

SIMULATIONS OF AERODYNAMICS

SIMULÁCIE V AERODYNAMIKE

Miroslav Novák

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
novak66@stud.uniza.sk

Martin Bugaj

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
martin.bugaj@fpedas.uniza.sk

Abstract

The aim of the paper is to approach the issue of simulations in aerodynamics. To describe the physical rules and basic mathematical equations, which are essential in the use of computing techniques. The paper deals with CFD (Computational Fluid Dynamics) and informations which are necessary for its understanding, the author further describes different software programs used for simulation purposes. By means of analyzing technical papers, the author compares and describes software considering to their practical use. The author also describes the aerodynamic tunnels and clarifies the basic issues related to aerodynamic tunnels and discuss factors that affect the resulting measurement quality. The author deals with methods of measuring individual physical quantities that are the interest of simulation or measurement. At the end of the paper, the author compares the specific aerodynamic tunnels and the possibilities of measurements that aerodynamics tunnels provide.

Keywords

Aerodynamics, CFD, Wind tunnel

1. Úvod

Aerodynamika predstavuje hlavný vedný odbor týkajúci sa letectva. Vďaka poznatkom z tohto odboru máme dostatok informácií týkajúcich sa podmienok potrebných na samotný let lietadla. Poznatky a informácie z tejto oblasti je možné uplatniť aj v iných odvetviach, ako napríklad automobilový priemysel alebo stavebné inžinierstvo, kde zohráva podstatnú úlohu.

Cieľom bakalárskej práce je teoreticky priblížiť a preskúmať základné možnosti simulácií, predstaviť dôležité fyzikálne zákonitosti a matematické rovnice, ktoré je nutné vhodným spôsobom implementovať v prípade využitia výpočtovej techniky. S vývojom výpočtovej techniky sa rozšírila aj technológia CFD, teda výpočtová dynamika tekutín. V praxi je však vyžadovaná znalosť tejto technológie a jej pozadia tak, aby bola správne aplikovaná a poskytovala možnosť získať výsledky blízke realite aplikovateľné v praxi. V súvislosti s technológiou CFD je autorovým cieľom stručne a vecne popísať softvéry využívajúce sa na simulácie v aerodynamike a zhodnotiť ich použitie.

V práci sa autor venuje odbornej terminológii a zákonitostiam aerodynamiky v teoretickej rovine. Následne venuje pozornosť technológii CFD, objasňuje jej účel, výhody, bližšie popisuje faktory, ktoré ovplyvňujú celkovú kvalitu výslednej simulácie. V súčasnosti je vzhľadom na komplexnosť a komplikovanosť skúmaných modelov dôležité nachádzať isté typy kompromisov a matematických zjednodušení, ktoré treba citlivo aplikovať tak, aby bol výsledok správny a v prvom rade, aby bol splnený účel samotnej počítačovej simulácie a to priblíženia správania sa v reálnom prostredí.

V ďalšej časti sa autor venuje aerodynamickým tunelom. Bližšie popisuje typy aerodynamických tunelov a ich využitie. Venoval sa jednotlivým častiam, z ktorých sú zložené a popísaniu ich účelu. Následne sa venoval technikám a systémom slúžiacich pre meranie potrebných fyzikálnych veličín ako je rozloženie tlaku alebo meraniu silového pôsobenia na skúmaný model a bližšie objasnil možnosti upevnenia modelu v tuneli. V poslednej časti autor objasnil možnosti týkajúce sa vizualizácie prúdenia a bližšie predstavil techniky využívané v súčasnosti. Na záver predstavil európske, strategicky dôležité aerodynamické tuneli, ich súčasné využitie a objasnil hlavné rozdiely.

2. Úvod do aerodynamiky

Aerodynamika je rozsiahly vedný odbor a nespochybniteľne jedným z najdôležitejších vedeckých odvetví pri návrhu lietadiel a ich jednotlivých častí. Je využívaná v rôznych oblastiach týkajúcich sa aerodynamiky vozidiel, stavby budov, navrhovaniu lodí, veterných turbín a v neposlednom rade aj lietadiel samotných. Aerodynamika je úzko spojená s hydrodynamikou. Práve táto vlastnosť predurčuje využitie zákonov hydromechaniky v simuláciách pre určovanie konkrétnych parametrov predmetov, skúmaných modelov a ich vlastností, ich správanie sa pri obtekaní kvapalinou alebo plynom.

Aerodynamika je veda zaoberajúca sa pôsobiaci silami na teleso, ktoré je obtekané prúdom vzduchu a ich vzájomnou interakciou. Umožňuje pilotovi pochopiť základy letu, jeho ovládanie a predpokladať správanie lietadla v každej fáze letu. Od základných aerodynamických vlastností sa odvíjajú vlastnosti lietadla pohybujúceho sa vo vzduchu. Neustále dynamické silové pôsobenie na lietadlo ovplyvňuje jeho stabilitu a riaditeľnosť pri rôznych uhloch nábehu, tým pádom existujú podmienky, za

ktorých je lietadlo schopné bezpečného letu a podmienky nebezpečné pre let lietadla, pri ktorých môže dôjsť k strate kontroly a vztlaku a v najhoršom prípade k pádu.

3. Mechanika tekutín

Mechanika tekutín je vedný odbor, ktorý sa zaoberá správaním tekutín a plynov, ktoré môžu byť v pokoji (hydrostatika) alebo v pohybe (hydrodynamika).

Pod pojmom tekutina môžeme rozumieť kvapaliny aj plyny. Od tuhých látok sa podstatne odlišujú pohyblivosťou častíc. Ich častice sa môžu navzájom relatívne voľne pohybovať. Kvapaliny je takmer nemožné stlačiť, pretože ich molekuly majú vysoký odpudivý charakter pri malých vzdialenostiach a medzi ich základné vlastnosti patrí ich schopnosť kopírovať tvar telesa, v ktorom sa nachádzajú.

Plyny sú naopak relatívne ľahko stlačiteľné z dôvodu veľkej vzdialenosti ich molekúl a úplne vypĺňajú nádobu, v ktorej sa nachádzajú. Jednou zo základných vlastností kvapalín a plynov teda je, že nemajú stály tvar.

Vo všeobecnosti môžeme povedať, že kvapaliny sú nestlačiteľné a plyny sú. Stlačiteľnosť kvapalín však musíme zobrať do úvahy, pokiaľ je pod veľmi vysokým tlakom, zatiaľ čo pri plynach stlačiteľnosť môžeme zanedbať, pokiaľ je tlaková zmena malá. Jednou z ďalších vlastností tekutín je viskozita. V jednoduchosti viskozitu opisujeme ako trenie medzi dvoma vrstvami tekutiny. Jej vplyv si môžeme znázorniť napríklad pri porovnaní vody a oleja. Voda, ktorá má nízku viskozitu je tekutejšia a naopak olej, ktorý má viskozitu vysokú je viditeľne hustejší.

