

AERODYNAMIC AIRFOILS AND THEIR APPLICATIONS

AERODYNAMICKÉ PROFILY A ICH VYUŽITIE

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

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

Abstract

This work focuses on aerodynamic airfoils and their application. The significant aim of this work is to introduce and analyse different types of airfoils and their importance. The first part of the paper examines aerodynamic characteristics, airfoil geometry and brings the historical evolution of certain types of airfoils. The second part of the paper considers different databases, and closely examines the NACA database and its numerical labelling by looking at digit series label, which follows the acronym NACA, indicating the airfoil's shape. The main body of the paper illustrates the real-life application of chosen airfoils by examining horizontal and vertical stabilisers and wind turbines. The last part of the paper presents the analysis of the application of chosen wing root and wingtip airfoils.

Keywords

Airfoil, wind turbine, NACA.

1. Úvod

Záujem o letectvo sa začal pozorovaním pohybu vtákov. To ľudí inšpirovalo k výrobe krídel z peria alebo ľahkého dreva, ktoré si pripevnili na ruky, aby vyskúšali ich schopnosť lietať. Po mnohých nevydarených pokusoch si ľudia uvedomili, že ľudské telo nie je stavané aby poháňalo umelé krídla a verili že let človeka si bude vyžadovať určitú formu umelého pohonu. Výraznejšie pokroky nastali po prvých výskumoch aerodynamických síl pôsobiacich počas letu. Na základe týchto získaných informácií bol ďalší vývoj letectva a navrhovanie profilov jednoduchší.

Hlavným cieľom práce je poskytnúť charakteristiku jednotlivých typov profilov s dôrazom na analýzu ich využitia. Zhromaždiť informácie o profiloch a demonštrovať ich rôznorodý účel využitia. Zameriame sa na využitie profilov pre stabilizátory lietadla a veterné turbíny. Uvedieme najpoužívanejšie profily pre krídlo lietadla. Čiastkovým cieľom práce je prezentovať označovanie profilov s ústredným zameraním na databázu NACA, ktorá je z hľadiska informácií najdostupnejšia.

Práca je rozdelená do troch kapitol. Obsahom prvej kapitoly je venovaný stručnému historickému vývoju profilov so zameraním sa na určenie základnej definície pojmu. V kapitole nájdeme aj opis jednotlivých charakteristík a vlastností profilov.

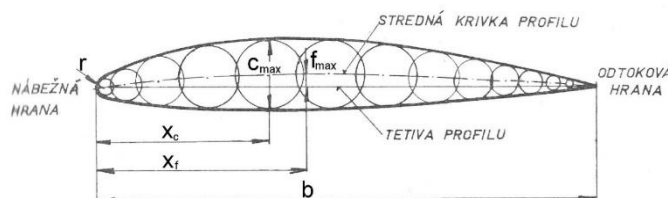
Druhá kapitola je venovaná označovaniu profilov. Oboznámime sa rôznymi druhmi databáz, z ktorých je možné vybrať vhodný profil pre dané účely. Dôkladnejšie sa však oboznámime s databázou NACA, so zameraním sa na štandardizované značenie, ktoré táto databáza zaviedla. Vysvetlíme čo znamenajú jednotlivé označenia a ako ich delíme na jednotlivé rady. Náplňou tretej kapitoly je ukázať rozličné možnosti využitia

profilov. Konkrétnejšie sa budeme venovať profilom veterných turbín. Pre listy veternej turbíny je potrebný špeciálny tvar profilu, ktorý je možné ovládať pri rôznych poveternostných podmienkach. Na záver práce ukážeme najpoužívanejšie profily NACA pre koreňovú a špičkovú časť krídla

2. Vlastnosti aerodynamických profilov

2.1. Geometrické charakteristiky profilu

Každý profil je popísaný a určený svojím číselným označením, podľa ktorého vieme určiť jeho základné geometrické charakteristiky. Na nasledujúcom obrázku sú znázornené jednotlivé charakteristiky: [1]



Obrázok 1: Geometrické charakteristiky profilu. Zdroj: [2].

- **Stredná krivka profilu** – spojnica stredov vpísaných do kružníc.
- **Tetiva profilu** – spojnica nábežnej a odtokovej hrany.
- **Hĺbka profilu "b"** – dĺžka tetivy profilu.

