



EFFECT OF WING SURFACE CONTAMINATION ON AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

Filip Gego
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Martin Bugaj
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The article is focused on determining the influence of wing surface contamination on aerodynamic characteristics. This work describes the description of the BL 215 airfoil on which the measurements were made, the factors affecting the change in aerodynamic characteristics, the method of obtaining the values necessary to draw a conclusion, and finally the comparison and evaluation of the resulting values. Through the geometric functions in the Inventor program, a wing model with a laminar airfoil BL 215 was created, the aerodynamic characteristics of which were calculated in the Ansys Fluent program.

Keywords

laminar airfoil, contamination, CFD, aerodynamic characteristics, simulations

1. Úvod

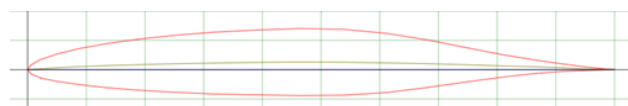
Účelom tohto článku je zhrnúť dosiahnuté výsledky bakalárskej práce ktorej účelom je určiť vplyv rôznych druhov kontaminácie na aerodynamické charakteristiky laminárneho profilu. Charakteristiky boli zisťované sériou simulácií v CFD programe Ansys Fluent. V tejto práci sme sa zamerali na pozorovanie súčiniteľa vzlaku a odporu pri rôznych uhloch nábehu. Výsledné hodnoty boli spracované do grafov, ktoré sú dostupné v nižšej časti tohto článku.

2. Laminárny profil BL215

Pre pozorovanie vplyvov kontaminácie bol zvolený laminárny profil BL 215.

Rozmery krídla:

- Hĺbka profilu: 170mm
- Šírka krídla: 320mm
- Maximálna hrúbka: 11,4% pri 46,3% tetivy
- Maximálne prehnutie: 1,3% pri 46,3% tetivy



Obrázok 1 - Laminárny profil BL 215 [1]

Laminárny profil využíva svojim dizajnom na väčšinej časti svojho povrchu laminárne prúdenie aby sa predišlo vytváraniu nežiadúceho odporu. Keďže laminárne prúdenie vytvára menší odpor ako turbulentné prúdenie. S turbulentným prúdením rastie aj hrúbka medznej vrstvy a tým sa navyšuje odpor.

3. Kontaminácia

Kontaminácia je narušenie pôvodného tvaru krídla cudzím predmetom. Počas prevádzky môže krídlo letúňa za určitých podmienok podliehať určitej kontaminácii jeho povrchu. Jeho kontaminácia nie je priaznivým javom práve kvôli zhoršeniu aerodynamických vlastností krídla.

V našom výskume boli skúmané vplyvy znečistenia krídla s laminárnym profilom na aerodynamické charakteristiky. V leteckej prevádzke sa stretne s viacerými druhmi znečistenia krídla. Najčastejšie ide o kontamináciu:

- námrazou
- poškodenie povrchovej úpravy krídla
- vodou
- tenkou vrstvou prachu
- hmyzom

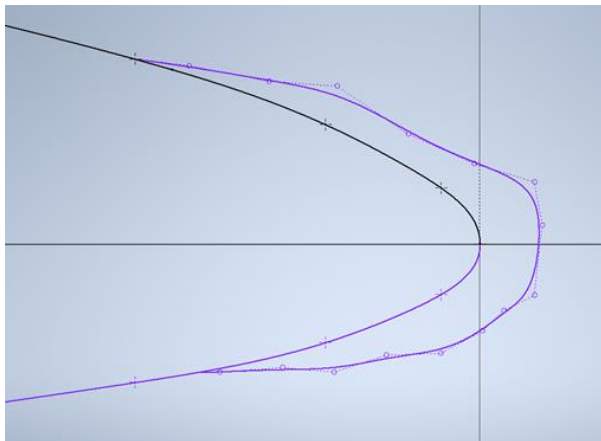
3.1. Kontaminácia námrazou

Námraza je zrnitá usadenina, ktorá sa skladá z ľadových kryštálikov a zrníek. Vzniká pri teplote od 0 do -10°C a jej hustota sa pohybuje od 200 do 500kg/m³. Námraza sa usadzuje na povrchu letúňa počas státia na letisku alebo taktiež aj vo fáze letu. Nebezpečenstvo predstavuje najmä narušením aerodynamických vlastností nosných plôch. Nepriaznivo ovplyvňuje letové vlastnosti a riaditeľnosť letúňa zvýšením hmotnosti a odporu, znížením súčiniteľa vzlaku a mení rozloženie pôsobiacich síl. Tvorí sa na nábežných hranách krídel ale môže pokryť aj celú plochu krídel s tým, že hustota znečistenia je rozsiahlejšia na nábežnej ako na odtokovej hrane[3]. Na jej bezpečné odstránenie sa používajú systémy odstraňovania námrazy.

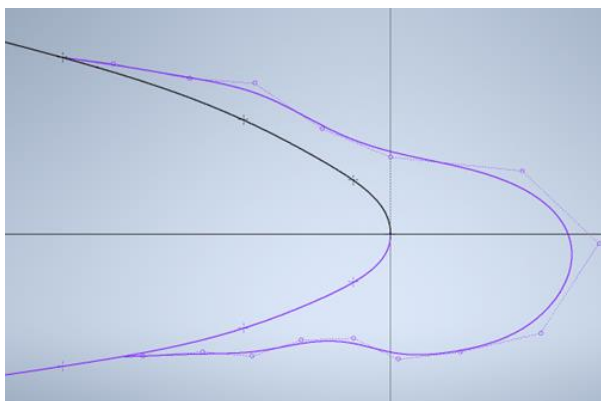
V reálnej prevádzke sa môžeme stretnúť s rôznymi tvarmi námrazy ako napríklad:

