

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Diplomová práce



Vliv Gurneyho klapky na aerodynamiku leteckého profilu s Fowlerovou klapkou

Autor: Martin Tetiva

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.

2018

Praha

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tetiva** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **420509**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv Gurneyho klapky na aerodynamiku leteckého profilu s Fowlerovou klapkou

Název diplomové práce anglicky:

The Influence of a Gurney Flap on the Aerodynamics of the Airfoil Equiped with a Fowler Flap

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši vztahové mechanizace křídla v letectví.
 2. Proveďte rešerši použití Gurneyho klapky a jejího vlivu na proudové pole.
 3. Proveďte numerickou simulaci na 2-D geometrii leteckého profilu a výsledky porovnejte s experimentálními daty.
 4. Proveďte simulaci vlivu Gurneyho klapky na výše uvedený profil.
- Rozsah práce: cca 50 stran textu plus přílohy.

Seznam doporučené literatury:

1. James C. Ross, Bruce L. Storms, Paul G. Carrannanto: Lift-Enhancing Tabs on Multielement Airfoils
2. A. M. O. Smith: High-Lift Aerodynamics
3. E. L. Houghton, P. W. Carpenter: Aerodynamics for Engineering Students

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

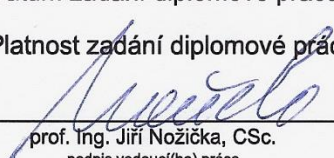
prof. Ing. Jiří Nožička, CSc., 12112

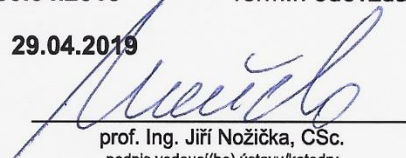
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

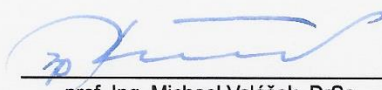
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.08.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **29.04.2019**


prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30. 4. 2018
Datum převzetí zadání

Tetiva
Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci napsal samostatně. Všechny použité materiály, z kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Praze dne 28. 6. 2018

.....

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Jiřímu Nožičkovi, CSc. za odborné vedení a věcné rady k této diplomové práci. Zároveň děkuji Ing. Antonínovi Tetivovi, Ph.D. za pomoc při proniknutí do problematiky letectví a současně za sdílení jeho dlouholetých zkušeností z oblasti CFD, které byly velmi přínosné a dopomohly k dokončení této diplomové práce.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vztlakové mechanizace v leteckém odvětví a jejím zefektivněním pomocí Gurneyho klapky. Součástí práce je numerická simulace pro jednotlivé varianty Gurneyho klapky a vztlakové konfigurace (vzlet, přistání). Část výsledků z matematického modelování je porovnávána s experimentálním měřením provedeným v aerodynamickém tunelu ve VZLÚ v Letňanech. Teoretická část obsahuje seznámení s principem Gurneyho klapky, jejím vlivem na proudové pole kolem leteckého profilu a použitím v praxi.

Klíčová slova:

Vztlaková mechanizace, Gurneyho klapka, CFD, letecký profil, ANSYS Fluent

Abstract

This master's thesis deals with the problematics of high-lift device in the aeronautics and improving its efficiency with Gurney flap. The thesis includes numerical simulation of several shapes of Gurney flap and different Fowler's flap configuration (take-off, landing). Part of the results is compared to experiment data from wind tunnel in VZLU Letňany. Theoretical part introduces the principles of Gurney flap, its effect on flow field around airfoil and practical use.

Keywords:

High-lift device, Gurney flap, CFD, airfoil, ANSYS Fluent

Obsah

Seznam symbolů.....	7
1. Úvod.....	8
2. Prvky vztlakové mechanizace, Gurneyho klapka.....	9
2.1 Základní vztlakové prvky a jejich funkce.....	9
2.2 Vzájemné působení jednotlivých prvků profilu.....	13
2.3 Gurneyho klapka.....	16
2.4 Shrnutí.....	17
3. Gurneyho klapka – komplexní studie.....	19
3.1 Segmentace Gurneyho klapky	19
3.2 Poloha a natočení Gurneyho klapky	20
3.3 Shrnutí.....	25
4. Numerická simulace leteckého profilu	26
4.1 Princip CFD, možnosti a omezení modelování turbulence	26
4.2 Geometrie a varianty výpočtu.....	29
4.3 Simulace profilu bez Gurneyho klapky a porovnání	30
s experimentálními daty.....	30
4.4 Simulace profilu s Gurneyho klapkou	38
4.5 Shrnutí.....	46
5. Závěr.....	47
6. Seznam použité literatury	49
Seznam příloh.....	51

Seznam symbolů

∇	operátor nabra	[1]
c	tětiva	[m]
C	konstanta	[1]
c_D	součinitel odporu	[1]
c_L	součinitel vztlaku	[1]
c_{Lmax}	maximální součinitel vztlaku	[1]
c_p	tlakový součinitel	[1]
d	vzdálenost Gurneyho klapky od odtokové hrany	[m]
D	odporová síla	[N]
E	energie	[J]
\vec{f}	vektor zrychlení	[m·s ⁻²]
g	vzdálenost mezi hlavním profilem a následující klapkou	[m]
h	výška Gurneyho klapky	[m]
k	turbulentní kinetická energie	[m ² s ⁻²]
L	vztlaková síla	[N]
M	Machovo číslo	[1]
p	tlak	[Pa]
\dot{q}	tepelný tok	[W·m ⁻²]
r	měrná plynová konstanta	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
t	čas	[s]
v	rychlost	[m·s ⁻¹]
y_+	bezrozměrná vzdálenost	[1]
α	úhel náběhu	[°]
α_{krit}	kritický úhel náběhu	[°]
α_{ZL}	úhel náběhu, při kterém je nulový vztlak	[°]
δ	úhel natočení Gurneyho klapky	[°]
ε	rychlost disipace kinetické turbulentní energie	[m ² s ⁻³]
μ	dynamická viskozita	[Pa·s]
μ_t	turbulentní dynamická viskozita	[Pa·s]
ν	kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ν_t	turbulentní kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
σ	konstanta	[1]
ω	Specifická rychlost disipace	[s ⁻¹]

1. Úvod

Vztlaková mechanizace je klíčovým prvkem všech moderních letadel napomáhající stabilnějšímu a bezpečnějšímu letu zejména v nižších rychlostech. V nejběžnějších případech se skládá ze soustavy klapek a slotů, které se vysunují z křídel letounu, zvyšují vztlak, a tím i stabilitu nejčastěji při vzletu a přistání.

Základní princip tkví ve zvětšení prohnutí profilu a tím i zvětšení cirkulace kolem něj. Vlivem změny rychlosti proudění kolem horní a spodní strany profilu se i úměrně mění vztlakový součinitel, resp. vztlaková síla na křídlo. Ta je závislá mj. na úhlu náběhu, rychlosti nabíhajícího proudu a konfiguraci vztlakové mechanizace (úhel a vysunutí klapky). Jelikož je v praxi často letadlo po startu nuceno nastoupat do určité výškové hladiny co nejrychleji, je cílem takové nastavení vztlakové konfigurace, které co nejvíce zvýší vztlak a zároveň při něm dojde k odtržení proudu na klapce až při velmi vysokém úhlu náběhu (pro zajištění stabilního prudkého stoupání).

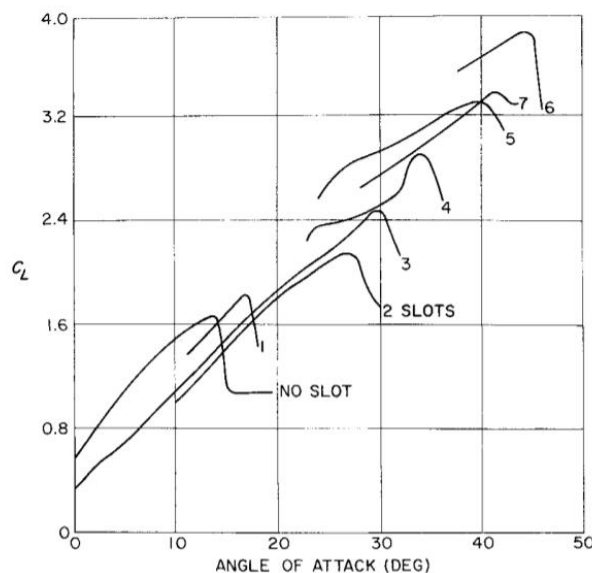
Prvky vztlakové mechanizace tedy musí dohromady splňovat určité parametry výkonové. Zároveň by pak tyto prvky měly být co možná nejmenší, resp. nejlehčí, vzhledem k ušetření hmotnosti a tím i paliva. Tento požadavek je problematický, protože je do jisté míry v rozporu s požadavkem na maximální zlepšení vztlakových parametrů. Zjednodušeně lze říci, že větší klapka bude generovat větší vztlak.