- **Maximálna hrúbka profilu “ C_{max} ”** – priemer najväčšej vpísanej kružnice.
- **Poloha maximálnej hrúbky “ X_c ”** – vzdialenosť maximálnej hrúbky profilu od nábežnej hrany.
- **Maximálne prehnutie strednej krivky “ f_{max} ”** – výška najvyššieho bodu strednej krivky nad tetivou profilu.
- **Poloha maximálneho prehnutia strednej krivky “ X_f ”** – vzdialenosť maximálneho prehnutia od nábežnej hrany.
- **Polomer nábežnej hrany “ r ”** – polomer oskulačnej kružnice v nábežnej hrane [3].

2.2. Druhy profilov

Profil sa delia podľa rozličných kritérií, ako napríklad podľa hrúbky a polohy maximálnej hrúbky profilu, prehnutia strednej krivky alebo tvaru.

Symetrický profil – profil krídla, ktorý má na oboch stranách strednej krivky rovnaký tvar. Stredná krivka a tetiva sú rovnaké a pri nulovom uhle nábehu neprodukujú vztlak. Tento typ profilu sa vo veľkej miere používa pre akrobatické lietadlá a v rotoroch vrtuľníkov [4].

Nesymetrický profil – profil krídla, ktorý má rôzne tvary na hornej a spodnej časti, s väčším zakrivením profilu nad líniou tetivy. Stredná krivka profilu a tetiva sú odlišné. Nesymetrický profil môže produkovať vztlak pri nulovom uhle nábehu [4].

Laminárny profil – profil krídla, ktorého maximálna hrúbka je posunutá smerom dozadu, dôsledku čoho pozdĺž profilu klesá statický tlak a naopak rýchlosť stúpa. Na povrchu vzniká laminárny úsek medznej vrstvy, ktorý odďaľuje prechod do turbulencie, čo ma za následok zníženie profilového odporu [5].

Autostabilný profil – profil krídla so zdvihnutým koncom, kde jeho stredná čiara ma dvojité zakrivenie. Autostabilný profil má stále pôsobisko vztlaku alebo pri zväčšení uhla nábehu sa ťažisko posúva smerom dozadu, kedy vzniká klopivý moment, ktorý vracia krídlo do pôvodnej polohy [5].

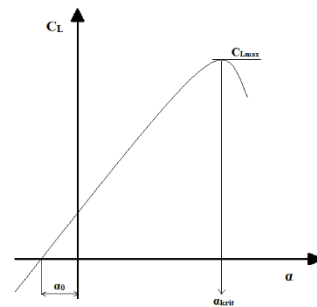
Superkritický profil – profil, ktorý bol navrhnutý tak aby odďaľoval vznik vlnového odporu pri transsonických rýchlostiach. Typickými vlastnosťami superkritických profilov v porovnaní s klasickými tvarmi profilov, sú sploštenie horného povrchu, väčšia relatívna hrúbka, prehnutie strednej krivky do tvaru S a väčší polomer nábežnej hrany [6].

2.3. Aerodynamické vlastnosti profilu

Aerodynamické vlastnosti profilu priamo závisia na jeho geometrických vlastnostiach. Tieto vlastnosti sú vyjadrované pomocou súčiniteľov, ktoré sa získavajú meraním v aerodynamických tuneloch a závisia na uhle nábehu a tvaru profilu. Súčiniteľ vztlaku a súčiniteľ odporu zakresľujeme do grafu, ktorý nazývame aerodynamická polára profilu.

Vztlaková čiara je závislosť súčiniteľa vztlaku na uhle nábehu. Na vztlakovej čiare charakterizujeme nasledujúce typické body:

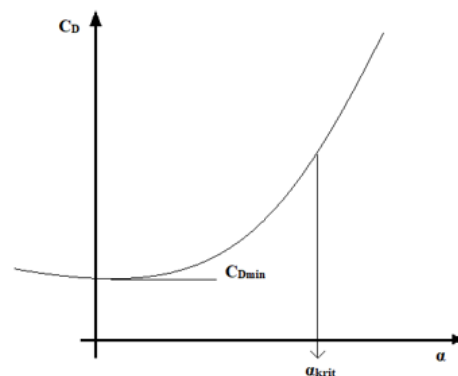
- pri zápornom uhle nábehu definujeme nulový súčiniteľ vztlaku, tento uhol označujeme $\alpha_0 (< 0)$
- vztlaková čiara ma nelineárny charakter
- sklon vztlakovej čiary vypočítame ako deriváciu súčiniteľa vztlaku podľa uhla nábehu α , $\frac{dC_L}{d\alpha} \cong 2\pi [\text{rad}^{-1}]$
- každý profil dosahuje svoj maximálny bod vztlakovej sily (súčiniteľ vztlaku), ktorý označujeme C_{Lmax} , po dosiahnutí tohto bodu súčiniteľ vztlaku klesá,
- uhol nábehu, pri ktorom súčiniteľ vztlaku dosiahne maximálnu hodnotu sa nazýva kritický uhol nábehu



Obrázok 2: Vztlaková čiara. Zdroj: Autori.

