



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

AERODYNAMIKA ODKRYTÉHO KOLA

OPEN-WHEEL AERODYNAMICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VIKTOR BABINEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ ČAVOJ

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Viktor Babinec

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aerodynamika odkrytého kola

v anglickém jazyce:

Open-wheel aerodynamics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor aerodynamických vlastností odkrytého rotujícího kola pro formulové vozy a proudových struktur v jeho okolí, které ovlivňují další části vozu.

Cíle bakalářské práce:

1. Uveďte základní teorie obtékání odkrytého kola.
2. Popište rozložení tlaku na odkrytém rotujícím kole a tzv. jetting.
3. Na příkladech ukažte charakteristické tvary úplavu odkrytého kola a popište vírové struktury, které se v něm nacházejí, včetně jejich interakce.

Seznam odborné literatury:

- [1] SPROT, A.J. Open-Wheel Aerodynamics: Effects of Tyre Deformation and Internal Flow [online]. Durham, 2013. Dostupné z: <http://etheses.dur.ac.uk/7292/>. Doctoral Thesis. Durham University.
- [2] VAN DEN BERG, M.A. Aerodynamic interaction of an inverted wing with a rotating wheel [online]. Southampton, 2007. Dostupné z: <http://eprints.soton.ac.uk/49927/>. Doctoral Thesis. University of Southampton.
- [3] CRONER, E. et al. Aerodynamic characterization of the wake of an isolated rolling wheel. International Journal of Heat and Fluid Flow [online]. 2013, vol. 43, s. 233-243. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.04.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142727X13000829>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Čavoj

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Bakalárska práca je zameraná na posúdenie aerodynamických vlastností rotujúcich kolies pre formulové vozidlá. V tejto práci je opísaný charakter, vznik a vývoj prúdových štruktúr v jeho okolí, ktoré ovplyvňujú ostatné časti vozidla. Pre vytvorenie uceleného pohľadu na aerodynamické vlastnosti kolesa je nutné zahrnúť vplyvy pôsobiace na zmenu geometrie kolesa počas jazdy, ktorá výrazne mení charakter prúdenia. Medzi sledované vplyvy patria deformácia kolesa, jeho odklon, natočenie a výška nápravy.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika, koleso, úplav, rotácia, jetting fenomén

ABSTRACT

This bachelors thesis is focused on review of the aerodynamic characteristics of the rotating wheels for formula cars. This paper describes the nature, origin and development of flow structures in the wheel area, affecting other parts of the vehicle. To create a holistic view of the aerodynamic characteristics of the wheel, it is necessary to include impacts on changing wheel geometry while driving, which significantly changes the nature of the flow. Among the observed effects include deformation of the wheel, its camber, yaw and axle height.

KEYWORDS

aerodynamics, wheel, wake, rotation, jetting phenomena



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BABINEC, V. *Aerodynamika odkrytého kola*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 46 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Čavoj.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 28. května 2015

.....

Viktor Babinec



PODĚKOVÁNÍ

Týmto by som rád poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Ondřejovi Čavojovi za zaujímavý námet, užitočné rady a odbornú pomoc.



OBSAH

Úvod	10
1 Aerodynamika	11
1.1 Bernoulliho rovnica	11
1.2 Prúdnicia	12
1.3 Prúdové pole	12
1.3.1 Medzná vrstva	13
1.3.2 Odtrhnutie medznej vrstvy	13
1.3.3 Úplav	14
2 Obtekanie valca	15
2.1 Karmánová vírová cesta.....	16
2.2 Magnusov jav.....	17
2.3 Účinok obvodovej rýchlosti.....	17
3 Základné teórie obtekania kolesa	19
4 Charakter obtekania rotujúcich kolies	24
4.1 Rozloženie tlaku na povrchu kolesa	24
4.2 Jetting fenomén.....	26
4.3 Úplav za rotujúcim kolesom	27
4.3.1 Nestálosť prúdenia v úplave	29
4.3.2 Vrchné vírové štruktúry.....	30
4.3.3 Spodná oblasť separácie prúdenia	31
4.3.4 Spodná časť úplavu	32
5 Vplyvy na charakter úplavu.....	33
5.1 Výška nápravy	33
5.2 Odklon kolesa	33
5.3 Prúdenie cez stred kolesa.....	34
5.4 Natočenie kolesa	36
6 Aerodynamika deformovateľných kolies	37
6.1 Experimentálne merania pre deformovateľné koleso	39
6.1.1 Geometria 1	40
6.1.2 Geometria 2	41
6.1.3 Geometria 3	42
Záver.....	43
Zoznam použitých skratiek a symbolov	46



ÚVOD

Dizajn moderných formulových monopostov je ovplyvnený hlavne aerodynamikou, pričom sa kladie dôraz nielen na maximálnu rýchlosť, ale aj na prítlak a stabilitu monopostu. Veľké zlepšenie v časoch na okruhu môže byť dosiahnuté zaobľovaním karosérie a pridaním prídavných súčastí produkujúcich prítlak. Avšak kolesá na formulových monopostoch sú vystavené priamemu prúdeniu vzduchu, čo má neblahý vplyv na celkovú aerodynamiku. Kolesá nielenže produkujú vztlak, ale aj narúšajú prúdenie, ktoré vplýva na ostatné komponenty, čo ich vystavuje neoptimálnym podmienkam prúdenia. Z celkového pohľadu na aerodynamické charakteristiky formulových monopostov je zrejmé, že kolesá majú najväčší vplyv a zároveň sú pravdepodobne najmenej preskúmaná oblasť vozidla.

Formula 1 predstavuje vrchol v oblasti optimalizácie aerodynamiky a vývoja pretekárskeho monopostu. Už od jej začiatku v roku 1950 sa tímy snažili o zníženie odporu pri zachovaní dostatočného chladenia monopostu. Karoséria obopínala rám a motor monopostu, pokým kolesá zostali plne odokryté. Až v polovici šesťdesiatych rokov nastal zlom v chápaní aerodynamiky formule ako celku. Konštruktérske tímy si začali uvedomovať, že vytváraním prítlaku môže nastať rapídne zlepšenie časov na kolo. Zvýšená rýchlosť v zákrutách, stabilita a brzdné vlastnosti prevládli nad znižovaním prítlaku spôsobujúceho zvýšenie rýchlosti na rovinkách. Na monopostoch sa začali objavovať prítlačné krídla a následne aj rôzne aerodynamické zariadenia, z ktorých niektoré boli kvôli bezpečnosti zakázané. Až v modernej Formule 1 sa začal klásť veľký dôraz na vplyv kolies na celkovú aerodynamiku monopostu.

Aerodynamické nastavenia pretekárskeho vozidla je rozdielne pre jednotlivé trate, na ktorých sa jazdí. Závisí to na charakteristikách závodnej trate, ako napríklad počet a smer zákrut, priemerné rýchlosti alebo dĺžky rovínok. Výsledkom podrobnej štúdie okruhu je výber vhodného nastavenia aerodynamiky monopostu pri zachovaní vhodného pomeru medzi prítlakom a celkovým odporom monopostu.



1 AERODYNAMIKA

Aerodynamika sa zaoberá silovým pôsobením prúdiaceho vzduchu na teleso, v dôsledku čoho je teleso vystavené dynamickému pôsobeniu. Plyny ľahko podliehajú objemovým deformáciám a zmenám tvaru bez ohľadu na veľkosť pôsobiacej sily. Rozdiel vo vlastnostiach skupenstiev je spôsobený veľkosťou prítlačlivých medzimolekulárnych síl. Vzduch považujeme z pohľadu prúdenia za homogénne a izotropné spojité kontinuum [1].

Pre získanie komplexnej predstavy o pôsobiacich silách na teleso vyskytujúce sa v prúdovom poli, je potrebné presne zadefinovať charakteristiky prúdenia okolo sledovaného telesa. Stav prúdenia sa považuje sa plne určený, ak v každom bode prúdiacej tekutiny a v každom časovom momente je známa rýchlosť a základné stavové veličiny – tlak, hustota a teplota. Fyzikálne vlastnosti plynov závisia na základných stavových veličinách. Najdôležitejšími veličinami charakterizujúcimi prúdenie sú tlak p v jednotlivých miestach prúdového poľa a lokálna rýchlosť prúdu v . Tieto veličiny sú na sebe závislé podľa vzťahu [1]:

$$p \sim v^2 \quad (1)$$

Pre presnejšie zadefinovanie javov ovplyvňujúcich prúdenie nastáva snaha o vytvorenie čo najpresnejších simulácií sledovaných javov, pri ktorých sa kladie dôraz na overiteľnosť získaných výsledkov. Akákoľvek chyba alebo neprimerané zjednodušenie pozorovaného javu má výrazný vplyv na sledované charakteristiky, kvôli čomu môže nastať výrazný odklon od skutočnosti. Z takto získaného merania môžu vyplynúť úplne rozdielne výsledky. Prúdenie vzduchu možno nasimulovať v aerodynamických tuneloch alebo pomocou simulácií v CFD. Výpočty pomocou CFD musia byť optimalizované a následne overené simuláciami v aerodynamickom tuneli.

Z hľadiska správania sa kolies v prúdovom poli sú najvýznamnejšie aerodynamické faktory odpor a vztlak izolovaného kolesa. Dôraz sa kladie aj na popis úplavu, ktorý výrazne ovplyvňuje prúdenie okolo vozidla.

1.1 BERNOULLIHO ROVNICA

Je to základná rovnica mechaniky tekutín. Udáva vzťah medzi jednotlivými druhmi mechanickej energie, čím popisuje zákon zachovania energie. Slúži k určovaniu rýchlostí, tlakov a výšok v rôznych bodoch prúdenia. Zaťaženie aerodynamickými silami je závislé na rýchlosti prúdenia v blízkosti povrchu obtekaného telesa. Táto rýchlosť súvisí s veľkosťou tlaku na povrchu telesa. Z rovnice (2) vyplýva že vzduch akceleruje z oblasti s vyšším statickým tlakom do oblasti s nižším statickým tlakom. Pre ustálené prúdenie a ideálny prípad bez strát možno použiť Bernoulliho rovnicu popisujúcu vzťah medzi rýchlosťou prúdenia a tlakom na povrchu telesa v tvare [1]:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p = p_0 \quad (2)$$

kde $\frac{1}{2} \rho v^2$ označuje dynamický tlak vzduchu v danom mieste, p statický tlak a p_0 celkový tlak, ktorý sa vyskytuje v mieste s nulovou rýchlosťou. Každý člen predstavuje energiu vzťahnutú k jednotkovému objemu.



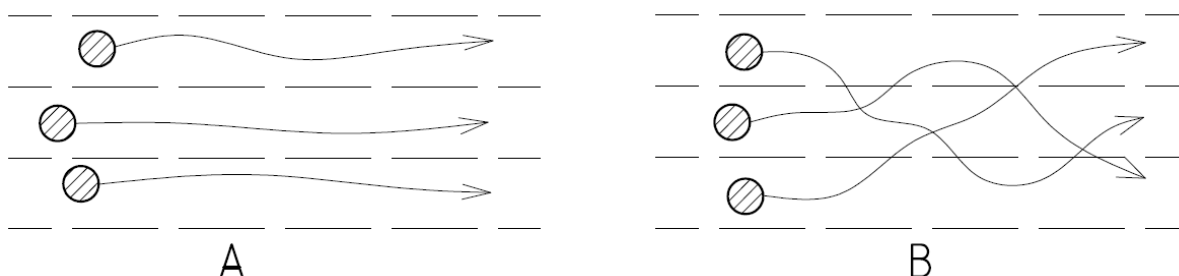
1.2 PRÚDNICA

Prúdnica je krivka, ktorej tangenta v ktoromkoľvek bode má rovnaký smer ako vektor rýchlosti v tomto bode. Je to dráha vybranej častice obtekajúcej tekutiny. Jej vizualizácia je v aerodynamických tuneloch vykonávaná pomocou dymu, bavlnených vlákien alebo novších technológií ako napríklad PIV.

Podľa tvaru prúdnic rozdeľujeme prúdenie na laminárne a turbulentné prúdenie.

Laminárne prúdenie (ustálené) – dráhy jednotlivých častíc tekutiny sú navzájom približne rovnobežné. Pohyb častíc prebieha v jednotlivých rovnobežných vrstvách, častice neinterferujú medzi jednotlivými vrstvami, ktoré sa vzájomne nemiešajú.

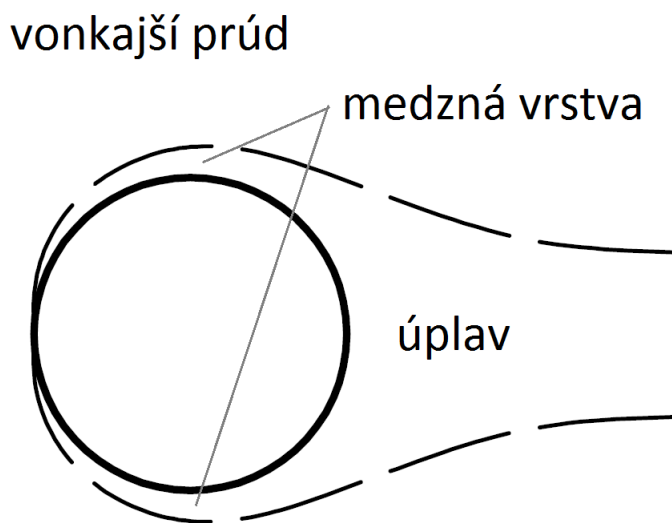
Turbulentné prúdenie (vírivé) – je to nestacionárne prúdenie. Jednotlivé častice menia rýchlosť počas svojho pohybu a prechádzajú medzi rôznymi vrstvami, čoho dôsledkom dochádza k premiešavaniu tekutiny. Častice konajú okrem posuvného pohybu aj pohyb zložitý, ktorý vedie k vzniku vírov.



Obr. 1 A) laminárne prúdenie , B) turbulentné prúdenie

1.3 PRÚDOVÉ POLE

Vzhľadom k vlastnostiam prúdenia možno reálne prúdové pole okolo obtekaného telesa rozdeliť na tri špecifické oblasti (viď obr. 2).



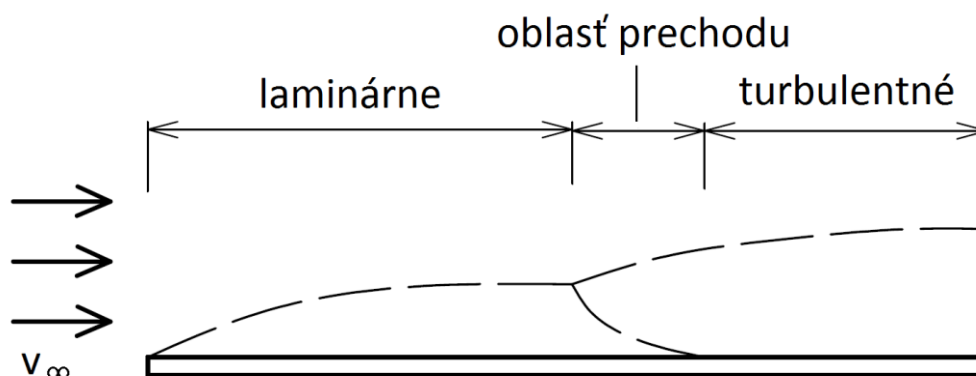
Obr. 2 Charakter prúdenia



1.3.1 MEDZNÁ VRSTVA

Medzná vrstva je vrstva prúdiacej tekutiny bezprostredne blízka obtekanému povrchu. Pri prúdení tekutiny sa pozdĺž stien obtekaného telesa prejavuje viskozita tekutiny. Vrstvy častíc v blízkosti povrchu telesa sú spomaľované trením medzi vrstvami, pričom častice v kontakte s povrchom telesa majú nulovú rýchlosť. Rýchlosť častíc plynu narastá až do rýchlosti pôvodného prúdu vzduchu. Časť kinetickej energie týchto častíc sa mení na teplo. Hrúbka medznej vrstvy smerom po prúde stále narastá, tým pádom do medznej vrstvy spadajú viacej častíc. Hrúbka medznej vrstvy závisí aj na Reynoldsovom čísle. Pri nízkych hodnotách Reynoldsovho čísla začína v prúdení prevládať vplyv viskozity, ktorej brzdiaci vplyv zasahuje ďalej do prúdového poľa, čím zväčšuje hrúbku medznej vrstvy [2].

Podľa rýchlostného profilu vnútri medznej vrstvy sa dá určiť, či sa jedná o laminárnu alebo turbulentnú medznú vrstvu. Zvyčajne medzná vrstva má laminárny charakter, pričom s narastajúcou vzdialenosťou od začiatku obtekaného telesa sa prúdenie v medznej vrstve mení na turbulentné. Pri turbulentnom charaktere medznej vrstvy zostáva v tesnej blízkosti povrchu stále laminárny charakter prúdenia. Prechod medzi laminárnym a turbulentným prúdením nenastáva skokovito, ale postupnými zmenami na určitej dĺžke (viď obr. 3). Táto oblasť sa nazýva prechodová oblasť prúdenia v medznej vrstve. Hodnota Re , pri ktorej nastáva prechod z laminárneho prúdenia na turbulentné sa nazýva kritické Reynoldsovo číslo. Jeho hodnota sa stanovuje experimentálne pre konkrétne prípady. Pre väčšinu prípadov pre vzduch sa uvažuje $Re_{krit} = 5 \cdot 10^5$ [1][2].



Obr. 3 Oblasť prechodu prúdenia na rovnej doske

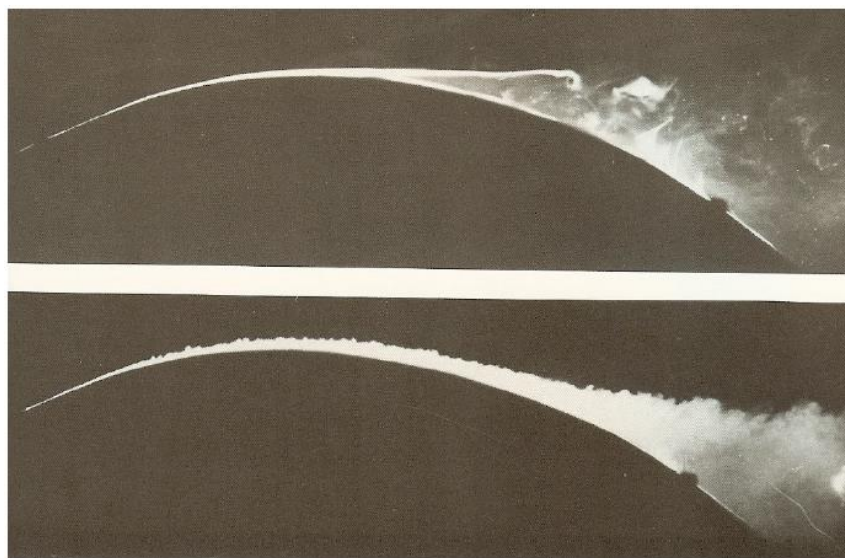
1.3.2 ODTRHNUTIE MEDZNEJ VRSTVY

Pri obtekaní zaoblených telies (napr. valec, guľa, letecký profil) dochádza k zmene rýchlosti na povrchu telesa, tým pádom sa mení aj tlak. V oblasti rastúceho tlaku sú častice spomaľované vnútorným trením a kladným tlakovým gradientom. Rýchlosť v medznej vrstve klesá, rýchlostný profil sa deformuje, až na rýchlostnom profile sa objaví inflexný bod, v ktorom sa častica zastavuje. Následne nastáva odtrhnutie medznej vrstvy od steny a v blízkosti povrchu obtekaného telesa vzniká spätné prúdenie a vytvára sa množstvo vírov.