Jednou z variant, jak se s tímto problémem vyrovnat, je optimalizace klasické soustavy prvků vztlakové mechanizace s ohledem na co nejmenší rozměry (hmotnost) a co největší vztlak. Jiná možnost je pak doplnit tyto klasické prvky o prvek další, který by zlepšil vztlakové parametry ideálně stejnou měrou, za použití menší klapky. Touto problematikou se zabývá i Výzkumný a zkušební ústav v Letňanech, kde se výše uvedených cílů snaží dosáhnout pomocí Gurneyho klapky umístěné v zavětrání mezi profilem a Fowlerovou klapkou. Právě ve spolupráci s VZLÚ pak byla napsána tato diplomová práce.

2. Prvky vztlakové mechanizace, Gurneyho klapka

2.1 Základní vztlakové prvky a jejich funkce

Jak již bylo zmíněno v úvodu, základními prvky vztlakové mechanizace jsou sloty a klapky. Historie těchto prvků sahá téměř do počátků letectví samotného. Již na začátku 20. století zveřejnil výsledky svého téměř desetiletého výzkumu křídel se sloty Handley Page. Jeho práce se nezabývala pouze křídly s jedním slotem, ale i s více sloty najednou. Autor se snažil dokázat, že každý profil s $n+1$ elementy (sloty, klapky) bude generovat větší vztlak než profil s n elementy. Své tvrzení ověřoval na profilu s postupně až osmi sloty. Na Obr. 1 lze vidět závislost vztlakového součinitele c_L na úhlu náběhu α pro profily s různým počtem slotů. Závislost obecně ukazuje, že čím více je slotů, tím větší je vztlak a zdá se, že tedy potvrzuje autorovo tvrzení [1].



Obr. 1: Vliv počtu slotů na vztlakovou křivku [1]

Z grafu je patrné, že slot obecně zvyšuje kritický úhel náběhu, kdy dochází k odtržení proudu. Slot je v podstatě lišta s vlastním profilem (pevně fixovaná nebo vysouvací), umístěna u náběžné hrany profilu (Obr. 2). V anglické literatuře bývá odlišováno slovo slat a slot.

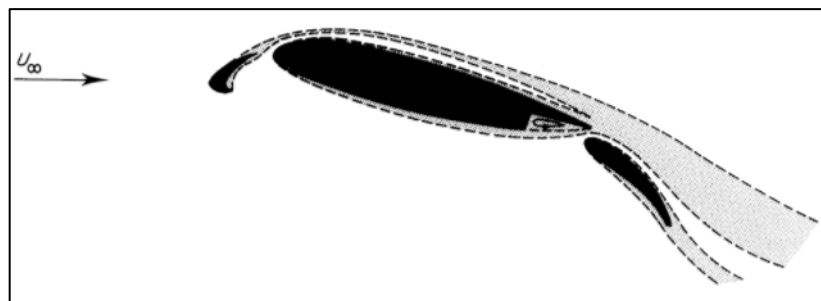
První výraz se užívá pro pohyblivou lištu a druhý pro mezeru mezi slatem a křídlem. V českém jazyce toto rozdělení není zavedeno.

Ve starších odborných literaturách často bývá jako princip funkce slotu uvedeno, že za zvýšení α_{krit} (oddálení odtržení na profilu) může proudící vzduch o vyšší energii z dolního povrchu slotu na horní povrch profilu a tím oživení mezní vrstvy. Novější publikace ale tuto hypotézu označují za chybnou.



Obr. 2: Pohyblivý slot na náběžné hraně [2]

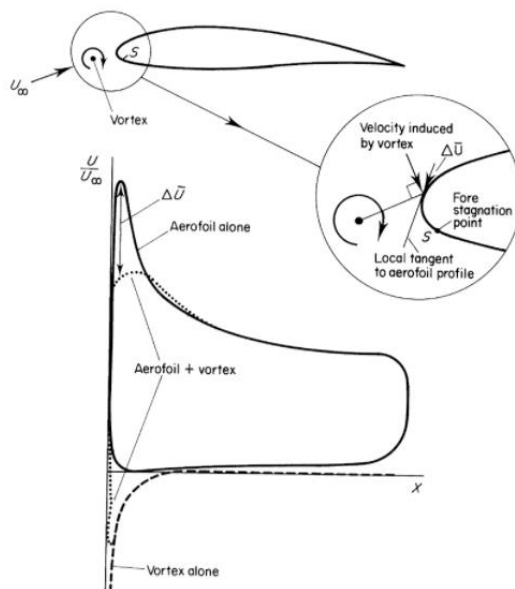
Ve skutečnosti spolu úplav ze slotu a mezní vrstva profilu nijak výrazně neinteragují a stejně jako v případě dvojice křídlo-klapka to jsou po většinu času, až na odtokovou hranu, dvě separátní oblasti (Obr. 3) [3].



Obr. 3: Typické chování mezní vrstvy u tří-elementového profilu [3]

K pochopení funkce slotu můžeme tento element nahradit (modelovat) pomocí víru. Na Obr. 4 je znázorněn vliv tohoto víru (slotu) na profil. Když budeme uvažovat složku rychlosti indukovanou vírem ve směru tečny v okolí náběžné hrany, je patrné, že tato složka působí ve směru proti proudění na horním (sacím) povrchu profilu, a tudíž snižuje na tomto povrchu rychlost. Opačný vliv má slot na rychlost na spodním povrchu profilu. Pozitivní efekt slotu tedy tkví v redukci nepříznivého tlakového gradientu na hlavním profilu. Tento pokles tlaku a rychlosti na sacím povrchu je kompenzován vzrůstem tlaku na povrchu spodním a má za následek zvýšení vztlakového koeficientu c_L [3]. Jednodušeji řečeno, slot díky své vlastní

cirkulaci generuje složky rychlosti, které mají směr proti proudu na profilu, a díky tomu snižují tlakové špičky na profilu.



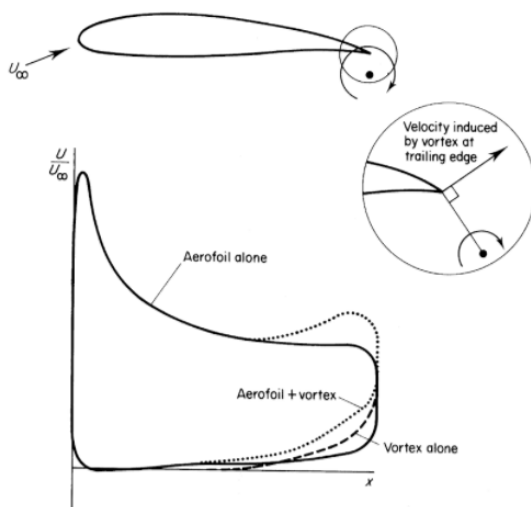
Obr. 4: Vliv slotu (modelovaný vírem) na rozložení rychlosti po profilu [3]

Podobně jako slot lze modelovat i vliv klapky za hlavním profilem umístěním víru v blízkosti odtokové hrany (Obr. 5). V tomto případě vírem indukovaná rychlost zvyšuje rychlost jak na sacím, tak tlakovém povrchu. Na horním povrchu je to výhodné opět z hlediska nepříznivého tlakového gradientu, jehož vliv se zvýšením rychlosti na odtokové hraně snižuje. Díky indukované rychlosti na odtokové hraně se zvýšil efektivní úhel náběhu. Za takových podmínek by ale proud neopouštěl odtokovou hranu hladce, což by porušovalo Kuttovu podmínku¹. Proto vliv vazkosti způsobí zvýšení cirkulace kolem profilu tak, aby byla Kuttova podmínka splněna, což má za následek také zvýšení vztlaku [3].

Jak již bylo zmíněno dříve, pro správnou funkci více-elementového profilu je nezbytné udržet oddělené úplavy a oblasti mezní vrstvy u po proudu následujících elementů profilu (viz Obr. 3). Úplav ze slotu se dále vyvíjí s nepříznivým tlakovým gradientem po celé délce profilu. Pokud by došlo ke spojení úplavu s mezní vrstvou následujícího elementu, značně by se zvýšila šance na odtržení proudu a byla by narušena správná funkce celého profilu. Pro korektně

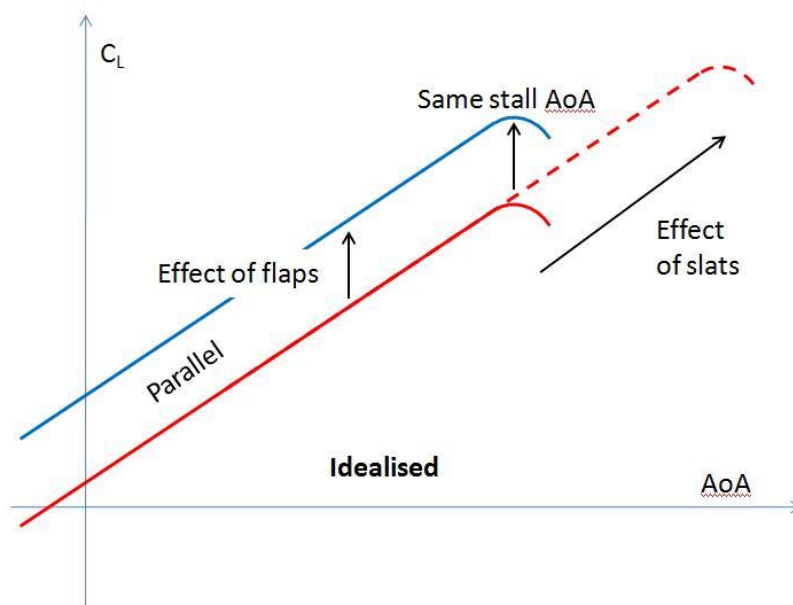
¹ Kuttova podmínka dává do souvislosti hodnotu cirkulace s polohou stagnačního bodu. Těleso s ostrou odtokovou hranou, které se pohybuje tekutinou, vytvoří kolem sebe dostatečnou cirkulaci, aby byl stagnační bod udržen na odtokové hraně.

navržené profily ale k tomuto jevu nedochází a úplav a mezní vrstva zůstávají dvěma separátními entitami.



