



DIDAKTICKÉ POMÔCKY VETERNÉHO TUNELA

Marta Hronská
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Pavol Pecho
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The aim of the paper is to approach the issue of the flowing around didactic tools in the wind tunnel. Didactic tools are used for education and help in understanding the issue of aerodynamics. In the first part, the paper deals with theoretical knowledge about the wind tunnel and then describes the theory and laws of aerodynamics. The core of this work is the analysis of the given objects realized through numerical and experimental methods. By using CFD simulation of didactic tools, it was possible to obtain aerodynamic drag values, from which the values for the drag coefficient were calculated and then compared with tabular values from theory. Experimental verification of individual objects was carried out in a wind tunnel located at the Department of Air Transport in Dolný Hričov. The result of tests in the wind tunnel was the visualization of the air flow around the didactic aids. At the end of the work, both methods were compared and the reasons for deviations and inconsistencies were described.

Keywords

wind tunnel, aerodynamics, CFD simulation, fluid flow

1. Úvod

Didaktika je veda, ktorá sa zaoberá náukou a vzdelávaním. Aerodynamika je veda, ktorá opisuje pohyb plynu alebo tekutiny okolo pevného telesa. Spojenie týchto dvoch odborov dokáže zefektívniť a oživiť vzdelávací proces. V súčasnej dobe rýchleho technologického napredovania zohrávajú didaktické pomôcky kľúčovú úlohu pri štúdiu zložitých fyzikálnych javov a aplikácie pomôcok do praxe. Integráciou takýchto pomôcok do vzdelávacieho procesu sa očakáva zlepšenie pochopenia učiva.

Tento článok sa zameriava na návrh a analýzu didaktických pomôcok veterného tunela. Na začiatku sa autor snaží priblížiť čitateľovi veterný tunel a jeho základné princípy fungovania a zákonitosti aerodynamiky, ktoré sa využívajú pri experimentoch vo veternom tuneli. V praktickej časti sa bude pracovať s CFD simuláciou a experimentom vo veternom tuneli ako metódami analýzy, ktoré sa pokúsia vizualizovať prúdenie plynu okolo didaktických pomôcok.

Zámerom tohto výskumu je demonštrovať ako integrácia didaktických pomôcok môže prispieť k lepšiemu pochopeniu a vizualizácii prúdenia plynu okolo pevného telesa.

2. Veterný tunel

Veterný alebo inak nazývaný aerodynamický tunel je zariadenie, ktoré slúži na skúmanie aerodynamických vlastností tuhých telies. Tieto skúmané tuhé telesá môžu predstavovať model daného objektu alebo reálne vyhotovenie. Vo veternom tuneli je na výskum využívaný prúd vzduchu, ktorý prúdením skrz veterný tunel dokáže dokonalo simulovať reálny pohyb prúdu okolo telesa a vplyvu naň. Skúmané telesá vo veternom tuneli môžu byť pevné, pružné alebo pohyblivé. [1]

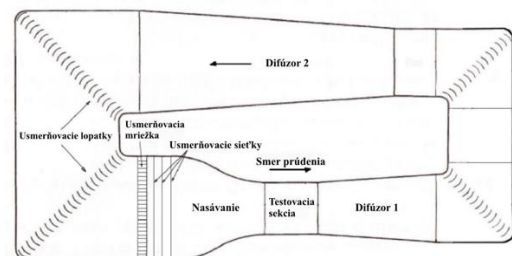
Aplikácia a uplatnenie týchto zariadení má dosah do rôznych druhov odvetví, ako napríklad v letectve, kozmickom

inžinierstve, stavebnom inžinierstve a automobilovom priemysle.

Simuláciu v aerodynamickom tuneli je možné nastaviť na reálne klimatické podmienky prostredia, kde sa dané teleso bude vyskytovať prípadne, akým bude musieť odolávať. Následne po spustení veterného tunela a dodatočných analýzach inžinieri majú možnosť odstraňovať chyby, vylepšovať konštrukcie, meniť materiály či robiť iné ďalšie úkony, aby sa docielilo teleso s ideálnymi aerodynamickými vlastnosťami pre dané prostredie.