α_{krit} [6].

Odporová čiara znázorňuje závislosť súčiniteľa aerodynamického odporu od uhla nábehu a zvyčajne má tvar paraboly. Na začiatku prebieha nevýrazná transformácia tohto súčiniteľa od uhla nábehu, až neskôr v oblasti α_{krit} začína výrazne narastať, to sa vysvetľuje zväčšením oblasti odtrhávania hraničnej vrstvy. Pri určitých hodnotách C_D je možné dosiahnuť minimálnu hodnotu C_{Dmin} , pri symetrickom profile dosiahneme minimálny odpor pri nulovom uhle nábehu [6].



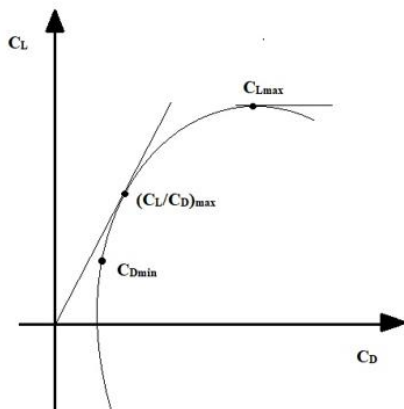
Obrázok 3: Odporová čiara. Zdroj: Autori.

Polára profilu je krivka vyjadrujúca vzájomnú závislosť súčiniteľa vztlaku a súčiniteľa odporu. Znázorňujeme ju graficky a to tak, že určíme súčiniteľ vztlaku a súčiniteľ odporu pre

totožné hodnoty uhlov nábehu a tie vynesieme do diagramu. Závisí na tvare profilu, Machovom a Reynoldsovom čísle [3], [6].

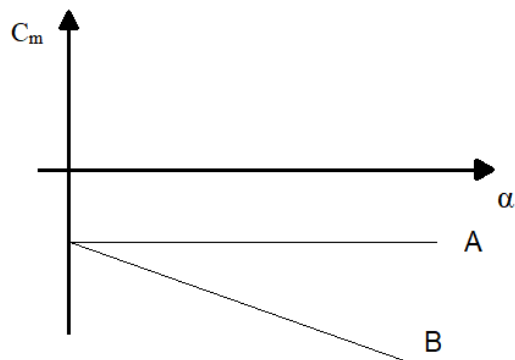
Na poláre vyznačujeme tieto charakteristické body:

- bod nulového vztaku,
- bod minimálneho súčiniteľa odporu C_{Dmin} , zodpovedá (predstavuje) režimu maximálnej rýchlosti pri vodorovnom ustálenom lete,
- bod maximálnej hodnoty súčiniteľa vztaku C_{Lmax} , zvyčajne zodpovedá režimu minimálnej rýchlosti pri vodorovnom priamočiaram lete,
- bod maximálnej aerodynamickej jemnosti profilu $K_{max} = (C_L/C_D)_{max}$, graficky to dostaneme tak, že vedieme dotyčnicu k poláre zo začiatku súradnicovej sústavy [7].



Obrázok 4: Polára profilu. Zdroj: Autori.

Momentová čiara je krivka závislosti súčiniteľa momentu profilu na uhle nábehu. Pri zväčšovaní uhla nábehu rovnomerne rastie záporný klopivý moment do záporných hodnôt, ktorý sa vzťahuje ku špičke profilu pri nulovom vztaku. Nulový klopivý moment k špičke profilu majú tieto profily v okolí záporného vztaku. Pre symetrické profily platí, že vplyvom symetrického obtekania pri nulovom uhle nábehu majú nulový klopivý moment vztiahnutý k špičke profilu. S rastúcim uhлом nábehu rovnomerne rastie aj veľkosť klopivého momentu. Na obrázku krivka A predstavuje moment vzťahujúci sa k nábežnej hrane profilu, a krivka B znázorňuje moment vzťahujúci sa k aerodynamickému strediu profilu, zhruba 25% hĺbky profilu [8].



Obrázok 5: Momentová čiara. Zdroj: [8].