Obr. 5: Vliv klapky (modelovanou vírem) na rozložení rychlosti po profilu [3]

Závěrem lze říci, že slot zvyšuje kritický úhel náběhu α_{krit} a Fowlerova klapka zvyšuje maximální vztlak c_{Lmax} (viz Obr. 6). Obě zařízení se využívají zejména pro letové režimy při nízkých rychlostech a u moderních letounů jsou plně výsuvné/zásuvné. Je třeba mít na paměti, že přes kladné účinky na vztlak, zvyšují tyto elementy výrazně i odpor (resp. koeficient odporu c_D). Ne vždy aplikací těchto elementů dojde k celkovému zlepšení poláry (křivka závislosti c_L na c_D).

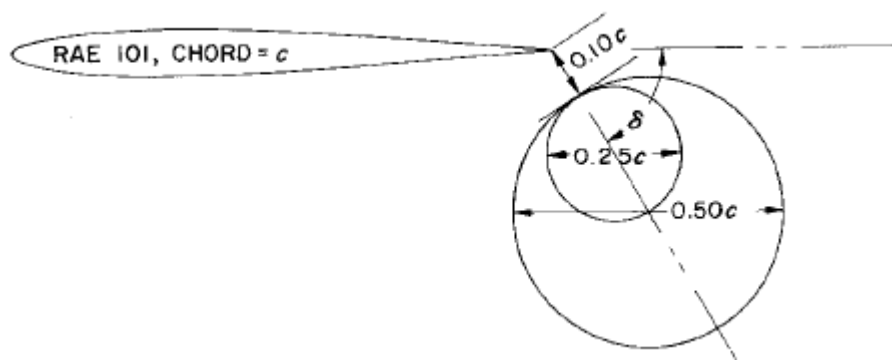


Obr. 6: Efekt slotu a klapky na aerodynamický profil [4]

2.2 Vzájemné působení jednotlivých prvků profilu

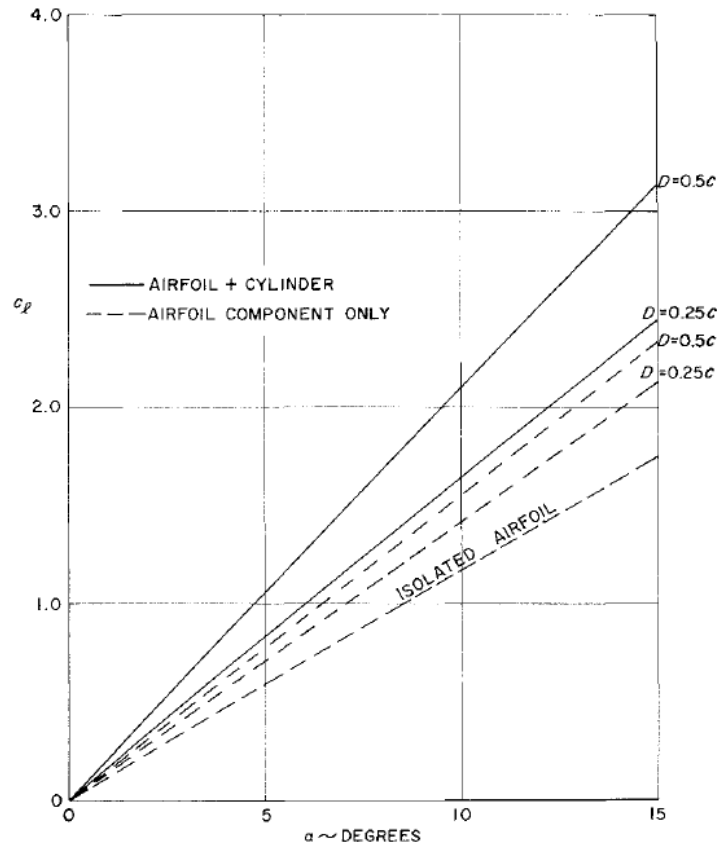
V předchozí podkapitole byla obecně vysvětlena funkce základních vztlakových prvků leteckého profilu. Jednotlivé prvky, ať již po proudu nebo proti, se ale ovlivňují vzájemně, a proto je třeba toto téma osvětlit. Již víme, že funkce slotu netkví v ožívování mezní vrstvy vlivem proudu s větší energií, ale naopak je založena na zpomalení proudu na sacím povrchu profilu vlivem cirkulace kolem slotu a tím zmírnění tlakových špiček. Zároveň však prvek po proudu (v tomto případě hlavní profil) způsobí, že odtoková hrana slotu se nachází v oblasti s větší rychlostí. Proud se v této oblasti ohýbá ve směru proudění kolem hlavního profilu a vlivem toho zvyšuje cirkulaci kolem slotu. V angličtině je pro tento jev užíván termín *slat effect*.

Podobným způsobem hlavní profil ovlivňuje proudění na klapce a zároveň klapka zakřivuje proud odtékající z profilu, čímž pomyslně zvětšuje prohnutí samotného profilu. Principem funkce klapky je tedy zvýšení rychlosti na horním povrchu a z toho vycházející zvýšení cirkulace pro dodržení Kuttovy podmínky. Zajímavým zjištěním pak je, že prvek fungující jako klapka, nemusí být ve skutečnosti profil, ale téměř libovolné těleso, které vhodně umístíme, pokud vycházíme z předpokladu, že pro zvýšení cirkulace kolem profilu potřebujeme zakřivit proud na odtoku. A. M. O. Smith ve své publikaci [1] toto ukazuje na příkladu dvou válců s různými průměry, umístěné v blízkosti odtokové hrany profilu (Obr. 7).



Obr. 7: Válce umístěné za odtokovou hranou zastupující efekt klapky [1]

Jak je vidět na Obr. 7, válce měly průměr $0.25c$, respektive $0.5c$ a byly ve vzdálenosti od odtokové hrany $0.1c$. Úhel natočení δ se měnil od 0° do 90° . V prvním kroku byly válce umístěny horizontálně za odtokovou hranu, tzn. $\delta=0^\circ$. Vliv válců na vztlakový součinitel c_L je na Obr. 8.

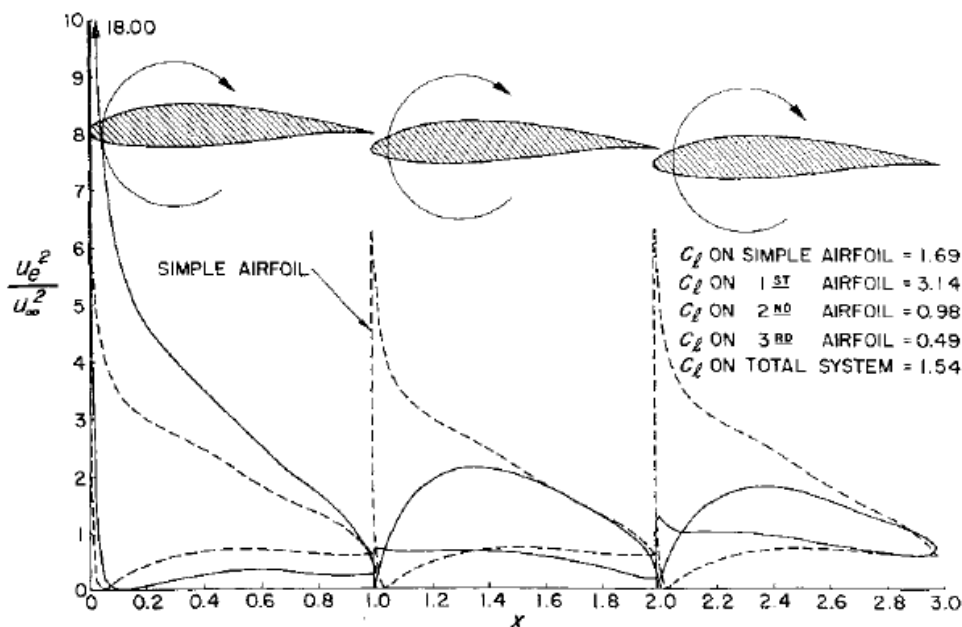


Obr. 8: Vliv válců za odtokovou hranou na vztlakový součinitel c_L [1]

Je patrné, že válce způsobují značný nárůst c_L . Pro úhel náběhu $\alpha=15^\circ$ se zvětšil vztlakový součinitel z 1.75 na 3.35 , což je téměř dvojnásobek. Další studií byl zjištěn optimální interval úhlu natočení $\delta=(60-70)^\circ$, při kterém je přírůstek c_L největší.