Na to, či sa medzná vrstva odtrhne a v ktorom mieste, má vplyv tlakový gradient pozdĺž povrchu telesa a charakter prúdenia. Turbulentná medzná vrstva sa odtrhne neskôr ako laminárna. Turbulentná medzná vrstva je odolnejšia voči odtrhnutiu, čo je zrejmé z tvarov rýchlostných profilov. Častice z horných vrstiev prenikajú do oblasti bližšie k obtekanému povrchu a čiastočne kompenzujú straty kinetickej energie. Obr. 4 poukazuje na rozdielnu



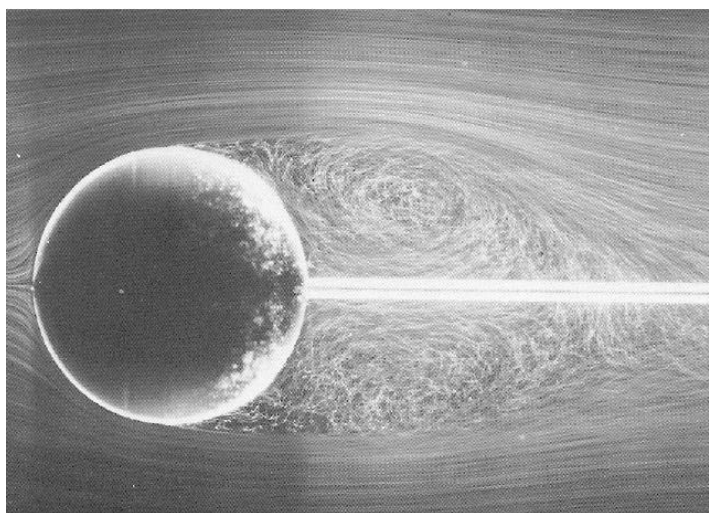
polohu separácie medznej vrstvy pre laminárny a turbulentný charakter medznej vrstvy pri zachovaní rovnakých podmienok [2].



Obr. 4 Separácia laminárnej a turbulentnej medznej vrstvy [3]

1.3.3 ÚPLAV

Úplav je oblasť prúdenia za obtekaným telesom, ktorú tvoria častice z medznej vrstvy a z odtrhnutého prúdu. Keď je teleso obtekané bez odtrhnutia medznej vrstvy, úplav je tvorený časticami medznej vrstvy telesa. V tomto prípade sa v úplave nenachádzajú spätné prúdenia, jedná sa len o pokračovanie spojených medzných vrstiev. Charakter úplavu je približne rovnaký pre turbulentnú a laminárnu medznú vrstvu. Pri turbulentnej vrstve sa rýchlejšie rozširuje úplav a skôr sa vyrovnáva rýchlosť. Úplav za obtekanými telesami s odtrhnutou medznou vrstvou má rozdielny charakter. Spadajú doňho častice z medznej vrstvy a z odtrhnutého prúdenia. Na zadnej strane telesa je podtlak, ktorý sa postupne vyrovnáva na hodnoty okolitého tlaku. V úplave sa vytvárajú výrazné vírivé a spätné prúdenia (vid' obr. 5), ktoré môžu viesť až k vzniku nestability [2].



Obr. 5 Úplav za telesom tvaru gule [3]



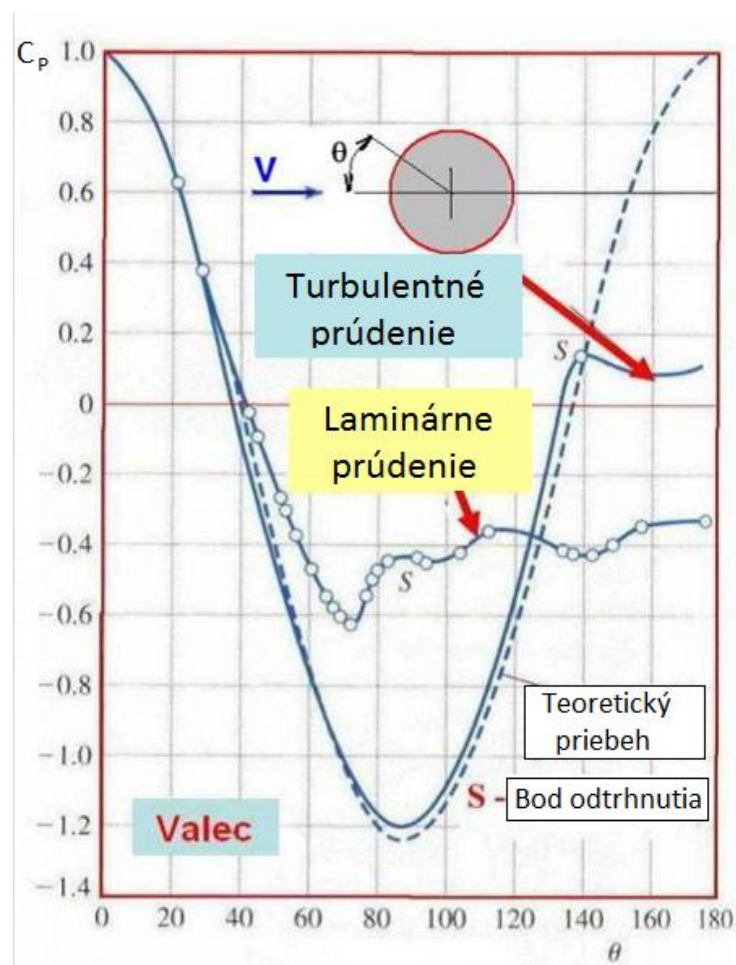
2 OBTEKANIE VALCA

Vzhľadom na podobnosť geometrie valca a kola, možno valec považovať za jeho zjednodušený model, pričom majú podobné rysy prúdenia. Valec je teleso s jednoduchou geometriou a z hľadiska obtekania je jeho chovanie podrobne preskúvané pre malé a aj veľké hodnoty Reynoldsovo čísla. Výsledné charakteristiky prúdenia vychádzajú hlavne z oblého tvaru a absencii ostrých hrán. Tento základný tvar vytvára veľkú zónu úplavu za valcom a nestabilné prúdové vzory.

Pre prúdenie s $Re < 2$ okolo nekonečne dlhého valca, v nekonečne veľkom priestore, za predpokladu, že vektor rýchlosti prúdenia je kolmý na os valca, pre súčiniteľ odporu je stanovená rovnica [2]:

$$c_x = \frac{8\pi}{Re \cdot (2,002 - \ln(Re))} \quad (3)$$

kde Re – je Reynoldsovo číslo. Rovnica (3) platí pre $Re < 0,5$, ale používa sa až do hodnôt $Re < 2$. Pre vyššie hodnoty Reynoldsovo čísla sú hodnoty súčiniteľa odporu určené experimentálne [2].



Obr. 6 Tlakový profil pri obtekaní valca [2]



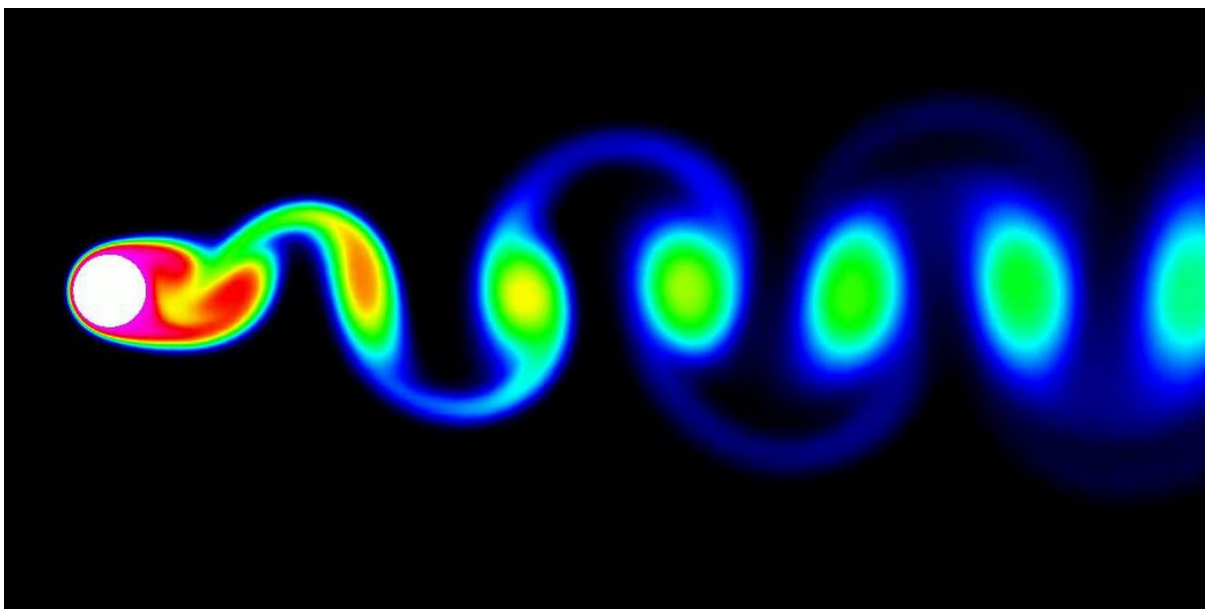
Tlakový profil za valcom pre ideálnu tekutinu má symetrický priebeh, nevzniká žiadny odpor, čo ale nekorešponduje so skutočnosťou (viď obr.6). Viskozita hrá výraznú rolu pri obtekaní valca reálnou tekutinou. Vývoj prúdenia určuje hodnota Reynoldsovho čísla. Laminárne prúdenie sa výrazne líši od turbulentného. Skôr nastáva odtrhnutie prúdenia, čo zväčšuje oblasť úplavu za valcom.

2.1 KARMÁNOVÁ VÍROVÁ CESTA

Za obtekaným valcom dochádza k odtrhnutiu medznej vrstvy a za telesom sa vytvára úplav. Pri malých hodnotách Re je stabilný a neodtrháva sa. Zvyšovaním Reynoldsovho čísla úplav začína byť nestabilný a následne sa odtrháva od povrchu telesa a je unášaný v smere prúdenia. V dôsledku malých odchýlok a nepresností nastáva odtrhnutie víru striedavo, najprv z jednej strany a potom z druhej. Tento jav, ktorý má za následok vznik rady vírov za valcom, sa nazýva Karmánová vírová cesta.

Vznik a charakter Karmánovej vírovej cesty je závislý od Reynoldsovho a Machovho čísla. Prúdenie okolo valca je rozdelené na niekoľko režimov, ktoré sú definované charakteristickými vlastnosťami medznej vrstvy, úplavu a miesta bodu oddelenia. Hodnota Re , pri ktorej nastáva jej vznik, je väčšia ako 6,23. Pre Machovo číslo blížiacie sa 1, sa z úplavu vytráca periodicita a víry sa odtrhávajú nepravidelne [2].

Odtrhávanie vírov za obtekaným valcom spôsobuje periodické zmeny rýchlostného a tlakového poľa, čoho dôsledkom odporová sila nie je konštantná, ale má pulzujúci charakter s danou frekvenciou odtrhávania vírov. Pri riešení niektorých praktických úloh je dôležité brať do úvahy frekvenciu odtrhávania vírov, ktorá by nemala mať rovnakú hodnotu ako vlastná frekvencia valca.



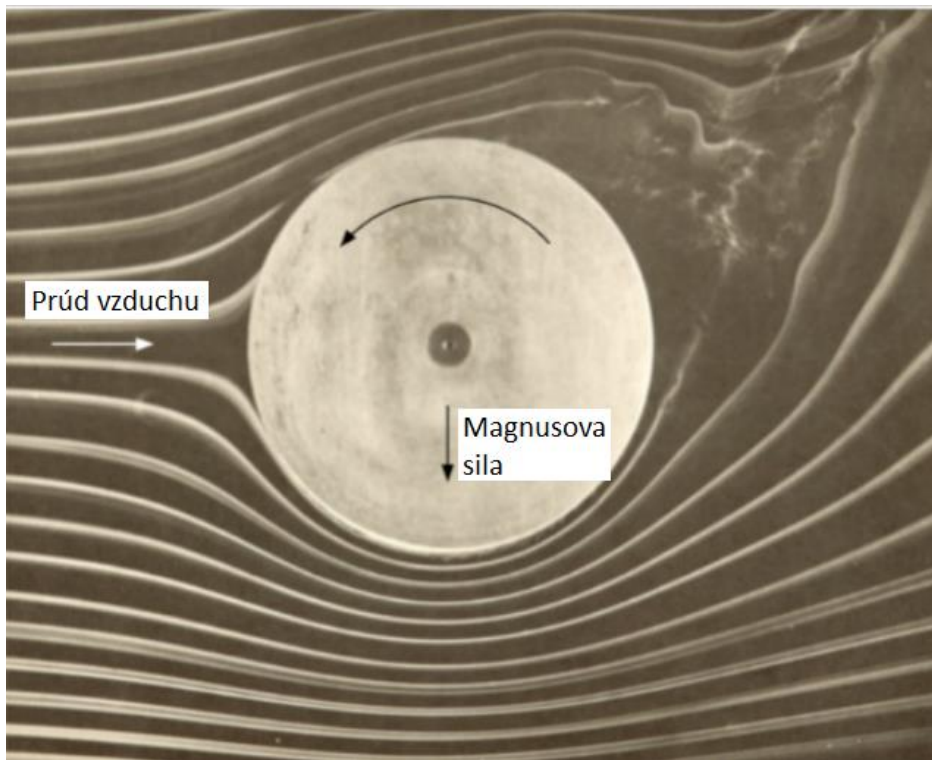
Obr. 7 Vyobrazenie Karmánovej vírovej cesty [4]



2.2 MAGNUSOV JAV

Magnusov jav sa objavuje vo viacerých aplikáciách v aerodynamike. Rôzne príklady zahŕňajú aj oblasti, akými sú šport alebo armáda, kde tento jav vysvetľuje zakrivenie dráhy letiacej lopty alebo projektilu.

Pri obtekaní rotujúceho valca vzniká cirkulácia vzduchu, ktorá usmerňuje prúdenie do smeru, v ktorom rotuje valec. V tejto oblasti sa zvyšuje rýchlosť vzduchu, čoho dôsledkom poklesne tlak a vzniká bočná tlaková sila nazývaná Magnusová sila. Táto sila je kolmá na rýchlosť prúdenia okolitého vzduchu a závisí na rýchlosti rotácie objektu, jeho posuvnej rýchlosti a na rozmeroch valca [2].

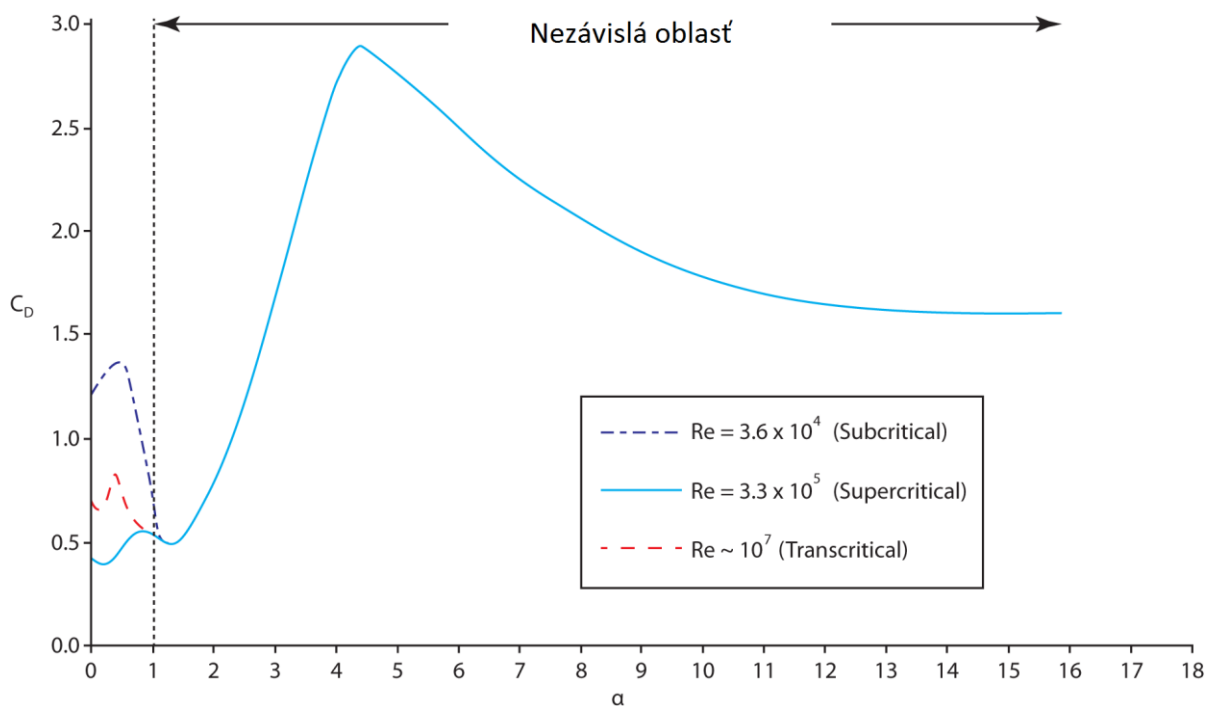


Obr. 8 Zobrazenie Magnusovho javu pomocou prúdnic [3]

V prípade, keď valec rotuje smerom dopredu, podobne ako u kolesa, v spodnej časti valca sa vytvára oblasť nízkeho tlaku, čoho dôsledkom je generovaný prítlak. Avšak tento efekt možno len ťažko použiť na popis aerodynamiky kolesa. Hneď, ako nastane kontakt medzi kolesom a cestou, vzduch prestane prúdiť pod ním. Namiesto toho je vzduch nútený prúdiť ponad alebo okolo kolesa, čím vytvára oblasť nízkeho tlaku na vrchnom povrchu rezultujúcu vo vznik vztlaku.

2.3 ÚČINOK OBVODOVEJ RÝCHLOSTI

Závislosť koeficientu odporu rotujúceho valca na pomere obvodovej rýchlosti valca k rýchlosti neovplyvneného prúdenia je rozdelená do dvoch oblastí (viď obr. 9). Na oblasť závislú a nezávislú na Reynoldovom čísle. Pomer obvodovej rýchlosti valca k rýchlosti neovplyvneného prúdenia nazývame α .



Obr. 9 Koeficient odporu rotujúceho valca v závislosti na pomere α [5]

Prvá oblasť, v ktorej je obvodová rýchlosť na povrchu menšia ako rýchlosť okolitého prúdenia, je vysoko závislá na Reynoldsovom čísle, kde nastáva úplný rozdiel v tvare úplavových štruktúr, v odporovej a vztlakovej sile pre subkritickú, superkritickú a transkritickú oblasť. Keď pomer obvodovej rýchlosti valca k rýchlosti neovplyvneného prúdenia sa blíži k jednej ($\alpha = 1$), aerodynamické koeficienty jednotlivých režimov prúdenia vzájomne konvergujú a vytvárajú zjednotené prúdové pole, ktoré nie je závislé na režime prúdenia. Ak pri meraní neuvažujeme preklzavanie, koleso rotuje rovnakou obvodovou rýchlosťou ako rýchlosť neovplyvneného prúdenia [5].