2.1. Tunely s uzavretým okruhom

Tunely s uzavretým okruhom, tiež nazývané ako cirkulačné tunely, sa odlišujú od tunelov s otvoreným okruhom tým, že vzduch z výstupnej dýzy neprúdi z tunela von, ale sa privádza späť do vstupného ústrojenstva. To znamená, že prúdici vzduch sa re-cirkuluje dovnútra [1] a kontinuálne obieha tunelom pri minimálne prípadne žiadnej výmene vzduchu s okolím. [2]



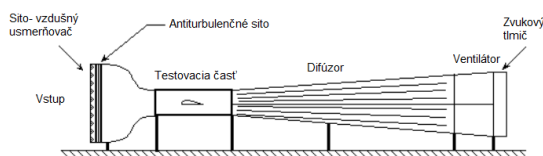
Obrázok 1. Schéma veterného tunela s uzavretým okruhom. Zdroj: Vlastné spracovanie podľa [3]

Pri aerodynamickom tuneli s takýmto okruhom v komparácii s tunelom s otvoreným okruhom existujú výhody, ako napríklad zmena charakteristík použitej kvapaliny (tlak, teplota, vlhkosť, viskozita atď.) a možnosť aplikovať otvorenú alebo

polootvorenú testovaciu komoru, čo umožňuje jednoduchšiu manipuláciu s modelmi a logistiku pri ich umiestňovaní. [1]

2.2. Tunely s otvoreným okruhom

Do aerodynamického tunela s otvoreným okruhom prúdi vzduch z okolitého prostredia do ústia s konštantným prierezom (zvyčajne štvorcový, kruhový alebo obdĺžnikový prierez) a následne nasávaný vzduch pokračuje cez zbiehavý úsek, ktorý končí pri prahu testovacej komory. Testovacia časť má konštantný prierez a je tvorená z materiálu, ktorý umožňuje vidieť do tunela, pretože v tejto časti tunela sa nachádza model objektu, ktorý je analyzovaný. Rýchlosť prúdenia vzduchu je v testovacej sekcii najvyššia. Potom vzduch prúdi cez difúzor ďalej do okolitého prostredia, čo znamená, že nie je vedený späť. [2]



Obrázok 2. Schéma veterného tunela s otvoreným okruhom. Zdroj: [4] s. 16

3. Aerodynamika

Pre lepšie pochopenie veterného tunela, je potrebné si zadefinovať základné pojmy z aerodynamiky. Aerodynamika je veda, ktorá sa zaoberá skúmaním vlastností a zákonitostí prúdenia plynu. Tento vedný odbor popisuje pohyb plynu a interakciu s telesami, ktoré sú doň vložené a plyn ich obteká. Práve výskum prúdenia plynu pri obtekaní telies definoval základný účinok prúdenia a je ním silové pôsobenie na dané predmety, ktoré kladú odpor voči prúdeniu. Odporová sila závisí na tvare a veľkosti obtekaného telesa, rýchlosti a hustote prúdiaceho média. [2, 5]

3.1. Teória prúdenia tekutín

Tekutinu a tuhé teleso rozlišuje ich základná vlastnosť - pohyblivosť molekúl v kvapaline a tuhom telese. Pohyb tuhého telesa sa popisuje ako tuhý celok hmotných bodov. Tekutina oproti tuhému telesu sa neustále deformuje. Tekutina nemá vlastný tvar a pri pôsobení nepatrných dotykových síl sa jej častice uvedú do pohybu. Tekutiny tečú v prúde ohraničenom pevnými stenami alebo tvoria rozhranie. [6]

Laminárne prúdenie je prúdenie charakterizované rovnomerným tokom. Jednotlivé molekuly sa pohybujú paralelne vedľa seba v tenkých vrstvách, tak ako je viditeľné na obrázku 4. V tomto prúdení je priebeh rýchlostí častíc pravidelný.

Turbulentné prúdenie je nerovnomerný tok častíc. Dráhy častíc sa navzájom ovplyvňujú a vytvárajú víry. Priebeh rýchlostí častíc je nepravidelný, majú turbulentnú rýchlosť, ktorou sa premiestňujú po priereze.

