tomto zatížení však na modelu vážla ložiska kol, která nebyla na tuto hmotnost uzpůsobena, vznikala tedy odpor valení. Odpor valení byl zjištěn tak, že se v tunelu na model pustil dostatečně rychlostí proud vzduchu, závaží na váze se nadlehčilo, po vypnutí ventilátoru a zastavení vzduchu v tunelu zůstala na digitálních vahách pokaždé hodnota odporu valení 63g. Tato hodnota byla vždy odečtena z naměřených hodnot, aby byly zpracovány pouze data s aerodynamickým odporem.

Měření vzdušného odporu (*Graf 1*), bylo provedeno jak na všech polohách naklonění křídla, tak i na modelu bez křídla i bez zrcátek, prahů a předního spoileru (*Graf 1.-Bez všeho*). U hodnot při měření (*Bez všeho*), se musí počítat s menší plochou průřezu S_c , která byla menší o $1247,2 \text{ mm}^2$. Pozn. , *Grafy (Graf 1 a Graf 2)*, jsou pro lepší zobrazení obsahem Přílohy.



Graf 1 - Odporová vzdušná síla v závislosti na rychlosti vzduchu

Pro výpočet koeficientu aerodynamického odporu C_x , jsem použil vyjádření (8), ze základního vzorce pro výpočet síly aerodynamického odporu (6). Do vzorce je potřeba vypočítat hustotu vzduchu ρ , pro nadmořskou výšku laboratoře $h=237m$ a teplotu v době měření, $t=12^\circ C$. Aby bylo měření co nejpřesnější, použil jsem pro výpočet hustoty program *QPRO SOFTWARE* [21], který pracuje jako online výpočet, pro výpočty vlastností vlhkého vzduchu. Experiment se provedl dne 10.2.2011, kdy teplota vzduchu u sání ventilátoru byla již zmíněných $12^\circ C$ a relativní vlhkost vzduchu byla 56,4%. Program vypočetl hustou vzduchu $\rho=1,199 \text{ kg/m}^3$.

$$C_x = \frac{2 \cdot F_{vz}}{\rho \cdot S_{\xi} \cdot v^2} \quad [-]. \quad (8)$$

Zatížený model – tabulka s hodnotami C_x					
Rychlost [m/s]	10	20	30	40	46
	C_x				
Úpravy modelu					
Bez všeho	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26
Bez křídla	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28
Původní	0,28	0,27	0,28	0,28	0,29
Vysunutě	0,31	0,30	0,30	0,31	0,31
20°	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36
28°	0,43	0,43	0,42	0,42	0,42

Tab. 1 - Výpočet koeficientu aerodynamického odporu C_x

Model bez zatížení - Bez křídla			
Odporová síla [N]	0,56	7,36	8,11
Rychlost [m/s]	13,72	44,73	46,42
C_x	0,27	0,33	0,34

Tab. 2 - Výsledek měření modelu bez zatížení

5.3.1 Vyhodnocení výsledků

V grafu (*Graf 1*) jsou zaznamenané hodnoty při měření vzdušného odporu s různou rychlostí obtékajícího vzduchu a jiným nakloněním zadního přitlačného křídla. Podle předpokladů z kapitoly (5.2), i tady vyplývá, že největší odporovou sílu způsobuje největší naklonění křídla, na které působí největší odpor v podobě tlaku a jak již bylo zmíněno, tvoří největší úplav, tudíž za modelem vzniká menší tlak. Tyto dva faktory produkují společně větší aerodynamický odpor.

Z tabulky (*Tab. 1*) a grafu (*Graf 1*) lze vyčíst, že při stejné rychlosti se mění aerodynamický odpor a jedinou hodnotu, kterou je možno ve vzorci (8) změnit, je koeficient C_x . Ten tedy roste s naklánějícím se křídlem, protože při obtékání vzduchu po karoserii působí na křídlo normálové síly proudnic. Proudnice se usměrňují a tím vzniká i větší úplav.