- Profilová
- Žliabková
- Nepravidelná

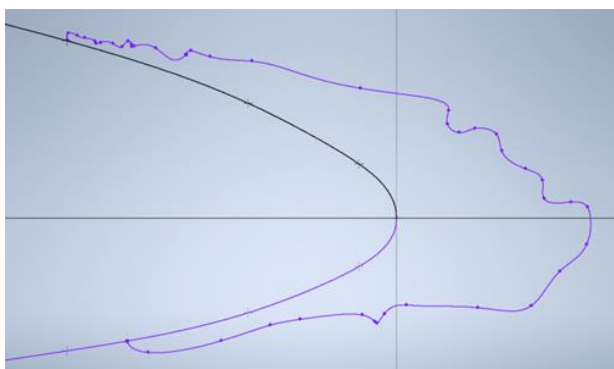
V našej práci boli sledované vplyvy viacerých druhov námrazy. Tvary námraz boli vymodelované podľa predlohy a bola umiestnená prevažne na nábežnej hrane. Ide o 4 typy námrazy



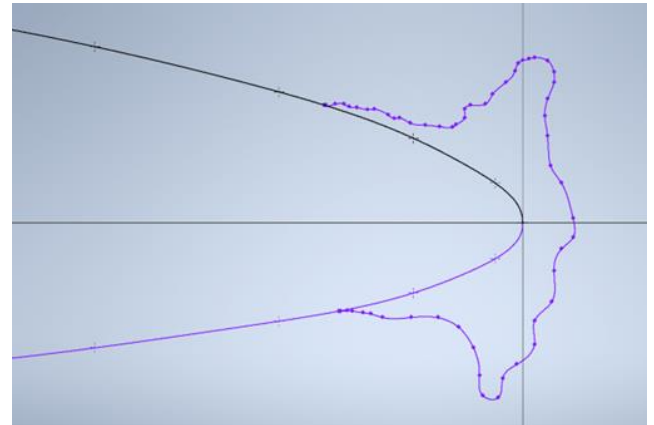
Obrázok 2 - Profil námrazy typu A



Obrázok 3 - Profil námrazy typu B



Obrázok 4 - Profil námrazy typu C



Obrázok 5 - Profil námrazy typu D

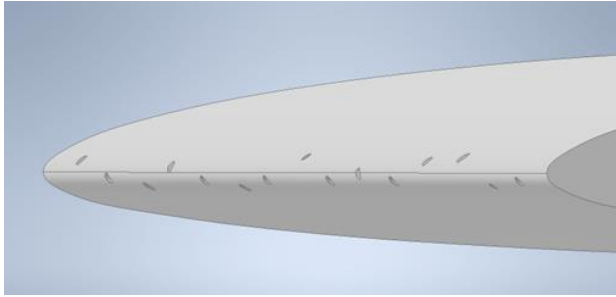
Všetky druhy skúmanej námrazy boli namodelovaná v programe Autodesk Inventor cez geometrické a 3D funkcie programu. Zvolené námrazy dosahovali hrúbku 1,5 - 5mm. Model laminárneho profilu s námrazou bol neskôr použitý na simuláciu v programe Ansys Fluent, kde prebehlo zisťovanie aerodynamických charakteristík.

3.2. Poškodenie

Do úvahy musíme brať aj poškodenie, ako určitý spôsob kontaminácie. K poškodeniu môže dôjsť veľmi jednoducho pri strete s cudzím predmetom, najčastejšie s vtákom alebo malými kamienkami, čo je v letectve bežným javom. Teda ide o narušenie pôvodného tvaru profilu cudzím predmetom. Aj minimálnym narušením pôvodného tvaru profilu môže dôjsť k zmene aerodynamických charakteristík. Deformáciou nábežnej hrany profilu sa mení charakter prúdenia. To má samozrejme dopad na rozloženie pôsobiacich síl, odpor a vztlak.

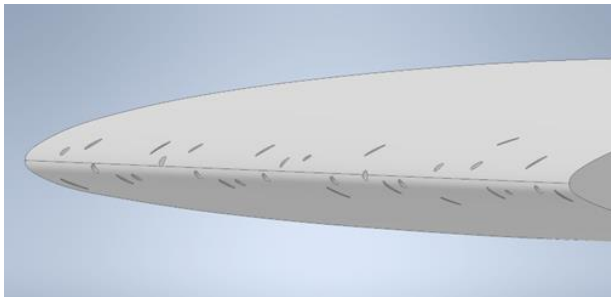
Poškodenie profilu BL215 bolo zvolené na čisto náhodných miestach. Ide iba o povrchové poškodenie spôsobené malými kamienkami zo vzletovej dráhy. Je to druh poškodenia nábežnej hrany s ktorým sa stretneme v bežnej prevádzke lietadiel. Modelovanie poškodenia prebehlo v programe Autodesk Inventor pomocou geometrických funkcií, ktoré program v študentskej verzii ponúkal. Boli zvolené jamky pravidelného tvaru najmä kvôli následnej simulácii v programe Ansys Fluent. Ak by bolo poškodenie zložené zo zložitých tvarov, limitovaný počet buniek siete programu CFD by nemusel stačiť pre potrebnú kvalitu výsledkov.

V tejto práci boli skúmané vplyvy dvoch poškodení, ktoré sa od seba líšia v intenzite poškodenia. Na menej intenzívnom poškodení (typ A) bolo vymodelovaných 10 jamiek kruhového tvaru s rozmermi od 0,6 do 1mm



Obrázok 6 - Poškodenie Typ A

Pri intenzívnejšom poškodení (typ B) ide o 20 jamiek v rozmedzí 0,5 do 0,9mm s elipsovitým a kruhovým tvarom.



Obrázok 7 - Poškodenie Typ B

3.3. Kontaminácia vodou

Kontaminácia tenkou vrstvou vody je bežným javom v leteckej prevádzke pri nevhodných meteorologických podmienkach ako je dážď. Vplyvy kontaminácie tohto druhu neboli odsledované v našej práci kvôli obtiažnemu namodelovaniu tohto javu.

3.4. Kontaminácia prachom

V prevádzke sa stretávame aj s takýmto druhom kontaminácie. Avšak má minimálny vplyv pre aerodynamické charakteristiky. Obdobný problém so sieťou sa nachádza aj pri tomto druhu kontaminácie. Kontúry neboli vykreslené v dostatočnom rozlíšení a teda model bol pre ďalšie výpočty nevhodný.