4. Metodika a metódy skúmania

Hlavnou myšlienkou výskumu je návrh a analýza didaktických pomôcok veterného tunela. Navrhnutých bolo päť rôznych

objektov a to kocka, guľa, kvapka, golfová loptička a doska s brúsnym papierom. Tieto objekty sa analyzovali prostredníctvom numerickej a experimentálnej metódy. Numerickej metódy bola realizovaná v CFD programe, z dôvodu zložitých rovníc, ktorých počítanie ručne je často kontraproduktívne. Experimentálne overenie prebiehalo vo veternom tuneli, ktorý sa nachádza na Katedre leteckej dopravy v Dolnom Hričove.

4.1. Computational fluid dynamics (CFD)

CFD metóda predstavuje numerické metódy pre riešenie a výpočet podrobných modelov prúdenia na počítači. [7] Využitie metódy CFD nesie viaceré výhody pre inžinierov a vývojárov rozličných odvetví. Jednou z výhod je eliminácia rizika, čo v realite môže predstavovať napríklad zníženie výskytu zlyhání konštrukčných celkov skôr, než sa dané riziko vyskytne. Náklady a časová náročnosť CFD simulácie oproti testovaniu objektu v realite, sú oveľa nižšie.

Program CFD slúži na vyriešenie matematických rovníc konkrétneho problému pomocou počítača. V prvom rade si zadefinuje geometrickú štruktúru objektu na konečný počet prvkov. Výsledok závisí od počtu buniek. Samozrejme platí, ak má program dať presnejšie výsledky, tak potrebuje vyššie číslo. Následne je potrebné vytvoriť druhú sieť (Mesh), ktorá zobrazuje objem tekutiny. Po zadefinovaní všetkých podmienok pre simuláciu konkrétneho problému, je možné simuláciu spustiť. Po skončení simulácie nastáva záverečná časť, v ktorej sa zobrazujú analýzy výsledkov a riešenia problému. Taktiež v časti výsledkov je možné vizualizovať prúdenie či zobrazíť interakciu medzi telesom a kvapalinou či plynom. [1]

4.2. Didaktické pomôcky

Didaktické pomôcky, ktoré sú uplatnené v tejto práci, predstavujú základné geometrické útvary, prípadne základné predmety, s ktorými sa ľudia bežne stretávajú v realite. Konkrétne didaktické pomôcky, ktoré boli vybrané pre túto prácu sú kocka, guľa, golfová loptička, plocha s drsným povrchom a kvapka.

Pre efektívne skúmanie vo virtuálnom prostredí je nutné najprv v počítačovom programe namodelovať objekty, ktoré následne budú predmetom testovania pomocou numerickej metódy v CFD softvéri. Program zvolený na vytvorenie virtuálnych didaktických pomôcok je Autodesk Inventor. Proces modelovania nie je zložitý, keďže ide o základné predmety. Použité rozmery sa zvolili na základe analýzy a porovnania s podmienkami, ktoré ponúka veterný tunel na Katedre leteckej dopravy na letisku v Dolnom Hričove.

4.3. Veterný tunel

Aerodynamický tunel Katedry leteckej dopravy sa nachádza na Letisku Žilina v Dolnom Hričove. Je charakterizovaný ako nízko rýchlostný aerodynamický tunel s otvoreným okruhom. Základná časť konštrukcie tvorí topoľová preglejka, čo zlepšuje tlmenie vibrácií z prúdenia vzduchu. [1]

Veterný tunel je rozdelený do štyroch vzájomne prepojených sekcií. Vstupná časť je tvarovaná ako postupne zužujúci sa kužeľ, ktorý sa následne napája na testovaciu sekciu. Pohonnou jednotkou tohto veterného tunela je ventilátor, ktorý sa

nachádza na výstupe difúzora. Pre usmernenie prúdu vzduchu sa v nasávacej sekcii nachádza hliníkové jadro s hexagonálnym tvarom mriežky. V testovacej sekcii sa nachádzajú dve Pitotove trubice pre indikáciu celkového a dynamického tlaku. Na pravej strane od testovacieho priestoru sa nachádza manometer, ktorý sa využíva na vyhodnotenie rozdielu tlakov nameraných Pitotovými trubicami.