V každém řádku v (*Tab.1*), ve sloupci (*Úpravy modelu*), by měl být koeficient C_x stejný, protože při zvyšující se rychlosti roste i aerodynamický odpor F_{vz} . Hodnota C_x

v řádcích vyšla velmi podobná, odchylky jsou způsobeny malým chvěním modelu zapříčiněným turbulencemi vznikajícími při provozu tunelu. Dále je možné z dat v tabulce zpozorovat, že se s rychlostí koeficient ve vrchní půli tabulky zvyšuje a ve spodní půli klesá. To je s velkou pravděpodobností zapříčiněno opět větším chvěním modelu, poněvadž při měření (*Bez křídla*), měl model malý přítlak na zadní nápravu, při vyšších rychlostech tedy nebyl stabilní. Ve spodní části tabulky je efekt opačný, při vyšších rychlostech křídlo s větším úhlem naklonění dodalo na nápravu potřebný přítlak a model se přitlačil k podlaze vzduchového tunelu, tím byl stabilnější a chvění bylo minimální. Kompromis můžeme sledovat u modelu s (*Původním, či Vysunutým křídlem*), kdy se koeficient téměř vyrovnal.

V tabulce (*Tab. 2*) je výsledek koeficientu z měření odporu u nezátíženého modelu. Chvění karoserie bylo markantní, proto se součinitel C_x zvětšil o 0,06.

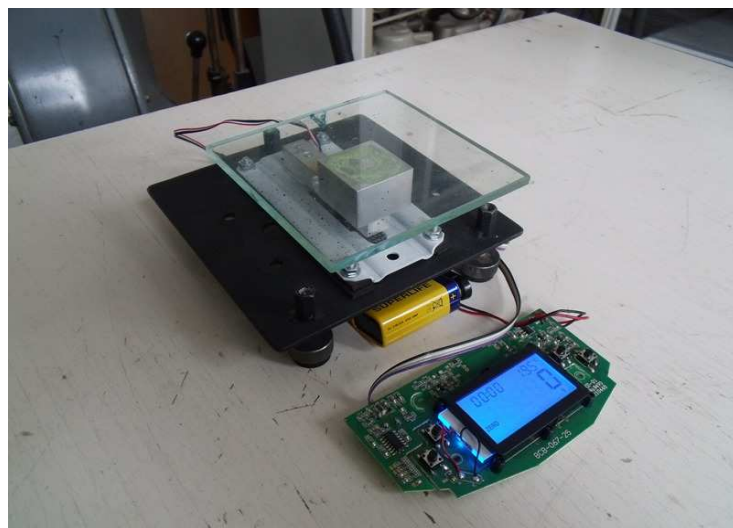
5.4 Měření aerodynamického přítlaku na nápravách

V této experimentální části se měřily účinky aerodynamických sil působící na nápravu. Opět při různém naklonění přitlačného křídla a za jiných rychlostí proudění vzduchu.

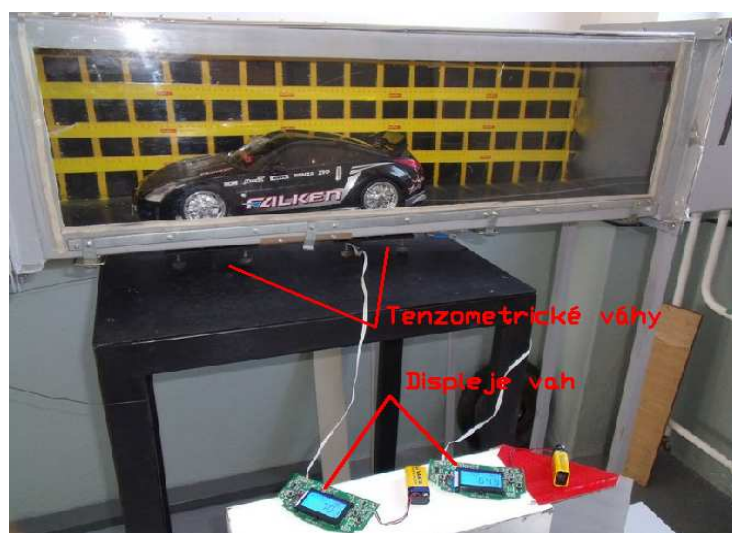
K tomuto měření sloužily tenzometrické váhy (*Obr. 35*), které již byly pro toto měření vyrobeny dříve. Měřící element vah je deformační člen s nalepenými tenzometry a s vyhodnocovací jednotkou. Toto měřící zařízení bylo součástí digitálních vah, z nichž bylo demontováno a umístěno na ocelové podložky s trojicí stavěcích šroubů, které mají za úkol zjednodušit seřízení skleněné plošiny do roviny tak, aby vršek skla lícoval s podlahou tunelu.