3.5. Kontaminácia hmyzom

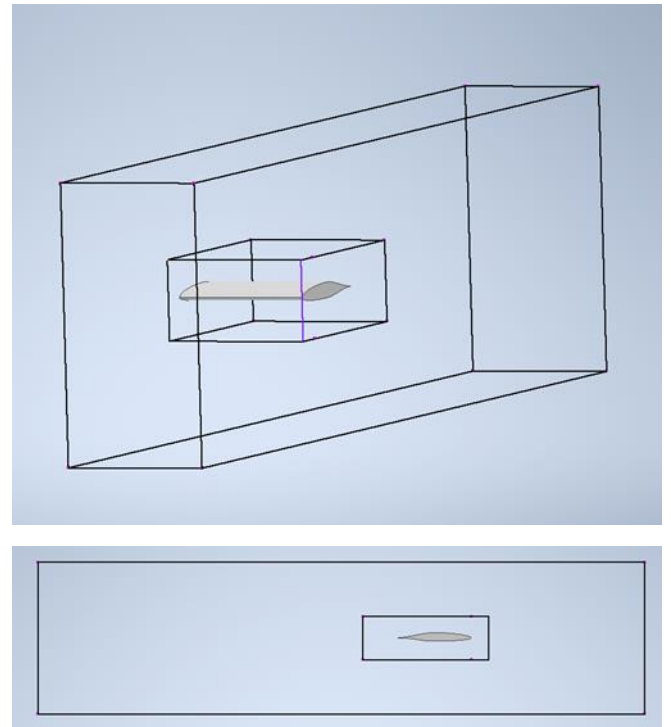
Znečistenie povrchu krídla hmyzom je pri prevádzke lietadiel bežným javom, ktorému sa nedá predísť. Aj to najmenšie znečistenie pri krídlach s laminárnym profilom môže zohrať veľkú úlohu pri udržaní laminárneho prúdenia. Negatívnym dôsledkom tohto typu znečistenia je rozrušenie laminárneho prúdenia na nábežnej hrane a to priamo ovplyvňuje prúdenie okolo celého profilu. Teda prúdenie okolo profilu sa stáva turbulentným a tým sa zvyšuje trecí odpor. Samozrejme záleží na hustote znečistenia nábežnej hrany hmyzom. Na odstránenie tohto typu kontaminácie sú používané čističe nábežných hrán.

Vplyv tohto druhu kontaminácie nemohol byť otestovaný, kvôli limitáciám na počet buniek zo strany študentskej licencie program Ansys Fluent. Pri použití siete s maximálnym počtom povolených buniek, kontúry tohto znečistenia neboli v dostatočnom rozlíšení, tak ako aj v predošlom prípade.

4. CFD

4.1. Geometria

Rozmery skúmaného krídla a domény boli prispôbené pre rozmery testovacej sekcie univerzitného aerodynamického tunela. Rozmery testovacej sekcie tunela sú prispôbené na tvar ležiaceho kvádra so štvorcovým vstupom s rozmermi 600mm x 350mm x 350mm [2]. Skúmané krídlo s rozmermi v hĺbke profilu 170mm a s rozpätím krídla 160mm bolo navrhnuté pre neskoršie skúmanie v aerodynamickom tuneli. Stred otáčania bol zvolený v $\frac{1}{4}$ tetivy, v aerodynamickom strede krídla. V programe Ansys Fluent bola vytvorená doména s rozmermi 1400mm x 350mm x 175mm. Vytvorená doména vhodná pre meranie aerodynamických charakterísk zvoleného krídla sa líši v dĺžke od testovacej sekcie kvôli potrebe umiestnenia okrajových podmienok vstupu a výstupu v dostatočnej vzdialenosti od krídla, pre zabránenie vzájomnej interferencie krídla so vstupom a výstupom. Doména je zobrazená na obr. 8 (väčší kváder).

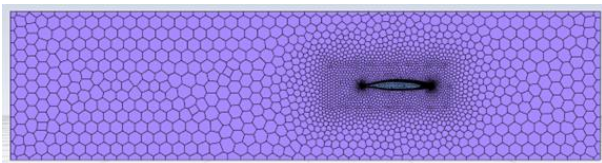


Obrázok 8 - Doména

4.2. Parametre siete

Sieť samotného krídla bola zjemnená primárne na nábežnej hrane z dôvodu významného vplyvu tejto časti geometrie na celkové prúdenie a taktiež z dôvodu prítomnosti kontaminácie v tejto oblasti. Okrem nábežnej hrany je oproti zvyšku krídla zjemnená aj vrchná časť krídla. Zjemnená bola aj oblasť v blízkosti okolia krídla, nazývaná v anglosaskej terminológii BOI (viditeľná na obr. 8 ako menší kváder), z dôvodu výskytu vyšších tlakových a rýchlostných gradientov. Oblasť v okolí krídla slúži aj na zachytenie prúdenia v úplave tvoreného za krídlom. Rozmery siete na krídle sa pohybujú od 0,6 mm do 4,5 mm. Bunky v oblasti zjemnenia majú veľkosť maximálne 7 mm. Bunky vo zvyšku domény sú limitované na hodnotu maximálne 30 mm. Pre dobré zachytenie medznej vrstvy sa používajú v blízkosti

povrchov stien takzvané prizmatické vrstvy. Veľkosť a počet prizmatických vrstiev sa odvíja od charakteristiky medznej vrstvy v danej oblasti. Prizmatické vrstvy by mali pokrývať celú medznú vrstvu a zároveň by mali mať dostatočné rozlíšenie na zachytenie rýchlostných gradientov v medznej vrstve. Výška prvej prizmatickej vrstvy sa volí na základe hodnoty y^+ , ktorá sa pre nami zvolený turbulentný model $k-\omega$ SST odporúča, aby bola menšia než 5. Z tohto dôvodu bola veľkosť prvej prizmatickej vrstvy stanovená na hodnotu 0,05 mm, pričom celkovo je prizmatických vrstiev 15, s rastom 1,25 na vrstvu. Z dôvodu obmedzenia celkového počtu buniek študentskou licenciou, boli prizmatické vrstvy aplikované len na krídlo, trenie na stenách domény bolo zanedbané. Typ použitých buniek je poly-hexcore. Tento typ ponúka najlepší pomer medzi kvalitou výpočtu a výpočtovou náročnosťou, taktiež je odporúčaná spoločnosťou Ansys. Výpočtová sieť v ploche symetrie je vyobrazená na obr. 9.