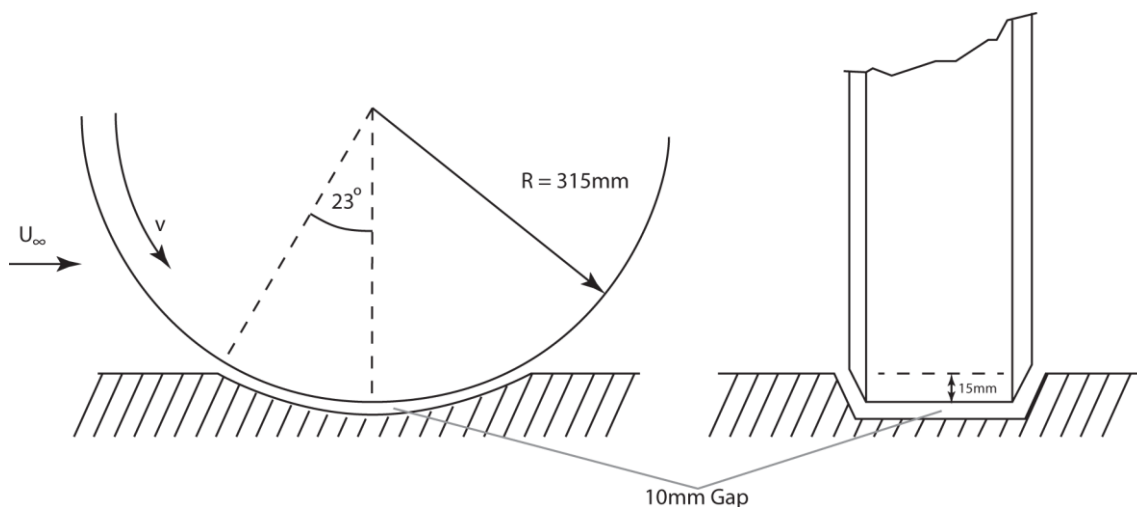
3 ZÁKLADNÉ TEÓRIE OBTEKANIA KOLESA

V motoršporte sú kolesá jedným z mála komponentov, ktoré takmer nemožno prispôbovať aerodynamickým potrebám, pričom výrazne ovplyvňujú celkové prúdenie vzduchu okolo vozidla a vytvárajú výraznú časť celkového odporu. Pneumatiky sú navrhované iba na jeden účel, ktorým je zaistiť prenos výkonu z motora na cestu pri udržaní maximálnej trakcie. Tvarovanie diskov predstavuje jednu z možností zlepšenia aerodynamických vlastností kolies.

Prvé štúdie popisujúce obtekanie okolo odkrytých rotujúcich kolies boli uverejnené v druhej polovici 60. rokov 20. storočia, čo je skoro 20 rokov po vzniku Formuly 1. Kvôli viacerým limitujúcim faktorom a predpokladom, či zjednodušeniam robeným pri týchto štúdiách, niektoré nezodpovedajú moderným metódam aerodynamického testovania, preto ich výsledky nemožno považovať za správne. Prvé merania sa týkali prúdenia okolo valcov, čo bolo výrazné zjednodušenie. Preto výsledky nie je možné použiť pre aerodynamiku kolesa.

Následne bolo vykonaných viacero pokusov zameraných na zmeranie aerodynamických síl pôsobiacich na koleso v kontakte s podkladom. Pri meraní sa používali dve základné metódy určovania aerodynamických síl, a to priama a nepriama. Priama metóda využíva na meranie aerodynamických síl aerodynamické váhy. Problém pri tejto metóde nastáva kvôli vzniku neznámej a premennej kontaktnej sily pôsobiacej medzi kolesom a podkladom. Vznikajú ťažkosti s presným určením vztlakovej sily, pretože kontaktná sila je k nej rovnobežná a tým ovplyvňuje merania. Druhou metódou je nepriama metóda, ktorá meria tlak na povrchu. Vo vnútri kolesa sú umiestnené elektronické meracie zariadenia, ktoré pomocou merania tlaku na povrchu, odvodí aerodynamické sily pôsobiace na koleso. Aj keď táto metóda rieši problematiku kontaktných síl, nastáva problém s vloženíím vysoko citlivej elektroniky dovnútra rýchlo rotujúceho kolesa [6].

Prvú významnú štúdiu v oblasti aerodynamiky kolies spracoval Morelli [7]. Avšak zjednodušenia spravené v tejto práci viedli k viacerým nesprávnym záverom. Keďže toto meranie bolo vykonané priamou metódou, nebolo možné zmerať celkový vztlak vytvorený kolesom, pretože súčasťou síl pôsobiacich na koleso je reakčná sila medzi kolesom a podlahou, ktorá má meniaci sa charakter. Toho dôsledkom navrhol Morelli experimentálny postup, pri ktorom posadil koleso na nižšiu hladinu a do stacionárnej podlahy vyrezal oblasť, aby sa koleso nedotýkalo podlahy (viď obr. 10).

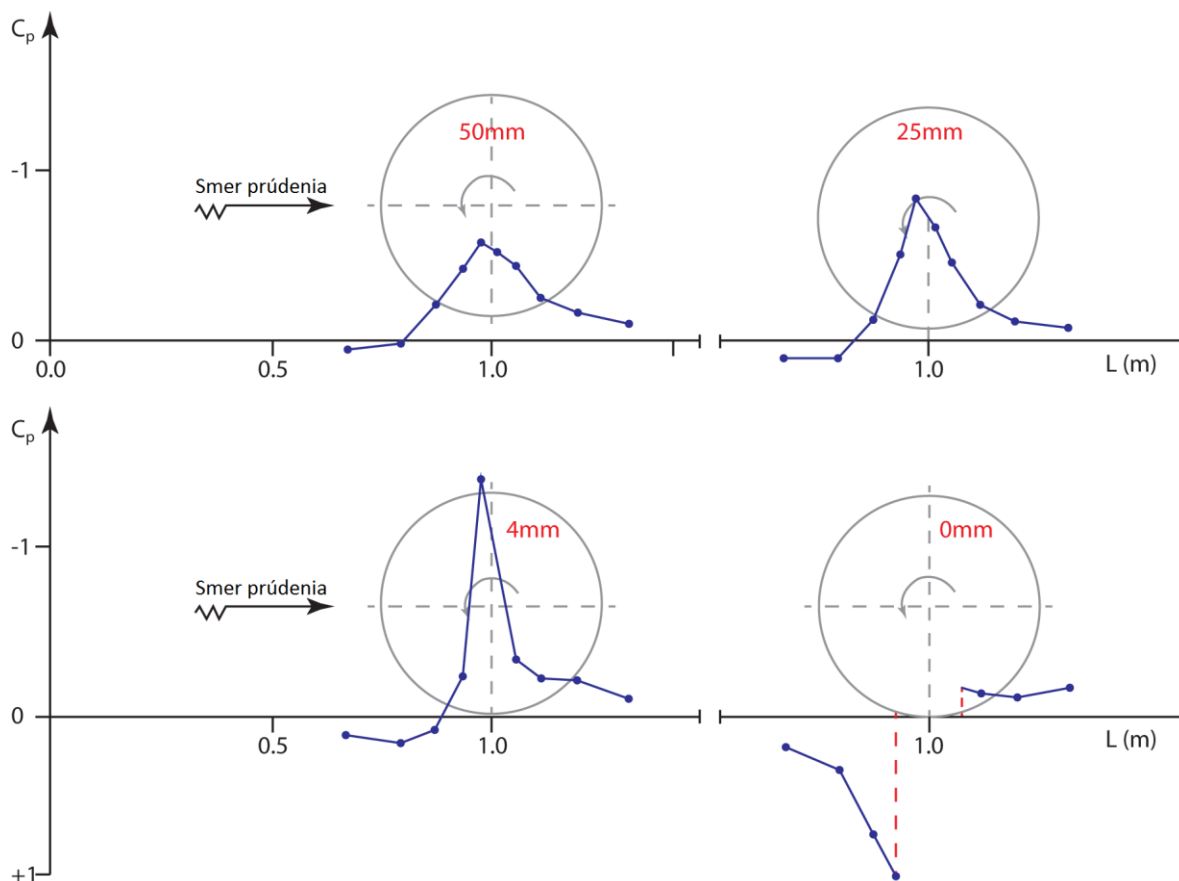


Obr. 10 Experimentálny postup meraní podľa Morelliho [7]



Pri tomto zjednodušení nastávajú zásadné problémy. Pod kolesom sa vytvára medzera, v ktorej venturiho efekt urýchľuje prúdenie vzduchu, čo spôsobuje zníženie tlaku pod kolesom. Čoho dôsledkom môže vzniknúť prítlak. Aby mohol byť vytvorený priestor pod kolesom, musela byť použitá stacionárna podlaha, čo nie je akceptovateľné pre testovanie rotujúceho kolesa, lebo nemôžeme zanedbať vplyv medznej vrstvy na vozovke.

Na Morelliho prácu nadviazal Cogotti [8], ktorý vo svojej práci vyšetril rozloženie tlaku pri rozdielnych vzdialenostiach medzi kolesom a podlahou. Potvrdil pôsobenie venturiho a magnusovho efektu vytvárajúcich prítlak v blízkosti podlahy.



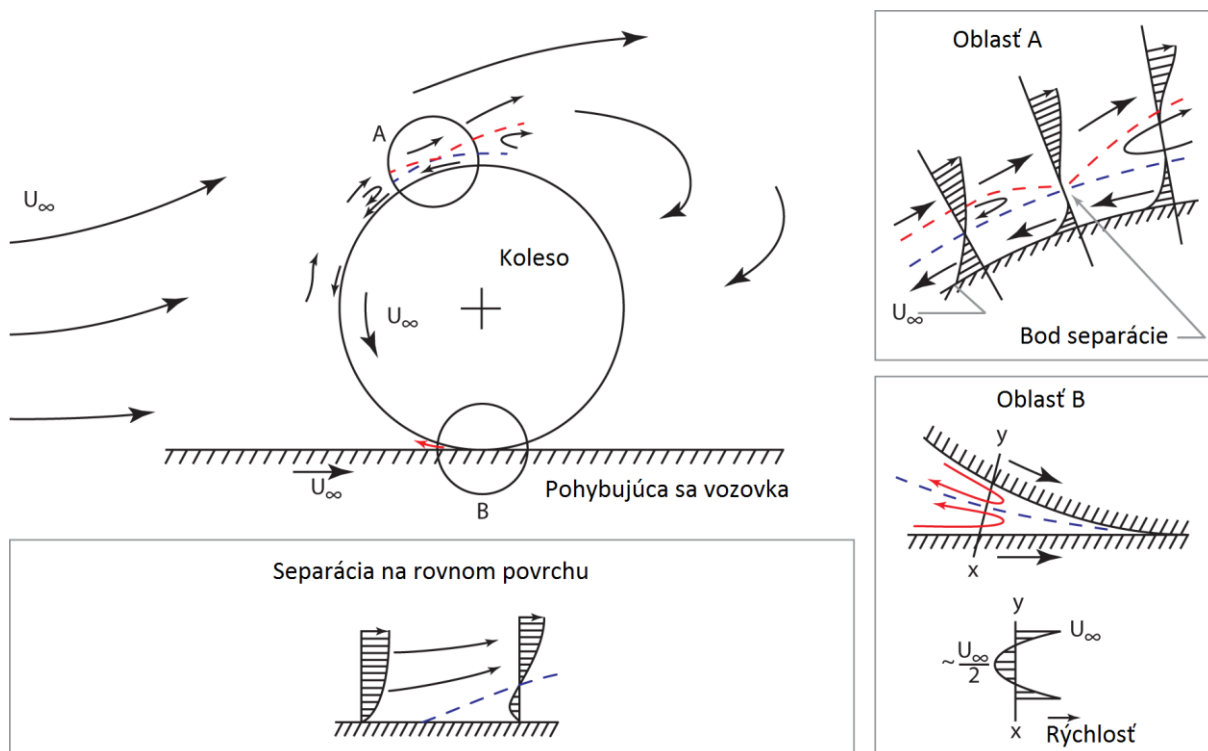
Obr. 11 Rozloženie tlaku pre rôzne vzdialenosti medzi kolesom a podkladom [8]

Zmenšovaním medzery medzi kolesom a podkladom sa zvyšuje pôsobenie venturiho javu (viď obr. 11). Pod kolesom sa zvyšuje rýchlosť prúdenia a znižuje tlak, čo má za dôsledok nárast celkového prítlaku. Avšak pri úplnom dosadnutí kolesa na podklad nastáva opačný jav. Tesne pred kontaktnou plochou kolesa a podkladu vzniká oblasť vysokého tlaku, ktorá má za následok zväčšenie vztlaku kolesa.

Fackrell a Harvey [9] vypracovali prvú štúdiu zaberajúcou sa meraním aerodynamických síl a tlakov nepriamou metódou. Merania prebiehali s pohybujúcim sa podkladom a potvrdili výsledky z predchádzajúcich prác. Vo svojej práci predpokladal a následne overil vznik maxima tlaku, približne $C_p = 2$, tesne pred kontaktnou plochou kolesa s podkladom. Tento jav vysvetlili vznikom efektu viskózneho pumpy, ktorá vytvára víry na krajoch kolesa, nazývané jetting. Tento jav pokladali za unikátny pre prúdenie okolo rotujúceho kolesa, pričom má



výrazný vplyv na okolité prúdenie. Ďalej sledovali hodnoty tlaku v úplave. Výsledky ich výskumov majú vysokú výpovednú hodnotu ešte aj v dnešnej dobe.



Obr. 12 Charakter prúdenia, ktoré zdefinovali Fackrell a Harvey [9]

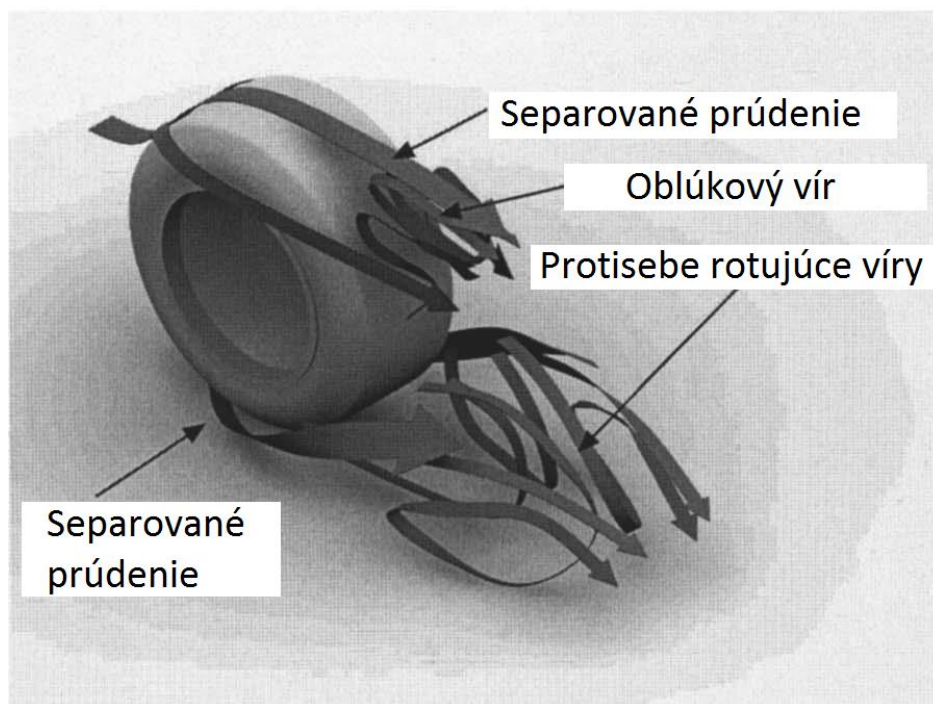
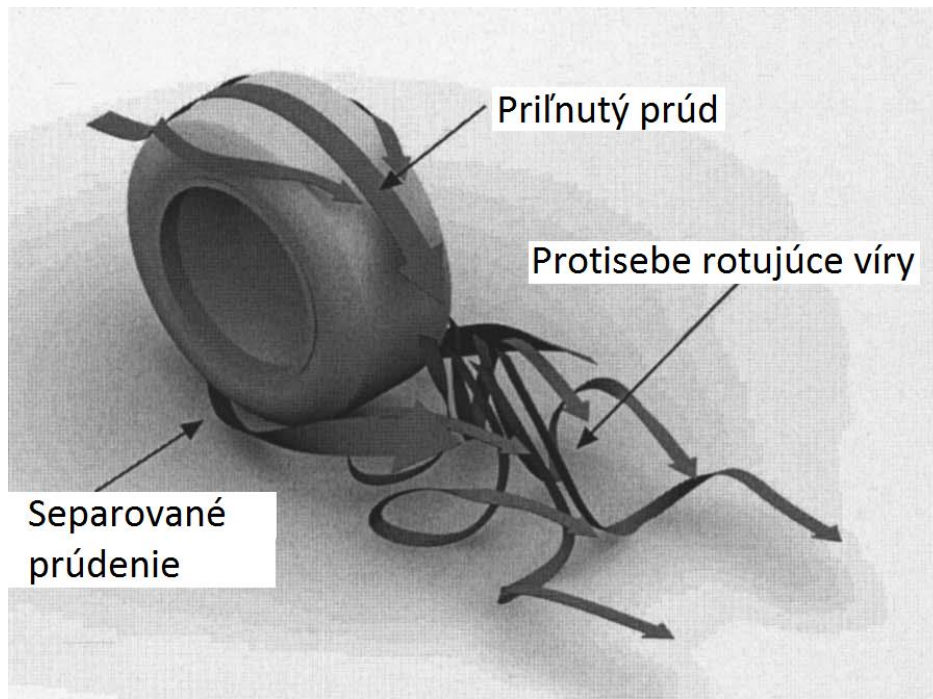
Príchodom výpočtovej techniky schopnej počítať zložité problematiky metódy konečných prvkov sa začalo rozširovať používanie CFD simulácií v aerodynamike. Tento trend výrazne uľahčuje riešenie aerodynamických úloh. Znižujú sa náklady potrebné na simulácie a čas strávený v aerodynamických tuneloch. Keďže sa jedná o numerický výpočet, je potrebné CFD simuláciu optimalizovať a overiť pomocou dát z aerodynamického tunela. Použitie CFD prinieslo nový pohľad na porozumenie aerodynamiky kolies. Ich pomocou možno dosiahnuť detailné vizualizácie prúdenia okolo izolovaných kolies alebo kolies umiestnených v podbehu pre rozličné charakteristiky prúdenia.