Vizualizácia na aerodynamickom tuneli Katedry leteckej dopravy je prevádzkovaná dvomi spôsobmi. Prvý z nich je systém laserovej anemometrie častíc a druhým je vizualizácia prúdenia pomocou generátora dymu.

5. Výsledky z CFD simulácie

Po ukončení simulácií v CFD programe boli vygenerované výsledky pre každé teleso pri troch rýchlostiach prúdiaceho média. Porovnanie veľkosti súčiniteľa odporu sa vyhodnotilo navzájom medzi jednotlivými didaktickými pomôckami pri rovnakej rýchlosti prúdenia vzduchu. Z toho vyplýva, že vznikli tri situácie prúdenia vzduchu, ktorým boli objekty vystavené.

Výsledné hodnoty odporu vzduchu po priebehu simulácie sa spísali do troch tabuliek číslo 1, 2 a 3 podľa rýchlosti prúdenia vzduchu. Ako komparatívny parameter pri jednotlivých didaktických pomôckach sa zvolil koeficient odporu. Koeficient odporu je číslo, ktoré sa v aerodynamike používa na modelovanie všetkých zložitých závislostí tvaru, sklonu a podmienok prúdenia na odpor, napríklad lietadla. [8]

Výsledné hodnoty odporu po CFD simulácii sa so zvyšujúcou rýchlosťou zväčšujú pri každom jednom objekte. Najväčšiu zmenu podľa tabuľky 1, 2 a 3 je možné vidieť pri kocke a guľi. Hodnoty C_D zo simulácie zachovávajú približne rovnakú hodnotu s minimálnou odchýlkou pri jednotlivých rýchlostiach. Porovnanie výsledných hodnôt C_D zo simulácie s hodnotami C_D teoretickým by malo ukázať nulovú odchýlku. Avšak podľa hodnôt v posledných dvoch stĺpcoch v tabuľkách 1, 2 a 3 tento stav nenastal. Prijateľné výsledky vykazujú objekty guľa a kvapka, pri ktorých je odchýlka minimálna a je možné usúdiť, že simulácia v CFD softvéri prebehla úspešne. Naopak pri kocke a golfovej loptičke sú rozdiely medzi výslednými hodnotami C_D zo simulácie a hodnotami C_D z teórie veľké. Pri kocke je možné tvrdiť, že pri zvyšovaní rýchlosti sa nesúlad simulovanej a teoretickej hodnoty C_D zväčšuje. Protikladom je golfová loptička, ktorej výsledná hodnota C_D zo simulácie sa zrýchľovaním prúdenia vzduchu približuje k hodnote C_D teoretickej.

Tabuľka 1. Výsledné hodnoty z CFD simulácie pri rýchlosti 35 km/h

Objekt	$D_{\text{simulácia}}$ [N]	C_D zo simulácie	C_D teoretické
Kocka	1,83	0,714	1,05
Guľa	2,66	0,32	0,47
Kvapka	0,36	0,062	0,04
Golfová loptička	0,53	0,064	0,4

Tabuľka 2. Výsledné hodnoty z CFD simulácie pri rýchlosti 45 km/h

Objekt	$D_{\text{simulácia}}$ [N]	C_D zo simulácie	C_D teoretické
Kocka	3,07	0,701	1,05
Guľa	4,39	0,319	0,47
Kvapka	0,59	0,062	0,04
Golfová loptička	0,89	0,065	0,4

Tabuľka 3. Výsledné hodnoty z CFD simulácie pri rýchlosti 55 km/h

Objekt	$D_{\text{simulácia}}$ [N]	C_D zo simulácie	C_D teoretické
Kocka	4,47	0,684	1,05
Guľa	6,71	0,327	0,47
Kvapka	0,89	0,062	0,04
Golfová loptička	1,39	0,068	0,4

6. Experimentálne overenie vo veternom tuneli

Testovaniu vo veternom tuneli predchádza rovnaká príprava ako pri CFD simulácii, čo znamená v tomto prípade vytvorenie didaktických pomôcok. Najefektívnejší spôsob bol využiť namodelované objekty v programe Inventor a vytlačiť ich na 3D tlačiarňi. Na obrázku 3 je vidieť jednotlivé objekty, ktoré sú už pripravené na experiment vo veternom tuneli.