Obrázok 9 - Sieť

4.3. Nastavenia simulácie

Na vstupe do domény je aplikovaná podmienka „velocity inlet“ s rýchlosťou 55 km/h. Na výstupe je definovaná podmienka „pressure outlet“ 0 atmosferického tlaku. Na styčnej stene je aplikovaná podmienka symetrie a na zvyšných stenách domény je definované nulové trenie.

Bol použitý turbulentný model $k-\omega$ SST. Model $k-\omega$ SST kombinuje výhody základných modelov $k-\epsilon$ a $k-\omega$, tak že využíva $k-\epsilon$ v oblasti voľného prúdenia a model $k-\omega$ v oblasti blízko stien. Model $k-\omega$ SST poskytuje lepšiu predpoveď separácie prúdenia ako väčšina modelov RANS a tiež zodpovedá za jeho dobré správanie pri nepriaznivých tlakových gradientoch. Je to najbežnejšie používaný model v priemysle vzhľadom na jeho vysoký pomer presnosti a nákladov. Ponúka presné výsledky pri prípadoch s výskytom nepriaznivých tlakových gradientov [4].

Počet iterácií použitých pri simuláciách bolo v rozmedzí od 300 do 500. Na niektoré simulácie pri kritických uhloch nábehu bolo nutné použiť vyšší počet iterácií, v niektorých prípadoch až 1000.

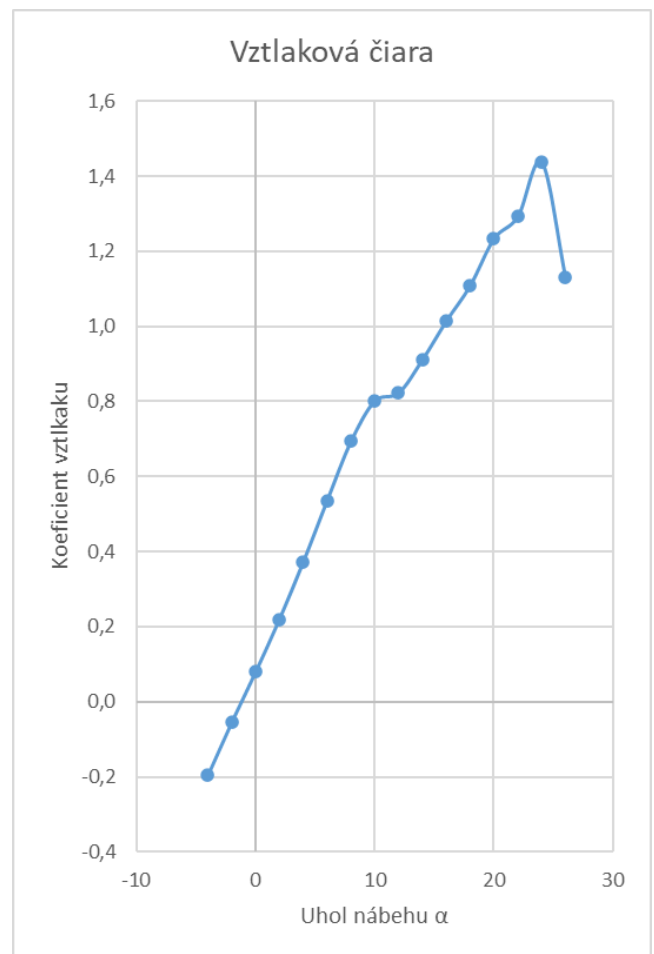
4.4. Nedostatky CFD

Čo sa týka nedostatkov CFD programu pre naše konkrétne merania, ktoré v ňom boli vykonané, ide najmä o:

- Nedostatočnú simuláciu laminárnej medznej vrstvy
- Nižšia presnosť výsledkov v porovnaní s aerodynamickým tunelom
- Nutná určitá výpočtová kapacita
- Limitácie pri tvorbe siete študentskou licenciou

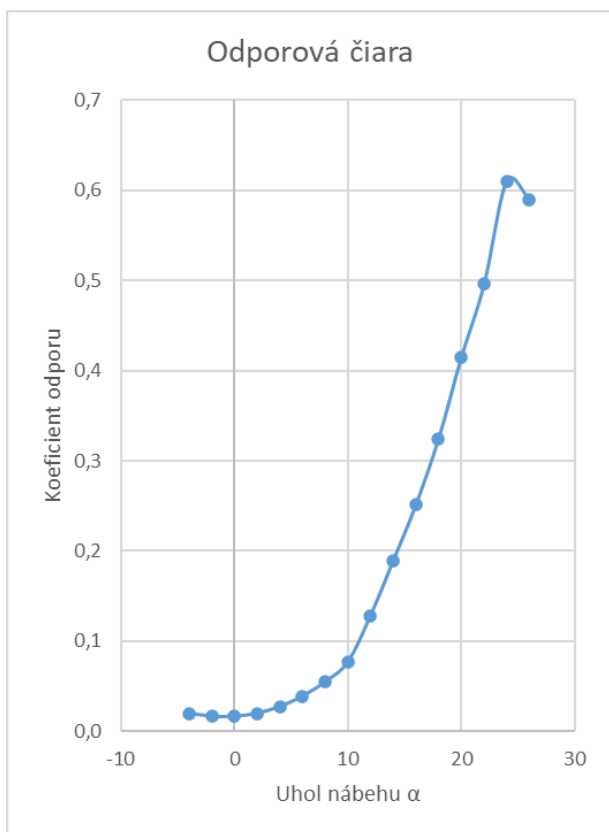
5. Aerodynamické charakteristiky

Aerodynamické charakteristiky boli skúmané v programe Ansys Fluent súborom viacerých simulácií. Na každom profile bolo vykonaných 16 simulácií v rozmedzí $\alpha = -4$ až 26° .