3. Označovanie profilov

Pre ľahšiu orientáciu vznikali rôzne databázy profilov, na základe ktorých sme vedeli vybrať profil najviac vyhovujúci našim potrebám. Jedna z prvých databáz profilov bola vytvorená v Göttingene v Nemecku v ranných rokoch rozvoja letectva. Profily Göttingen boli založené na matematickom odvodení ruského vedca Nikolai E. Jokovského. Ďalšou skupinou sú profily Wortmann, ktoré boli navrhnuté doktorom F. X. Wortmannom začiatkom 60. rokov. Primárne boli určené pre vetrone a pre nízke Reynoldové čísla. Profily sú charakterizované laminárnym prúdením, relatívne malým polomerom nábežnej hrany, prehnutím profilu v 40% - 60% hĺbky profilu a tenkou odtokovou hranou. Za posledných 45 rokov bola vyvinutá Epplerová metóda určovania tvaru profilov. Táto metóda umožňuje rozdelenie profilu krídla na požadovaný počet segmentov, pozdĺž ktorých je predpísané rozloženie rýchlosti spolu s navrhovaným uhлом nábehu pri ktorom sa má rýchlosť dosiahnuť. Ďalej sa budeme venovať predovšetkým označovaniu profilov NACA, ktoré sú z hľadiska dostupnosti voľných informácií najviac prístupné [9], [10], [11].

NACA

Profily NACA sú profily krídel lietadiel vyvinuté Národným poradným výborom pre letectvo (National Advisory Committee for Aeronautics – NACA). Tvary profilov sú opísané pomocou série číslíc nasledujúcich za slovom NACA. Parametre v číselnom kóde je možné zadať do rovníc na presné vygenerovanie prierezu profilu krídla a jeho vlastností [12].

NACA štvormiestnej série – systém číslovania je založený na geometrických vlastnostiach profilov. Ako príklad použijeme profil s označením NACA 2412, kde

2 – číslica, ktorá vyjadruje maximálne prehnutie strednej krivky v percentách tetivy profilu,

4 – číslica popisujúca polohu maximálneho prehnutia strednej krivky v desatinách tetivy profilu,

12 – číslice, ktoré popisujú maximálnu hrúbku profilu v percentách tetivy profilu [13].

NACA päťmiestnej série – systém číslovania je založený na kombinácii aerodynamických a geometrických vlastnostiach profilov. Číselné značenie NACA 23012 predstavuje:

- 2 – určuje 2/3 navrhovaného súčiniteľa vztaku,
- 30 – uvádza dvojnásobok polohy maximálneho prehnutia v percentách hĺbky,
- 12 – maximálnu hrúbku v percentách hĺbky [13].

NACA série 1 – profily boli navrhnuté koncom 30. rokov po štvormiestnej a päťmiestnej sérii [20]. Geometria bola skôr založená na teórii tenkých profilov, než na určovaní polohy maximálneho prehnutia, či určovania maximálnej hrúbky. Prvýkrát sa začal používať inverzný návrh profilu krídla. Tieto profily sa primárne využívajú pre vrtule, pretože zabraňujú tvorbe veľkých tlakových špičiek, ktoré sú škodlivé pre profily v blízkosti nadzvukových rýchlostí. Väčšinou sa hlavne využíva 16 verzií profilov série 1, preto sa niekedy zvyknú označovať ako profily série 16. Typický profil série 1 je označený päťmiestnym číslom, ako napríklad NACA 16-212, kde:

- 1 – číslica, ktorá predstavuje typ série,
- 6 – číslica určujúca umiestnenie minimálneho tlaku v desatinách tetivy,
- 2 – číslica označujúca navrhovaný súčiniteľ vztlaku
- 12 – posledné dve číslice určujú maximálnu hrúbku v desatinách hĺbky profilu [14].

NACA šesťmiestnej série – sú zvyčajne označené šesťmiestnym číslom spolu s vyjadrením o druhu, použitej strednej krivky a prevažne udávajú aerodynamické charakteristiky. Napríklad označenie NACA 65,3-218, $a=0,5$ znamená:

- 6 – číslica, ktorá vyjadruje označenie rady,
- 5 – číslica predstavujúca polohu minimálneho tlaku v desatinách hĺbky,
- 3 – číslica nasledujúca za pomlčkou, ktorá udáva rozsah súčiniteľa vztlaku nad a pod navrhovaným súčiniteľom vztlaku s priaznivým tlakovým gradientom na oboch stranách,
- 2 – číslica udávajúca navrhovaný súčiniteľ vztlaku,
- 18 – číslice, ktoré popisujú maximálnu hrúbku profilu v percentách hĺbky,
- $a=0,5$ – ukazuje typ použitej strednej krivky. Ak nie je uvedené označenie strednej krivky, znamená to že bola použitá stredná krivka s rovnomerným zaťažením [13].