Riešenie dynamiky tekutín je v súčasnosti z pohľadu matematiky veľmi zložitá, aktuálne sa tieto problémy riešia pomocou výpočtovej techniky. Odvetvie, ktoré sa zaoberá touto problematikou sa nazýva výpočtová dynamika tekutín (CFD – Computational Fluid Dynamics) [1][2].

4. Computational fluid dynamics

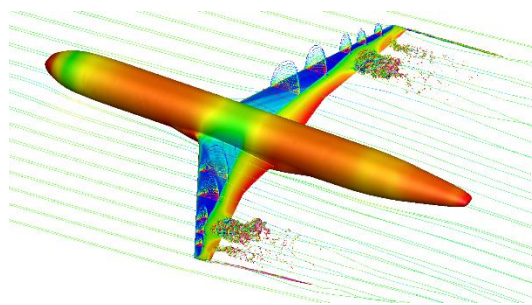
CFD je vedný odbor založený na poznatkoch z fyziky, a to predovšetkým z mechaniky tekutín, termomechaniky, numerickej matematiky, ktorého hlavným účelom je za pomoci vhodného softvéru a výpočtovej techniky simulovať fyzikálne javy rôzneho druhu a náročnosti. Počítače sa využívajú na vykonávanie výpočtov potrebných na simuláciu interakcie kvapalín a plynov s predmetmi rôzneho charakteru. Použitím výkonnejších počítačov vieme dosiahnuť lepšie a hlavne presnejšie dáta, ktoré majú rozhodujúci vplyv pri reálnom využití daného modelu, ktorý môže byť následne overený v prostredí veterného tunela. CFD programy sa v súčasnosti považujú za štandardné numerické nástroje pri vývoji budov, vozidiel, mostov a lietadiel, takže majú naozaj široké využitie v inžinierstve. Dokážeme nimi simulovať nielen správanie prúdu tekutiny, ale aj prenos tepla, prenos hmoty (vyparovanie alebo rozpúšťanie), zmenu skupenstiev (zamrzanie, topenie alebo var), chemické reakcie, mechanický pohyb alebo namáhanie a ohýbanie pevných konštrukcií (viď. Obrázok 1) [3][4].

Výhody využitia CFD môžeme zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- poskytuje podrobné informácie pre pochopenie vlastností prúdu, úbytkov hmoty, prenosu hmoty a tepla a separácií

častíc. Toto všetko dáva inžinierom oveľa lepšie a hlbšie poznatky toho, čo sa deje v konkrétnom procese,

- umožňuje vyhodnotiť geometrické zmeny modelov oveľa rýchlejšie a lacnejšie ako laboratórne testovanie,
- nachádzame odpovede na otázky typu „čo keby“ veľmi rýchlo,
- zmenšujú sa problémy s mierkou modelu, pretože modely podliehajú zákonom základnej fyziky a sú nezávislé od veľkosti mierky,
- možnosť simulovať podmienky, v ktorých nie je možné zabezpečiť podrobné merania napríklad kvôli vysokým teplotám [4].



Obrázok 1: Výsledná ilustrácia modelu pri využití technológie CFD, rozloženia tlaku a vírových štruktúr. Zdroj: [http://www.cfd4aircraft.com/images/ddes_fancy.png].

4.1. Turbulentné modely

Pri turbulentných prúdeniach tekutiny vznikajú fyzikálne javy, ktoré sa musia vhodne a korektne simulovať. Miešanie prúdov a úplav za telesom sú znakmi voľnej turbulencie, zatiaľ čo turbulentná medzná vrstva je závislá od obtekaného povrchu. Povrchy sú z väčšej časti obtekané turbulentným prúdením v porovnaní s laminárnym prúdením, ktoré sa vyskytuje v nábehovej časti prúdenia.

Oba typy týchto prúdení je treba vnímať samostatne a vnímať ich špecifiká. Tento fakt komplikuje aj využitie počítačových simulácií, ktoré so sebou nesú neistotu vo výsledku. V mechanike tekutín existuje viacero modelov, ktorých rozdiel spočíva v presnosti, v zložitosti a tým v závislosti od výpočtového výkonu počítača a celkových nákladov. V tejto časti sa teda budeme venovať turbulentným modelom využívaných pri simuláciách. V tejto časti práce objasním princípy, ktoré sú uplatnené u jednotlivých turbulentných modeloch, časovú a výpočtovú náročnosť a vhodnosť ich uplatnenia na určité geometrie.

4.1.1. DNS (Direct numerical simulation)

DNS je metóda, ktorá sa riadi úplnými Navier-Stokesovými rovnicami. Prúdenie je simulované v priestore a čase a nie je potrebný žiadny zjednodušujúci model prúdenia, preto sa táto metóda pokladá za najjednoduchší koncept pre simuláciu. Pri tomto modeli simulujeme prúdenie vo všetkých mierkach od najväčších po najmenšie. Z dôvodu využitia veľmi jemnej siete a veľkého počtu buniek s veľmi malým časovým krokom má DNS extrémne veľké nároky na výpočtový výkon počítača a využíva

sa len v špeciálnych prípadoch na výskumné účely. DNS je však možné využiť v oblasti malých Reynoldsových čísel rádovo 6000 [3][5][6].

4.1.2. Simulácia veľkých vírov (Large Eddy Simulation)

Model simulácie veľkých vírov je aktuálne jeden z najvyužívanejších. Pri simulácii sa využíva filtrovaná Navier-Stokesova rovnica. Model je založený na Kolmogorovej teórii podobnosti, kde sa vírivé pohyby veľkých mierok prepočítavajú a vírivé pohyby mierok malých modelujú. Časové kroky sú taktiež väčšie a preto je možné realizovať výpočty aj pre väčšie Reynoldsove čísla v porovnaní s DNS, kedy je v prípade LES potrebných len približne 3 % výpočtového výkonu oproti DNS [3][4][17].

4.1.3. Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS)

Rovnice RANS sa riadia prenosom spriemerovaných prietokových veličín, pričom sa modeluje celý rozsah mier turbulencie. Tieto spriemerované Navier-Stokesove rovnice sú založené na báze štatistického modelu turbulencie. Dôsledkom spriemerovania rovníc je oddelenie strednej hodnoty veličín od fluktučných zložiek a následnej úpravy tvaru pre stredné časové hodnoty, ktoré sú formálne zhodné s pôvodnými rovnicami, ale obsahuje fluktučné zložky rýchlosti a iných veličín, ktoré je možné modelovať. Spôsob modelovania založený na RANS preto výrazne znižuje potrebný výpočtový výkon, zdroje a je všeobecne používaný v praktických inžinierskych aplikáciách. Existuje viacero druhov RANS modelov, ktoré zjednodušujú problém prídávaním ďalších transportných rovníc (k- ϵ model, k- ω model, k-T model, URANS) [18].