Medzi významnejšie práce sledujúce chovanie rotujúceho kolesa patrí štúdia vypracovaná Mearsom [10]. Pri experimentálnom skúmaní ako aj pri CFD modeli bol použitý rovnaký 40% model kolesa. Testovanie prebiehalo pre rotujúce a statické koleso s použitím pohybujúcej sa a statickej vozovky. Tlak na povrchu kolesa bol meraný pomocou systému rádiovkej telemetrie, ktorý posielal informácie z rotujúceho kolesa priamo do počítača. Zameril sa na sledovanie priebehu prúdových polí a nestálych prúdových štruktúr v úplave za kolesom. Vo svojej práci potvrdil Fackrell a Harveyho predpoklad vzniku jetting fenoménu pred kontaktnou plochou kolesa. Pomocou CFD výpočtu predpokladal vznik jetting fenoménu aj za kolesom, čo následne overil aj meraním pomocou PIV.

McManus a Zhang [6] vo svojej práci skúmali prúdenie okolo izolovaného kolesa v kontakte s vozovkou pomocou CFD výpočtu metódou URANS. Pri svojich výpočtoch vychádzali z práce Fackrella a Harveyho, pričom použili rovnakú reprezentáciu geometrie kolesa. Pri výpočtoch brali do úvahy dva prípady a to statické koleso na statickej vozovke a rotujúce koleso na pohyblivej vozovke. Podrobne opísali prúdové štruktúry na izolovanom kolese a charakter



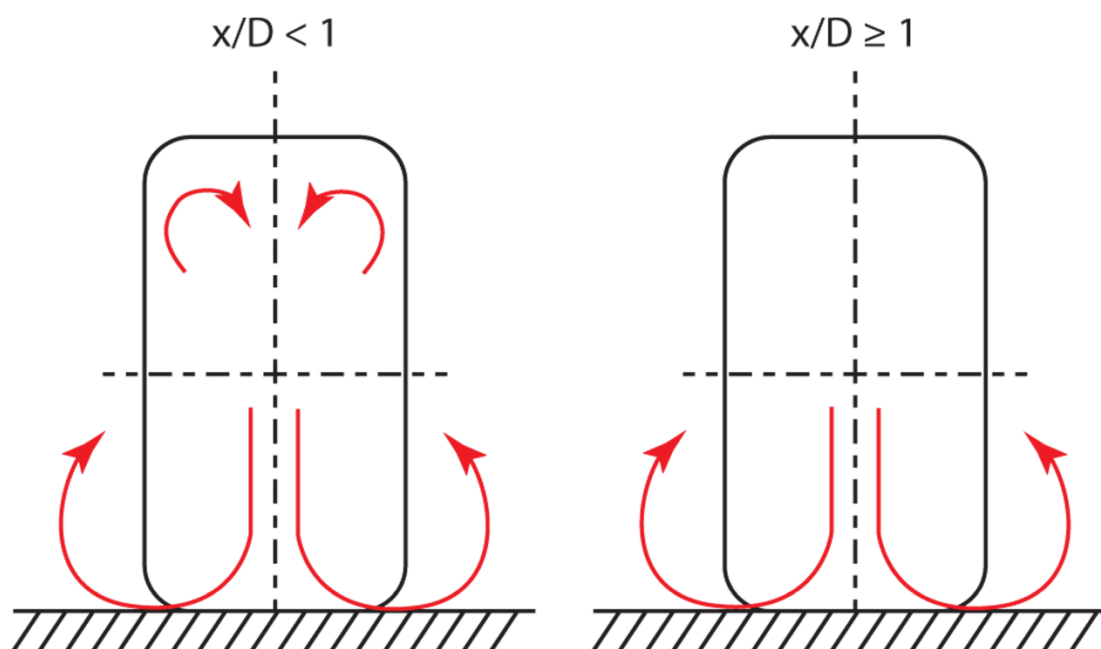
úplavu. Výsledkom ich práce je podrobná analýza a porovnanie obtekania statického a rotujúceho kolesa. Vytvorili detailný schematický diagram prúdových štruktúr (vid' obr. 13) a poukázali na vznik oblúkového víru na hornej strane kolesa na rozdiel od príľnutého prúdenia sledovaného pri statickom kolese.



Obr. 13 Charakteristické črty prúdenia pre (a) statické a (b) rotujúce koleso [6]



Saddlington a spol. [11] vytvorili jednotnú teóriu vývoja prúdenia založenú na ich vlastných experimentoch. Pri meraniach používali 50% model kola vychádzajúci z geometrie pneumatík vo F1. Zostava kola bola prepracovaná do detailov a zahŕňala nedeformovateľnú pneumatiku z uhlíkových vlákien, detailnú repliku závodného náboja, brzdového kotúča a tehlice. Ich hlavný výsledok sa týkali centrálnej časti a prízemných vírov, ktoré vytvárajú úplav tvaru obráteného T, pričom zohľadnili prúdenie cez centrálnu časť kola okolo náboja a brzdového kotúča. Tento úplav bol mierne asymetrický, pretože prúdenie bolo na jednej strane ovplyvnené úchytom kola. Ďalej po prúde od kola sa neobjavujú žiadne známky vrchných vírových štruktúr a prúdeniu dominujú spodné víry, ktoré sa rozširujú smerom po prúde.



Obr. 14 Štruktúry prúdového poľa podľa Saddlingtona [11]



4 CHARAKTER OBTEKANIA ROTUJÚCICH KOLIES

Kolesá vozidla vytvárajú približne 30 až 40% celkového odporu vozidiel a výrazne ovplyvňujú celkové prúdenie okolo monopostu. Rotácia samostatného kolesa vďaka Magnusovmu javu zapríčiňuje menší koeficient odporu a koeficient tlaku ako u stacionárneho. Prúdenie okolo kolies predstavuje komplexný nestály fenomén obsahujúci veľké oblasti odtrhnutia medznej vrstvy, vznik úplavu a vírových štruktúr. Z dôvodu veľkej komplexnosti študovanej problematiky je nesmierne ťažké presne zadefinovať sledované javy. Táto problematika sa vyznačuje veľkým množstvom premenných veličín, ktoré zásadne ovplyvňujú prúdenie. Medzi tieto patria napríklad pomer medzi priemerom a šírkou kolesa, tvar dezénu, natočenie alebo sklon rotujúceho kolesa. Dôležitú úlohu zohráva aj zaoblenie hrán pneumatík, ktoré má výrazný vplyv na prúdenie vzduchu za kolesom [12].

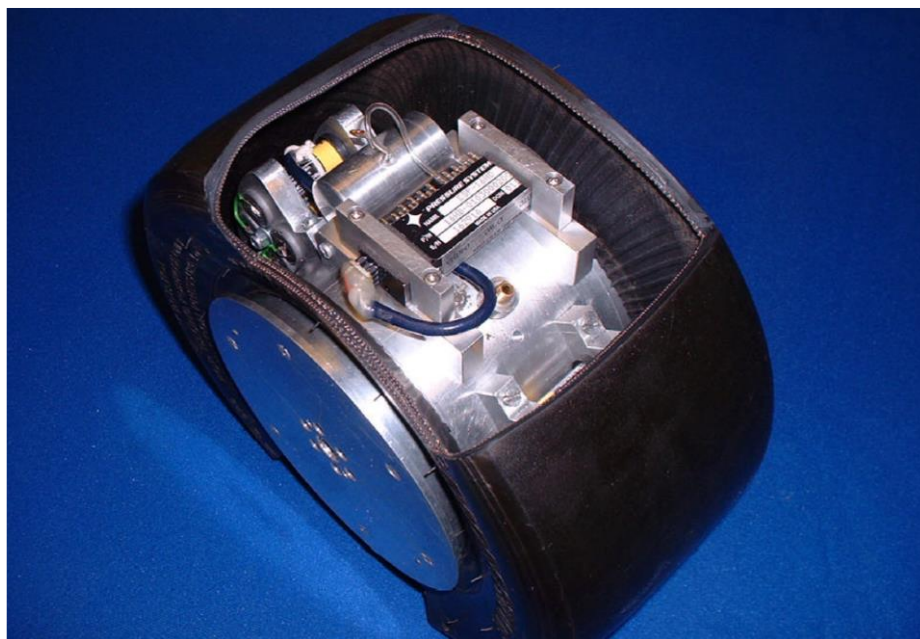
Koeficient odporu má sklon k zvyšovaniu sa so zväčšujúcim pomerom priemeru kolesa k jeho šírke. Tento fakt sa dá vysvetliť znížením tlaku za objektom pri zvýšení pomeru strán. Kvôli konečnej šírke kolesa vznikajú javy na jednotlivých koncoch kolesa a prúdenie po stranách kolies nemôže byť zanedbané ako v prípadoch meraní s dvojdimenzionálnym systémom.

Dôležitým faktorom pri aerodynamických meraniach je aj vplyv režimu prúdenia. Viac publikovaných prác poukazuje na potrebu použitia superkritického režimu prúdenia pri prebiehajúcich simuláciách. Potom je prúdenie v podstate rovnaké ako v reálnom prípade, pokiaľ ide o miesto prechodu medznej vrstvy na turbulentnú. Pre pretekárske autá to zodpovedá hodnotám od $Re = 4 \cdot 10^5$ do $Re = 4 \cdot 10^6$. Pre testovanie polovičného modelu dosahujúceho dvojnásobné rýchlosti vzduchu ako v reálnom prípade, je to nedosiahnuteľné v bežnom aerodynamickom tuneli. Avšak v prípade vzduchu prúdiaceho ponad rotujúce koleso, superkritická oblasť Reynoldsovho čísla je dosiahnuteľná a tento región zahŕňa celý rozsah rýchlostí charakteristických pre pretekárske vozidlá [12].

4.1 ROZLOŽENIE TLAKU NA POVRCHU KOLESA

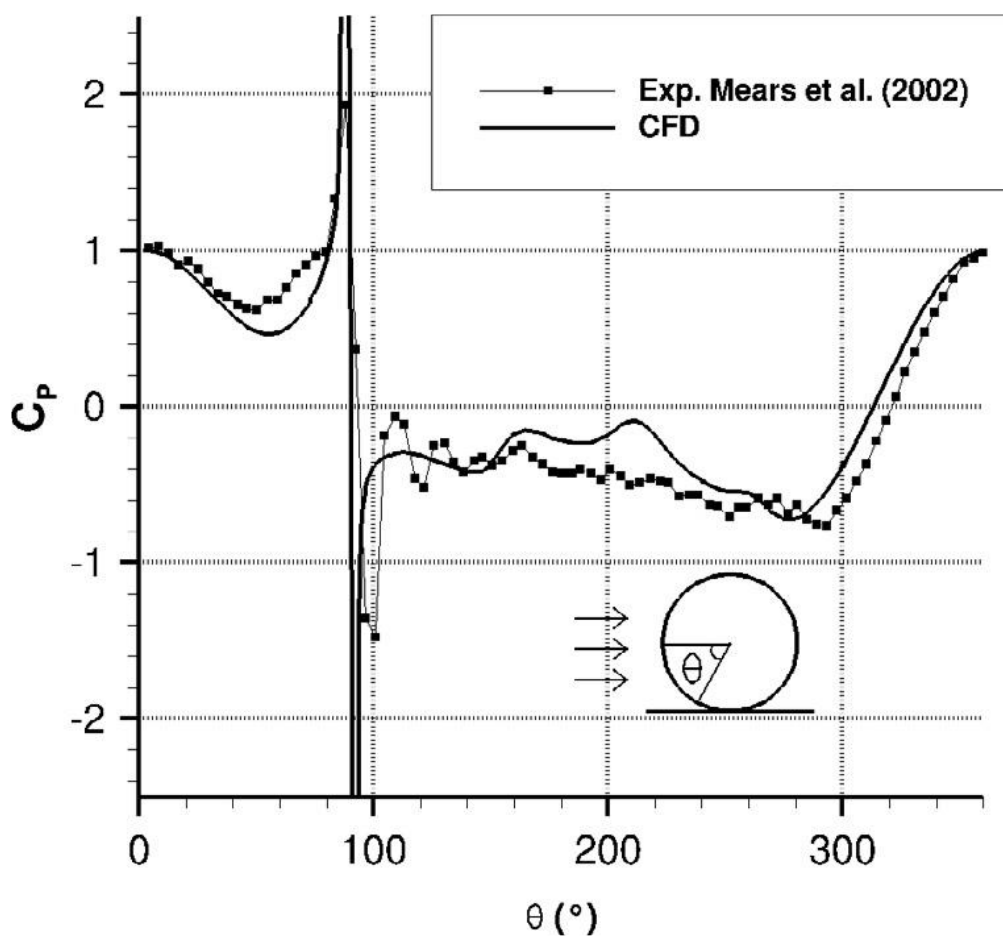
Rozloženie statického tlaku je považované za najlepší spôsob stanovenie aerodynamického vztlaku rotujúceho kolesa. Celkový vztlak možno získať pomocou integrácie rozloženia tlaku na celom povrchu rotujúceho kolesa. Touto metódou možno získať veľmi presné hodnoty, ktoré nie sú ovplyvnené interakciou rotujúceho kolesa s vozovkou.

Používajú sa rozličné metódy pre určenie rozloženia tlaku, pričom senzory na meranie tlaku sú umiestnené priamo v rotujúcom kolese. Na prenos dát v reálnom čase sa môžu používať infračervené vysielacie a prijímače, ktoré posielajú nespracované dáta priamo zo sensorov. Ďalšou možnosťou je umiestnenie meracieho systému priamo do vnútra kolesa, ktoré zaznamenáva tlak na dátové úložisko alebo posiela informácie pomocou systému rádiovkej telemetrie. Prenos nameraných dát v reálnom čase umožňuje okamžitú analýzu a spracovanie dát bez potreby prerušenia experimentu.



Obr. 15 Systém rádiovkej telemetrie použitý Mearsom z Univerzity v Dunhame [10]

Rozloženie priemerného tlakového koeficientu C_P pozdĺž povrchu kola je na obr. 16, ktorý poukazuje na charakteristické rysy vznikajúce pri obtekaní kola.



Obr. 16: Rozloženie tlakového koeficientu C_P podľa meraní Mearsa [10]



Pri izolovanom rotujúcom kolese v kontakte s pohybujúcou sa podlahou rozloženie tlaku merané na povrchu koleasa vytvára dve hlavné špecifiká prúdenia. Prvé sa vytvára pred kontaktnou plochou ($\theta=90^\circ$), kde rotujúce koleso a pohybujúca sa podlaha pôsobia ako viskózna pumpa a nastáva tu zvýšenie tlakového koeficientu, ktorý môže dosiahnuť hodnôt okolo $C_p = 2$. Za kontaktnou plochou vzniká oblasť nízkeho tlaku, ktorá súvisí s efektom viskózneho pumpy [13].

Druhý fenomén poukazuje na fakt, že separácia medznej vrstvy od povrchu koleasa na vrchnej strane nastáva skôr pri rotujúcom kolese ako pri stacionárnom. Pri rotujúcom kolese nastáva separácia pri $\theta=270-280^\circ$ a pri statickom je to približne o 10 až 20° menej. Oblasť oddelenia medznej vrstvy od vrchnej strany koleasa je jednou z charakteristík používaných pre overovanie numerických výpočtov pomocou CFD. Nepresný predpoklad miesta oddelenia medznej vrstvy môže viesť k výrazným nezrovnalostiam medzi dátami nameranými počas experimentu v aerodynamickom tuneli a numerickým výpočtom [13].

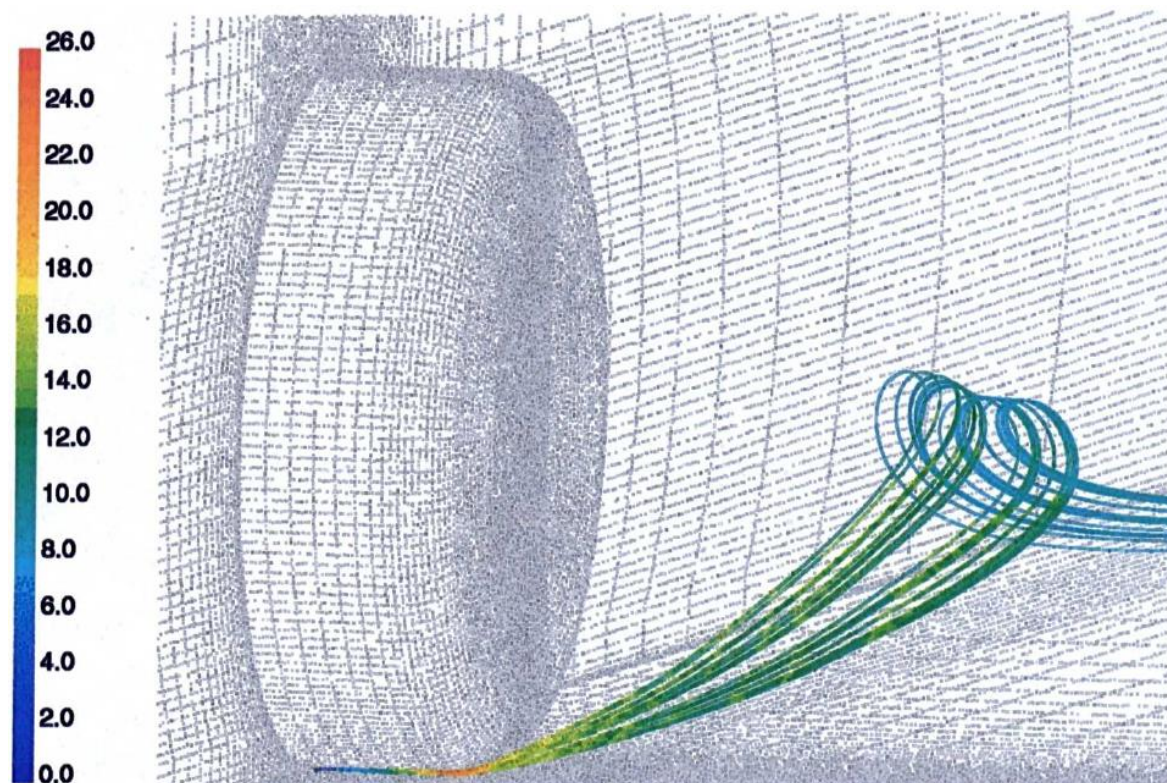
Pre $\theta \leq 90^\circ$, tlakový koeficient naznačuje oblasť zníženého tlaku s lokálnym minimom pri hodnotách približne $\theta=60^\circ$. Oblasť medzi $100-270^\circ$ je silno nestabilná a objavuje sa tu fluktuácia tlaku. Táto oblasť sa nachádza v úplave za kolesom a je silno ovplyvnená vírovými štruktúrami a recirkulačnými oblasťami [13].

V bode stagnácie prúdenia je rýchlosť prúdenia na povrchu koleasa nulová. Pre prípad rotujúceho koleasa sa bod stagnácie prúdenia nachádza tesne pod najprednejším bodom na kolese, v blízkosti $\theta=5^\circ$. Tento posun smerom bližšie k podkladu je zapríčinený rotáciou koleasa, ktoré strháva prúdenie v smere rotácie [13].