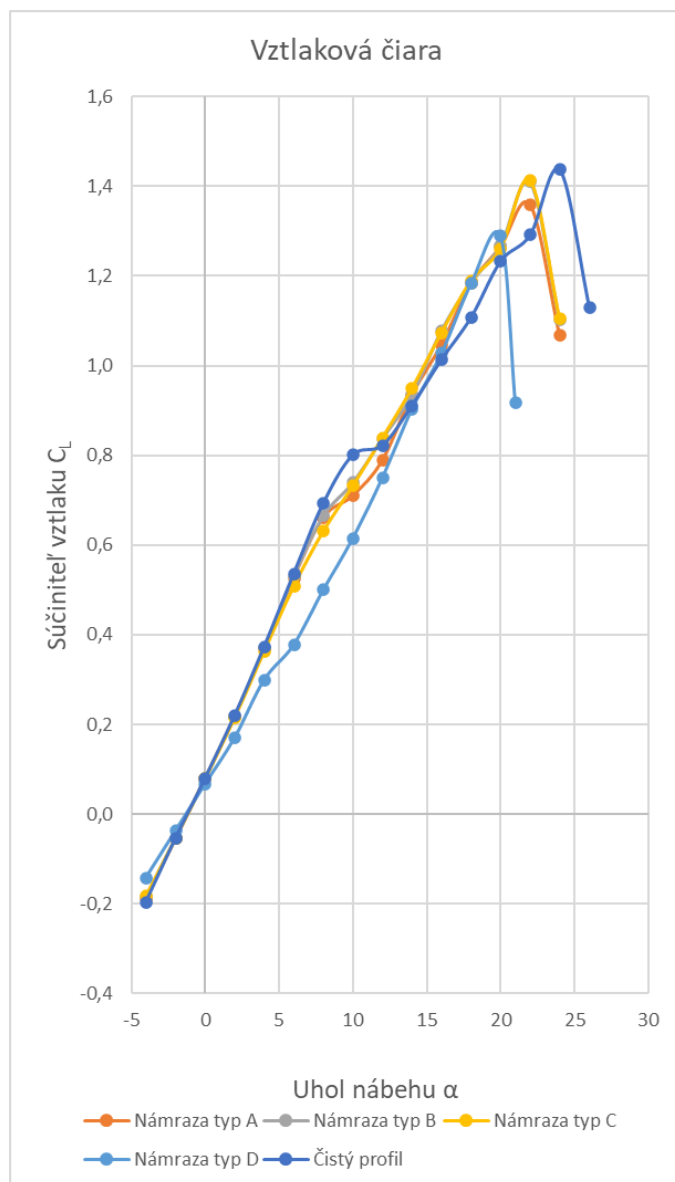
Obrázok 10 - Vztlaková čiara čistého profilu

Kvôli nízkej štihlosti krídla môžeme spozorovať vysoký kritický uhol nábehu pri $\alpha=24^\circ$. Pri nízkej štihlosti krídla sa výraznejšie prejavujú účinky postranných vírov a je znížený gradient rastu vztlakovej čiary. K poklesu koeficientu vztlaku pri kritickom uhle nábehu $\alpha=24^\circ$ dôjde vďaka kompletnému odtrhnutiu prúdenia od nábežnej hrany.



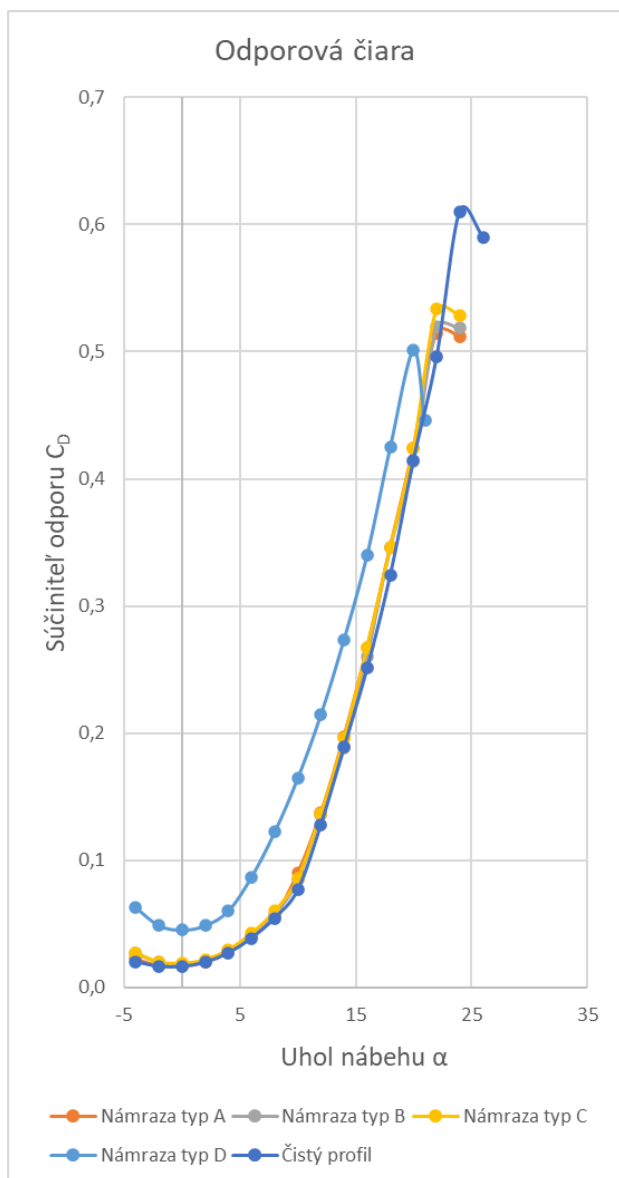
Obrázok 11 - Odporová čiara čistého profilu

Rýchlosť zvyšovania koeficientu odporu rastie so zvyšujúcim uhlom nábehu až do maxima. Pri kompletom odtrhnutí prúdu pri dosiahnutí kritického uhla nábehu $\alpha=24^\circ$ dochádza k zníženiu koeficientu odporu. Maximum koeficientu odporu sa nachádza pri $\alpha=24^\circ$ a minimum koeficientu odporu sa nachádza pri $\alpha=0^\circ$.