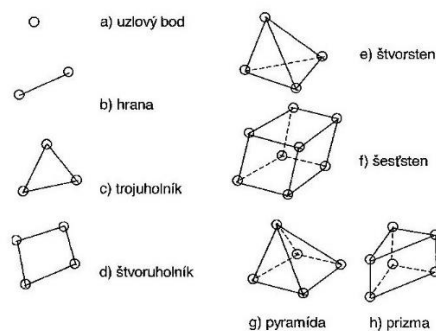
4.1.4. Detached Eddy Simulation (DES)

Metóda DES predstavuje hybridný model medzi metódami LES a RANS a kombinuje výhody oboch týchto metód a zároveň sa snaží minimalizovať ich nedostatky. Pri tomto modeli sa uplatňuje prístup modelu RANS v oblastiach medznej vrstvy a prístup modelu LES sa uplatňuje v ostatných oblastiach, hlavne však v oblasti jadra turbulentného prúdenia, kde vírivé prúdenie veľkej mierky zohráva najväčšiu úlohu. Model DES bol navrhnutý pre prúdenia ohraničené stenami pri vysokých Re, kedy by použitie modelu LES bolo nevhodné a príliš drahé. Použitie modelu si však môže stále vyžadovať značný výkon počítača [19].

4.2. Diskretizácia oblasti prúdenia

Pre počítačové riešenie rovníc CFD je potrebné, aby bol priestor, v ktorom sa počíta prúdenie diskretizovaný. Inými slovami sa z určujúcich rovníc diskretizáciou stávajú algebrické rovnice (matematický model). Jednoznačné riešenie dostaneme definovaním začiatkových a okrajových podmienok, pomocou ktorých získame potrebné informácie o prúdacej tekutine v ľubovoľnom mieste a čase [5].

Priestor, v ktorom sa riešia rovnice prúdenia sa pokrýva uzlovými bodmi. Spojením dvoch uzlových bodov získame hranu. Z hrán dokážeme vytvoriť rôzne prvky do dvojrozmernej alebo trojrozmernej siete, ktorá následne tvorí konečný počet prvkov (2D,3D), v ktorých budú počítané veličiny (viď. Obrázok 2) [3].



Obrázok 2: Typy prvkov tvoriace sieť. Zdroj: [12].

Hlavnými charakteristikami siete je množstvo buniek, veľkosť buniek, geometrický tvar a kvalita. Siete môžeme všeobecne rozdeliť na siete štruktúrované, neštruktúrované, hybridné a zonálne.

Výber typu siete a jej kvalita má náležitý vplyv na relevantnosť výsledku a dobu výpočtu. Pod kvalitnou sieťou rozumieme sieť, ktorá je dostatočne jemná na zachytenie modelovaného deja a jej bunky, čo najmenej podliehajú tvarovej deformácii s pravidelným rozložením a pravidelnou veľkosťou [3][5][7].

5. Metodika a metodológia práce

5.1. Charakteristika objektu skúmania

Hlavným cieľom bakalárskej práce je preskúmať problematiku CFD simulácií v aerodynamike a predstaviť rôzne softvérové možnosti, ich vzájomné porovnanie a poskytnutie informácií o ich popredných alebo záporných vlastnostiach, a to prostredníctvom preskúmania a následnej analýzy recenzovaných odborných prác venujúcich sa simuláciám v aerodynamike. Preskúmať praktické overenie simulácii CFD v prostredí aerodynamických tunelov a analyzovať konkrétne aerodynamické tunely a ich možnosti.

5.2. Spôsob získavania údajov a ich zdroje

Samotnému spracovaniu a porovnaniu jednotlivých CFD simulácií predchádzalo podrobné štúdium dostupnej literatúry, výskumov a vedeckých recenzovaných relevantných zdrojov zaoberajúcich sa skúmanou problematikou, či už v zahraničí alebo na Slovensku. Vyhľadávanie bolo uskutočnené prostredníctvom využitia internetu a relevantných stránok. Práce boli zvolené zámerným výberom, kde hlavným kritériom bolo využitie softvérového programu na simulácie aerodynamických javov. Analýze bolo podrobených tridsať výskumných prác, kde išlo o rovnomerné zastúpenie zo Slovenska aj zahraničia. Bakalárska práca má prevažne teoretický charakter s prvkami explorácie, ktorá bola využitá najmä v rámci porovnávaní jednotlivých softvérov. Autori bakalárskej práce čerpal poznatky a zistenia o softvérových možnostiach simulácií a o aerodynamických tuneloch od viacerých autorov, ktoré následne porovnával vzhľadom na ich praktické využitie.

5.3. Metódy vyhodnotenia

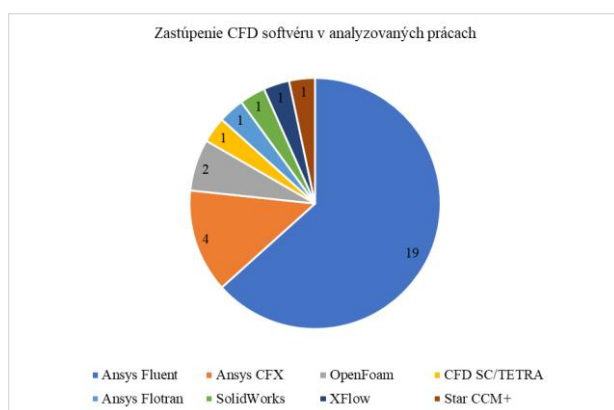
V bakalárskej práci autor použil metódu analýzy, teda podrobný rozbor jednotlivých výskumných prác a teoretických poznatkov. Syntézu, ktorej cieľom je združenie menších častí do zmysluplného celku a následne bola aplikovaná metóda porovnania jednotlivých softvérových programov vzhľadom na spoločné alebo odlišné vlastnosti. V rámci štatistického spracovania autor použil deskriptívnu (popisnú) štatistiku využívajúcu grafy a tabuľky na sprehľadnenie získaných údajov z analýzy.