Nutno podotknout, že hodnoty nebyly změřeny, ale počítány pomocí numerické metody Douglase Neumanna. Ta je založená na potenciálním proudění a byla ověřena na stovkách profilů, které byly měřeny v aerodynamickém tunelu. Její výsledky lze proto interpretovat v podstatě jako exaktní [1].

Vzájemný vliv jednotlivých elementů lze ještě lépe ilustrovat, pokud umístíme za sebou tři naprosto totožné profily (Obr. 9). Průběhy rychlostí/tlaků byly zaznamenány pro úhel náběhu $\alpha=10^\circ$. Mezery mezi jednotlivými profily jsou shodně 1% hloubky profilu.



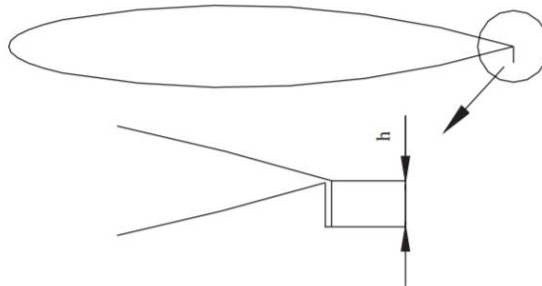
Obr. 9: Distribuce rychlosti/tlaku na třech totožných po sobě jdoucích profilech [1]

Poslední profil nemající za sebou žádný další prvek, který by zvýšil jeho cirkulaci, dosahuje hodnoty vztakového součinitele pouze 0.49. Tento profil však zvyšuje cirkulaci kolem prostředního profilu, který má při daném úhlu náběhu $c_L=0.98$. Oba zadní profily pak dohromady působí na první profil, jehož vztakový součinitel je 3.14. Vysvětlení koresponduje s výše uvedenou teorií. Cirkulace na předcházejícím profilu snižuje úhel náběhu, rychlosti kolem povrchu a tím i vztakový součinitel na profilu následujícím. Závěrem lze tedy prohlásit, že jakýkoliv profil, který následuje po jiném profilu, bude mít vždy menší vztlak. Tento zajímavý jev se projevuje například i u plachetnic. Pokud by jely těsně za sebou tři stejné plachetnice a poslední dvě se snažily předjet tu vedoucí, mělo by být téměř nemožné to dokázat, protože jejich plachty by zvětšovaly vztlak první lodi a zmenšovaly by svůj. Tento efekt se ještě zvýrazní u více plachet na jedné lodi (menší vzdálenost) [1].

2.3 Gurneyho klapka

Gurneyho klapka je zařízení velmi malé, jednoduché, avšak při vhodné aplikaci velmi účinné. Zatímco v letectví zatím nedosahuje výrazné využitelnosti, v automobilovém průmyslu, zejména motorsportu, je prvkem klíčovým. V této podkapitole bude vysvětlena obecně funkce Gurneyho klapky, jejímu podrobnějšímu rozboru bude věnována samostatná kapitola.

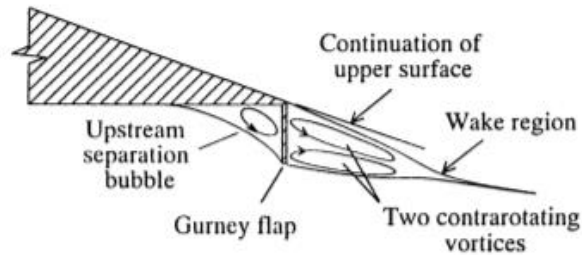
V principu se jedná o tenkou lištu umístěnou ve většině případech přímo na odtokové hraně, případně v její těsné blízkosti kolmo k těživě (Obr. 10).



Obr. 10: Gurneyho klapka na profilu [5]

První experimentální výsledky přinesl Liebeck, který aplikoval Gurneyho klapku na Newmanův profil. Z měření byl zjištěno, že při aplikaci Gurneyho klapky vztlakový součinitel vzrostl, zatímco odpor mírně klesl. Tyto výsledky byly dosaženy pouze pro určitou konfiguraci, konkrétně pro Gurneyho klapku o výšce (1-2) % těživy. Pro větší výšky Gurneyho klapky sice stále docházelo k růstu vztlaku, zároveň ale rostl i odpor [5].

Princip funkce Gurneyho klapky spočívá v rozdílném tlaku na odtokové hraně. Budeme-li předpokládat standardní teoretický profil, kde jeho odtoková hrana má nulovou tloušťku (ve 2D je to bod), pak logicky na této hraně musí být jeden jediný tlak. Aplikujeme-li na odtokovou hranu Gurneyho klapku, dojde k vytvoření nenulové tloušťky na odtokové hraně. Na horním a dolním povrch bude rozdílný tlak a za Gurneyho klapkou se vytvoří dva víry s opačnou orientací (Obr. 11).



Obr. 11: Proudové pole v okolí Gurneyho klapky [5]

Gurneyho klapka má velmi podobný účinek jako zvětšení prohnutí profilu. Oblast s nižším tlakem těsně za Gurneyho klapkou způsobí, že proud přitékající z horního povrchu má tendenci pokračovat směrem dolů. Rychlost na sacím povrchu tím vzroste, čímž vzroste i vztlak [5].

Jak již bylo zmíněno, benefit v podobě růstu vztlaku s sebou přináší i růst odporu. Ve většině konfiguracích tak Gurneyho klapka způsobí celkový pokles poměru vztlak/odpor (L/D). Využití Gurneyho klapky je tedy vázáno s případy, kde odpor není dominantním parametrem pro správnou funkci zařízení, nebo kde zvýšení vztlaku je nezbytné a tento klad převyšuje ztráty vlivem vzrůstu c_D .

V současné době z hlediska využití Gurneyho klapky se jedná zejména o přitlačná křídla a spoilery u sportovních vozů, případně o horizontální stabilizátory u helikoptér.

2.4 Shrnutí

Vztlakové mechanizace jsou dnes nezbytnou součástí dopravních i sportovních letounů. Ve většině případů se používají vztlakové prvky pohyblivé s možností jejich vysunutí, resp. zasunutí. Sloty zvyšují kritický úhel náběhu (prodlužují vztlakovou křivku) a klapky zase zvětšují maximální vztlakový koeficient. Gurneyho klapka má podobný efekt jako Fowlerova, tedy zvětšuje maximální vztlak. Pro správnou funkci vztlakových prvků je třeba správně navrhnout jejich velikost a natočení vůči proudu. Zjednodušeně lze říci, že čím delší klapka bude, tím větší bude generovat vztlak a čím bude více natočena (zvětší se prohnutí profilu), tím se opět zvětší vztlak.

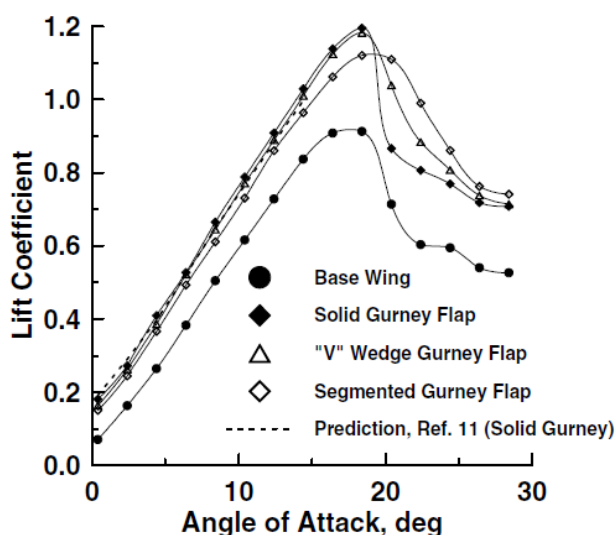
Zároveň se ale zvětšuje riziko odtržení proudu na klapce ať již z důvodu tloušťnutí mezní vrstvy pro případ příliš dlouhé klapky, či vlivem velkého natočení klapky. I u Gurneyho klapky platí úměra čím větší, tím větší vztlak, ale zde je nárůst odporu ještě výraznější. Její výška se obvykle pohybuje v řádu maximálně jednotek procent tětiny. O efektivních parametrech výšky, polohy a umístění Gurneyho klapky bude pojednávat následující kapitola.