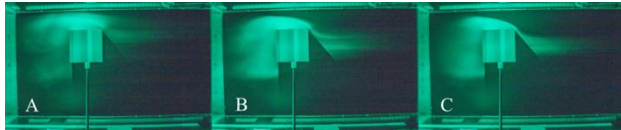
Obrázok 3. Didaktické pomôcky vyrobené pomocou 3D tlače

Experimentálne overenie prebiehalo rovnako ako počas CFD simulácie pri rýchlostiach 35 km/h, 45 km/h a 55 km/h. Rýchlosť sa nastavila podľa nameraného tlaku Pitotovými trubicami prislúchajúceho danej rýchlosti. Hodnota tlaku podľa prevodného grafu pri rýchlosti 35 km/h bola 60 Pa, pri 45 km/h 95 Pa a pri rýchlosti 55 km/h bola hodnota tlaku 140 Pa. Vizualizácia obtekania telesa bola sprostredkovaná využitím dymovej vizualizácie a laserovej roviny.

6.1. Kocka

Na obrázku 4 sú vyobrazené kocky pri troch rýchlostiach časť A zobrazuje test pri rýchlosti prúdenia 35 km/h, časť B 45 km/h a časť C 55 km/h. Narastajúca rýchlosť prúdenia vzduchu

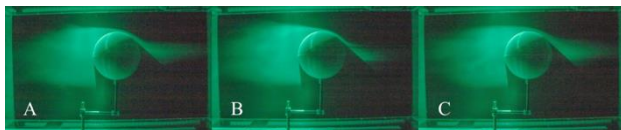
ovplyvňovala len silu prúdenia respektíve hodnotu aerodynamických síl. Na prednej hrane kocky je viditeľné odtrhávajúce prúdy vzduchu. Po vrchnej strane vzduch prúdi laminárne. Za zadnou hranou kocky sa vzduch opätovne odtrháva a na časti A obrázku 4 je veľmi dobre dymom vykreslené vírenie prúdu.



Obrázok 4. Obtekanie kocky vo veternom tuneli pri rýchlosti (A) 35, (B) 45 a (C) 55 km/h

6.2. Guľa

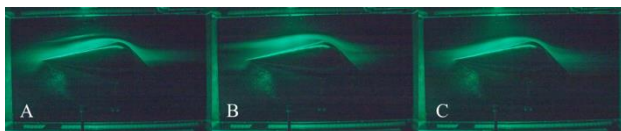
Prúdenie okolo gule charakterizuje laminárne prúdenie. Z obrázku 5 od časti A po C je evidentné, že postupným zvyšovaním rýchlosti sa forma prúdenia nemení, zmena nastáva iba v priestore za guľou. Laminárna medzná vrstva prechádza do turbulentnej v mieste kde sa prúd odtrháva, teda po prechode prúdu na zadnú stranu gule. V rovnakom mieste prúd vzduchu postupuje do úplavu za objektom. Keďže v oblasti úplavu nastáva podtlak, vznikajú tu vírivé prúdy, čo je čiastočne vidieť na obrázku 5.



Obrázok 5. Obtekanie gule vo veternom tuneli pri rýchlosti (A) 35, (B) 45 a (C) 55 km/h

6.3. Kvapka

Učebnicový príklad laminárneho prúdenia vzduchu nastáva v prípade kvapky. Toto tvrdenie potvrdzuje aj obrázok 6, kde dymom vizualizovaný prúd vzduchu sa tiahne pozdĺž celej vrchnej strany telesa. Pri detailnejšom skúmaní obrázka 6, je možné si všimnúť malý nedostatok v podobe odtrhávania prúdu vzduchu v najvyššom bode profilu kvapky. Prúd sa v danom mieste odtrháva z dôvodu nedokonalého prechodu medzi guľovitou a kužeľovou časťou kvapky. Zrýchľovanie prúdenia spôsobuje silnejšie primknutie prúdu vzduchu na povrch telesa. Iba pri tomto objekte nastáva situácia, kedy po prechode prúdiaceho média okolo telesa prúd za telesom pokračuje v rovnakom smere. Prúd vzduchu pokračuje v nezmenenom smere vďaka tvaru telesa - kvapky.