6. CFD softvér

Numerická vizualizácia je platforma, ktorá poskytuje jednoduchší spôsob analýzy veľkých, zložitých a viacrozmerných informácií. Výpočtová dynamika tekutín, teda CFD, kombinuje mechaniku tekutín s touto platformou a umožňuje simulovať správanie prúdenia stlačiteľného aj nestlačiteľného média. Technológiou možno vypočítať teplotu, rýchlosť, tlak, koncentráciu kontaminácie a ďalšie vlastnosti kvapaliny zobrazené vhodným spôsobom. Výsledky pomáhajú inžinierom rýchlo a efektívne vylepšiť a dokončiť navrhovaný model [8].

Užívateľ má mnoho možností pri výbere samotného simulačného softvéru. Užívateľ sa musí rozhodnúť, či využije voľne dostupný softvér ako je OpenFOAM, prípadne využije komerčný softvér v podobe Ansys Fluent, ktorý je častokrát využívaný na školské účely vďaka jeho študentskej verzii a veľmi dobrému užívateľskému prostrediu. Softvér Ansys Fluent inak predstavuje finančne veľmi náročnú možnosť, ktorá sa pohybuje v rádoch tisícok eur za licenciu. OpenFOAM je naopak zadarmo, no neponúka atraktívne riešenie pre laikov, ktorí musia ovládať programovací jazyk C++ pre porozumenie a prácu v tomto programe.

V rámci analýzy som zistil, že vo väčšine prác týkajúcich sa simulácie aerodynamických veličín bol využitý softvér Ansys Fluent (viď. Graf 1). Bližší popis ostatných CFD softvérov sa nachádza v bakalárskej práci. V nasledujúcej kapitole popisujem iba softvér Ansys Fluent



Graf 1: Zastúpenie CFD softvéru v analyzovaných prácach. Zdroj: Autori.

6.1. Ansys Fluent

Ansys Fluent je v súčasnosti jeden z najpoužívanejších softvérov využívaným predovšetkým pre simuláciu obtekania modelov tekutinou. Ansys ponúka niekoľko balíkov, v ktorých je zahrnutý samotný Fluent. CFD Premium Bundle obsahuje Fluent,

Workbench (softvér spravujúci rôzne nástroje) SpaceClaim (CAD nástroj, ktorý je teraz samostatným softvérom), Ensignt (softvérový balík pre následné spracovanie), CFX (ďalší CFD riešiteľ) ako aj CFD-Post (nástroj pre následné spracovanie). Ansys teda ponúka širokú škálu softvéru, ktorý poskytuje prostredie pre samotné vytvorenie modelu, jeho upravenie pred samotnou simuláciou, diskretizáciu, simuláciu a následné spracovanie výsledkov [9].

Ansys Fluent ponúka veľmi dobré užívateľské rozhranie, ktoré je intuitívne a jednoduché. Pred samotnou simuláciou je potrebné určiť okrajové podmienky, vlastnosti prúdenia, nastavenie riešiteľa alebo podmienky zastavenia. Zadávanie príkazov je možné aj vďaka prítomnosti príkazového riadku, kde sa môžu zobraziť aj prípadné chyby v priebehu simulácie. Keď sú všetky potrebné podmienky správne definované, je možné simuláciu spustiť priamo z aplikácie Fluent alebo pomocou skriptu. Po dokončení môžu byť výsledky analyzované buď z prostredia Fluent, prostredníctvom CFD-Post alebo Ensignt.

Ansys Fluent je veľmi obľúbený aj vďaka širokej databáze materiálov a fyzikálnych možností. K dispozícii sú RANS modely pre časovo stále prúdenia, laminárne alebo turbulentné prúdenie, modely pre riešenie chemických reakcií a mnoho iných. Takisto disponuje aj modelmi DES a LES. Ansys integroval aj turbulentné modely ako je GEKO (hybridný model K-Omega SST a K-Epsilon Realizable). Zaujímavosťou je prítomnosť modelu VOF-to-DPM, ktorý sa využíva pri simulácii rozprašovania kvapaliny pomocou dýz [9].

Prítomnosť funkcie na importovanie geometrie umožňuje priamy import univerzálnych súborov CAD ako je Parasolid, aj keď s nákupom ďalších licenčných funkcií.

V diskretizačných funkciách je Ansys Fluent na najvyššej úrovni a umožňuje zobrazenie veľkosti jednotlivých buniek ešte predtým, než bude čokoľvek pokryté sieťou. Ansys Fluent využíva bunky v tvare mnohostenu napríklad štvorstenu alebo šesťstenu. Veľkým prínosom je prítomnosť novej technológie na vytváranie siete s názvom Mosaic, ktorá vytvára hybridnú sieť, vďaka ktorej dokážeme zvýšiť presnosť a znížiť potrebný čas na výpočet.

Licencia za tento softvér je však veľmi drahá a aktuálne je 30000 Eur. Ansys však ponúka aj študentské verzie, vďaka ktorým je tento program populárny aj na akademickej pôde [9].

7. Aerodynamické tunely

Aerodynamické tunely sú dôležitým pokračovaním pri tvorbe nových geometrií a ich overovaní. Informácie získané pomocou metódy CFD sa verifikujú v týchto tuneloch a následne je možné pokračovať v ich úprave pre dosiahnutie požadovaných vlastností. Vďaka kombinácii týchto dvoch metód skúšok môžeme veľmi detailne pochopiť správanie prúdenia a vyvodiť tak závery užitočné pre praktickú skúšku v reálnych podmienkach. Aj keď majú simulácie pomocou CFD technológií a aerodynamických tunelov zásadnú úlohu, je dôležité, aby sa získané informácie zhodovali aj s numerickými simuláciami.

Príkladmi využitia týchto tunelov môže byť testovanie krídel alebo leteckých spaľovacích motorov, ktoré vyžaduje finančne náročný filtračný systém vzduchu pre zachovanie kvality vzduchu vo vnútri tunela. V prípade automobilového priemyslu je dôležitou vlastnosťou automobilu jeho odpor a vytváraný

hluk, ktorý je možné merať práve v takomto tuneli. V architektúre sa využíva na skúmanie atmosférickej medznej vrstvy, rýchlostí prúdenia a turbulencií v blízkosti zeme a jeho vplyvu na budovy [10].

Aerodynamické tunely môžeme jednoducho opísať ako veľké rúry, v ktorých sa nepohybujú predmety voči vzduchu ale práve naopak, vzduch prúdi okolo skúmaných predmetov, ktoré sú ukotvené na danom mieste [11].