4. Analýza využitia profilov

Využitie aerodynamických profilov je v súčasnosti veľmi rôznorodé. Môžeme sa s nimi stretnúť nie len v letectve, ale aj pri výrobe pohonných jednotiek, v hydrodynamike či veternej energetike. Ukážeme si profily využívané pre veterné turbíny a zanalyzujeme najvyužívanejšie profily pre koreňovú a špičkovú časť krídla.

4.1. Veterná turbína

Veterná turbína je zariadenie, ktoré premieňa kinetickú energiu na mechanickú, ktorá sa cez generátor mení na elektrickú energiu. Existujú dva typy veterných turbín, s vodorovnou a zvislou osou rotácie. Aerodynamický tvar listov veternej turbíny je jeden z hlavných problémov veterného priemyslu, ktorý má významný vplyv na získanie maximálneho výkonu z vetra. Štúdie ukázali, že pre listy veterných turbín je potrebný špeciálny tvar profilov, ktorý je možné ovládať pri rôznych poveternostných podmienkach. Priebehu rokov bolo vykonaných niekoľko výskumov a štúdií s cieľom navrhnuť a zlepšiť výkonnosť profilu pre listy veternej turbíny. Nižšie sa budeme venovať niektorým vybraným profilom a ich kľúčovým charakteristikám [15].

4.1.1. NREL profily

V roku 1984 spoločnosť NREL začala s vývojom aerodynamických profilov pre veterné turbíny s horizontálnou osou. Odvtedy spoločnosť prišla s deviatimi skupinami profilov, ktoré boli navrhnuté pre rôzne veľkosti rotorov. Tieto skupiny profilov pozostávajú z dvadsiatich piatich aerodynamických

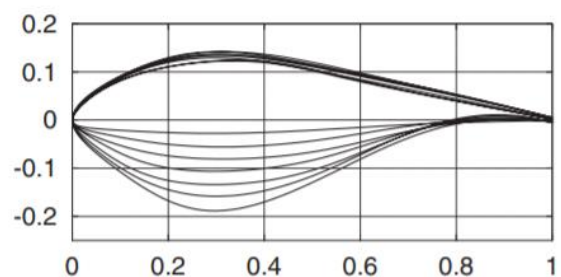
profilov so začínajúcim označením S801 až po končiace označenie S828. Označenia predstavujú číselné poradie v akom boli profily navrhnuté v rokoch 1984 až 1995. Po tomto období boli niektoré profily vylepšené na základe testovaní v aerodynamickom tuneli. Vhodnú dĺžku lopatiek a veľkosť generátora pre príslušnú skupinu profilov, nájdeme v tabuľke 1 [16].

Spomedzi týchto skupín profilov je sedem označovaných ako „hrubé“, čo značí že profil vonkajšej časti lopatky je hrubý 16 - 21%. Väčšia hrúbka poskytuje vyššiu pozdĺžnu tuhosť nutnú pre zabezpečenie dostatočnej vzdialenosti medzi lopatkami a stožiarom, nižšiu hmotnosť čo je dôležité pre veľké veterné turbíny, a umožňuje uloženie aerodynamických zariadení na reguláciu maximálnych otáčok pri turbínach regulovaných odhrnutím prúdu vzduchu. Skupiny profilov označené ako „tenké“ sú vhodnejšie pre malé až stredné turbíny fungujúce v smere vetra. V mnohých prípadoch je pre koreňovú časť profilu lopatky používaný hrubý profil, aby vyhovoval štruktúrnym a dynamickým požiadavkám. Hrúbka takéhoto profilu spadá do rozsahu 18% až 24%. Hrúbky väčšie ako 26% majú nežiaduce výkonné charakteristiky [16].

4.1.2. Risø profily

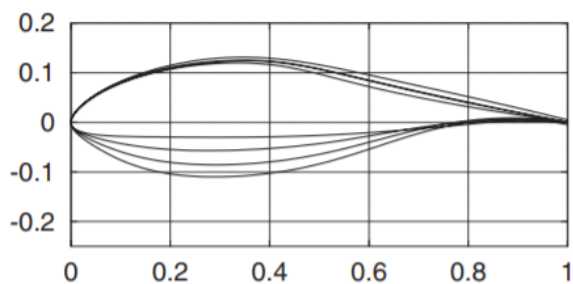
Vývoj profilov Risø sa začal v polovici 90. rokov a doteraz boli vyvinuté tri skupiny aerodynamických profilov; Risø-A1, Risø-P, Risø-B1. Pre výpočet parametrov profilu je využívaný program XFOIL vyvinutý profesorom Markom Drelom.