Obrázok 12 - Porovnanie vztlakových čiar profilov s námrazou s čistým profilom

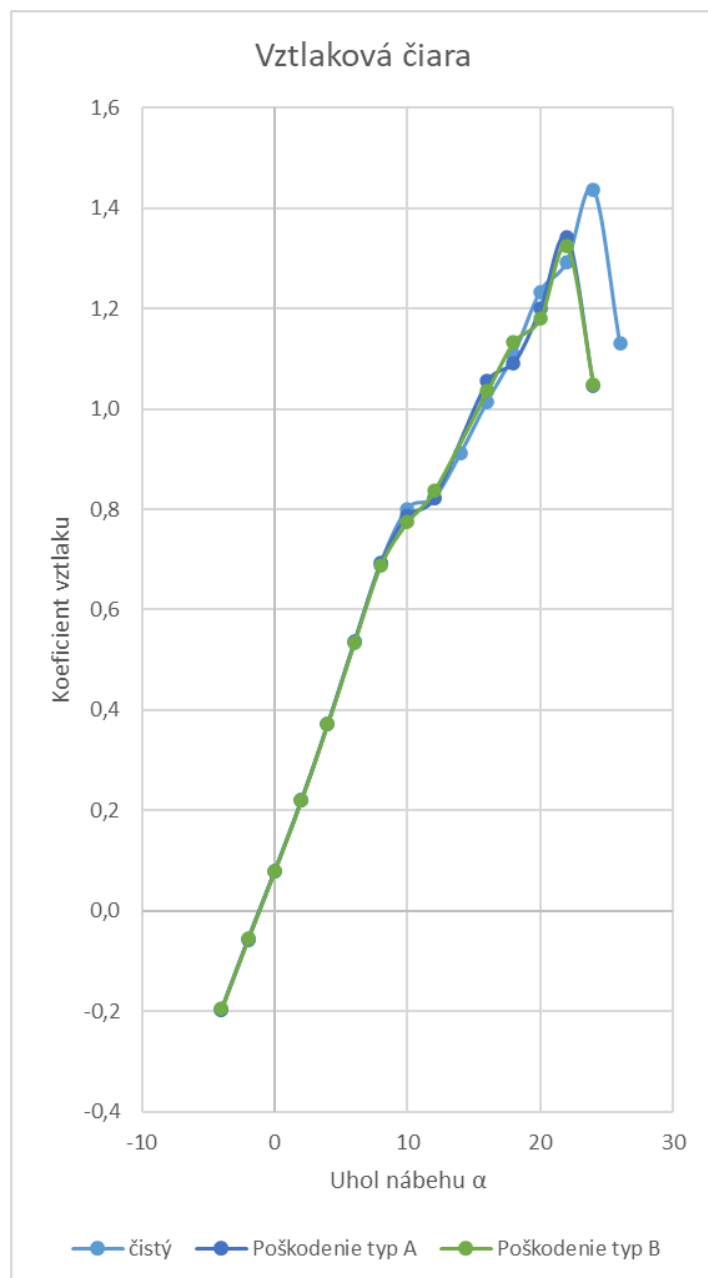
Z obr. 12 môžeme vidieť, že námraza typu B a typu C vyšla takmer identicky vo vyšších uhloch nábehu. Možný dôvod, prečo väčšie typy námrazy vykazujú väčší súčiniteľ vztlaku je preto, lebo predlžujú nábežnú hranu. Priebeh vztlakových čiar je obdobný pri všetkých druhoch profilov námrazy typu A-C. Najväčší vplyv na vztlakovej čiare sa preukázal pre námrazu typu D, ktorého $\alpha_{krit} = 20^\circ$ je znížený o 2° pri porovnaní s ostatnými kontaminovanými námrazami. Pri porovnaní s čistým krídlom je tento rozdiel až 4° . Najvýraznejší rozdiel pri generovaní vztlaku sa nachádza medzi $\alpha 5^\circ-12^\circ$.



Obrázok 13 - Porovnanie odporových čiar profilov s námrazou s čistým profilom

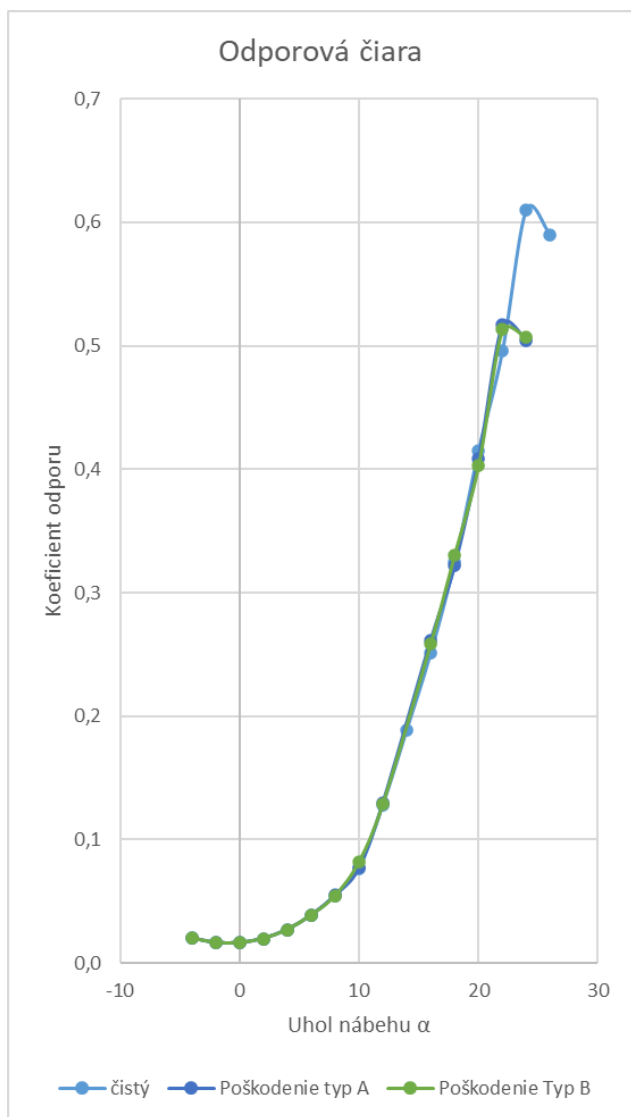
Z obr. 13 vyplýva, že súčiniteľ odporu rastie exponenciálne až po $\alpha_{krit} = 22^\circ$. Maximum súčiniteľa odporu profilov s námrazou typu A-C sa nachádza pri $\alpha = 22^\circ$. Najväčší vplyv na odporovej čiare sa preukázal pre typ D, ktorý generuje výrazne vyššie hodnoty odporu na celej škále uhlov nábehu. Maximálny súčiniteľ odporu pre typ D sa nachádza pri $\alpha_{krit} = 20^\circ$. Minimum súčiniteľa odporu sa nachádza pre všetky druhy námrazy pri $\alpha = 0^\circ$.