Všetky aerodynamické tunely sú zložené z komplexu častí a jednotlivých oddelení. Základom je vytvorenie pohybujúceho sa prúdu vzduchu, ktorý sa vo väčšine prípadov realizuje pomocou ventilátora. Vytvorené prúdenie prechádza cez zahnuté časti, ktoré sa nazývajú kolená, kde sa o jeho usmernenie starajú usmerňovacie lopatky. V ďalšej časti sa prúd narovnáva prechodom cez sieťku. Prúd vzduchu ďalej prechádza cez merací priestor v tvare dýzy, ktorý je v týchto miestach najužší a vzduch tu prúdi najvyššou rýchlosťou až do difúzora. V meracom priestore je vzduch homogénny a uskutočňujú sa tu merania. Za meracím úsekom prúd vstupuje do difúzora, kde sa rozmery tunela zväčšujú a dochádza tu k spomaleniu vzduchu. Nasleduje opäť vstup do ventilátora, čím sa okruh uzatvára. Tento stručný opis je opisom uzavretého typu aerodynamického tunela. Hlavným rozdielom medzi otvoreným a zatvoreným typom je, že pri otvorenom type aerodynamického tunela vstupuje vzduch z atmosféry a rovnako do nej ústí aj výstup [12].

Aerodynamické tunely sú navrhnuté pre konkrétny účel a rozsah rýchlostí. Existuje veľa typov aerodynamických tunelov a niekoľko rôznych spôsobov ich klasifikácie.

- Aerodynamické tunely môžeme všeobecne klasifikovať podľa:
- dosiahnuteľnej rýchlosti prúdenia (podzvukové, transonické, nadzvukové a hypersonické),
- geometrie tunela (otvorený a uzavretý)
- pracovnej látky (vzduch, dusík, hélium)

7.1. Časti aerodynamických tunelov

7.1.1. Testovacia komora

Komora alebo testovacia časť je navrhovaná vzhľadom na celkové špecifikácie tunela ako rýchlosť prúdenia a želaná kvalita prúdenia. Veľkosť testovacej komory a rýchlosť prúdenia ďalej stanovujú maximálnu veľkosť testovaných modelov a maximálne dosiahnuteľné Re . Tvar prierezu testovacej komory závisí od využitia. V niektorých prípadoch je potrebné umiestnenie testovacieho príslušenstva v priestoroch testovacej komory. V takýchto prípadoch je odporúčané udržiavať v komore tlak rovnaký ako je v okolitom prostredí, ktorý sa docieli otvorom vo veľkosti 1 % celkovej dĺžky testovacej komory. Existujú aj testovacie komory s mierne odlišnými stenami, a to za účelom správneho simulovania medznej vrstvy a jej rastu [13].

7.1.2. Dýza

Zúžená časť alebo dýza je časť nachádzajúca sa pred testovacou časťou a je najdôležitejšou časťou aerodynamického tunela. Má najväčší vplyv na kvalitu prúdenia v testovacej časti tunela. Jej účelom je urýchliť prúd vzduchu, znížiť turbulencie a zabezpečiť homogénne prúdenie. Zrýchlenie a kvalita prúdenia závisí od pomeru N , ktorý je daný pomerom plochy vstupu a plochy výstupu. Veľkosť tohto pomeru by mala byť čo najväčšia a pre civilné využitie by malo mať hodnotu 4 – 6. Pri takomto pomere sa zaistí kvalitatívne vhodné prúdenie s mierou turbulencie približne 2 % [13].

7.1.3. Usmerňovacia komora

V prípade potreby vysoko kvalitného prúdenia je potrebná inštalácia dodatočných prvkov na zabezpečenie vyššej homogénnosti prúdenia a zníženia úrovne turbulencií pred vstupom do dýzy. Na tieto účely slúžia sieťky a usmerňovacia hexagonálna mriežka. Obe zariadenia docielia zvýšenie kvality prúdenia pomocou tlakovej straty. Hexagonálna mriežka veľmi dobre eliminuje laterálne turbulencie. Sieťky sú zase vhodné na elimináciu pozdĺžnych turbulencií. Využitím série dvoch alebo troch sieťok dokážeme znížiť úroveň turbulencie až na hodnotu 0,15 % v dvoch smeroch [13].

7.1.4. Difúzor

Difúzor vedie prúdenie späť k ventilátoru. V tejto časti dochádza často k separácii prúdu. Tvar prierezu sa môže pozdĺž difúzora meniť, pretože spája koleno, ktorého tvar sa zvyčajne podobá tvaru testovacej komory so vstupom do ventilátora. Analogicky k predchádzajúcemu prípadu poskytuje spojenie medzi východom z ventilátora a kolonom, ktorý má prierezový tvar podobný tvaru skúšobnej komory [13].

7.1.5. Kolená

Aerodynamické tunely s uzavretým okruhom si vyžadujú inštaláciu štyroch rohov respektíve kolien, ktoré zodpovedajú za viac ako 50 % z celkovej tlakovej straty. Najväčší vplyv má prvé koleno, pretože predstavuje asi 34 % z celkovej tlakovej straty. Na zníženie tlakovej straty a na zlepšenie kvality prúdenia na výstupe z kolena musia byť inštalované lopatky. Lopatky možno definovať ako jednoduché zakrivené profily. Rozmery kolena sú závislé od rozmerov difúzora, ktorý sa naň pripája. Šírka kolena na jeho výstupe by mala byť väčšia z dôvodu, že pozitívne ovplyvňuje celkové straty tlaku. Rádus kolena je väčšinou úmerný rozmerom napájajúcej sa časti. Rádus kolena je rovnaký ako rádus lopatiek respektíve ich natočenia [13].

7.1.6. Zdroj energie

V aerodynamických tuneloch môžeme ako zdroje energie použiť ventilátory alebo kompresory. Ich úlohou je vytvorenie želaného prúdu vzduchu požadovanej veľkosti a jeho udržanie počas doby testovania aj napriek stratám. Bližšie ho špecifikuje tlakový prírastok, objemový prietok a výkon.

Je potrebné, aby takýto zdroj dokázal kompenzovať straty v aerodynamickom tuneli. Existuje viacero možností, či už využitie jedného veľkého ventilátora alebo viacerých menších uložených do kaskád [13].

7.2. Merania v aerodynamickom tuneli

Určenie veľkostí síl a momentov, analýza prúdového poľa okolo skúmaného predmetu v aerodynamickom tuneli je elementárnou záležitosťou pre získanie celkových aerodynamických vlastností. Na tento účel slúžia konkrétne zariadenia a postupy. Merania ustálených a meniacich sa síl pôsobiacich na obtekané telesá sú hlavnými úlohami v rámci testovania v aerodynamických tuneloch.