Skupina profilov Risø-A1 bola dokončená v roku 1998 a predstavuje šesť profilov s pomerom hrúbky k dĺžke tetivy od 15% až 30%. Profily boli implementované pre turbíny regulované odhrnutím prúdu vzduchu. Menovitý výkon vetrenej turbíny, ktorá využívala tento aerodynamický profil bol okolo 600kW [17].



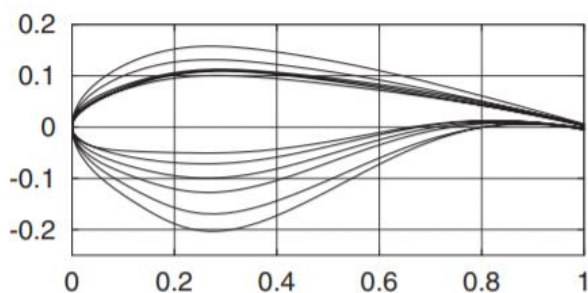
Obrázok 5: Profily Risø-A1. Zdroj: [17].

V roku 2001 bola vyvinutá skupina profilov Risø-P, ktorá obsahuje štyri profily s pomerom hrúbky k dĺžke tetivy 15, 18, 21 a 24%, určené pre lopatky rotorov s nastaviteľnou geometriou na veterných turbínach s pevnou alebo variabilnou rýchlosťou otáčania, ktorých inštalovaný výkon prekračuje 1MW [18].



Obrázok 6: Profily Risø-P. Zdroj: [17].

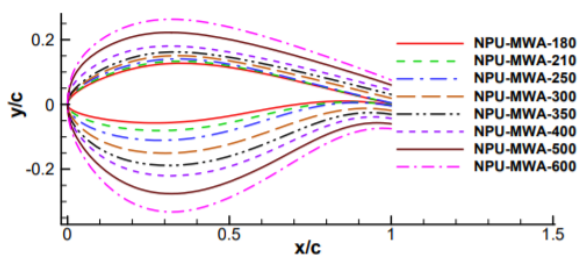
Skupina profilov Risø-B1 bola navrhnutá ako sedem samostatných profilov s rozšíreným rozsahom pomeru hrúbky k dĺžke tetivy od 15% do 53%, aby pokryl celé rozpätie lopatky veternej turbíny. Tieto profily boli navrhnuté pre veterné turbíny s výkonom rádovo v jednotkách MW, s variabilnou rýchlosťou a ovládaním uhla nastavenia lopatiek pre zabezpečenie maximálneho a prevádzkového vztlaku, čo umožňuje použitie úzkych flexibilných lopatiek pri zachovaní vysokej aerodynamickej účinnosti [17].



Obrázok 7: Profily Risø-B1. Zdroj: [17].

4.1.3. Profily NPU-MWA

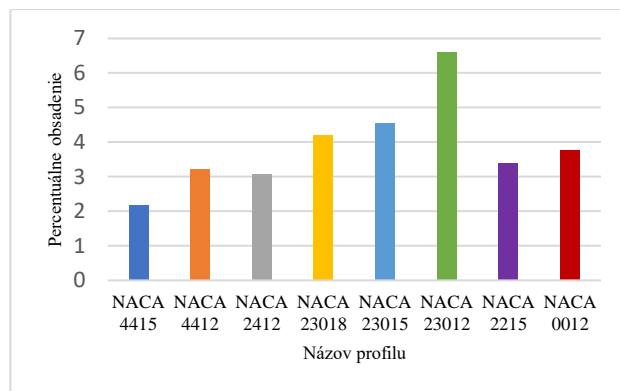
V roku 2016 bola navrhnutá nová skupina aerodynamických profilov NPU-MWA pre veterné turbíny s výkonom viac megawattov. Tieto profily sú navrhnuté aby dosiahli čo najväčšiu aerodynamickú jemnosť pri navrhovanom koeficientu vztlaku. Vysoká aerodynamická jemnosť pomáha zlepšiť aerodynamickú výkonnosť a zachytávanie veternej energie. Výhodou vysokého navrhovaného koeficienta vztlaku je zmenšenie dĺžky tetivy, čo vedie k zníženiu hmotnosti. Profily s plochou zadnou stranou, navrhnuté pre vnútorné časti rotorových listov, taktiež pomáhajú pri zvyšovaní konštrukčnej pevnosti redukciami hmotnosti [19].



Obrázok 8: Geometrické tvary profilov NPU-MWA. Zdroj: [19].