3. Gurneyho klapka – komplexní studie

3.1 Segmentace Gurneyho klapky

Ačkoliv do této chvíle byla diskutována Gurneyho klapka pouze ve 2D pohledu, existují studie, které poukazují na vliv „hloubky“, nebo lépe řečeno třetího rozměru u Gurneyho klapky. Ta totiž nemusí být po celé délce křídla, ale lze ji segmentovat, a to různými způsoby. V předchozí kapitole bylo ukázáno, že Gurneyho klapka zvyšuje vztlak za cenu (ve většině případech) snížení celkového poměru L/D . Přesto je často zvýšení maximálního vztlaku pro vyšší úhly náběhu tak výhodné, že lze navýšení odporu přijmout.

Růst odporu i přesto nemusí být tak markantní i přes alespoň částečné zachování výhod Gurneyho klapky. Studie R. Mayera z roku 2006 prokazuje redukci odporu spojenou s nepravidelnostmi na povrchu Gurneyho klapky. Jedná se například o obdélníkové, či V-výřezy. Taková segmentace sice sníží celkový odpor klapky, zároveň však způsobí pokles přidaného vztlaku. Přesto je výsledkem celkové zvýšení poměru L/D . Grafické znázornění vlivu segmentace Gurneyho klapky je patrná z Obr. 12 [6].



Obr. 12: Vliv konfigurace Gurneyho klapky na c_L [6]

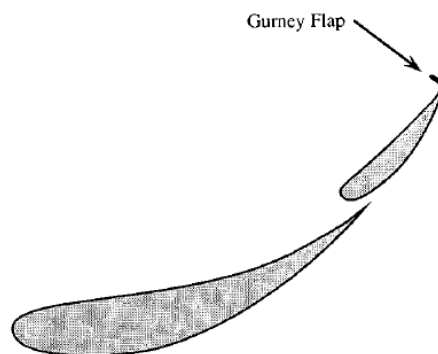
Nabízí se otázka, jaký je princip vlivu těchto výřezů. Pro odpověď je potřeba se vrátit trochu do minulosti. Maďarsko-americký fyzik Theodore von Kármán ukázal, že odpor asociovaný s vírovou stezkou (dnes nesoucí jeho jméno) je snížen, pokud se zmenší mezery mezi jednotlivými víry a jejich rychlost se sníží. Jinak řečeno, sníží-li se vírová frekvence. Jak již víme z přechozích kapitol, za Gurneyho klapkou se tvoří dva protichůdné víry. D. Jeffrey a další experimentálně potvrdili přítomnost periodické separace ve formě von Kármánovy vírové stezky za Gurneyho klapkou.

S odkazem na R. Mayera, segmentace Gurneyho klapky má takový efekt, že se vytvoří takový 3D úplav který naruší formování vírové stezky. Frekvence tvoření vírů tak již není dále jasně rozlišitelná, což má za následek i celkový pokles odporu.

Z grafu na Obr. 12 je tedy patrné, že V-výřezy mají jen malý vliv na funkci Gurneyho klapky. Segmentace klapky způsobí snížení vztlaku (porozita redukuje efekt prohnutí klapky) i odporu a zvýšení L/D poměru. Asi nejpodstatnějším benefitem je pak pozvolnější pokles vztlaku v okolí pádového úhlu oproti celistvé Gurneyho klapce [6].

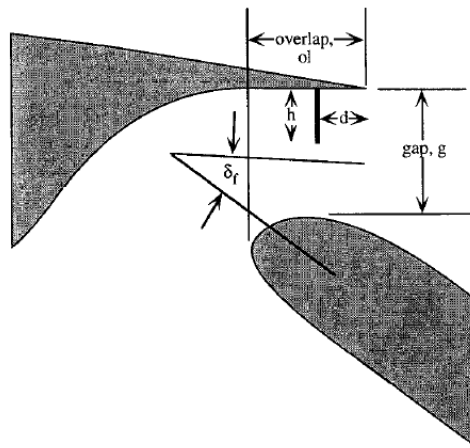
3.2 Poloha a natočení Gurneyho klapky

Vraťme se nyní do rovinného případu a uvažujme Gurneyho klapku konzistentní po celé délce křídla, takže prostorové efekty můžeme zanedbat. V předchozích kapitolách byla Gurneyho klapka umísťována vždy až na odtokovou hranu. To lze udělat, pokud předpokládáme, že je Gurneyho klapka na samostatném profilu, nebo je případně až na posledním prvku více-elementového profilu (Obr. 13).

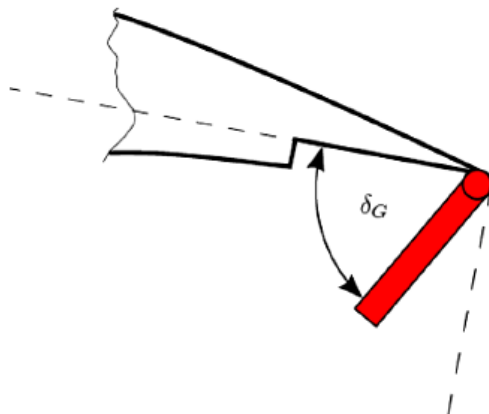


Obr. 13: Gurneyho klapka na posledním prvku více-elementového profilu [7]

V přechozích případech jsme také uvažovali Gurneyho klapku pevnou, bez možnosti jejího zasunutí. V ideálním případě by ale měla být klapka vysouvací, takže by nepůsobila zbytečný odpor při cestovním režimu letu. Stejně tak by byla potřeba klapku zatáhnout, pokud by byla umístěna například na profil, za nímž následuje Fowlerova klapka. V případě, že by byla klapka čistě zasouvací (nahoru-dolů), je zřejmé, že by nemohla být situována přímo na odtokové hraně, jelikož by ji nebylo kam zasunout. Je tedy nezbytné ji posunout proti proudu směrem od odtokové hrany (Obr. 14). Druhou možností je klapku sklápět, což s sebou přináší možnost i variabilního úhlu natočení Gurneyho klapky, to ovšem vyžaduje zásah do konstrukce křídla (Obr. 15).



Obr. 14: Gurneyho klapka ve vzdálenosti "d" od odtokové hrany [7]



Obr. 15: Sklápěcí Gurneyho klapka [8]

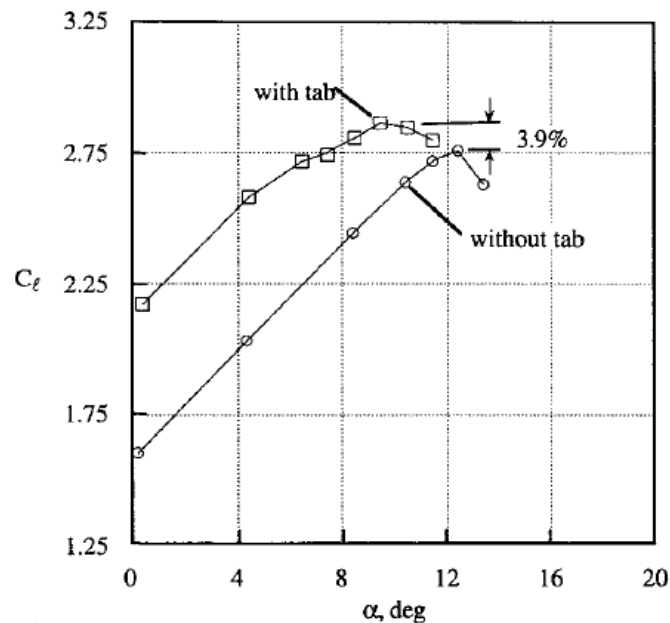
Nejprve se zaměříme na Gurneyho klapku na profilu s Fowlerovou klapkou. Jejím vlivem na proudové pole kolem více-elementového profilu se zabýval James C. Ross [7]. V tomto případě, pokud Gurneyho klapka není umístěna přímo na odtokové hraně, můžeme zaregistrovat jiný název pro toto zařízení, anglicky *tab*. Ve skutečnosti se ale jedná o stejnou konstrukci, která je pouze posunuta o vzdálenost d od odtokové hrany, bude proto v této práci nadále užíván pojem Gurneyho klapka.

Pokud se výška Gurneyho klapky u samostatných profilů pohybovala v jednotkách procent tětivy, v případě, že se nachází mezi hlavním profilem a následující (například) Fowlerovou klapkou, její velikost bude menší, většinou do 1% tětivy. Všechny důležité parametry, které přímo ovlivňují funkci Gurneyho klapky jsou na Obr. 14. Jsou to výška Gurneyho klapky h , její vzdálenost od odtokové hrany d a velikost mezery mezi profilem a klapkou g . Začneme-li výškou h , experimentálně a současně analytickou studií bylo dokázáno, že nárůst vztlaku a posun α_{ZL} (úhel náběhu, při kterém je vztlak nulový) je závislý na parametru $\sqrt{\frac{h}{c}}$, kde c je tětiva [9]. Zjednodušeně lze tedy říci, že čím větší Gurneyho klapka bude, tím větší bude i vztlak. To platí u samostatných profilů. Pokud budeme uvažovat více-elementový profil, tato závislost zůstává, pouze se shora omezíme na maximální výšku okolo 1,5% tětivy.