4.2 JETTING FENOMÉN

Predný jetting fenomén sa dá experimentálne sledovať na priebehu rozloženia statického tlaku na povrchu koleasa, kde tesne pred kontaktnou plochou koleasa a pohybujúcej sa vozovky vzniká maximum statického tlaku. Medzi kolesom a pohybujúcou sa vozovkou je vzduch výrazne stláčaný a medzné vrstvy koleasa a vozovky sú spájané do jednej, čím je od koleasa a vozovky pridávaná ďalšia energia do prúdenia, ktorá zvyšuje celkový tlak, čo vedie k lokálne zvýšenému koeficientu C_p . Prúd vťahovaný pohybujúcimi sa povrchmi do tejto oblasti je usmernený a odklonený smerom do strán vo forme viskózných prúdov. Tento jav sa správa ako viskózna pumpa, ktorá stláča vzduch a usmerňuje ho do strán. Prúd vzduchu vytváraný v tejto oblasti smeruje rovnobežne s osou koleasa a následne je unášaný hlavným prúdením po stranách kolies. Výsledkom je zníženie vztlaku pôsobiaceho na koleso v porovnaní s nekonečne dlhým kolesom, kde stláčaný vzduch nemá možnosť uniknúť do strán [14].

Podľa predpokladu opačný jav k prednému jetting fenoménu by mal existovať tesne za líniou kontaktu, kde by sa mala nachádzať oblasť s nižším statickým tlakom. Podobne ako v oblasti pred kolesom, kde sú medzné vrstvy spájané, v oblasti za kolesom by sa medzné vrstvy mali vzdialovať a znížiť statický tlak v blízkosti línie kontaktu, pretože vzduch je vťahovaný z tejto oblasti vzniknutými medznými vrstvami kvôli viskóznemu efektu. Znížený tlak za rotujúcim kolesom by mal strhávať prúd vzduchu z bočných strán kolies. Avšak podľa experimentálnych meraní sa zdá, že z bočných strán kolies nesmeruje žiadne prúdenie za kontaktnú oblasť koleasa. Z toho vyplýva, že táto oblasť by mala byť zásobovaná vzduchom pochádzajúcim z úplavy [14].

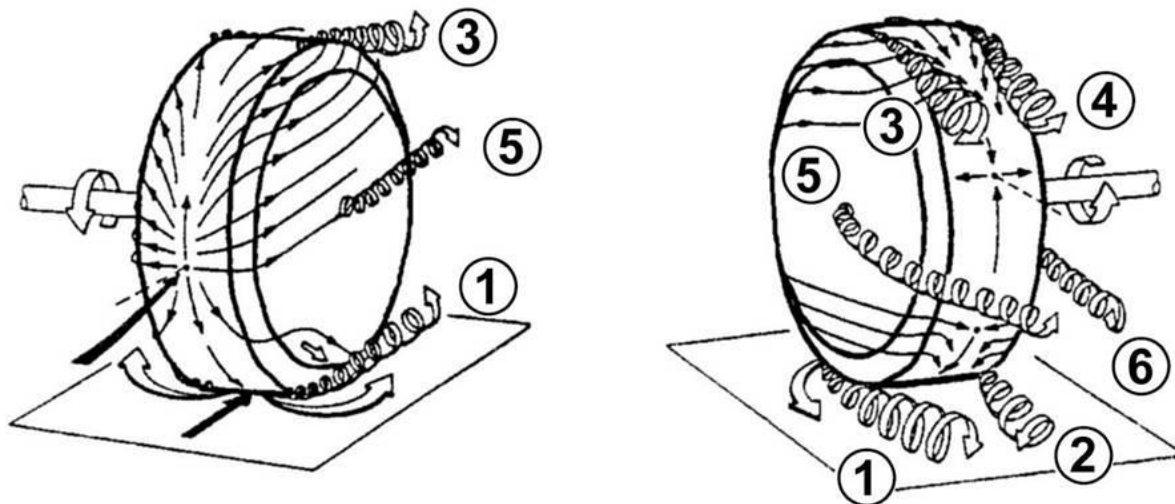


Obr. 17 Prúdnice pochádzajúce z jetting fenoménu v prednej časti kontaktnej plochy [14]

Zadný jetting fenomén je predpokladom, ktorý výrazne ovplyvňuje základné chápanie mechanizmu vytvárania úplavu za rotujúcim kolesom a má praktický význam v porozumení strhávania prúdenia pohybujúcimi sa telesami. Tento jav sa len veľmi ťažko experimentálne potvrdzuje, keďže ide iba o malú oblasť. Sťažuje to aj výrazná zložitosť meraní v blízkosti pohyblivej vozovky.

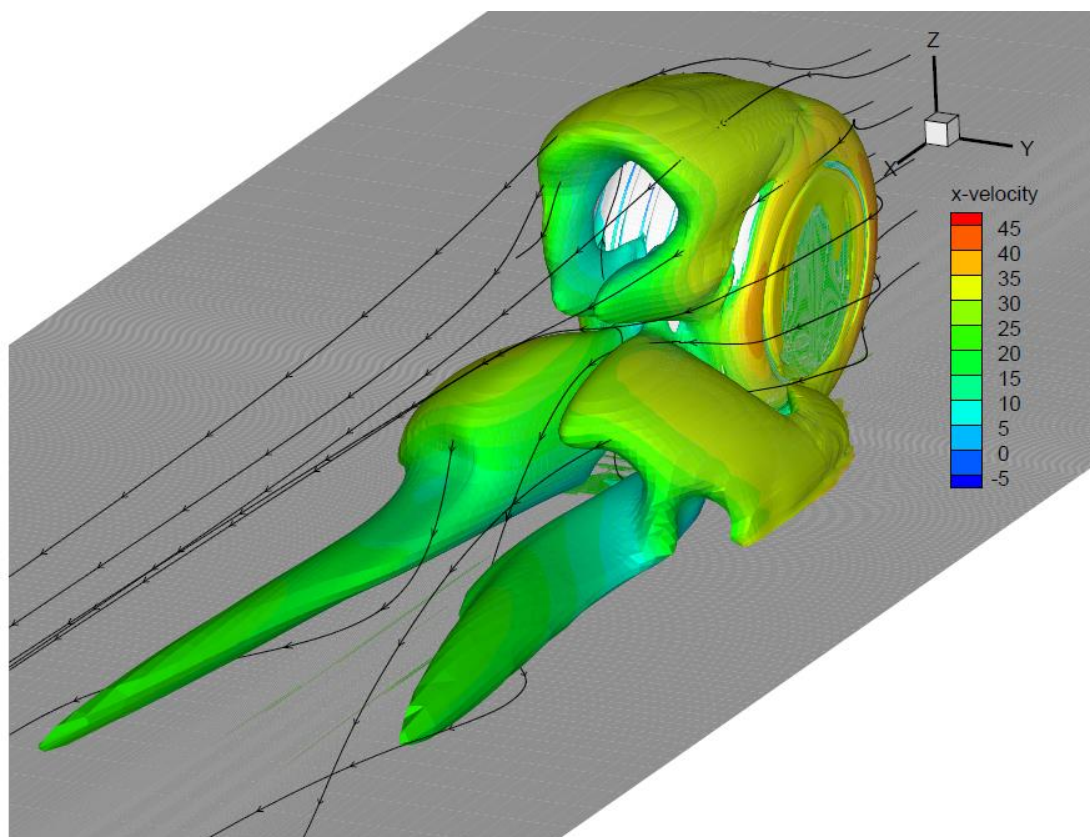
4.3 ÚPLAV ZA ROTUJÚCIM KOLESOM

Úplav vznikajúci za rotujúcim kolesom je závislý na viacerých faktoroch akými sú tvar kolesa, pomer výšky a šírky kolesa, Reynoldsovo číslo a rýchlosť prúdenia. Z meraní v aerodynamickom tuneli a z CFD výpočtov viacerých na sebe nezávislých autorov vyplývajú základné vlastnosti úplavu. Výskumom bolo dokázané, že rotujúce koleso za sebou vytvára vyšší a užší úplav ako statické. Vyšší úplav je indikátorom skoršieho bodu separácie medznej vrstvy ako je poukázané v rozložení tlaku na povrchu kolesa. Zúženie je nečakaný jav, pretože podľa predpokladu by jetting pred kontaktnou plochou kolesa s podkladom mal spôsobiť rozšírenie úplavu v blízkosti povrchu [6][15].



Obr. 18 Charakteristické vírové štruktúry [10]

Základné rozloženie úplavu pozostáva z troch párov proti sebe rotujúcich vírov (viď obr. 18). Po jednom páre na vrchnej (3,4) a spodnej časti kolesa (1,2) a posledný pár sa pochádza z dutiny pre čap kolesa (5,6). Pričom vírové štruktúry za rotujúcim kolesom sú podstatne slabšie ako tie za stacionárnym. Jednotlivé štruktúry sú závislé na viacerých faktoroch a pre rôzne geometrie kolesa sa môžu výrazne líšiť. Na vrchnej strane sa môže vytvárať jeden oblúkový vír namiesto vírovej dvojice (viď obr. 19) [13].

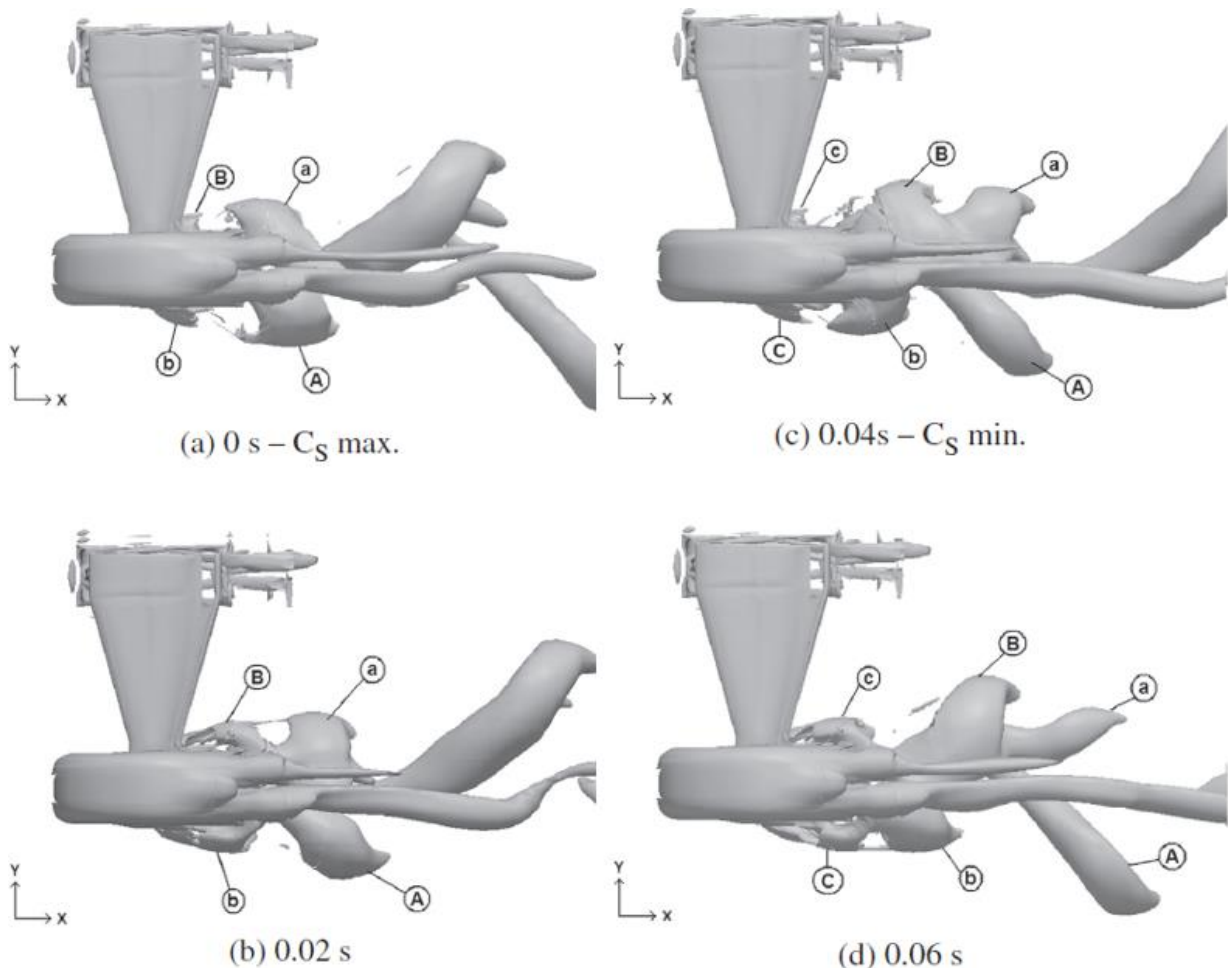


Obr. 19 Priestorová reprezentácia úplavu vypracovaná pomocou CFD [13]



4.3.1 NESTÁLOSŤ PRÚDENIA V ÚPLAVE

Úplav rotujúceho kolesa má pomerne nestály charakter a prúdenie v ňom podlieha zmenám podľa ich harmonickej frekvencie. Časová analýza úplavu počas jednej periódy so zodpovedajúcou frekvenciou, je vyobrazená na obr. 21. Veľké písmená značia dominantnú štruktúru medzi ľavou a pravou stranou. Poukazuje to na spôsob, akým sa vytvárajú úplavové 3D vírové štruktúry a na prepojenosť úplavového víru tvaru podkovy s jetting fenómom [15].



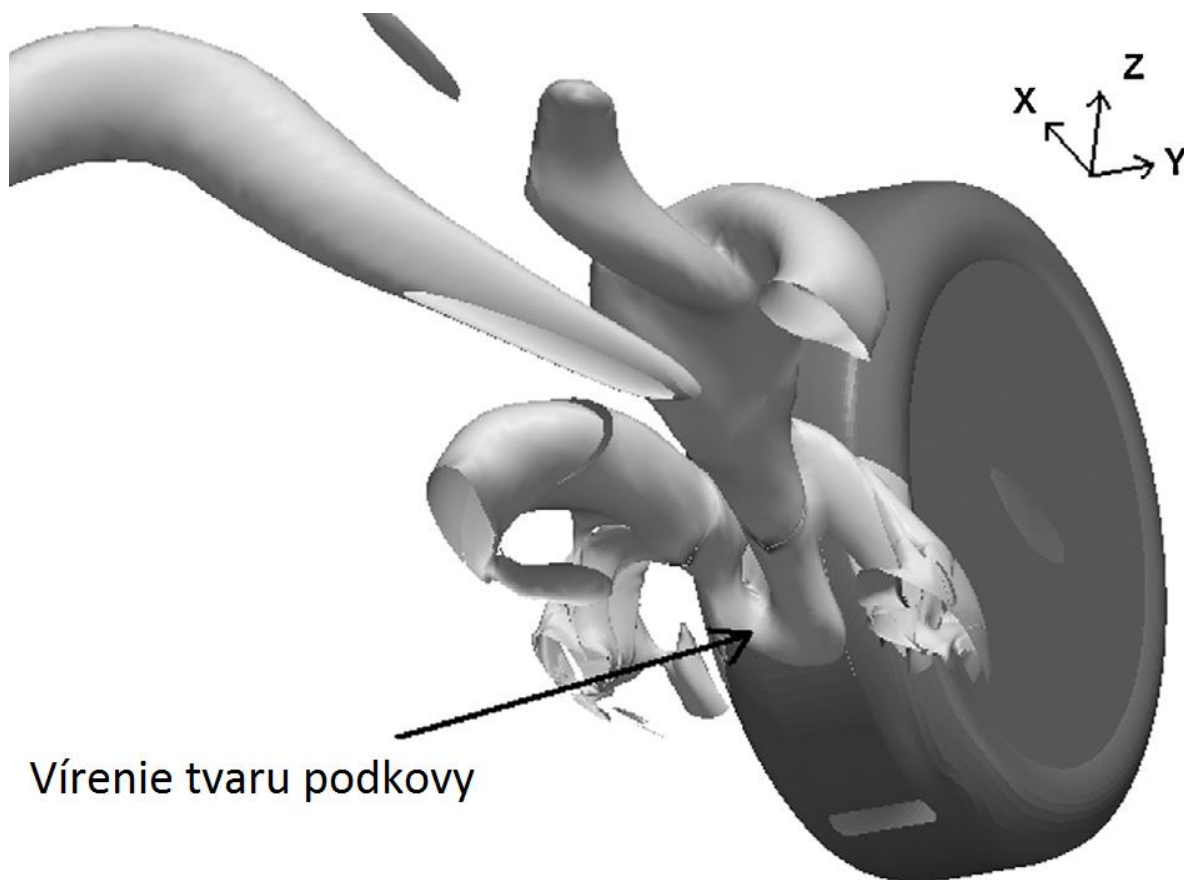
Obr. 20 Zmena tvaru úplavu v závislosti na čase [15]

Pri $t = 0$ s štruktúry **A** a **a** nadväzujú na vír tvaru podkovy (viď obr. 21), ktorý sa nachádza za kontaktnou plochou kolesa, pričom jetting fenomén vytvára víry **B** a **b**. V nasledujúcom kroku **B** a **b** začínajú interagovať s nestálou zónou základne kolesa. Keď tieto štruktúry splynú do úplavu, spoja sa do nového víru tvaru podkovy a zdôrazní sa prevaha **B**. V tom čase sa začínajú vytvárať víry **C** a **c** produkované jettingom. Ako výsledok, sú v úplave vytvorené veľké 3D štruktúry interakciou medzi kvázi-symetrickými štruktúrami pochádzajúcimi z jettingu a nestáleho prúdenia okolo základne kolesa [15].

Z nestálosti úplavu vyplýva aj zmena aerodynamických koeficientov v závislosti na čase. Priebeh koeficientov pre vztlak a odpor je silno vzájomne previazaný. Maximálnej hodnote odporu kolesa zodpovedá minimálny vztlak. Súvisí to s časovou zmenou vírových párov spodnej časti úplavu, ktorá je najviac nestabilná. Znížením tlaku za kolesom sa zníži celkový vztlak kolesa a zvýši jeho odpor. Toto sa dosahuje zväčšením rýchlosti prúdenia v tejto oblasti.



Maximálny aerodynamický koeficient odporu zodpovedá momentu, keď víry pochádzajúce z oblasti prúdového fenoménu vzájomne pôsobia s vírom tvaru podkovy, čím sa zvýši hustota prúdových štruktúr.