Pro měření přítlaku na nápravách byla původní skla vah $100 \times 100 \text{ mm}$ malá, proto bylo přidáno ještě přídavné sklo o délce 240 mm , které bylo vystředěno a připevněno na původní skleněné podložce. Váhy byly umístěny do středu náprav modelu, pro měření tedy byly použity dvě měřící jednotky. Kola náprav modelu tak stála na přídavné skleněné podložce, která byla mezi koly a původní měřící jednotkou. Aby nedocházelo k podélnému posuvu modelu, při působení aerodynamické odporové síly, byla karoserie připevněna za přední mřížku pomocí vázacího drátku.

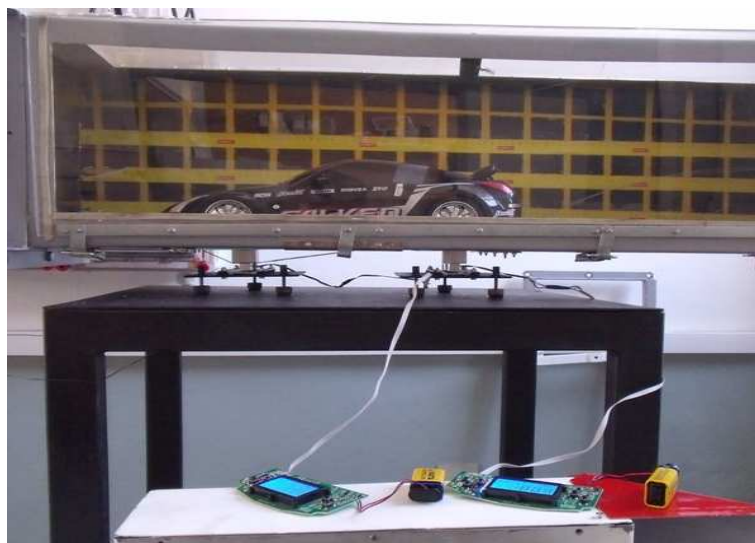
Kvůli odchylkám naměřených hodnot se zapisovaly hodnoty opět v určitém časovém intervalu, aby mohly být posléze zprůměrovány. Na obrázcích (*Obr. 36 a Obr. 37*), je zaznamenáno rozestavení tenzometrických vah při měření.