Odchýlka vztlaku námrazou znečistených profilov sa líši od čistého profilu v rozmedzí od -10 do +10%. Odchýlka pri odpore sa pohybuje v rozmedzí od 5 do 15% v závislosti od uhle nábehu.



Obrázok 14 - Porovnanie vztlakových čiar poškodených profilov s čistým profilom

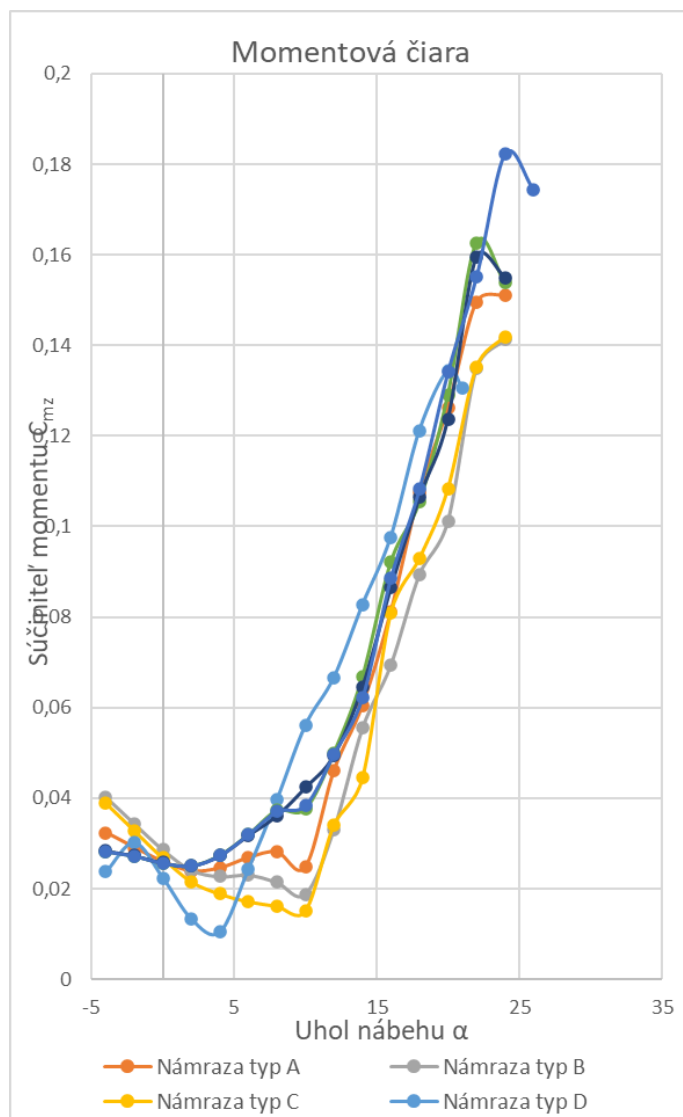
Rýchlosť zvyšovania koeficientu vztlaku rastie so zvyšujúcim uhlom nábehu až do maxima. Pri kompletom odtrhnutí prúdu pri dosiahnutí kritického uhla nábehu profilov s poškodením $\alpha=22^\circ$ dochádza k zníženiu koeficientu vztlaku. Maximum koeficientu vztlaku poškodených profilov sa nachádza pri $\alpha=22^\circ$.



Obrázok 15 - Porovnanie odporových čiar poškodených profilov s čistým profilom

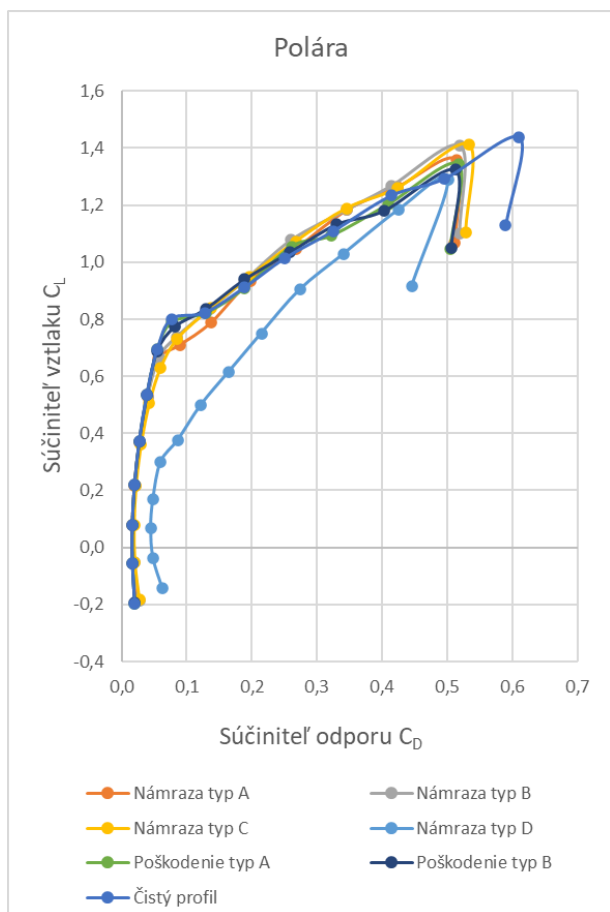
Koeficient odporu rastie exponenciálne až po kritický uhol nábehu $\alpha=22^\circ$. Maximum koeficientu odporu profilov s poškodením sa nachádza pri $\alpha=22^\circ$ a minimum koeficientu odporu sa nachádza pre oba druhy poškodenia pri $\alpha=0^\circ$.