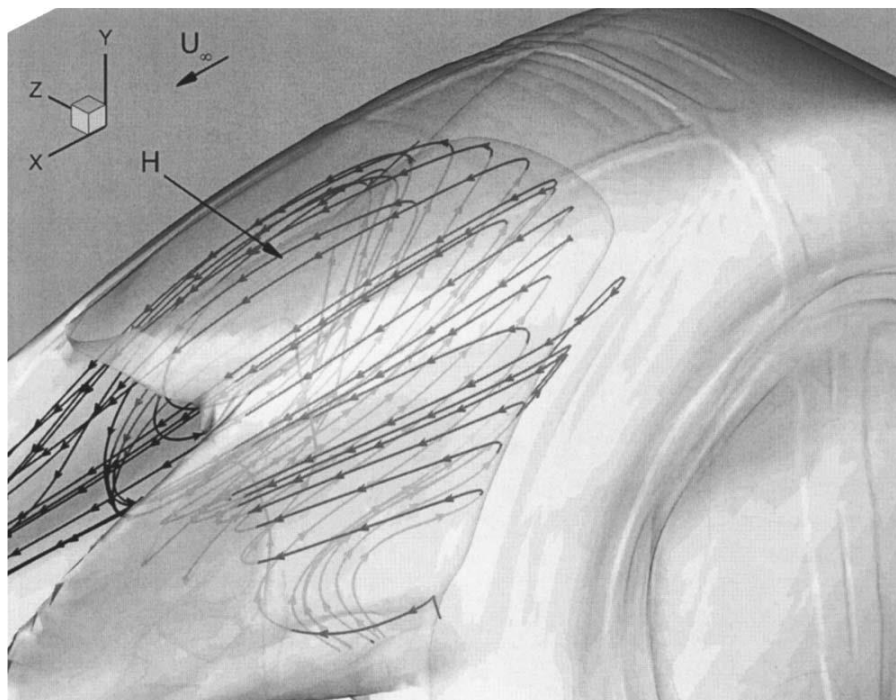


Vírenie tvaru podkovy

Obr. 21 Vyobrazenie víru tvaru podkovy [15]

4.3.2 VRCHNÉ VÍROVÉ ŠTRUKTÚRY

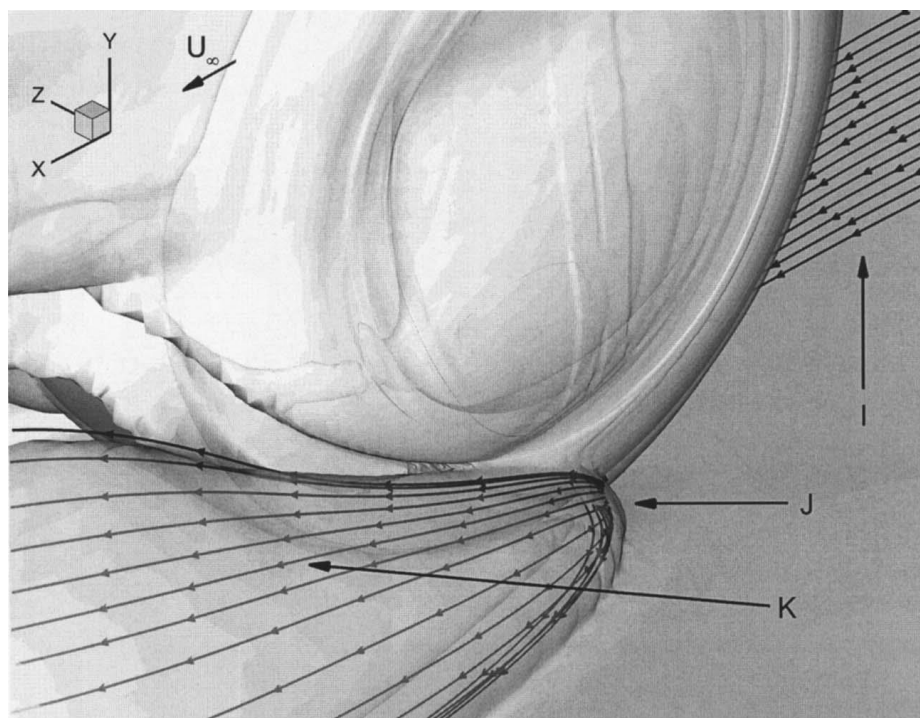
Štruktúry nachádzajúce sa v tejto oblasti sú výrazne ovplyvnené miestom separácie medznej vrstvy na vrchu rotujúceho kola. Preto nepresné určenie miesta separácie medznej vrstvy môže pri CFD výpočtoch spôsobiť výrazný rozdiel prúdenia v tejto oblasti. Táto oblasť sa vyznačuje výraznou nestabilitou štruktúr. Preto rozdielne geometrie kolies sa môžu vyznačovať inými tvarmi vírových štruktúr v tejto oblasti. Prúdenie môže mať charakter dvoch proti sebe rotujúcich vírov, ktoré sa najčastejšie vyskytujú pri obtekaní statického kola. Rozdielne tvarovanie vírových štruktúr sledovali McManus a Zhang [6], ktorý vo svojej práci dokázali existenciu oblúkového víru (viď obr. 22) v tejto oblasti. Prúdenie, ktoré sa oddeľuje na vrchnom povrchu kola, v oblasti blízko úplavu rotuje okolo jadra víru v tvare oblúku, na rozdiel od proti sebe rotujúcej vírovej dvojice. Spodné extrémny oblúkového víru sa zatáčajú smerom do strednej roviny kola. Avšak vírivosť okolo týchto štruktúr rýchlo zaniká a to už od vzdialenosti dvoch tretín priemeru kola smerom po prúde od osi kola. Separovaná oblasť, ktorá je vytvorená v blízkosti vrchnej časti kola a má šírku porovnateľnú ako obrys kola.



Obr. 22 Vrchná časť úplavu s oblúkovým vírením [6]

4.3.3 SPODNÁ OBLASŤ SEPARÁCIE PRÚDENIA

Veľké oblasti oddelenia medznej vrstvy sa vytvárajú v blízkosti podkladu a spodných bočných povrchov na každej strane kolesa. Prúdenie nad povrchom je pred kolesom urýchľované a pomocou jetting efektu je usmernené do strán. Toto bočné prúdenie rapídne znižuje svoju rýchlosť a expanduje v priestore, kde je odklonené do smeru hlavného prúdenia vzduchu.



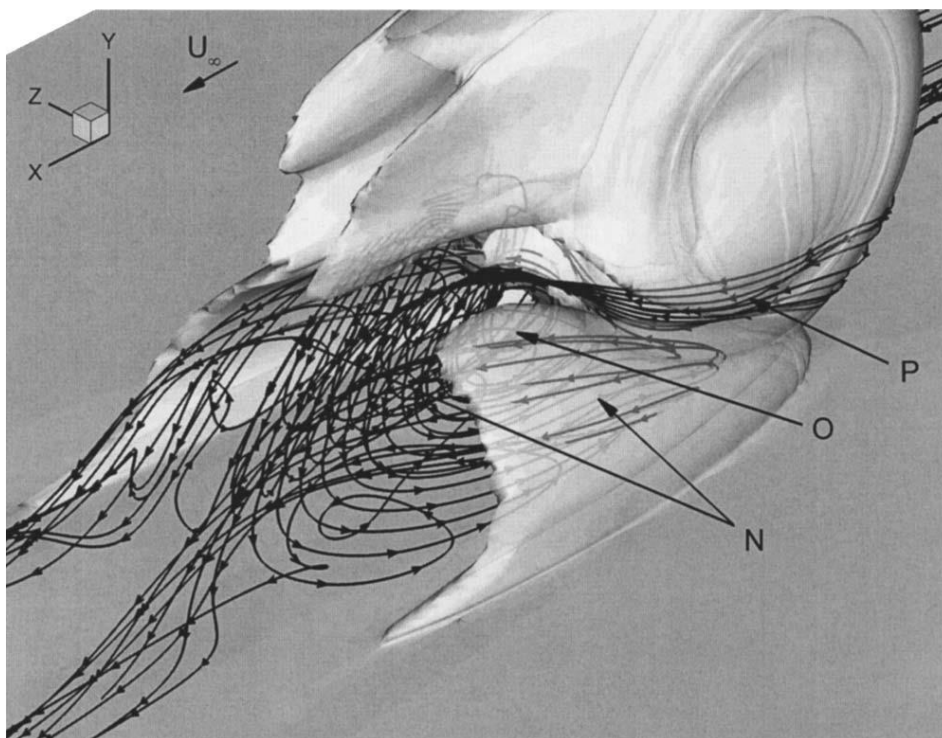
Obr. 23 Oblasť separácie prúdenia pred kolesom [6]



Prúdenie okolo rotujúceho a statického kolesa je v tejto oblasti v podstate identické. Úplav je menší v porovnaní so statickým kolesom. Dôvodom tohto rozdielu je pravdepodobne rozdiel vo vstupujúcich podmienkach hlavného prúdenia. Na podlahe pri stacionárnom kolese sa vytvára medzná vrstva. Prúdenie pochádzajúce z oblasti pred kontaktnou plochou je usmernené spomaleným prúdením v medznej vrstve. U rotujúceho kolesa je prúdenie spred kolesa usmernené hlavným prúdom vzduchu (I), ktorý má rýchlosť vstupujúceho prúdenia. Víry vytvárané jetting efektom sú výraznejšie usmernené ako v prípade statického kolesa. Tohto dôsledkom je v spodnej časti úplav pri rotujúcom kolese užší [6].

4.3.4 SPODNÁ ČASŤ ÚPLAVU

Pár proti sebe rotujúcich vírov (N) vzniká blízko spodnej časti úplavu, čo je spoločné pre rotujúce a statické koleso. Výrazné rozdiely vznikajú v mechanizme ich vzniku. Vírové štruktúry u rotujúceho kolesa sa dajú opísať ako recirkulačné oblasti vytvorené v úplave, ktorý vznikol zo spodnej oblasti separácie. Rotácia kolesa taktiež spôsobuje vznik malého víru (O) v strede za kolesom. Tento vír spolu so strhávaním prúdenia okolo bokov kolesa posilňuje cirkuláciu bočných vírov.



Obr. 24 Spodná oblasť úplavu s vyznačenými prúdniciami [6]

Spodnej oblasti úplavu dominujú dva pozdĺžne proti sebe rotujúce víry v blízkosti vozovky. Na obr. 19 zastúpené ako dve štruktúry, ktoré sa vyznačujú najväčšou dĺžkou. Tieto víry sa vytvárajú z víru tvaru podkovy nachádzajúceho sa za kontaktnou plochou, ktorý je ohnutý do oblúku v horizontálnej rovine. Konce týchto oblúkov prechádzajú do spomenutých vírov. Vír tvaru podkovy nepochádza z kontaktnej oblasti, ale ďalej po prúde v oblasti vzdialenej od povrchu kolesa približne $0,2D$ a pre $\theta=160^\circ$. V tejto oblasti downwash napomáha a zosilňuje tento vír, na rozdiel od vrchného víru oblúkového tvaru [6].



5 VPLYVY NA CHARAKTER ÚPLAVU

Pri podrobnejšom pohľade na prúdenie okolo kolesa sa vynorí množstvo premenných akými sú výška nápravy, odklon a natočenie kolesa, tvarovanie diskov a náboja a ďalšie.

5.1 VÝŠKA NÁPRAVY

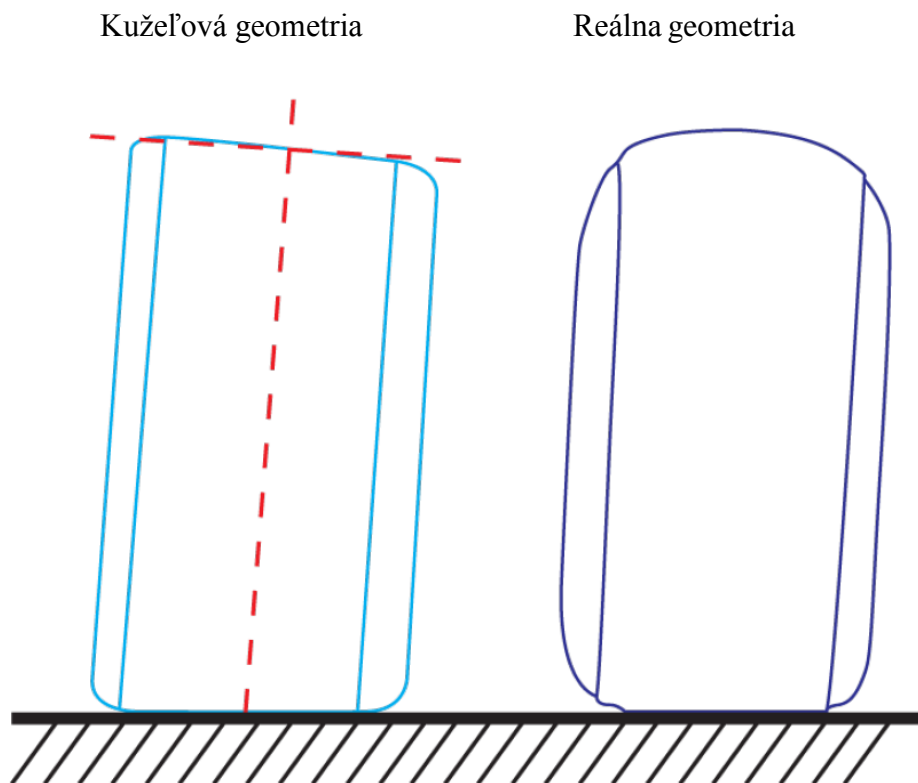
Pomocou nastavenia výšky nápravy sa definuje a reguluje veľkosť použitej deformácie kolesa. Väčšie hodnoty výšky nápravy znamenajú nižšie vertikálne zaťaženie, ktoré predstavuje stav vozidla pri výjazde zo zákruty alebo pri zrýchľovaní na rovnej trati. Nižšia poloha nápravy s väčším vertikálnym zaťažením reprezentuje podmienky pri výraznom brzdení na rovinke. Pri tomto nastavení sa zväčší kontaktná plocha pneumatiky s vozovkou a zmenší maximálna výška a čelná plocha pneumatiky.

Výška nápravy je často upravovaná za účelom zvýšenia životnosti testovacieho zariadenia v aerodynamickom tuneli. Pri nižších polohách nápravy sa zväčšuje teplota v kontakte kolesa a vozovky. Zvýšená teplota znižuje životnosť tenkostennej gumeny, z ktorej je tvorená pohybujúca sa vozovka. Na povrchu gumeny sa môžu objavovať zmeny textúry. Preto určovanie citlivosti prúdenia pre rozdielne výšky náprav je záležitosťou uplatnenie vertikálneho zaťaženia, ktoré je limitované životnosťou aerodynamického tunela [12].

5.2 ODKLON KOLESÁ

V praxi mávajú kolesá pretekárskych monopostov nastavený určitý uhol odklonu od vertikálnej plochy, čo spôsobuje naklonenie kolesa na jednu stranu. Najčastejšie sa používa jeho negatívne nastavenie, to znamená, že vrchná strana kolesa je naklonená smerom k centrálnej časti monopostu. Z toho vyplýva, že časť kontaktnej plochy kolesa s vozovkou je na jednej strane roviny symetrie väčšia ako na druhej. Odklonom sa ovplyvňuje ovládateľnosť vozidla, najmä sa tým zlepšuje príľnavosť v zákrutách. Negatívny odklon zabezpečuje, aby vonkajšie koleso v zákrute, ktoré je viac zaťažené, malo ideálne rozloženú kontaktnú plochu, ktorá vytvára maximálnu príľnavosť.

Použitie nedeformovateľnej pneumatiky pri testoch s odklonom kolesa vyžaduje použitie kuželovitej geometrie kolesa. Rozsah odklonu kolesa, ktorý môže byť testovaný pri použití tejto geometrie, je limitovaný uhlom, ktorý vytvára kuželový tvar pneumatiky. Vydutie pneumatiky na bočnej strane a tvar kontaktnej plochy je zanedbaný pri meraniach touto metódou. Oblúkové vydutie pneumatiky môže byť navrhnuté na bočnej strane kolesa, avšak toto vydutie sa vyskytuje na celom obvode pneumatiky a nielen pri kontaktnej ploche. Podobne aj kontaktná plocha má tvar línie namiesto elipsy. Tento problém sa zabezpečí utesnením medzery, čo stlmí vibrácie a zmenší nerovnováhu v rotujúcom systéme. Tieto vibrácie môžu spôsobiť odskakovanie kolesa od povrchu vozovky. Avšak utesnená oblasť je oveľa menej progresívna ako v prípade eliptickej kontaktnej plochy v prípade reálnych pneumatík. Táto zjednodušená geometria môže viesť k zmenám v jetting víroch pochádzajúcich z oblasti pred kontaktnou plochou. Navyše akékoľvek vibrácie vyskytujúce sa v sledovanom systéme môžu viesť k úplnej zmene aerodynamických vlastností sledovaného kolesa [12].

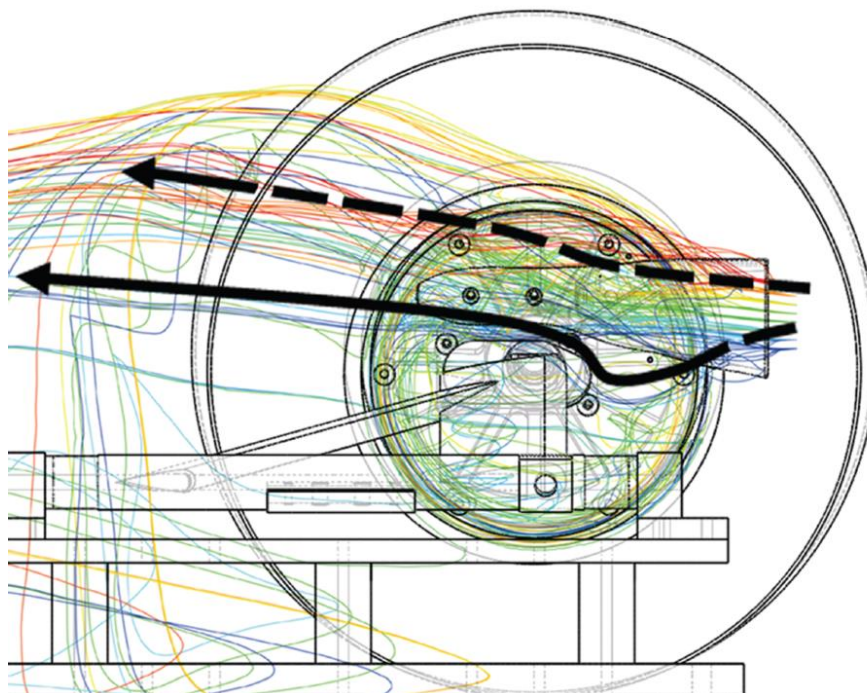


Obr. 25 Porovnanie kuželovej a reálnej geometrie kolesa [12]

Odklon kolesa nemá veľký vplyv na rozloženie tlaku po obvode kolesa. Vzniká asymetria v rozložení tlaku na bočných stranách kolesa, ktorá vedie k vzniku malej aerodynamickej bočnej sily. To je spôsobené tým, že vzduch na vonkajšej strane kolesa má vždy nižšiu tlak ako na vnútornej strane vzhľadom k odklonu kolesa. Tlak sa tu znižuje kvôli zrýchleniu prúdenia vzduchu v tejto oblasti. Celkový odpor kolesa pri zväčšovaní uhlu odklonu poklesne a následne mierne stúpa. Pravdepodobne to umožňuje presun väčšieho množstva vzduchu vonkajšou stranou kolesa do úplavu, čím sa v ňom zvyšuje tlak, čo vedie k zníženiu odporu. Avšak na vnútornej strane sa vytvára silnejšie vírenie, ktoré zväčšuje úplav a zároveň zväčšuje odpor kolesa. Ak tento jav prevládne, odpor kolesa sa zväčší [12][13].