Se vzdáleností od odtokové hrany d je to podobné. Nejlepší funkci bude mít Gurneyho klapka umístěna přímo na odtokové hraně. Jejím postupným oddalováním bude přírůstek vztlaku klesat. Je to dáno tím, že Gurneyho klapka způsobuje tlakovou diferenci mezi horním a dolním povrchem. Pokud je umístěna na odtokové hraně, pak je její účinek největší a proud z horního povrchu má tendenci se stáčet směrem dolů. Na samostatném profilu je její hlavní funkce změna tlakových poměrů a v důsledku toho zvýšení rychlosti na sacím povrchu a tím i zvýšení vztlaku. Pokud budeme hovořit o více-elementovém profilu, tam je hlavní benefit v podobě ohnutí proudu z horního povrchu směrem dolů. Proud je pak lépe usměrněn a v ideálním případě zabrání odtržení na následující Fowlerově klapce pro úhly náběhu, kde by již bylo proudění bez Gurneyho klapky odtrženo. Tento proces opět způsobí růst vztlaku [7].

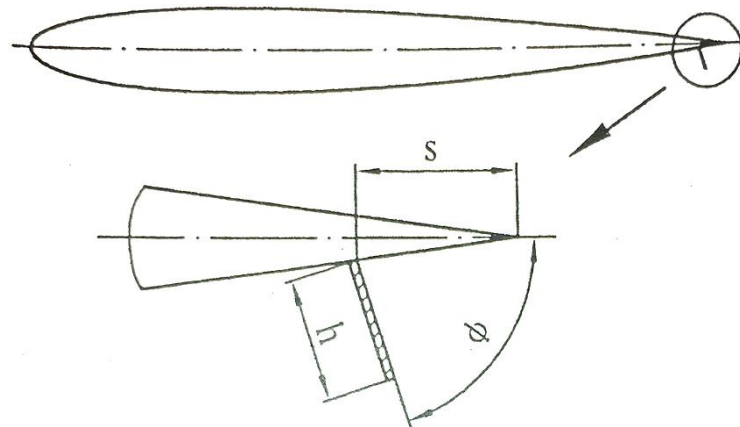
Vliv mezery mezi klapkou a hlavním profilem nelze jednoznačně definovat. V tomto případě bude hrát roli tvar jednotlivých prvků a zejména výřez pro klapku, který dále usměrňuje proud. Obecně lze říci, že mezera musí být dostatečně velká, aby nedocházelo k jejímu ucpání od proudění kolem Gurneyho klapky. Příliš velká mezera naopak může způsobit odtržení na Fowlerově klapce.

Následující graf na Obr. 16 znázorňuje vliv Gurneyho klapky o výšce $1\% c$ ve vzdálenosti $1\% c$ od odtokové hrany na dvouprvkovém profilu. Data byla získána experimentálně měřením profilu NACA 63(2)-215 MOD B s tětivou 2,5 ft (při zatažené klapce) a rozpětím 5 ft [7].



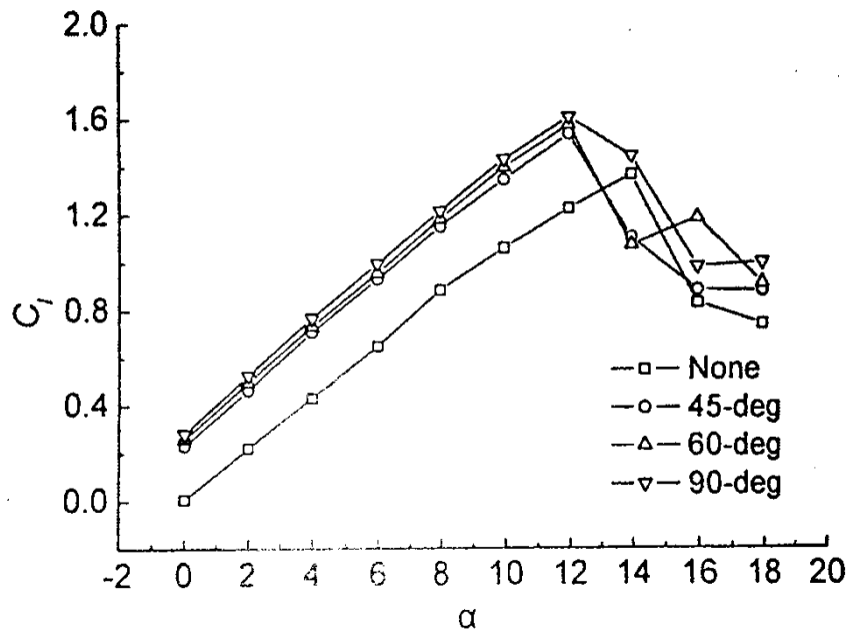
Obr. 16: Vzlaková křivka pro dvouprvkový profil bez a s Gurneyho klapkou [7]

Vliv úhlu natočení Gurneyho klapky byl rovněž zjištěn experimentálně. Měření bylo provedeno na Northwestern Polytechnical University of China na profilu NACA0012 o hloubce 1 m a výsledky z měření zveřejnili autoři Yachen Li, Jinjun Wang a Panfeng Zhang [10]. Rychlost volného proudu v aerodynamickém tunelu byla 30 m/s , což pro hloubku profilu 1 m odpovídá Reynoldsově číslu $2.1 \cdot 10^6$. Geometrie profilu je na Obr. 17.



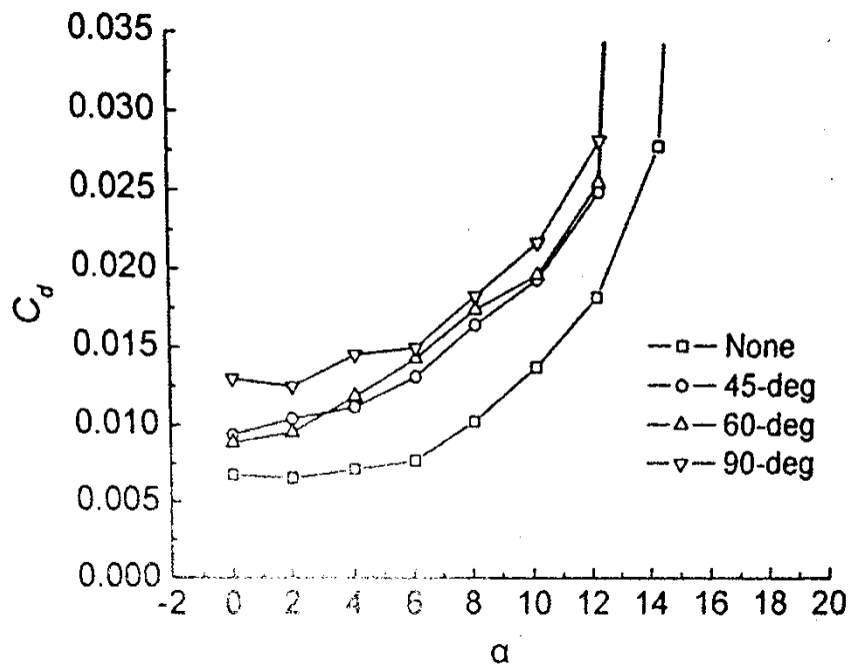
Obr. 17: Konfigurace Gurneyho klapky [10]

Při měření byl variabilní nejen úhel natočení Gurneyho klapky, ale rovněž její vzdálenost od odtokové hrany. Jelikož vliv umístění klapky byl již dříve diskutován, budou následující řádky věnovány pouze působení změny úhlu na vztlakový koeficient. Byly testovány tři úhly natočení klapky – 45°, 60° a 90°. Výška Gurneyho klapky byla 1.5% c . Výsledky z měření pro úhly náběhu od 0° do 18° jsou v grafu na Obr. 18.



Obr. 18: Vliv úhlu natočení Gurneyho klapky na vztlakový součinitel c_L [10]

Z výsledků plyne, že největšího vztlaku dosahuje profil s Gurneyho klapkou umístěnou kolmo k těživě. Přírůstky vztlaku rostou spolu s úhlem natočení až do úhlu 90°. Číselný nárůst je pak 12.3%, 15.1% a 17.4% pro úhly natočení 45°, 60° a 90°. S růstem vztlaku rovněž vzrostl úměrně i odpor, což je patrné z Obr. 19. Nejlepšího poměru L/D bylo dosaženo při konfiguraci s úhlem 45°. Všechny konfigurace vykazovaly zlepšení tohoto poměru.



Obr. 19: Vliv úhlu natočení Gurneyho klapky na součinitel odporu c_D [10]

3.3 Shrnutí

Na předchozích řádcích byl popsán princip funkce Gurneyho klapky a vliv jejího geometrického uspořádání na proudové pole. Gurneyho klapka má obecně pozitivní vliv na vztlakové vlastnosti profilu a v některých případech může dokonce zmenšit i celkový odpor profilu. Jak bylo zmíněno, lze ji segmentovat za účelem narušení pravidelnosti vírové stezky a tím zmenšit odpor generovaný klapkou, či ji různě natáčet a vzdalovat od odtokové hrany zejména z konstrukčních důvodů.