7.2.1. Meranie síl a momentov

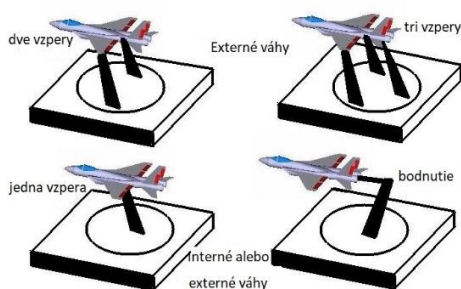
V aerodynamických tuneloch je meranie týchto veličín kľúčové a sú potrebné až v 70 % prípadoch. Merajú sa pomocou prístrojov na to určených – pomocou váh. Tieto váhy sú v dnešnej dobe založené na snímačoch, prípadne sú vyhotovené z jedného kusu kovu, na ktorý sú upevnené tenzometre. Väčšina váh používa prvky s tenzometrickým meraním, ktoré transformujú zaťaženie na elektrické napätie. V minulosti sa zaťaženie v aerodynamickom tuneli meralo pomocou váhových stupníc, podobne ako tie, ktoré existovali v lekárskech ordináciách, a preto sa dnes nazývajú váhy [14].

Takisto môžeme váhy rozdeliť od umiestnenia. Pokiaľ je váha umiestnená vo vnútri skúmaného modelu, hovoríme o vnútornej váhe, ak je váha umiestnená mimo modelu prípadne mimo tunela, hovoríme o externej alebo vonkajšej váhe. Rozsah, presnosť a doba odozvy meraní sú hlavnými parametrami, ktoré definujú tieto systémy [14].

Ďalšou možnosťou merania aerodynamického zaťaženia je meranie tlaku v niekoľkých bodoch na modeli pomocou tlakového skenera alebo systému Scanivalve. Meracie body sú zabudované do povrchu modelu vytvorením otvorov a ich spojením so skenerom pomocou trubice prenášajúcej tlak. Táto metóda je však veľmi drahá [14][15].

7.2.2. Upevnenie modelu

Upevnenie modelu musí správne prenášať aerodynamické zaťaženie na vonkajšie váhy a zabezpečiť statickosť modelu v požadovanej polohe, napríklad v požadovanom uhle nábehu a uhle vybočenia. Upevnenie dokážeme zabezpečiť rôznymi spôsobmi, pri výbere musíme zohľadniť účel testovania a možnosti upevnenia v samotnom tuneli. Výber typu váh a typu uchytenia môže tiež ovplyvniť možnosť snímaných veličín. Upevnenie musí byť pevné a tuhé a musí minimalizovať dynamické pohyby modelu počas testovania [14].



Obrázok 3: Typy upevnenia modelu lietadla. Zdroj: [https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunbalmnt.html, upravené autorom].

7.2.3. Meranie tlaku

Zisťovanie hodnoty statického a dynamického tlaku v súvislosti s voľným prúdením okolo obtekaného telesa je elementárnou úlohou meraní v aerodynamických tuneloch. Meranie tlaku prúdiacej tekutiny môže byť potrebný pre stanovenie ďalších vlastností z hľadiska termodynamiky a najmä pre určenie síl pôsobiacich na obtekané teleso a rýchlosti prúdenia. V praxi je tlak meraný na povrchu obtekaného telesa alebo vo voľnom prúde vhodnými snímačmi, ktoré sú ďalej prepojené s prevodníkmi vhodnej citlivosti a rozsahu. Aktuálne sa rozširuje metóda merania tlaku založená na farbe citlivej na zmenu tlaku, ktorá poskytuje možnosť merania tlaku na povrchu modelu priamo, bez prevodníkov a ostatného príslušenstva [14].

Meranie pomocou Pitotovej trubice môžeme považovať za jeden z najjednoduchších a najpoužívanejších spôsobov, akým dokážeme merať statický, dynamický tlak a následne rýchlosť.

Merania konvenčnými spôsobmi, ako je použitie desiatok snímačov na povrchu modelu niekedy nie je vhodné a nemožno ich použiť na hranách alebo veľkých rádiusoch.

Metóda merania tlaku (PSP) pomocou náteru citlivého na tlak sa pracuje na báze náteru, ktorý sa nanesie na skúmaný model a pri vhodnom nasvietení dokážeme vidieť celkové rozloženie tlaku na modeli. Metóda je založená na deaktivácii fotoexcitovaných molekúl organických luminofórov molekulami kyslíka (quenching). Pri nasvietení svetlom vhodnej vlnovej dĺžky excitované molekuly emitujú svetlo rozdielnej vlnovej dĺžky, ktorého intenzita je nepriamo úmerná parciálnemu tlaku kyslíka blízko povrchu. Vďaka rôznej intenzite vyžarovaného svetla dokážeme identifikovať rozloženie tlaku na povrchu modelu [14].

7.2.4. Vizualizácia prúdenia

Vizualizácia prúdenia poskytuje metódy pre pochopenie správania sa prúdenia a metódu pre vizualizáciu prúdenia, ktoré sme schopní vyhodnotiť voľným okom alebo pomocou špeciálneho príslušenstva.

Vizualizácia prúdnic a prúdenia pomocou dymu je takmer zhodná s metódou využívajúcou farbivo. Je štandardným experimentálnym nástrojom pre aerodynamické tunely a jeho pokrok úzko súvisí s históriou samotných tunelov [14].

V praxi sa častokrát môžeme stretnúť s vizualizačnou metódou založenou na používaní vlákien, ktorá nájde svoje uplatnenie predovšetkým pri vizualizácii podzvukového prúdenia. Ide o krátke kusy vlákien, ktoré sú na konci rozstrapkané. Sú väčšinou vyrobené z nylonu, polyesteru alebo bavlny [20].

Technológia PIV (Particle Image Velocimetry) je založená na zavádzaní veľmi malých častíc do prúdenia, ktoré sa pohybujú spolu s prúdením a jeho aktuálnym smerom a rýchlosťou. Môžeme ju zaradiť do optických metód. Ide o nepriamu metódu vizualizácie toku, ktorá však poskytuje priame vektorové meranie rýchlosti v priereze prúdenia. Základný princíp zahŕňa fotografovanie pohybu mikroskopických častíc, ktoré sa pohybujú v smere prúdenia tekutiny [14].

Technológia LDA (Laser Doppler Anemometry) je technika, ktorá poskytuje informácie aj o rýchlosti prúdenia. V súvislosti s prúdením je neinvazívna a veľmi často sa používa pre aplikácie s reverzným tokom, chemicky reagujúcimi alebo

vysokoteplotnými médiami a rotujúcimi strojmi ako sú turbíny, kde je ťažké alebo nemožné použiť fyzikálne snímače. Technológia používa podobne ako PIV malé častice, ktoré sú sledované. Výhodou tejto technológie je že nenaruša prúdenie, dosahuje veľké priestorové rozlíšenie, nie je potrebná počiatočná kalibrácia a pomocou tejto technológie dokážeme merať aj reverzné prúdenie [14].