5.3 PRÚDENIE CEZ STRED KOLESA

Vplyv prúdenia cez centrálnu časť kolesa okolo náboja na globálne prúdové pole je významný detail, ktorý býva často zanedbaný pri metodológii testovania izolovaného kolesa. Toto prúdenie má význam pre chladenie brzdných strmeňov a diskov, ktoré pracujú v rozsahu teplôt od 400°C do 1000°C. Činnosť brzd pri teplotách nespádajúcich do ich pracovného rozsahu nedosahuje optimálny brzdny účinok a zvyšuje ich opotrebenie. Pri brzdení disky premieňajú kinetickú energiu na teplo, ktoré musí byť efektívne odoberané prúdiacim vzduchom. Preto pri návrhu pretekárskych monopostov sa objavuje snaha o usmernenie prúdu vzduchu na brzdový disk, ktorý je umiestnený v strede kolesa. Väčšina moderných monopostov chladí brzdový kotúč vzduchom z vnútornej strany kolesa, ktorý je usmernený pomocou tvarovaného vstupu priamo na kotúč. Zohriaty vzduch smeruje cez lúče disku na vonkajšiu stranu kolesa [16].



Obr. 26 Prúdenie vzduchu cez stred kolesa [12]

Na obr. 26 je prerušovanou čiarou vyznačený smer prúdu, ktorý vchádza do bočného vstupu, smeruje cez brzdový kotúč okolo náboja a na vonkajšej strane vychádza mierne nahor smerom von z kolesa. Plná čiara poukazuje na vznik prúdenia, ktoré prejde cez okraj bočného vstupu na spodnej strane a smeruje po vnútornej strane za koleso [12].

Prúdenie cez stred kolesa vytvára zreteľné zmeny na globálnom prúdovom poli a významne ovplyvňuje vytváranie a polohu vírenia. Recirkulačná oblasť sa vytvára na vonkajšej strane vo výške nápravy a predstavuje prúd vzduchu prechádzajúci cez disk. Táto oblasť interaguje s úplavom za koleso a mení jeho štruktúru. Celý tento jav zväčšuje celkový aerodynamický odpor kolesa. Tento nežiaduci jav sa dá ovplyvniť zmenou tvarovania diskov alebo pridaním vhodne tvarovaného krytovania disku (viď obr. 27), čím sa významne zníži celkový odpor kolesa [12].

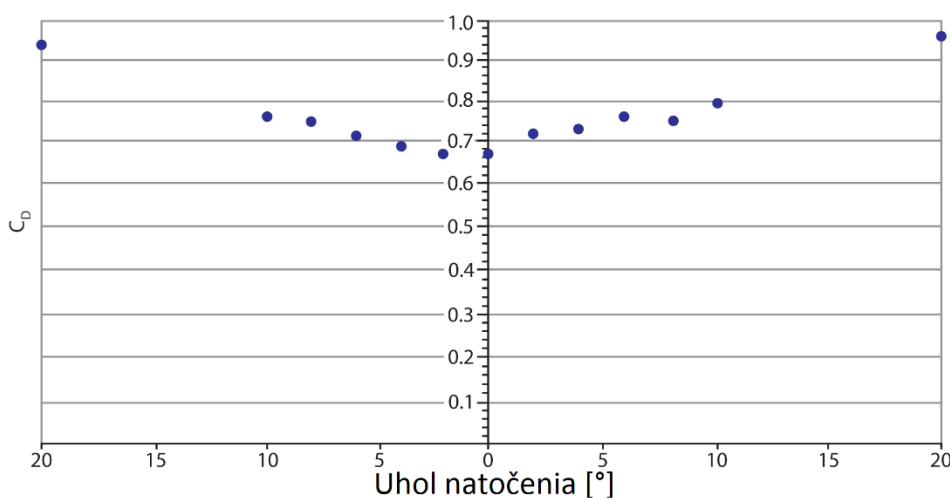


Obr. 27 Kryt predného kolesa monopostu McLaren MP4-24 z roku 2009 [17]



5.4 NATOČENIE KOLESA

Natočenie kola sa dá zdefinovať ako jeho rotácia okolo vertikálnej osi vzhľadom na smer prúdenia vzduchu. Pri pohľade na aerodynamiku vozidla nastávajú dva typy prúdenia na koleso pod uhlom a to pri bočnom vetre alebo natočení kola. Pri natočení kola na rozdiel od situácie s bočným vetrom je prúdenie okolo kola ovplyvnené aj uhlom, ktorý zvierá koleso s centrálnou osou vozidla. Natočenie kola môže byť permanentné v prípade zbiehavosti a rozbíhavosti alebo dočasné pri zatáčaní. V pretekárskom tempe na okruhu nie je koleso vystavené bočnému prúdeniu len veľmi krátko, lebo väčšinu času vozidlo prechádza zákrutami alebo je na rovinke vystavené bočnému vetru. Porozumenie povahy prúdového poľa pri pozitívnom a negatívnom natočení je dôležité pre návrh vozidla, ktoré je málo citlivé na zmeny natočenia kolies. Udržanie prítlaku v zákrutách je rozhodujúce pre konkurencieschopnosť pretekárskeho vozidla.



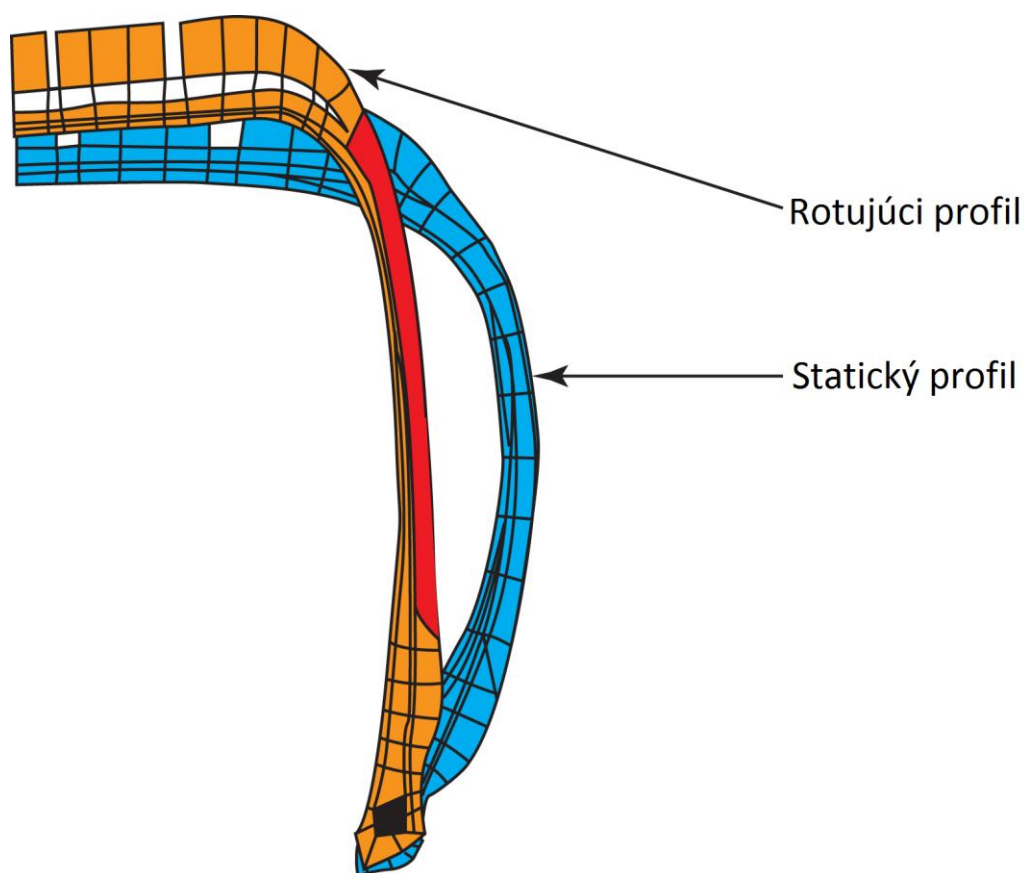
Obr. 28 Meranie odporu pre pozitívne a negatívne natočenie [18]

Zvyšovaním natočenia sa zväčšujú odporové a vztlakové sily pôsobiace na koleso. Kvôli rozšíreniu čelnej plochy nastáva zväčšenie odporu a úplavu za kolesom. Nastáva zmena tvaru kontaktnej plochy, čo zosilňuje vytváranie vírov v tejto oblasti. Úplav je v porovnaní s nenatočeným kolesom menší a užší [12].



6 AERODYNAMIKA DEFORMOVATEĽNÝCH KOLIES

Tento odsek je zameraný na detailnejší popis kolesa ako telesa, ktoré je deformované vplyvom statického a dynamického zaťaženia. Pneumatika je počas prevádzky vystavená viacerým podmienkam, pri ktorých prekonáva zmeny tvaru a vlastností. Pôsobí ako súčasť odpruženia vozidla, čím sa pravidelne mení jej tvar. Pri vysokých rýchlostiach a pri zatáčaní je vystavené veľkému napätiu spôsobujúcemu výrazné deformácie základnej štruktúry pneumatiky. Na rotujúce koleso pôsobí odstredivá sila, ktorá vedie k vyrovnaniu bočnice pneumatiky a zväčšeniu priemeru profilu. Zvyšovaním rýchlosti sa tento jav ešte viac zväčšuje a výraznejšie ovplyvňuje prúdenie okolo kolesa. Zmena tvaru bočnic pri vysokorýchlostnej rotácii vytvára dva opačné javy. Na vrchnej strane pneumatika nie je obmedzená v deformácii, čo vedie k predĺženiu profilu (viď obr. 29). Avšak na spodnej strane je deformácia obmedzená kontaktom s vozovkou. Preto sa vytvárajú v blízkosti kontaktnej plochy vydutia na bočnici pneumatiky. Z tohto vyplýva, že profil pneumatiky nie je osovo symetrický [12].



Obr. 29 Rozdiel medzi statickým a rotujúcim profilom pneumatiky [12]

Pneumatika pri zatáčaní taktiež podlieha deformácii. Na koleso pôsobí bočná sila, ktorá spôsobuje vytvorenie sklzu v kontaktnej ploche a šmykového napätia. Týmto pôsobením sa zdeformuje kontaktná plocha a spodná časť pneumatiky. Poloha kontaktnej plochy je mierne vyosená vzhľadom na rovinu symetrie kolesa a jej tvar sa stáva asymetrickým.

Vo väčšine aerodynamických experimentov boli použité nedeformovateľné kolesá, ktoré sú zvyčajne vyrobené z uhlíkových vlákien alebo z hliníka. Použitie týchto materiálov zabezpečuje trvanlivosť testovacích zariadení, pretože ani koleso a ani pohybujúca sa vozovka



nevykazujú známky veľkého opotrebenia, lebo vertikálne zaťaženie je minimálne. Avšak použitie nedeformovateľných kolies predstavuje zjednodušenie geometrie pneumatiky, pretože tá počas odvaľovania a rotácie podlieha zmenám tvaru ako už bolo spomenuté.

V poslednej dobe sa začala rozvíjať snaha o využívanie deformovateľných kolies pri aerodynamických meraniach. Technológiu zabezpečujúcu plne deformovateľné modely pneumatík sprevádzajú viaceré komplikácie a dokonca až v poslednej dobe sa predstavila ako realizovateľná možnosť v F1. Momentálne sú každému tímu Formuly 1 poskytnuté modelové pneumatiky (viď obr. 30) pre merania v aerodynamickom tuneli od oficiálneho dodávateľa pneumatík, ktorým je Pirelli [19]. Keďže sa jedná o 50% modely, tieto pneumatiky musia byť navrhnuté tak, aby sa deformovali rovnakým spôsobom ako reálne pneumatiky, ale pri nižších hodnotách vertikálneho zaťaženia. Dôležité je zachovať rovnaké vlastnosti a správanie sa modelu pre rozličné charakteristiky zaťaženia.



Obr. 30 Model pneumatiky pre aerodynamický tunel [19]

Deformovateľné kolesá musia byť zaťažené vertikálnou silou, aby bola vytvorená realistická nerovnomerná deformácia bočnej strany kolesa a správny tvar kontaktnej plochy. Jednou z možností vytvorenia deformovateľného kolesa je použitie nedeformovateľného základu pneumatiky, na ktorý sa pripevní vrstva penovej gumi, ktorá zabaľuje celú kontaktnú plochu kolesa. Týmto spôsobom sa dá simulovať deformovateľný behúň, ktorý je schopný obmedzeného stlačenia sa. Avšak stále sa jedná o výrazné zjednodušenie, ktoré nie je schopné vytvoriť správnu deformáciu bočnej strany kolesa. Pre dosiahnutie čo najpresnejších výsledkov je nutné použiť model pneumatiky, ktorá zodpovedá vlastnostiam reálnych kolies [12].



Testovanie kolies plnohodnotnej veľkosti sa uskutočňuje pomocou reálnych pneumatík kvôli jednoduchosti použitia a dostupnosti, pričom nie sú použité žiadne zjednodušenia geometrie. Takéto testovania vykonávajú iba automobilový výrobcovia pre svoje produkčné vozidlá. Výsledky z testovaní reálnych pneumatík nie sú všeobecne použiteľné na akékoľvek pneumatiky a sú len ťažko overiteľné. Jednotlivé pneumatiky sa líšia vo viacerých oblastiach, akými sú dezén behúňa, tvar bočnice alebo konštrukcia. Tieto rozdiely vo vlastnostiach pneumatík majú za následok odlišné charakteristiky prúdenia pre jednotlivé druhy pneumatík. Rozdiely sa vyskytujú nielen medzi rozdielnymi výrobcami, ale aj medzi jednotlivými modelmi. Preto väčšina štúdií s plnohodnotnými kolesami sa nezaobrá prúdením v ich okolí, ale deformáciou pneumatík pri vysokorýchlostnom zatáčaní a odchýlkami behúňa a bočnice a ich vplyv na celkový pohľad na vozidlo [12].

Lokálne javy prúdenia v oblasti kontaktnej plochy majú výrazný vplyv na celkové prúdové pole. Chovanie pneumatiky v mieste vzniku jetting fenoménov na oboch stranách kontaktnej plochy určujú silu vytváraných vírových štruktúr. Všeobecne platí, že ostrejšie geometrické profily vyúsťujú v agresívnejšie vírové rysy a úplav s vyššími stratami. Geometrické črty kolesa vo vzdialenosti maximálne pár milimetrov od pohybujúcej sa vozovky majú výrazne väčší vplyv na celkový charakter prúdenia ako tie nachádzajúce sa vo väčšej výške. Ostrejšie rozhranie medzi behúňom a bočnicou pneumatiky vedie k zväčšeniu oblastí s nižším tlakom v úplave [12].

6.1 EXPERIMENTÁLNE MERANIA PRE DEFORMOVATEĽNÉ KOLESO

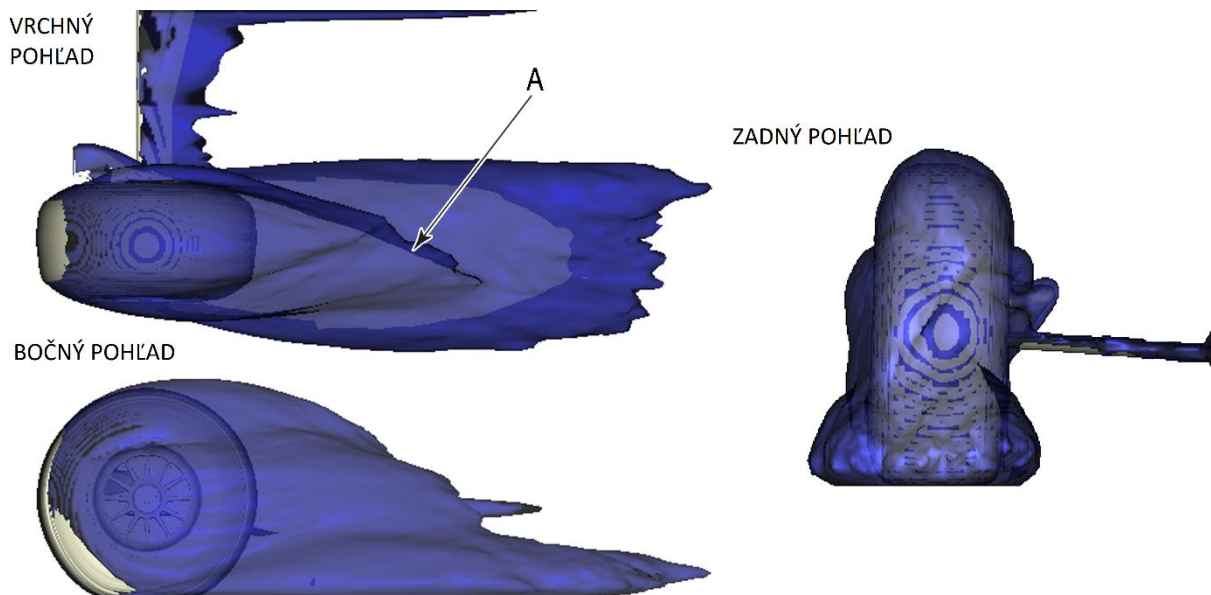
Najaktuálnejšiu a najpresnejšiu štúdiu, ktorá zahŕňa väčšinu prevádzkových stavov vypracoval Sprot [12]. Ten vo svojej práci do detailov vypracoval aerodynamické dôsledky zmeny tvaru deformovateľného detailne spracovaného kolesa pre rozdielne prevádzkové podmienky. Jeho práca zahŕňa snímky rotujúceho profilu pneumatiky pod zaťažením, merania veľkosti kontaktnej plochy, merania tlaku v úplave, PIV a meranie odporu pomocou load cell. CFD simulácie boli vykonané pre podporu experimentálneho merania. Najcitlivejšie parametre pri aerodynamickom testovaní kolesa boli zadané zo získaných výsledkov. Najväčší vplyv na prúdenie okolo kolesa má výška nápravy, menší vplyv majú zatočenie kolesa, uhol odklonu a prúdenie cez náboj kolesa. Geometriu kolesa zahŕňa deformovateľnú pneumatiku, lúčové disky, náboj s brzdovým kotúčom a vstup vzduchu.

Táto práca zahŕňa merania pre väčšinu možných stavov, ktoré môže pneumatika prekonať pri jazdách v pretekárskom tempe. V nasledujúcich odsekoch je rozanalyzované prúdenie okolo izolovaného kolesa pre tri hlavné štádiá deformácie pneumatiky



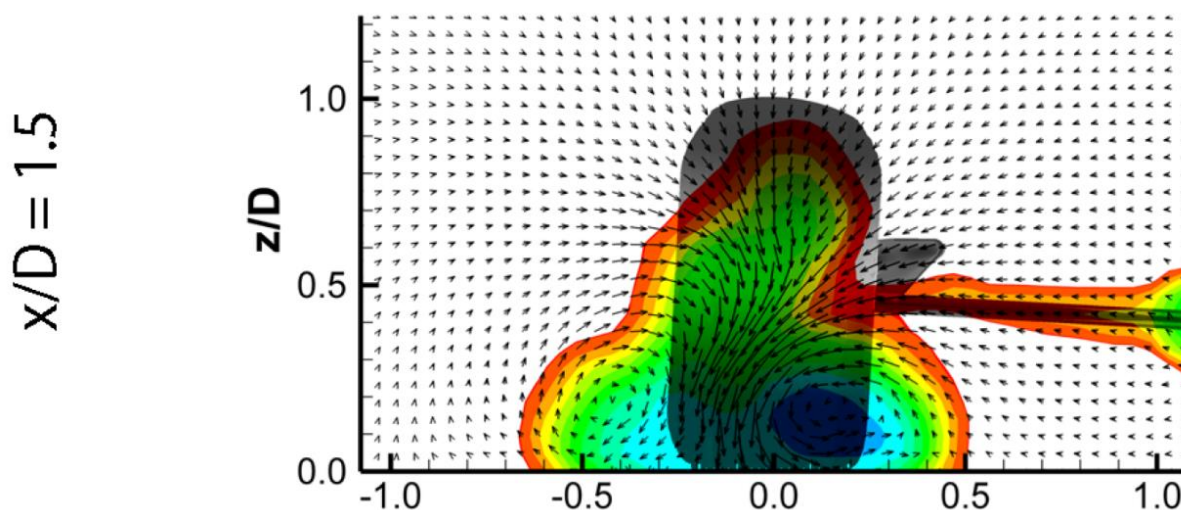
6.1.1 GEOMETRIA 1

Nasledujúce merania sú vyhotovené pre základné nastavenie polohy kolesa pre výšku nápravy 150mm a 0° natočenie. Výška nápravy 150mm zodpovedá vyššiemu zaťaženiu axiálnou silou. Táto poloha zodpovedá brzdeniu na konci rovinky. V ďalších meraniach je braná ako referenčná geometria.