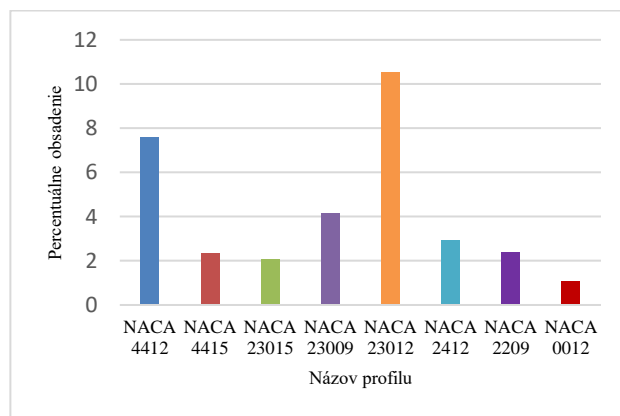
4.2. Využitie vybraných profilov NACA

Využitie profilov NACA je veľmi rôznorodé, či už ide profily krídla, veternej turbíny alebo pre pohonnú jednotku. V tejto časti sa konkrétne budeme venovať profilom pre koreňovú a špičkovú časť krídla. Z dostupnej databázy profilov pre daný typ lietadla boli vybrané práve NACA profily a následne vyhodnotené ich najpočetnejšie obsadenie. V nasledujúcich grafoch sú demonštrované najčastejšie využívané profily.



Graf 1: Najpoužívanejšie profily pre koreňovú časť krídla. Zdroj: Autori.

Z grafu 1 je vidieť, že najviac využívaným profilom pre koreňovú časť krídla z vybranej vzorky je NACA 23012. Pre jeho vlastnosti ako je vysoký vztlak, nízky odpor a mierny klopivý moment je vhodnou voľbou. Ďalšími často využívanými sú profily päťmiestnej série NACA 23015 a NACA 23018. Medzi tretí najpoužívanejší profil radíme NACA 0012.



Graf 2: Najpoužívanejšie profily pre špičkovú časť krídla. Zdroj: Autori.

Pre špičkovú časť krídla platí rovnako ako pre koreňovú, že najpoužívanejším profilom je NACA 23012. Druhým často využívaným je profil štvormiestnej série NACA 4412, ktorého výhodou je zvýšenie vztlaku a zníženie odporu v blízkosti zeme. Ďalšími využívanými profilmi sú profily päťmiestnej série NACA 23009. Nasledujúce profily sú prevažne štvormiestnej série.

5. Záver

Cieľom tejto práce bolo priblížiť jednotlivé charakteristiky aerodynamických profilov a analyzovať ich využitie. Podrobným

spracovaním informácií sme zosumarizovali a vytvorili teoretický základ pre ďalšie štúdium profilov s využitím dostupnej databázy. Ďalším z prínosov je súhrn komplexného súboru dát o profiloch, ktorého súčasťou je analýza ich využitia, ktorá môže byť aplikovaná pri ďalšom hodnotení praktického využitia daných profilov.

V súčasnosti existuje široká škála využitia aerodynamických profilov. Nie je rozšírená iba v letectve, ale čoraz viac sa s ňou stretávame vo veternej energetike, hydrodynamike či automobilovom priemysle. Výberom vhodného profilu prispievame k celkovému zlepšeniu výkonu. Na základe geometrických a aerodynamických charakteristík vieme určiť tvar profilu a jeho vlastnosti vo vzduchu. Tieto informácie môžeme nájsť v príslušných databázach. Z hľadiska dostupných informácií je pre nás najvýhodnejšia databáza NACA.

Ako sme už spomínali využitie profilov je veľmi rôznorodé. V tejto práci sme sa hlavne zamerali na profily pre veterné turbíny a najpoužívanejšie profily pre kridlo lietadla. Výber aerodynamického tvaru profilu pre veternú turbínu má značný význam pre získanie maximálneho výkonu z vetra. Výber taktiež závisí od druhu, výkonu a veľkosti turbíny. Pri analýze využitia profilov pre kridlo, sme sa sústredili na profily NACA. Z dostupnej databázy sme zistili, že profil NACA 23012 je najviac využívaný pre jeho dobré vlastnosti vzlaku a nízkeho odporu. Ďalším často využívaným je profil štvormiestnej série NACA 4412, ktorého výhodou je zvyšovanie vzlaku a zníženie odporu v blízkosti zeme.

Pre získanie potrebných informácií sme využívali odbornú literatúru, vedecké články prevažne v anglickom jazyku a vedomosti získané počas štúdia. Po dôkladnom preštudovaní vybranej literatúry boli vybrané vhodné informácie a spracované do tejto práce. Pre analýzu bola použitá dostupná online databáza využívaných profilov, z ktorej boli vyselektované profily NACA a následne bolo vyhodnotených ich najpočetnejšie obsadenie. Výsledky boli zaznamenané vo forme grafov.