8. Porovnanie aerodynamických tunelov

Aerodynamické tunely môžu disponovať rôznou konštrukciou, rozmermi alebo meracími zariadeniami, prípadne maximálnou možnou dosiahnuteľnou hodnotou Machovho a Reynoldsovo čísla. V tejto kapitole predstavím tri rôzne aerodynamické tunely a merania, ktoré je v nich možné uskutočniť. Tunely patria medzi strategicky dôležité a v súčasnosti sa vynakladá veľké úsilie na ich technologickú modernizáciu tak, aby ponúkali najnovšie metódy a technológie v tejto oblasti.

8.1. ONERA S1MA

ONERA S1MA je aerodynamický tunel uzavretým okruhom. Prúdenie vzduchu zabezpečujú dva protiběžné ventilátory poháňané Peltonovými turbínami o celkovom výkone 88 MW. V aerodynamickom tuneli je možné zabezpečiť nepretržité prúdenie s rýchlosťou od $M = 0,5$ po $M = 1$.

Aerodynamický tunel je jeden z najväčších svojho druhu a priemer jeho testovacej časti môže byť až 8 m. Modely lietadiel, ktoré sa v tomto tuneli zvyčajne testujú, majú rozpätie krídel 3,5-4 m [21].

V aerodynamickom tuneli sa uplatňujú technológie ako je IR (vizualizácia prechodu medznej vrstvy na krídlach pomocou infračervených kamier), PSP (meranie tlakového poľa na krídlach a pohyblivých plochách, meranie zaťaženia ovládacích plôch), MDM (meranie deformácie v ohybe a krute na rôznych typoch krídla a ovládacích plôch), vizualizačné metódy využívajúce farebné oleje, Schlierenove techniky a systém PIV.

Medzi štandardné testy ktoré sa uskutočňujú v tomto tuneli je testovanie zmenšených úplných modelov (Large-scale full model), testovanie polovice modelu, testovanie vrtúl alebo rotorov (samostatne alebo nainštalovaných na motore), testovanie laminárneho prúdenia na veľkých modeloch alebo testovanie rakiet so zapnutým motorom, prípadne akustiku.

Aerodynamický tunel S1MA je nevyhnutný pre výrobcov lietadiel na celom svete a tiež pre rad výskumných pracovníkov, ktorí využívajú výhody jeho veľkých rozmerov [21].

8.2. Large Low-speed Facility

Pracovisko sa zameriava na štandardné aerodynamické testovanie, no špecializuje sa najmä na testovanie pri nízkych rýchlostiach prúdenia pre testovanie napríklad lietadiel v pristávacej alebo vzletovej konfigurácii s možnosťou. Takisto sa zameriava na meranie akustických veličín ako je vyprodukovaný hluk lietadla alebo motorov [22].

Zaujímavosťou je prítomnosť pohybujúceho sa pásu pod modelom, ktorým je možné napodobniť javy spojené s blízkosťou zeme. Pás je zhotovený z ocele a je schopný pohybovať sa rýchlosťou 80 m.s^{-1} . Systém sania a nafukovania

dokáže pás udržať vodorovný aj pri vysokom aerodynamickom zaťažení [22].

Ide o tunel s uzavretým okruhom s otvorenou a uzatvorenou testovacou časťou. Maximálna dosiahnuteľná rýchlosť je $M = 0,4$. Rozmery testovacej časti môžu byť rôzne, možnosť s najväčšími rozmermi má rozmery $9,5 \text{ m} \times 9,5 \text{ m}$, menšia má rozmery $8 \text{ m} \times 6 \text{ m}$. Druhá možnosť sa dá konfigurovať aj na rozmery $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$.

V LLF tuneli je takisto možné využiť technológie PIV, stereoskopické sledovanie bodov (meranie deformácií, ohybov), PSP, Laser Light Sheet (vizualizácia prúdového poľa), IR, TSP (náter citlivý na teplotu) [22].

8.3. European Transonic Wind tunnel

ETW je jedno z najpokročilejších aerodynamických testovacích zariadení na svete. ETW tunel má uzavretý okruh, ktorý je dodatočne tlakovo izolovaný pomocou škrupiny z nehrdzavejúcej ocele. Prúdenie zabezpečuje kompresor s výkonom 50MW. V ETW sa nepoužíva vzduch ale dusík s teplotou $-163,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ s tlakom 4,5 baru. Dusík je do okruhu privádzaný a rozprašovaný za prvým kolenom nachádzajúcim sa za testovacou časťou a prechádza ňou rýchlosťou $M=1,35$. Tým, že sa tekutý dusík rozpráši dôjde ihneď k vypareniu a vytvorí tak homogénnu chladnú zmes. Tunel vyniká schopnosťou dosiahnuť vysoké hodnoty Reynoldsovo čísla, čo je jeho kľúčovou vlastnosťou oproti bežným aerodynamickým tunelom [16].

Pri skúmaní modelu lietadla polovičného rozpätia je možné dosiahnuť hodnotu 85.10^6 Reynoldsovo čísla. ETW má kvalitu prúdenia porovnateľnú s najlepšimi konvenčných transonickými aerodynamickými tunelmi. ETW je popredný svetový aerodynamický tunel zameraný predovšetkým na leteckú problematiku v ktorom sa dajú replikovať skutočné letové podmienky. Poskytuje Reynoldsove čísla relevantné pre let a umožňuje oddeľovať variácie Reynoldsovo čísla a štruktúrneho zaťaženia pri vzletovej, pristávacej a cestovnej konfigurácii. V tuneli ETW sa uplatňujú štandardné techniky na meranie síl, tlakov a teplôt, deformácii modelu alebo získavanie údajov o tlakovom poli pomocou techník PIV alebo TSP. PSP a akustické techniky [16].

Na záver prikladám tabuľku so základnými technickými špecifikáciami týchto tunelov.

Tabuľka 1: Porovnanie technických parametrov aerodynamických tunelov. Zdroj: Autori.