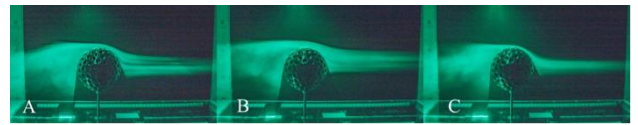


Obrázok 6. Obtekanie kvapky vo veternom tuneli pri rýchlosti (A) 35, (B) 45 a (C) 55 km/h

6.4. Golfová loptička

Vylisované jamky na golfovej loptičke predstavujú faktor, ktorý najviac ovplyvňuje správanie sa prúdu vzduchu. Na obrázku 7 v časti A, kedy je teleso ofukované prúdom s rýchlosťou 35 km/h, je viditeľná medzná vrstva a jemné rozvrstvenie prúdu

vzduchu. Prúdenie pokračuje laminárne po povrchu golfovej loptičky. Odtrhávajúce a vírenie prúdu nastáva až v druhej polovici objektu, kde sa objekt začína zaobľovať. Zvýšenie rýchlosti prináša zväčšenie oblasti úplavu a výraznejšie víry.

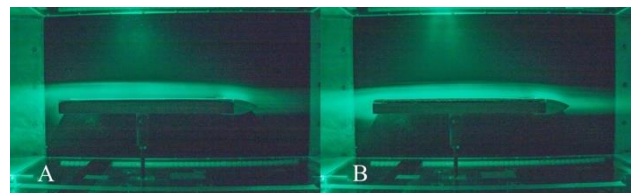


Obrázok 7. Obtekanie golfovej loptičky vo veternom tuneli pri rýchlosti (A) 35, (B) 45 a (C) 55 km/h

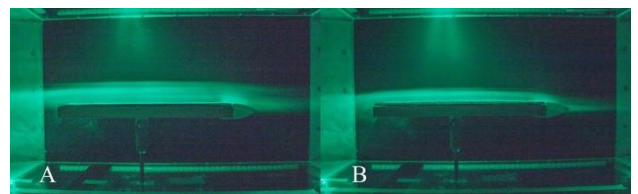
6.5. Doska s brúsnym papierom

Do výskumu bol zaradený ešte jeden objekt - plocha s drsným povrchom, ktorú sa nepodarilo simulovať pomocou CFD programu. To však neprekážalo uskutočniť testovanie prúdenia tejto dosky vo veternom tuneli.

Hypotéza pre prúdenie okolo dosky s brúsnym papierom predpokladala výskyt turbulentného prúdu a odtrhávajúce prúdy. Obidva javy sa mali so zväčšovaním drsnosti povrchu a zvyšovaním rýchlosti prúdu vzduchu zväčšovať. Reálny test vo veternom tuneli nepotvrdil ani jeden z predpokladov. Obrázok 8 ukazuje, že prúdenie vzduchu okolo tohto objektu malo laminárny charakter. Časť A zobrazuje dosku s najjemnejším šmirglom a časť B naopak najdrsnejší povrch brúsneho papiera pri rýchlosti 35 km/h. Ani zvýšením rýchlosti prúdenia na 55 km/h sa prúd neodtrhával a ani sa nezmenil na turbulentný, čo dokazuje vizualizácia na obrázku 9. Experiment prebehol pri kladnom aj zápornom uhle nábehu, avšak opäť sa hypotéza nepotvrdila a prúdenie zostalo laminárne. Detailný pohľad na obrázok 8 a 9 ukazuje odtrhávajúce prúdy vzduchu pri prechode z nábežnej časti na povrch dosky, čo mohlo byť spôsobené nedokonalým zlepením týchto dvoch častí.