Maximálním výkonem však Gurneyho klapka disponuje v její základní konfiguraci, tj. bez segmentů a pokud je umístěna kolmo k těživě přímo na odtokové hraně.

4. Numerická simulace leteckého profilu

4.1 Princip CFD, možnosti a omezení modelování turbulence

S rostoucími výpočetními možnostmi stoupá využití nástrojů CFD napříč průmyslem. Poněvadž popis jednotlivých metod není předmětem této práce, budou v následující podkapitole uvedeny pouze základní principy numerického modelování zejména s ohledem na modely turbulence, jejich silné stránky a slabiny.

Principem numerického řešení dané úlohy je diskretizace kontinua a aproximace parciálních diferenciálních rovnic algebraickými rovnicemi. Většina komerčních CFD řešičů je založena na metodě konečných objemů. Její podstata tkví v energetické a hmotnostní bilanci v kontrolním objemu. Výchozí rovnice dynamiky tekutin jsou:

- Zákon zachování hmoty
- 2. Newtonův zákon
- Zákon zachování energie

Zákon zachování hmoty představuje rovnice kontinuity (4.1–1), 2. Newtonův zákon představují Navier-Stokesovy rovnice (4.1–2) a Zákon zachování energie je popsán rovnicí energetickou (4.1–3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_k)}{\partial x_k} = 0 \quad (4.1-1)$$

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -grad p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{f} \quad (4.1-2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i E + \sigma_{ij} v_j - \rho \dot{q}_i) = 0 \quad (4.1-3)$$

Jelikož Navier-Stokesovy rovnice jsou tři (směr x, y, z), je celkový počet výše uvedených rovnic pět. Neznámých proměnných je ale šest: $v_x, v_y, v_z, p, T, \rho$. Proto je tato soustava doplněna obecně o rovnici $f(p, \rho, T)=0$, kterou může představovat například stavová rovnice (4.1–4).

$$pv = rT \quad (4.1-4)$$

Modelování turbulence je zřejmě největší výzvou počítačové mechaniky tekutin. Ačkoliv je zaznamenán prudký rozvoj výpočetní techniky v posledních letech, současné kapacity a jejich cena zatím nedovolují použití přímých numerických simulací (DNS) v komerčních úlohách. Proto je stále téměř jedinou možností aplikace modelů turbulence. Ty se řadí mezi statistické modely a jsou založené na středování turbulentních veličin. Tyto modely řeší pouze charakteristiky turbulentního proudění a jejich úkolem je spočítat tzv. Reynoldsovo napětí. Uplatnění jednotlivých modelů závisí na typu úlohy a také se od nich odvíjí požadavky na výpočtovou síť. Volba modelu tak téměř nikdy není jednoznačná a často závisí na zkušenosti a požadavcích uživatele.

Nejnámějšími modely jsou *k-epsilon* a *k-omega*. Oba modely se řadí mezi dvourovnicové, kde jednou z rovnic je transportní rovnice pro turbulentní kinetickou energii k a druhou je transportní rovnice pro rychlost disipace turbulentní energie ε , resp. specifickou rychlost disipace ω . Specifická rychlost disipace je definována vztahem (4.1-5).

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (4.1-5)$$

Transportní rovnice pro k má následující tvar:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i k)}{\partial x_i} = P_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \rho \varepsilon \quad (4.1-6)$$

Členy na levé straně vyjadřují akumulaci a konvekci, na pravé straně pak v pořadí produkci, difuzi a disipaci. Rovnice pro ε je uvedena ve tvaru (4.1-7)

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon}{T} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \quad (4.1-7)$$

kde T je časové měřítko dané rovnicí (4.1-8), μ_t je turbulentní viskozita (4.1-9) a C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε jsou empirické konstanty.

$$T = \frac{k}{\varepsilon} \quad (4.1-8)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.1-9)$$

Zatímco rovnice (4.1-6) je relativně exaktní a byla odvozena, rovnice pro ε vychází analogicky z rovnice pro k a systematicky odvozena nebyla. Nemá tedy fyzikální základ. Empirické konstanty lze určit pomocí experimentálního měření jednoduchých případů proudění [11].

Tato základní verze modelu $k-\varepsilon$ nevykazuje dobré výsledky v místech, kde hraje významnější roli vazkost tekutiny. V blízkosti stěn tedy nebude použití tohoto modelu příliš korektní. Zároveň je třeba brát na zřetel, že zmíněné empirické konstanty jsou kalibrovány vzhledem k modelovým případům a nelze jejich hodnoty aplikovat obecně pro všechny úlohy.

Mnohem lepších výsledků v blízkosti stěny dosahuje model $k-\omega$, jehož transportní rovnice jsou:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - k\omega \quad (4.1-10)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = C_{\omega 1} P_k - C_{\omega 2} k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4.1-11)$$

Tento model dobře řeší rychlostní pole, ale nepřesně parametry turbulence k a ω . Nabízí se spojení modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$. V roce 1994 tyto dva modely propojil Florian Menter pomocí spojovací funkce. Zjednodušeně lze říct, že tato funkce modifikuje dané rovnice tak, aby při její hodnotě blížíci se k jedničce se z rovnic stal model $k-\omega$ a při hodnotě blížíci se k nule model $k-\varepsilon$. Tento model je znám pod jménem *SST* $k-\omega$ a jeho největší výhodou je kvalitní řešení proudění s nepříznivým tlakovým gradientem a v blízkosti odtržení.

Dalším modelem, který je vhodné zmínit, je v letectví často používaný jednorovnicový model Spalart-Allmaras, jehož aplikace je však vhodná spíše na „hezky“ obtékané profily bez větších poruch proudového pole.

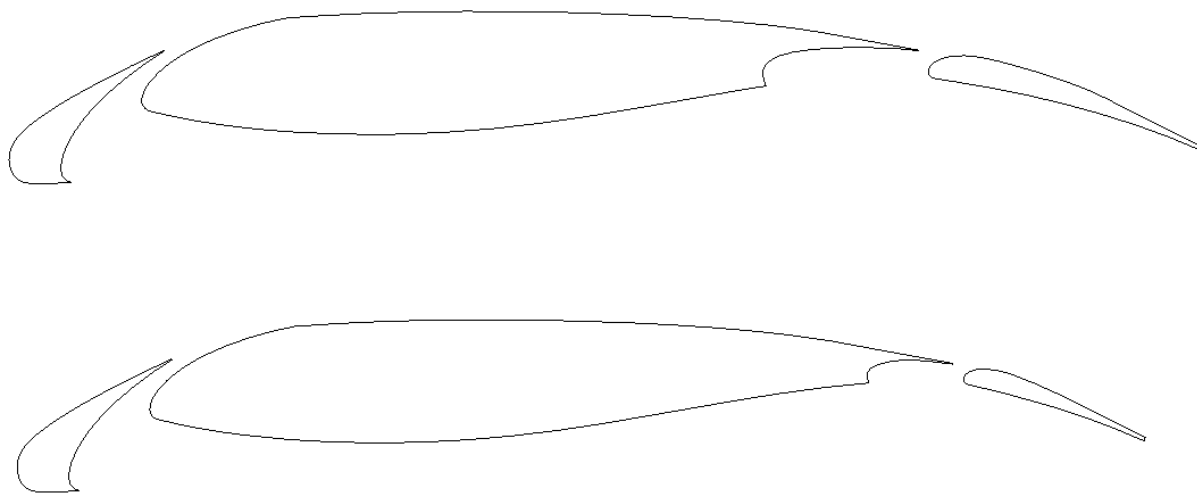
Modifikací výše uvedených, ale i zcela odlišných modelů, které nebyly zmíněny, je celá řada, jejichž aplikace variuje s typem konkrétní úlohy. Cílem této podkapitoly bylo nastínit problematiku této široké oblasti a ukázat úskalí jednotlivých modelů a jejich volby. Mnohem podrobnější informace o modelování turbulence lze zjistit například v publikacích [11] a [12].

Pro numerickou simulaci v této práci byl zvolen turbulentní model *SST* $k-\omega$ vzhledem k předpokládané přítomnosti nepříznivých gradientů a odtržení na profilu u vyšších úhlů náběhu. V souvislosti s touto volbou bylo použito adekvátní rozlišení sítě, které bude ukázáno v podkapitole 4.3.

4.2 Geometrie a varianty výpočtu

Cílem numerické simulace je zjištění vlivu Gurneyho klapky na profil s Fowlerovou klapkou a porovnání s profilem bez Gurneyho klapky. V následující diskuzi lze pak zhodnotit přínos, zda Gurneyho klapka nezajistí dostatečný vztlak natolik, že lze zmenšit Fowlerovu klapku.

Pro porovnání výpočtu je k dispozici několik experimentálních měření profilů se slotem a Fowlerovou klapkou. Tato měření se uskutečnila v roce 2003 ve VZLÚ, a.s. v pražských Letňanech v uzavřeném aerodynamickém tunelu o průměru měřicího prostoru 3 m (3mLSWT) při Reynoldsově číslu $1.56 \cdot 10^6$. Profil se slotem Fowlerovou klapkou má hloubku v zatažené konfiguraci 0.6 m. Ve vysunuté poloze je hloubka 0.7 m pro Short flap a 0.75 m s delší klapkou (Baseline). Obě geometrie jsou na Obr. 20. V prvním kroku byla provedena simulace pro obě varianty při vzletové konfiguraci (úhel natočení klapky 16.7° pro Baseline a 25° pro Short flap) a porovnání s experimentálními daty.