Referencie

- [1] BENEŠ, L. a kol. 1995. Učebnica pilota. Svět křidel, vyd. Leteckej literatury, 1995. 292 strán. ISBN 80-85280-30-2
- [2] Zadanie seminarky. [online]. Dostupné na internete: <https://www.zadania-seminarky.sk/semestralna-praca/kridlo-semestralna-praca/38858>
- [3] JÍRA, R. a kol. 1963. Aerodynamika a mechanika letu pro plachtaře. Praha: NAŠE VOJSKO, 1963. 269 strán
- [4] KOLEKTÍV AUTOROV. 2019. Učebnica pilota 2019. Svět křidel. 2019. 405 s. ISBN 978-80-7573-049-7
- [5] GONDA, J. 1953. Letecký terminologický slovník, Bratislava: vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1953. [online]. [cit.2021-05-22]. Dostupné na internete: https://terminologickyportal.sk/pdf/glosare/letecky_terminologicky_slovník.pdf
- [6] BUGAJ, M.2015. Areomechanika I. Základy aerodynamiky, Bratislava: DOLIS s.r.o., 2015. 208 strán. ISBN 978-80-970419-3-9
- [7] SLYŠKO,A. 1991. Aeromechanika, Bratislava: ALFA, 1991. 526 strán. ISBN 80-05-00711-6
- [8] KOLEKTÍV AUTOROV. 2019. Učebnica pilota 2019. Svět křidel. 2019. 405 s. ISBN 978-80-7573-049-7
- [9] RIBLETT, H. 1988. What Are Wortman Airfoils??. [online]. [cit. 2021-05-22]. Dostupné na internete:http://acversailles.free.fr/documentation/08~Documentation_Generale_M_Suire/Aerodynamique/Profil_s/Wortman/What%20are%20wortman%20airfoils.pdf
- [10] HANSEN,J. R. a kol. 2007. On the Wing. In The Wind and Beyond. [online]. Vol 2. [cit. 2021-05-22]. Dostupné na internete: <https://history.nasa.gov/sp4409-vol2-3.pdf>
- [11] Historical Background. [online]. Dostupné na internete: <http://www.profoil.org/profoil/020-background.html> (cit. 2021-03-27).
- [12] NACA airfoil. [online]. Dostupné na internete: https://nasa.fandom.com/wiki/NACA_airfoil (cit. 2021-05-21)
- [13] ABBOTT, I. H. – DOENHOFF, A. E. – STIVERS, Jr. L. S. 1945. Summary of Airfoil Data: Report No. 824. [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné na internete: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc65534/m1/9/>
- [14] GUDMUNDSSON, Snorri. General aviation aircraft design: applied methods and procedures. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-397308-5
- [15] Danish wind industry association. [online]. Dostupné na internete: <http://xn--drmrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/powerreg.htm> (cit. 2021-05-22)
- [16] TANGLER, J. L. – SOMERS, D. M. 1995. NREL Airfoil Families for HAWTs. [online]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1995. [cit. 2021-04-08]. Dostupné na internete: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/7109.pdf>
- [17] MAMADAMINOV, U. M. 2013. Review of Airfoil Structures for Wind Turbine Blades. [online]. [cit. 2021-05-22]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/271829785_Review_of_Airfoil_Structure_for_Wind_Turbine_Blades
- [18] FUGLSANG, P. – BAK, CH. 2004. Development of the Risø Wind Turbine Airfoils. [online]. [cit. 2021-05-22]. Dostupné na internete: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/we.117>
- [19] XU, J. – HAN, Z. – YAN, X. – SONG, W. 2019. Design Optimization of a Multi-Megawatt Wind Turbine Blade with the NPU-MWA Airfoil Family. [online]. [cit. 2021-05-22]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/335482225_Design_Optimization_of_a_Multi-Megawatt_Wind_Turbine_Blade_with_the_NPU-MWA_Airfoil_Family

[20] Novák, A., Novák Sedláčková, A., Janovec, M., 2020. Komunikačné systémy v letectve EDIS - Žilina, Žilinská univerzita v Žiline, 2020, ISBN 978-80-554-1737-0

Daniela Kamenická – narodená dňa 11.05.1996 v Levoči, absolvovala v roku 2014 Gymnázium v Levoči. V roku 2018 nastúpila na Žilinskú univerzitu v Žiline v odbore letecká doprava.