Obrázok 8. Obtekanie plochy s drsným povrchom pri rýchlosti 35 km/h (A nižšia drsnosť povrchu 160, B vyššia drsnosť povrchu 40)

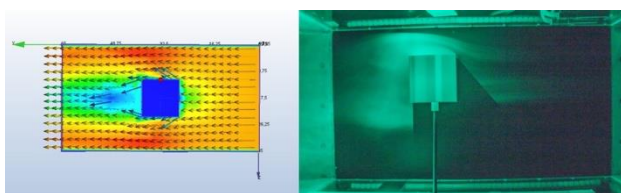


Obrázok 9. Obtekanie plochy s drsným povrchom pri rýchlosti 55 km/h (A nižšia drsnosť povrchu 160, B vyššia drsnosť povrchu 40)

7. Porovnanie CFD simulácie a experimentu vo veternom tuneli

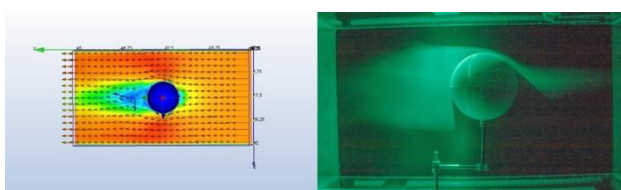
Pri porovnaní hodnôt z CFD simulácie a teoretickými hodnotami nastali viaceré nezrovnalosti. Pri porovnaní vizualizácií z oboch metód analýzy vychádzali vo väčšine zhody. Dokazuje to aj obrázok 10, kde je zobrazené naľavo obtekanie kocky po CFD simulácii a napravo obtekanie kocky vo veternom tuneli. Je

viditeľné, že vizualizácie sa zhodujú, no vo veternom tuneli je lepšie zobrazená oblasť úplavu, kde prúd vzduchu vytvára víry.



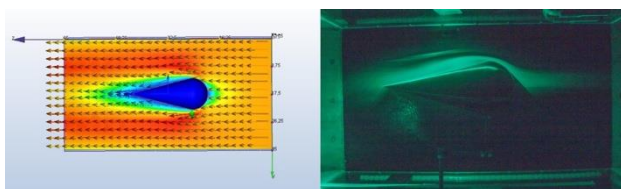
Obrázok 10. Porovnanie vizualizácií prúdenia vzduchu okolo kocky (naľavo CFD simulácia, napravo experiment vo veternom tuneli)

Rovnaký jav nastáva aj v prípade gule. Vektory viditeľné na obrázku 11 na vizualizácii po CFD simulácii smerujú rovnako ako dymová stopa prúdu vzduchu vo veternom tuneli. Jediný rozdiel predstavuje priestor za guľou, kde sa nachádza úplav. Dymová vizualizácia pôsobí celistvejšie oproti vektorom smerujúcich do rôznych strán.



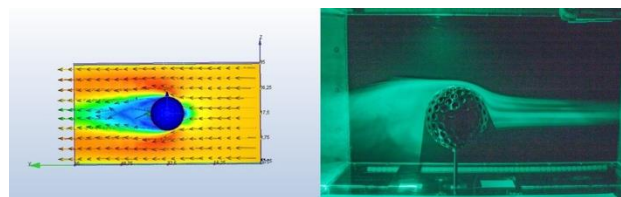
Obrázok 11. Porovnanie vizualizácií prúdenia vzduchu okolo gule (naľavo CFD simulácia, napravo experiment vo veternom tuneli)

Kvapka, ako učebnicový príklad obtekania vzduchu okolo telesa, predstavuje ukážkovú zhodu vizualizácie medzi CFD softvérom a veterným tunelom. Ako možno pozorovať na obrázku 12, laminárny prúd vzduchu sa tiahne pozdĺž celého povrchu telesa pri obidvoch vizualizáciách. V tomto prípade je zhoda aj v oblasti úplavu.



Obrázok 12. Porovnanie vizualizácií prúdenia vzduchu okolo kvapky (naľavo CFD simulácia, napravo experiment vo veternom tuneli)

Posledným objektom komparácie medzi vizualizáciami CFD je golfová loptička. Obrázok 13 zobrazuje vizualizáciu prúdenia vzduchu okolo golfovej loptičky po CFD simulácii (naľavo) a vo veternom tuneli (napravo). Jamky na povrchu golfovej loptičky slúžia na znížovanie aerodynamického odporu, čo dokazovali aj hodnoty po CFD simulácii. Pri vizualizácii z CFD programu je vidieť, že tieto jamky spôsobujú slabé odtrhávajúce prúdy vzduchu. Naopak test vo veternom tuneli dokazuje, že prúdenie je laminárne a k odtrhávaniu prúdu vzduchu nedochádza. Príklad golfovej loptičky dokazuje, že overenie jednej metódy pomocou druhej prináša spoľahlivejšie výsledky.