Obr. 35 - Tenzometrické váhy s nastavovacími šrouby

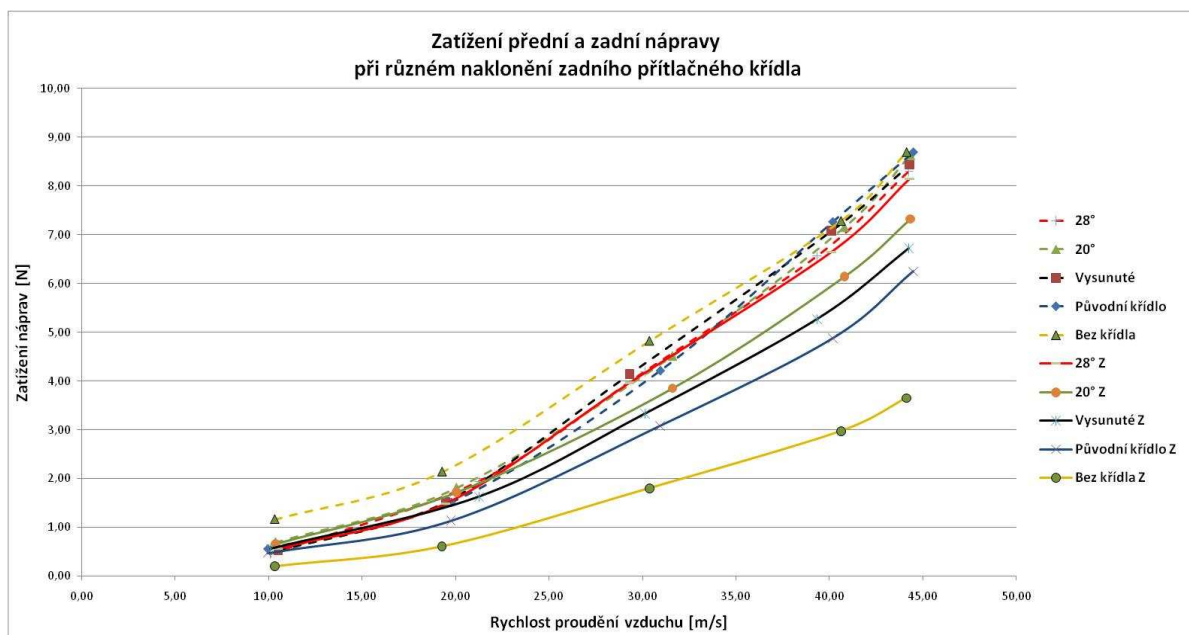


Obr. 36 - Měření aerodynamického přtlaku na nápravách



Obr. 37 - Pohled na tenzometrické váhy pod modelem

Naměřené hodnoty z experimentu jsou znázorněny v grafu (*Graf 2*). Výsledky jsou rozdělené na měření přední nápravy, (v grafu vyznačené čárkovaným stylem) a na výsledky naměřené u zadní nápravy (v grafu plný styl čar).



Graf 2 - Zatížení náprav v závislosti na rychlosti proudění

5.4.1 Vyhodnocení výsledků

Výstupem této experimentální části je graf (*Graf 2*), ze kterého je zřejmé, že zatížení přední nápravy je podobné u všech úprav modelu, toto zatížení je zapříčiněno působením obtékaného vzduchu na klínovitý tvar karoserie a přítomností předního přitlačného spoileru. U výsledků přitlaku zadní nápravy je vidět, že s vyšším nakloněním zadního přitlačného křídla roste její přitlak. Zajímavé je pak si povšimnout, že s rostoucí zátěží zadní nápravy klesá přitlak u přední nápravy, viz. (*Graf 2 - 28°*). Tento jev je způsoben momentem, který vzniká jako účinek síly proudícího vzduchu, působící na zadní křídlo.

Závěr

V experimentální části byla vyzkoušena možnost vizualizace proudění na obtékaném modelu pomocí kouře. Díky našemu úsilí jsme se dopracovali k výsledku, že tuto kouřovou metodu lze provádět i v tomto malém tunelu. Dále je ovšem potřeba ji řádně doladit a promyslet. Použít např. výkonnější výrobce mlhoviny, který by zajistil kouř v takovém množství, které by bylo dostačující pro více kouřových trysek a pro lepší vizualizaci při vyšších rychlostech vzduchu v tunelu.

O výsledcích C_x , z kapitoly pro měření aerodynamického odporu můžeme říci, že se jeho hodnoty moc neliší od skutečného modelu Nissan 350Z, kde je výrobcem uváděný koeficient aerodynamického odporu $C_x=0,29$. Musíme však brát v úvahu, že skutečný automobil má jiný průřez čelní plochy, protože náš model je tuningové úpravy, kde má díky vytaženým lemům, širším pneumatikám a nižší světlé výšce, větší průřez čelní plochy. Drobné odchylky v tabulce (*Tab. 1*), jsou způsobeny turbulencemi vznikající v tělese tunelu, protože tunel je čtvercového průřezu a v jeho stavbě jsou postrádány vzduchové usměrňovače, které by turbulence jistě zmenšily.

Z kapitoly měření aerodynamického přítlaku vyplývá, že při vyšší rychlosti větší přítlak na zadní nápravě nadzvedává přední nápravu, což by mohlo vést k nestabilitě vozidla. Při takovýchto sportovních úpravách automobilů, jako je např. zadní přítláčné křídlo je dobré si uvědomit, co vylepšené křídlo na automobilu změní. Vždy by se mělo takové vylepšení redukovat ještě nějakým jiným přítláčným prvkem, aby byla změna ku prospěchu celému vozidlu.

Na závěr bych chtěl dodat, že účinky obtékání vzduchu, které při jízdě působí na automobil, spolu úzce souvisí. Když zvětšíme úhel naklonění přítláčného křídla, bude se nadzvedávat přední náprava a koeficient aerodynamického odporu se zvýší díky většímu působení tlaku na křídlo a zvětšenému úplavu. Tím poroste aerodynamický odpor i spotřeba paliva vozidla. Proto je dobré, se při těchto změnách na karoserii, které nejsou jen na okrasu, poradit s odborníky na aerodynamiku.