Odchýlka vztaku poškodených profilov sa líši od čistého profilu v rozmedzí od -5 do +3%. Odchýlka pri odpore sa pohybuje do 5% v závislosti od uhla nábehu.



Obrázok 16 - Momentová čiara

Na grafe znázornenom na obr. 16 je možné sledovať priebeh súčiniteľa momentu C_{mz} k jednotlivým uhľom nábehu α všetkých skúmaných krídel. Zvyšujúce sa hodnoty súčiniteľa momentu so zvyšujúcim uhlom nábehu sú odôvodnené posunutím pôsobiska vztaku smerom dopredu k nábežnej hrane. Tým bude výsledná aerodynamická sila pôsobiť na väčšom ramene od vzťažného bodu otáčania, ktorý je umiestnený v $\frac{1}{4}$ tetivy. Výrazne sa líši námraza typu D vo všetkých uhloch nábehu. Ostatné druhy námrazy (typ A-C) vykazujú menší súčiniteľ momentu v intervale od 0° do 15° uhla nábehu ako krídlo s čistým profilom. Poškodenie nemá výrazný vplyv na súčiniteľ momentu vo vzťahu k čistému profilu. Napriek tomu, že bol bod otáčania zvolený v $\frac{1}{4}$ tetivy teda $x = 0,0425m$. Môžeme pozorovať, že momenty k tomuto bodu nie sú konštantné. Zdôvodnené je to tým, že aerodynamický stred, ku ktorému je súčiniteľ momentu konštantný, je posunutý dozadu smerom k odtokovej hrane, kvôli geometrickým vlastnostiam profilu BL 215.



Obrázok 17 - Poláry skúmaných profilov

Poláry znázornené na obr. 17 vyobrazujú závislosť súčiniteľa vzlaku na súčiniteli odporu. Najvýraznejší druh kontaminácie, ktorý vplyva na tieto dva už spomenuté súčinitele je námraza typu D. Vykazuje najmenšiu hodnotu maximálneho pomeru súčiniteľov vzlaku a odporu. Spočiatku je viditeľné, že tento druh námrazy produkuje vo všetkých hodnotách súčiniteľa vzlaku výrazne vyššie hodnoty súčiniteľa odporu. Všetky ostatné druhy kontaminácie, či už poškodenia, alebo námrazy (typu A-C) nevykazujú veľký rozdiel v rozmedzí malých hodnôt súčiniteľa odporu. Výraznejšie rozdiely sa začínajú objavovať od $CL = 0,6$.

6. Zaver

Zámerom tejto práce bolo vyhodnotiť a určiť závažnosť vplyvov kontaminácie na aerodynamické charakteristiky. Na získanie potrebných údajov bolo nutné vykonať 106 simulácií pre 7 rôznych druhov kontaminácií. V programe CFD v ktorom prebehli simulácie boli vybrané vhodné nastavenia parametrov geometrie, siete a okrajových podmienok za účelom čo najpresnejších výsledkov.

Pri spracovaní výsledkov bola použitá komparačná metóda na určenie vplyvu kontaminácie na aerodynamické charakteristiky krídla. Vplyv všetkých druhov kontaminácie je vo výsledku preukázateľný. Z výsledkov vyplýva, že rozsah skúmaného poškodenia nemá výrazný vplyv na bezpečnosť v leteckej prevádzke. Môže vplývať minimálne na riaditeľnosť letúňa. Tento vplyv môže byť odstránený správnym vyvážením pomocou vyvažovacích plôch. Ako nebezpečným javom pre

leteckú prevádzku sa preukázala námraza. Jej všetky druhy vykázali výrazné zníženie kritického uhla nábehu, zníženie súčiniteľa vzlaku a zvýšenie súčiniteľa odporu v takmer všetkých uhloch nábehu. Najvýraznejší vplyv vykazuje námraza typu D v celom priebehu vztlakovej a odporovej čiary.

Z hľadiska relevantnosti výsledkov sa odporúča ich neskoršie overenie v reálnych podmienkach v aerodynamickom tuneli alebo dostupným programom Ansys Fluent v plnej licencií, kde bude možné použiť výrazne hustejšiu výpočtovú sieť a komplexnejší turbulentný model. Odporúčané overenia výsledkov sa vzťahujú na všetky skúmané modely krídel, predovšetkým pre modely s poškodením, pri ktorých je miera neistoty správnosti výsledkov vysoká.

Táto práca môže slúžiť pre ďalší výskum v oblasti skúmania vplyvu implementácie trecieho koeficientu v prípade námrazy a pre zvýšenie povedomia nebezpečenstva kontaminácie pri výcviku pilotov.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky **KEGA 024ŽU-4/2023** s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu *Letecká doprava*".

Referencie

- [1] P-51D TIP (BL215) AIRFOIL (p51dtip-il). Airfoil tools [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=p51dtip-il>
- [2] VEĽKÝ, Patrik a Pavol PECHO Systém merania aerodynamických síl v demonštračnom veternom tuneli [online]. In: . s. 4 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: https://drepo.uniza.sk/bitstream/handle/hdluniza/149/1_0.26552_pas.Z.2020.1-227-230.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [3] SWAYNE, Martin. How Ice Affects Your Wings, And Why It Leads To An Early Stall. *Boldmethod* [online]. 2022 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/how-aircraft-icing->
- [4] *K-Omega and K-Omega SST* [online]. 25.5.2021 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>