Obr. 31 Iso-hladina vyobrazujúca $C_p \leq 0,3$ pre prvú situáciu [12]

Úplav je v spodnej časti symetrický. Nesymetria sa vyskytuje vo vrchnej časti (A) a je spôsobená umiestnením vstupu vzduchu a úchytom kolesa na vnútornej strane kolesa, čo výrazne ovplyvňuje charakter úplavu [12].



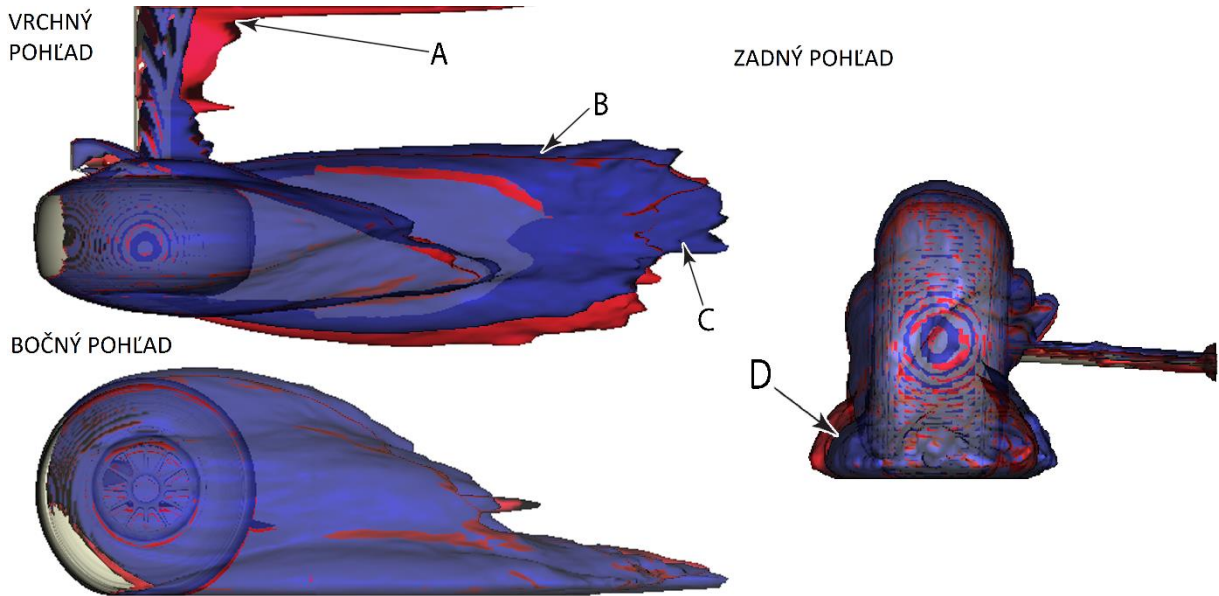
Obr. 32 Vyobrazenie tlaku a vektorov rýchlostí v rovine Y-Z [12]

Na obr. 32 vidno prevládanie vnútorného víru za kolesom, čo je spôsobené nesymetrickou geometriou a odklonom kolesa.



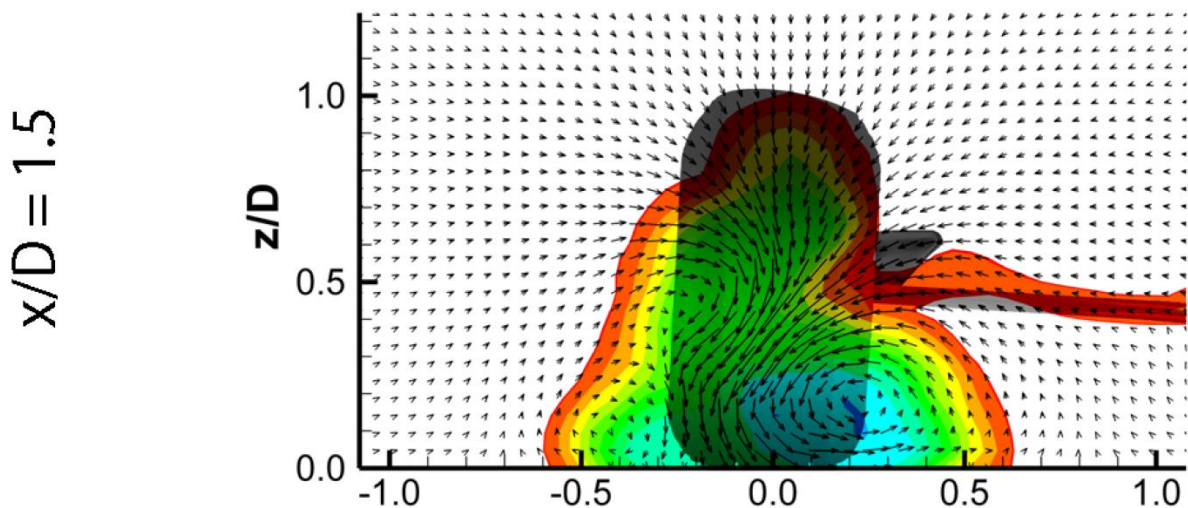
6.1.2 GEOMETRIA 2

Pri geometrii 2 je koleso nastavené na výšku nápravy 159mm a 0° natočenie, čo zodpovedá situácii pri zrýchľovaní vozidla na rovinke.



Obr. 33 Iso-hladina vyobrazujúca $C_p \leq 0,3$ pre druhú situáciu [12]

Na obr. 33 je zobrazené porovnanie tvaru úplavu referenčného prípadu (červená farba) a prípadu číslo 2 (modrá farba). Úchyt kolesa vytvára menší úplav ako v referenčnej situácii (A). Iso-hladina poukazuje na mierne vychýlenie smerom do vnútornej strany geometrie (B), pričom si zachováva približne rovnakú veľkosť a povahu. Vonkajšie štruktúry menšie a posunuté smerom dovnútra podobne ako celý úplav (D) [12].



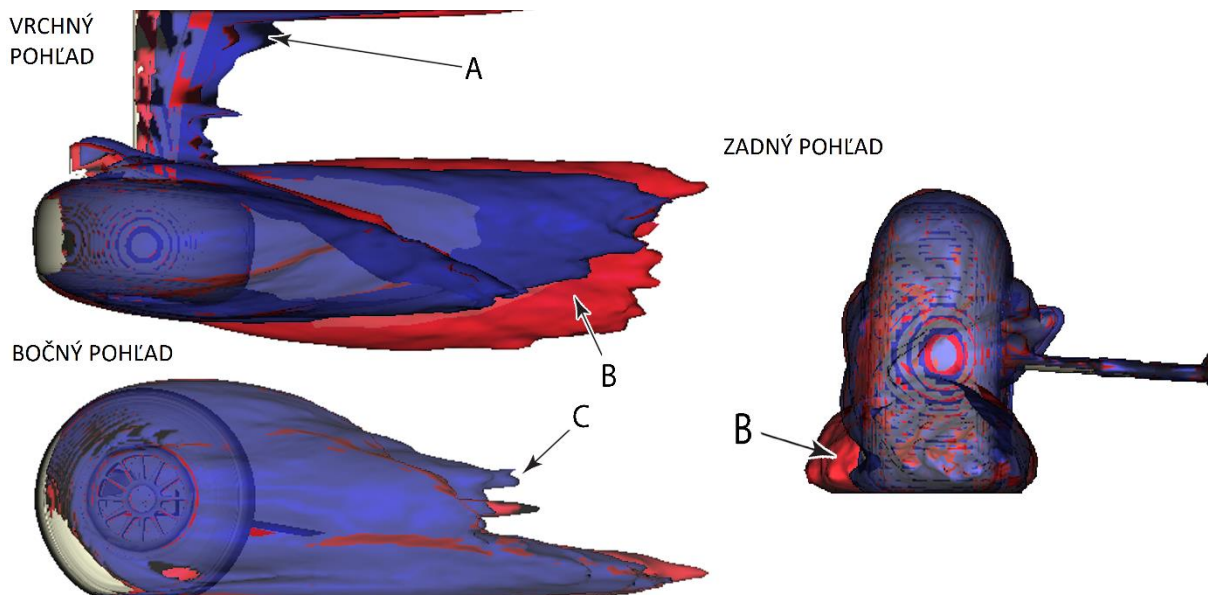
Obr. 34 Vyobrazenie tlaku a vektorov rýchlostí v rovine Y-Z [12]

Redukcia veľkosti vírov na vonkajšej strane kolesa je zreteľná (viď obr. 34).



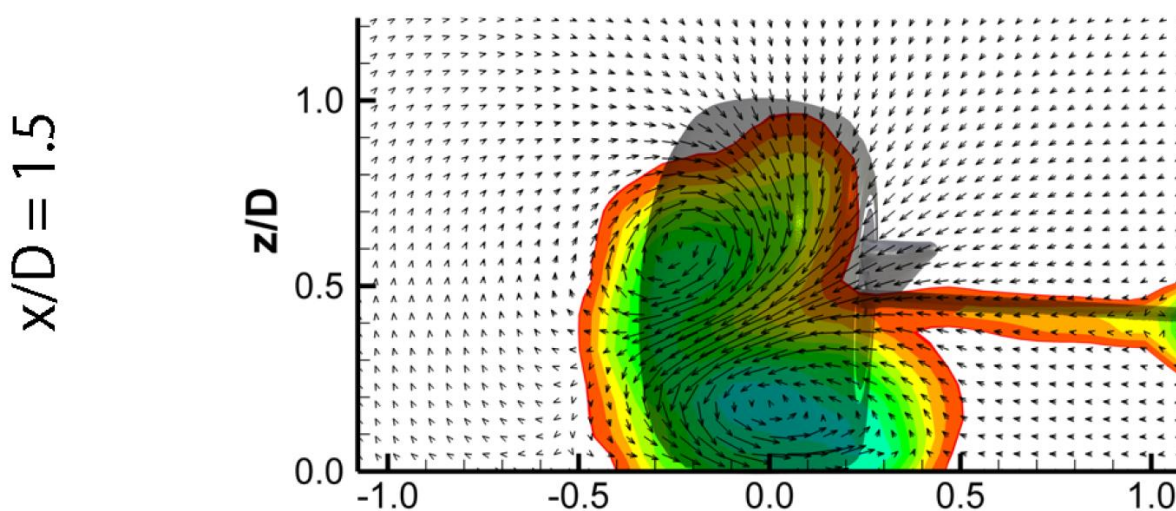
6.1.3 GEOMETRIA 3

Pri geometrii 2 je koleso nastavené na výšku nápravy 150mm a 5° natočenie, čo zodpovedá situácii prejazdu vozidla zákrutou.



Obr. 35 Iso-hladina vyobrazujúca $C_p \leq 0,3$ pre tretiu situáciu [12]

Na obr. 35 je zobrazené porovnanie tvaru úplavu referenčného prípadu (červená farba) a prípadu číslo 3 (modrá farba). Iso-hladiny poukazujú na úplne rozdielnu štruktúru ako v prípade nenatočeného kolesa. Nastáva zväčšenie úplavu za úchytom kolesa (A), úplav za kolesom je podstatne užší a štruktúry na vonkajšej strane sú zmenšené na minimum (B) [12].



Obr. 36 Vyobrazenie tlaku a vektorov rýchlostí v rovine Y-Z [12]

Nastáva zmenšenie spodného vonkajšieho víru na minimum a zdôraznenie dominance vnútorného víru (viď obr. 36).



ZÁVER

Cieľom tejto práce je poskytnúť ucelený pohľad na problematiku obtekania vzduchu okolo izolovaného rotujúceho kolesa. Jedná sa o rozsiahlu tematiku, ktorá stále nie je celá preskúmaná, lebo obsahuje veľa premenných faktorov. Jedná sa napríklad o sklon kolesa, zaoblenie hrán pneumatík, profil behúňu, tvar diskov, deformácia pneumatiky a iné. Jednotlivé problémy je nutné riešiť viacerými metódami pre potvrdenie získaných výstupov. Napríklad pre optimalizáciu a overenie výsledkov získaných z CFD výpočtov, je potrebné vykonať simuláciu v aerodynamickom tuneli.

Táto práca je zameraná na základné charakteristiky ovplyvňujúce obtekanie izolovaných rotujúcich kolies a opisuje charakter a vznik jednotlivých javov vznikajúcich pri tejto problematike. Medzi sledované javy patria výrazné oblasti v úplave kolesa s viacerými vírovými štruktúrami, ktoré ovplyvňujú nielen aerodynamické charakteristiky kolesa, ale aj prúdenie vzduchu za kolesom, kde môže ovplyvniť ostatné aerodynamické prvky.

Schopnosť predpokladať správanie prúdenia pri izolovanom rotujúcom kolese má veľký význam pri formulových sériách s otvoreným priestorom kolesa. Keďže koleso predstavuje pri takýchto vozidlách 30 až 40% celkového aerodynamického odporu, zlepšením znalostí v tejto oblasti je možné dosiahnuť skvalitnenie optimalizácie aerodynamiky monopostov a výrazné zníženie aerodynamického odporu a stability

V tejto práci je poukázané na veľký rozdiel správania sa prúdenia medzi statickým a rotujúcim kolesom. Najvýraznejší rozdiel je vo veľkosti úplavu, ktorý u rotujúceho kolesa dosahuje užších, ale vyšších rozmerov ako pri statickom kolese. Tento rozdiel zohráva významnú úlohu pri aerodynamických meraniach, či už pri CFD výpočtoch alebo pri meraniach v aerodynamických tuneloch. Preto v dnešnej dobe sa kladie veľký dôraz na čo najrealistickejšie simulácie, pri ktorých sa používajú pohyblivé vozovky a rotujúce kolesá.



POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] BROŽ, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 182 s. ISBN 80-010-2347-8.
- [2] JANALÍK, Jaroslav. *Obtékání a odpor těles*. Vyd. 5. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-1911-2.
- [3] CROSS, Rod. *Wind tunnel photographs* [online]. In: . University of Sydney [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.physics.usyd.edu.au/~cross/TRAJECTORIES/Fluidflow%20Photos.pdf>
- [4] CYCLONE FLUID DYNAMICS BV. 2009. *Dolfyn* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: http://www.dolfyn.net/dolfyn/voorbeelden_en.html
- [5] CLARKE, S. C. *An Investigation of the Flow Around a Rotating Cylinder Near the Critical Reynolds Number*. Cranfield, 1975. MSc Thesis.
- [6] MCMANUS, James a Xin ZHANG. A Computational Study of the Flow Around an Isolated Wheel in Contact With the Ground. *Journal of Fluids Engineering* [online]. 2006, vol. 128, issue 3 [cit. 2015-05-06]. DOI: 10.1115/1.2175158.
- [7] MORELLI, Alberto. Aerodynamic Actions on an Automobile Wheel. In: *Road Vehicle Aerodynamics Proceedings of the First Symposium on Road Vehicle Aerodynamics*. 1970. City University London.
- [8] COGOTTI, Antonello. Aerodynamic Characteristics of Car Wheels. *International Journal of Vehicle Design, Technological Advances In Vehicle Design Series: Impact of Aerodynamics on Vehicle Design*. 1983. (SP3), s. 173–196.
- [9] FACKRELL, J. E. a J. K HARVEY. The Flowfield and Pressure Distribution of an Isolated Road Wheel. *Fluid Engineering: Advances in Road Vehicle Aerodynamics*. 1973. s. 155–165.
- [10] MEARS, Andrew Paul. *The aerodynamic characteristics of an exposed racing car wheel*. Durham, 2004. Dostupné také z: <http://etheses.dur.ac.uk/3124/> . Doctoral Thesis. Durham University.
- [11] SADDINGTON, A. J., R. D. KNOWLES a K. KNOWLES. Laser Doppler anemometry measurements in the near-wake of an isolated Formula One wheel. *Experiments in Fluids* [online]. 2007, vol. 42, issue 5, s. 671-681 [cit. 2015-05-14]. DOI: 10.1007/s00348-007-0273-7.
- [12] SPROT, Adam. *Open-Wheel Aerodynamics: Effects of Tyre Deformation and Internal Flow* [online]. Durham, 2013. Dostupné také z: <http://etheses.dur.ac.uk/7292/>. Doctoral Thesis. Durham University.
- [13] VAN DEN BERG, Martinus. *Aerodynamic interaction of an inverted wing with a rotating wheel*. Southampton, 2007. Dostupné také z: <http://eprints.soton.ac.uk/49927/>. Doctoral Thesis. University of Southampton.



- [14] AXON, Lee. *The Aerodynamic Characteristics of Automobile Wheels - CFD Prediction and Wind Tunnel Experiment*. Cranfield, 1999. Dostupné také z: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/3296> . Doctoral Thesis. Cranfield University.
- [15] CRONER, Emma, Hervé BÉZARD, Christophe SICOT a Guillaume MOTHAY. Aerodynamic characterization of the wake of an isolated rolling wheel. *International Journal of Heat and Fluid Flow* [online]. 2013. vol. 43, s. 233-243. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.04.008. ISSN 0142727x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142727X13000829>
- [16] *Formula 1 Brembo* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://formula1.brembo.com/en/>
- [17] MICHAEL, Sam. Wheel covers likely to be banned. *GPupdate* [online]. 2009. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.gpupdate.net/en/f1-news/215660/wheel-covers-likely-to-be-banned/>
- [18] WHITBREAD, L. *Measurement of the Lift Distribution on a Rotating Wheel*. Cranfield, 2000. M.Sc. Thesis.
- [19] F1 tyres range. *Pirelli.com* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.pirelli.com/tyres/en-ww/motorsport/f1/tyre-range>



Zoznam použitých skratiek a symbolov

α	[-]	pomer obvodovej rýchlosti k rýchlosti prúdenia
C_D	[-]	koeficient odporu
C_P	[-]	koeficient tlaku
C_x	[-]	koeficient odporu v ose x
D	[m]	priemer kola
p	[Pa]	statický tlak
p_o	[Pa]	celkový tlak
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
v	[ms ⁻¹]	rýchlosť prúdenia
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota vzduchu
θ	[°]	uhol na kolese

CFD Computational Fluid Dynamics

URANS Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes

PIV Particle Image Velocimetry