Seznam použitých zdrojů

- [1] AERODYNAMIKA, *Historie* [online]. Poslední revize 17.4. 2011.
Dostupné z:
<<http://historieletectvi.xf.cz/aerodynamika.htm>>
- [2] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 17.4. 2011.
Dostupné z:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel>
- [3] TATRA, *Historie* [online]. Poslední revize 17.4. 2011. Dostupné z:
<<http://www.aerotatra.czweb.org/zacatky.htm>>
- [4] KOVANDA, B., KOVANDA J., *Aerodynamika vozidel*. Vydavatelství ČVUT, Praha 1999, ISBN 80-01-01942
- [5] VÁCLAV ŠŮLA, FRANTIŠEK ZEMÁNEK, *Tabulky mateatické, fyzikální a chemické*. Prometheus, ISBN 80-85849-84-4
- [6] ZAJÍC JAN, *FYZIKA II pro technické obory DFJP*, UNIVERZITA PARDUBICE, FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ, katedra fyziky, Pardubice 2008
- [7] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 17.4. 2011.
Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_%C4%8D%C3%ADslo>
- [8] AUTOLEXICON, *Aerodynamika* [online]. Poslední revize 17.4. 2011.
Dostupné z:
<<http://cs.autolexicon.net/articles/aerodynamika>>
- [9] STOCK CAR SCIENCE, *Nascar* [online]. Poslední revize 17.4. 2011.
Dostupné z:
<http://www.stockcarscience.com/blog/index.php/talladega_f09>
- [10] JANALÍK JAROSLAV, *Obtékání a odpor těles*. VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1911-2
- [11] MATOUŠEK VÁCLAV- *Přednáška ČVUT- Obtékání tuhého povrchu a pevné částice v kapalině* [online]. Poslední revize 17.4. 2011. Dostupné z:
<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/users/matousek/downloads/web_HY3V_12_Obt%C4%8Dk%C3%A1n%C3%AD_a_pevn%C3%A9_%C4%8D%C3%A1stice_v_kapalin%C3%A9.pdf>
- [12] WOLF-HEINRICH HUCHO (HRSG.), *Aerodynamik des automobils*, Springer-verlag Berlin-Heidelberg, Weisbadeb 2008, ISBN 978-3-528-03959-2
- [13] KATZ, J., *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Publishers 2006, ISBN 0-8376-0142-8
- [14] CHEVROLET, *Volt MPV5* [online]. Poslední revize 17.4. 2011. Dostupné z:
<<http://www.chevrolet.cz/vyzkousejte-chevrolet/koncepty-a-budouci-modely/volt-mpv5.html>>
- [15] OPEL FLEXTREME GT/E. *Automobil*. 2010, číslo 7
- [16] FRANTIŠEK VLK, *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*. Nakladatelství Vlk, Brno 2001 ISBN80-238-6573-0

- [17] FRANTIŠEK VLK, *Dynamika motorových vozidel*. Nakladatelství VLK, Brno 2000, ISBN 80-238-5273-6
- [18] AERODYNAMICKÉ LABORATOŘE GM. *Automobil*. 2010, číslo 5
- [19] BMW AVZ – AERODYNAMICKÁ STRATEGIE. *Automobil*. 2010, číslo 10
- [20] BMW GROUP FIZ/EVZ – VÁLNICE POD STŘECHOU. *Automobil*. 2010, číslo 8
- [21] QPRO TECHNIKA PROSTŘEDÍ, *Výpočet vlastností vzduchu* [online].
Poslední revize 17.4. 2011. Dostupné z:
<<http://qpro.cz/?id=Vlastnosti-vlhkeho-vzduchu>>

Prostudované literatury:

R.H. BARNARD, *Road Vehicle Aerodynamic Design*. Vydavatelství Addison Wesley Longman, Edinburgh Gate, 1996, ISBN 0-582-24522-2

KOREIS, J., KOREISOVÁ, G., BAYER, Z.: *Termomechanika a tepelné stroje*. UNIVERZITA PARDUBICE, Dopravní fakulta Jana Pernera. Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, 2009