Obrázok 13. Porovnanie vizualizácií prúdenia vzduchu okolo golfovej loptičky (naľavo CFD simulácia, napravo experiment vo veternom tuneli)

8. Záver

Tento článok sa venoval javom a zákonom aerodynamiky. Aerodynamika popisuje vlastnosti a správanie vzájomného pôsobenia prúdiaceho média a pevných objektov. Existujú rôzne prostriedky, spôsoby či zariadenia, ktoré vedci využívajú na popis aerodynamických javov. V tejto práci sa prúdenie vzduchu testovalo CFD simuláciou a experimentom vo veternom tuneli.

Predmetom skúmania boli didaktické pomôcky základných geometrických tvarov. Navrhnuté didaktické pomôcky boli skúmané pomocou numerickej metódy a experimentálnej metódy. Simulácia v CFD softvéri je vysoko efektívny nástroj a dokáže odhaliť aerodynamické nedostatky ešte pred výrobou daného objektu. Na druhej strane CFD softvér nie je dostatočne spoľahlivý ako reálny test vo veternom tuneli.

Ukázalo sa, že veterný tunel poskytuje hodnotný a interaktívny spôsob vizualizácie a experimentov s aerodynamickými javmi. V kombinácii s modernými výpočtovými metódami ako je CFD simulácia, prispievajú k lepšiemu pochopeniu a zobrazeniu prúdenia vzduchu.

Objekty skúmané v tejto štúdii sa dajú využiť v rámci vzdelávania o aerodynamike. Ich jednoduchý tvar prináša veľký benefit v oblasti chápania prúdenia plynu a transformácie teoretických poznatkov do praxe. Najväčším prekvapením bola plocha s brúsnym papierom, pri ktorej test neprebíhal podľa očakávaní. Je potrebné ešte upraviť danú pomôcku tak, aby spĺňala účel zamerania.

Na záver možno konštatovať, že veterný tunel a CFD simulácia majú perspektívu v oblasti vedy a výskumu. Vzdelávanie môže byť niekedy náročný proces a didaktické pomôcky pomáhajú objasniť komplexné fyzikálne javy. Okrem toho môžu zlepšiť zapamätanie si učiva, zvýšiť záujem študentov o štúdium ako aj podporiť aktívnu účasť študentov na vyučovacom procese.

Referencie

- [1] P. Pecho a K. Šajbanová, Počítačové simulácie v letectve - Návody na cvičenia, Žilina: EDIS-vydavateľstvo UNIZA, 2022.
- [2] M. Murgašová, - *Experimentálne meranie a numerické riešenie prúdenia pri obtekaní telies*, Bratislava, 2014.
- [3] „Chegg,“ [Online]. Available: <https://d2vlcm61l7u1fs.cloudfront.net/media%2F192%2>

F19298a70-ea67-449a-8228-
f9e3a8a1f2fa%2FphpGDu6Lm.png.

- [4] A. Gross, „Aerodynamické tunely pre automobily,“ 2014. [Online]. Available: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84653. [Cit. 2024].
- [5] M. Bugaj, Aeromechanika 1 : základy aerodynamiky, Bratislava: DOLIS, 2015.
- [6] „Mechanika tekutin,“ 12 2017. [Online]. Available: https://ooze.fberg.tuke.sk/wp-content/uploads/2017/12/Mechanika-tekutin_skripta-1.pdf. [Cit. 23 3 2024].
- [7] P. Gašparovič, *CFD modelovanie transsonického prúdenia v dúchadle leteckého motora*, Košice, 2008.
- [8] NASA official, „Drag Coefficient,“ 28 Júl 2022. [Online]. Available: <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-coefficient/>. [Cit. 2024].