	ONERA S1MA	ETW	DNW - LLF
Mesto	Modane, Francúzsko	Kolín nad Rýnom, Nemecko	Marknesse, Holandsko
Typ aerodynamického tunelu	Uzatvorený	Uzatvorený	Uzatvorený
Médium	Vzduch	Čistý dusík	Vzduch
Výkon	88 MW	50 MW	12,65 MW
Rozmery testovacej časti	Najväčšia s priemerom 8 m	Výška 2,0 m Šírka 2,4 m Dĺžka 9,0 m	Najväčšia s rozmermi 9,5 m x 9,5 m
Rozpätie Machovho čísla	0,5 – 1,00	0,15 – 1,35	Max. 0,4
Maximálne Reynoldsovo číslo	1.10^6	85.10^6	$3,9.10^6$

9. Záver

Autorovým hlavným cieľom bolo preskúmať problematiku simulácii v aerodynamike a s ňou súvisiacu technológiu CFD – výpočtovú dynamiku tekutín, ktorej využitie v posledných desaťročiach značne uľahčuje experimentálne merania v aerodynamike. Ďalším zámerom práce bolo preskúmať, popísať a poskytnúť stručný prehľad rôznych softvérových možností, ktoré sa na simulácie využívajú a priniesť tak teoretické poznatky. Cieľom práce bolo priblížiť problematiku týkajúcu sa aerodynamických tunelov a ich využitie vo výskumoch, či už ide o automobilový, letecký priemysel alebo stavebné inžinierstvo.

V rámci výskumnej časti bola aplikovaná syntéza, analýza a metóda porovnania jednotlivých odborných výskumných prác s dôrazom na využitý softvér. Neustále sa vyvíjajúce technológie ponúkajú nové možnosti skúmania. Ako autor zistil, existujú rôznorodé softvéry, avšak každý si vyžaduje určité znalosti a vedomosti súvisiace s jeho použitím alebo programovacím jazykom. Najčastejšie zastúpenie v rámci analyzovaných prác mal softvér ANSYS Fluent, ktorý ovplyvňuje viacerými výhodami v porovnaní s ostatnými. Je na užívateľovi, aký softvér na simuláciu zvolí, najmä vzhľadom na jeho využitie, samotné kompetencie užívateľa a experimentálny zámer.

V súčasnosti je nevyhnutná kombinácia technológie CFD a samotných aerodynamických tunelov, pričom autor poukázal na hlavné faktory ovplyvňujúce samotné experimentálne merania. Autor porovnával strategicky dôležité aerodynamické tunely v Európe a predstavoval ich možnosti využitia.

V rámci budúcich výskumov autor odporúča zamerať sa na praktickú simuláciu konkrétneho modelu pre lepšie porovnanie výsledkov medzi CFD softvérmí a následné porovnanie v prostredí aerodynamického tunelu, ktoré nebolo možné z dôvodu pandemickej situácie. Autor predpokladá, že dôjde k zníženiu potreby využívania aerodynamických tunelov z dôvodu rýchleho vývoja počítačov a informačných technológií.

Zoznam použitej literatúry

- [1] SIMSCALE. 2021. What is CFD | Computational Fluid Dynamics? [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>
- [2] NAKAYAMA, Y. 2018. Introduction To Fluid Mechanics. 2nd ed. Butterworth-Heinemann. 2018. 400 s. ISBN 978-0-08-102437-9.
- [3] MOLNÁR, V. 2011. Počítačová dynamika tekutín. Interdisciplinárny prístup s aplikáciami CFD. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2011. 464 s. ISBN 978-80-8106-048-9.
- [4] SADREHAGHIGHI, I. 2021. Essentials of CFD. CFD Open Series. [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/340038343_Essentials_of_CFD
- [5] KUDELAS, D. 2017. Základy počítačového modelovania prúdenia a vizualizácií [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: [https://ooze.fberg.tuke.sk/wp-](https://ooze.fberg.tuke.sk/wp-content/uploads/2017/12/Zaklady-numerickeho-modelovania-prudenia-1.pdf)

[content/uploads/2017/12/Zaklady-numerickeho-modelovania-prudenia-1.pdf](https://ooze.fberg.tuke.sk/wp-content/uploads/2017/12/Zaklady-numerickeho-modelovania-prudenia-1.pdf)

- [6] NILSSON, A. M. 2009. Exploring Fundamental Turbulent Physics Using Direct Numerical Simulation. Master Theses. University of Massachusetts Amherst. 91 s. Dostupné na internete: <https://core.ac.uk/download/pdf/13599077.pdf>
- [7] Cadence PCB Solutions. 2020. CFD Simulation Types: Discretization, Approximation, and Algorithms. [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-cfd-simulation-types-discretization-approximation-and-algorithms>
- [8] LI, N. 2015. Comparison between three different CFD software and numerical simulation of an ambulance hall. Master Theses. Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management. 57 s. Dostupné na internete: https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:792705/FULLTEXT01.pdf?fbclid=IwAR218-7BnmSXq5rxA_QJsG4YB_z0e4qlqA2spbgQNa05duWSIZ8DKERjKUI
- [9] RESOLVED ANALYTICS. 2020. Comparing CFD Software. [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-cfd-software?fbclid=IwAR0na4l5pCY-DczPCJfx-6P9_eKZn8WBheAn2dlzmfv4lUGSYa04ULMMMc
- [10] PEREIRA, D. J. 2011. Wind tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. 227 s. ISBN 978-1-61942-329-9.
- [11] NASA. 2017. What Are Wind Tunnels? [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html>
- [12] QUARK. 2020. Tunel plný vetra. In Quark: magazín o vede a technike. [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.quark.sk/tunel-plny-vetra/>
- [13] AHMED, A. N. 2013. Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications. Rijeka: InTech, 2013. 218 s. ISBN 978-953-51-1047-7.
- [14] TROPEA, C. - YARIN, L. A. - FOSS, F. J. 2007. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. 2nd ed. Springer. 2007. 1585 s. ISBN 978-3662491621.
- [15] NASA. Ames Balance Calibration Laboratory. Balance Basics. [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.nasa.gov/centers/ames/orgs/aeronautics/windtunnels/balance-basics.html>
- [16] European Transonic Windtunnel. [online]. [2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.etw.de/wind-tunnel/overview>
- [17] CFD Online. Large eddy simulation (LES). [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete:

[https://www.cfd-online.com/Wiki/Large_eddy_simulation_\(LES\)](https://www.cfd-online.com/Wiki/Large_eddy_simulation_(LES))

- [18] ANSYS. 2009. Reynolds-Averaged Approach vs. LES. [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node45.htm>
- [19] ANSYS. 2009. Detached Eddy Simulation (DES). [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node88.htm>
- [20] NASA. Smoke and Tufts. [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvsmoke.html>
- [21] ONERA. 2017. S1MA Large Transonic Atmospheric Wind Tunnel. [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.onera.fr/sites/default/files/windtunnel/pdf/S1MA-2018.pdf>
- [22] German-Dutch Wind Tunnels. Large Low-speed Facility (LLF). [online]. [citované 2021-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.dnw.aero/media-center/downloads/brochures/download/5>
- [23] Bugaj, M. 2015. Aeromechanika 1: základy aerodynamiky. 1. vyd. - Bratislava : DOLIS, 2015. - 208 s., ilustr. - ISBN 978-80-970419-3-9.