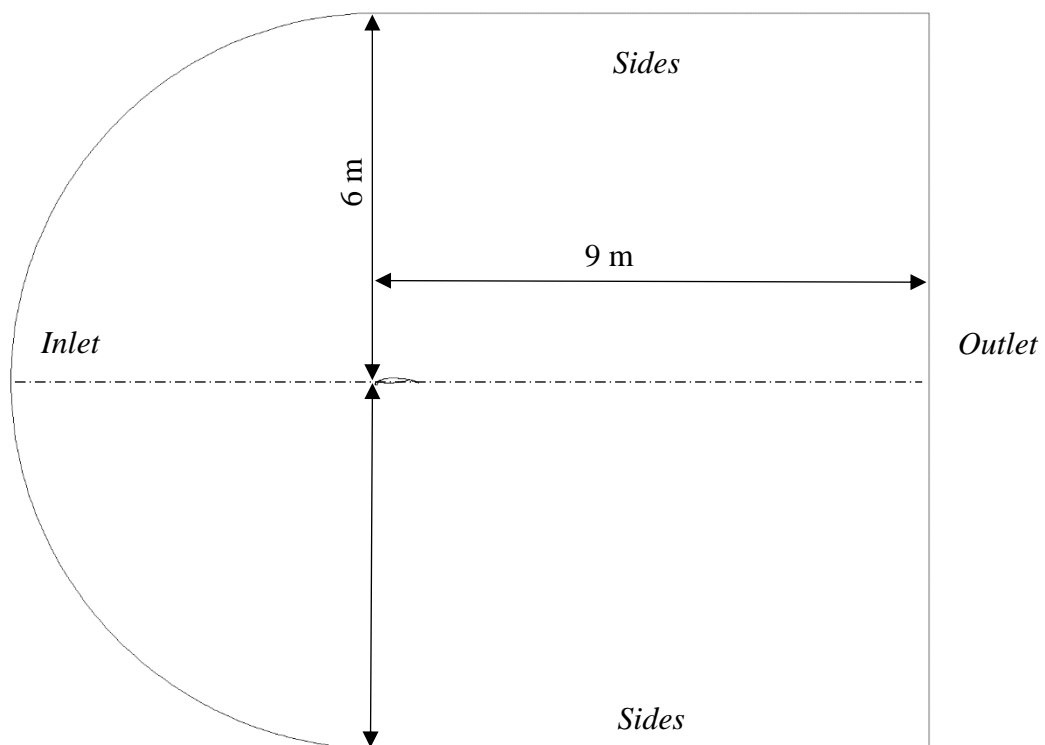


Obr. 20: Geometrie profilů Baseline (nahore) a Short flap

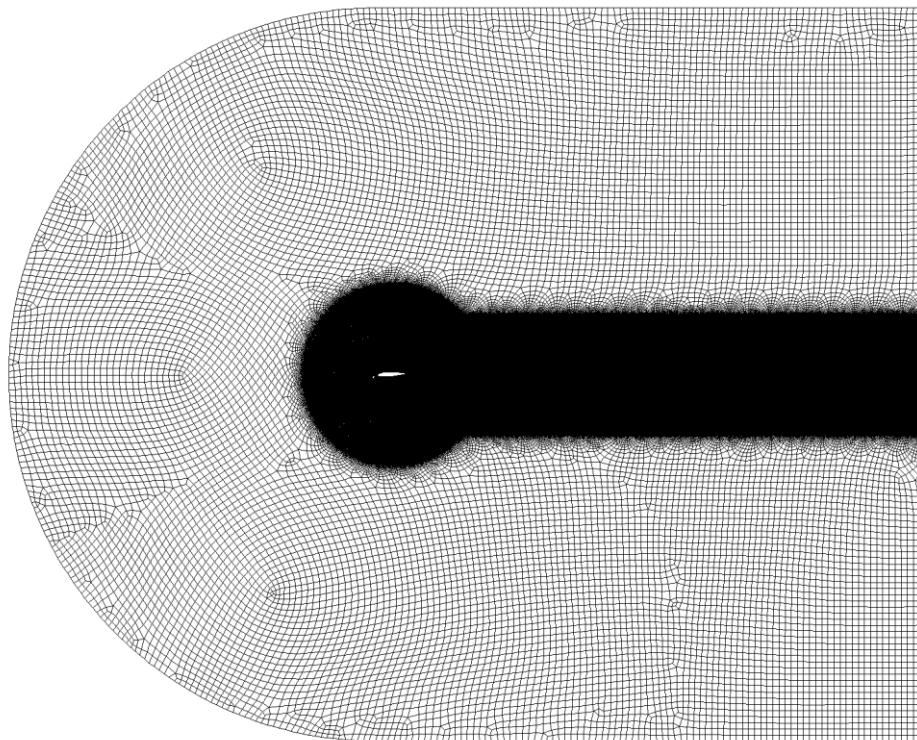
4.3 Simulace profilu bez Gurneyho klapky a porovnání s experimentálními daty

Pro numerický výpočet byl použit software ANSYS Fluent 18.0. Tento software, stejně jako většina komerčních softwarů v současné době, je založený na metodě konečných objemů. Výpočet byl proveden stacionárně metodou Reynoldsova středování (RANS) pro 2D geometrii. Vzhledem k měření v aerodynamickém tunelu s koncovými deskami je předpoklad pouze dvojrozměrného proudového pole korektní.

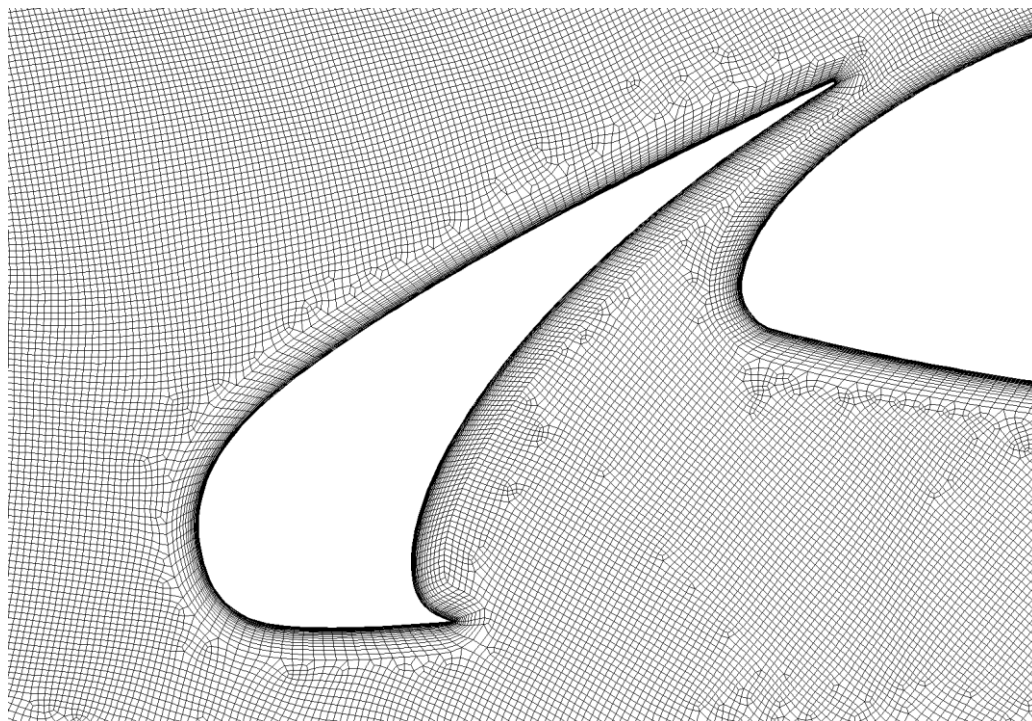
Pro obě geometrie byla vytvořena výpočtová doména (Obr. 21), která byla následně diskretizována výpočetní sítí. Typ výpočetní sítě je hexahedrální (ve 2D čtyřúhelníková). V okolí profilu a v úplavu byla síť zjemněna, aby byly zachyceny parametry proudění blízko stěny. Pro podrobné modelování mezní vrstvy bylo vytvořeno 30 prismatických vrstev na povrchu profilu tak, aby hodnota y^+ (bezrozměrná vzdálenost) všude na stěně dosahovala hodnoty maximálně 1 v souladu se zvoleným modelem turbulence $SST\ k-\omega$. Celkový pohled na diskretizovanou doménu je obrázku Obr. 22, detail sítě je pak na obrázku Obr. 23.



Obr. 21: Výpočtová doména s kótami a okrajovými podmínkami



Obr. 22: Diskretizovaná doména výpočtovou sítí



Obr. 23: Detail sítě v okolí slotu

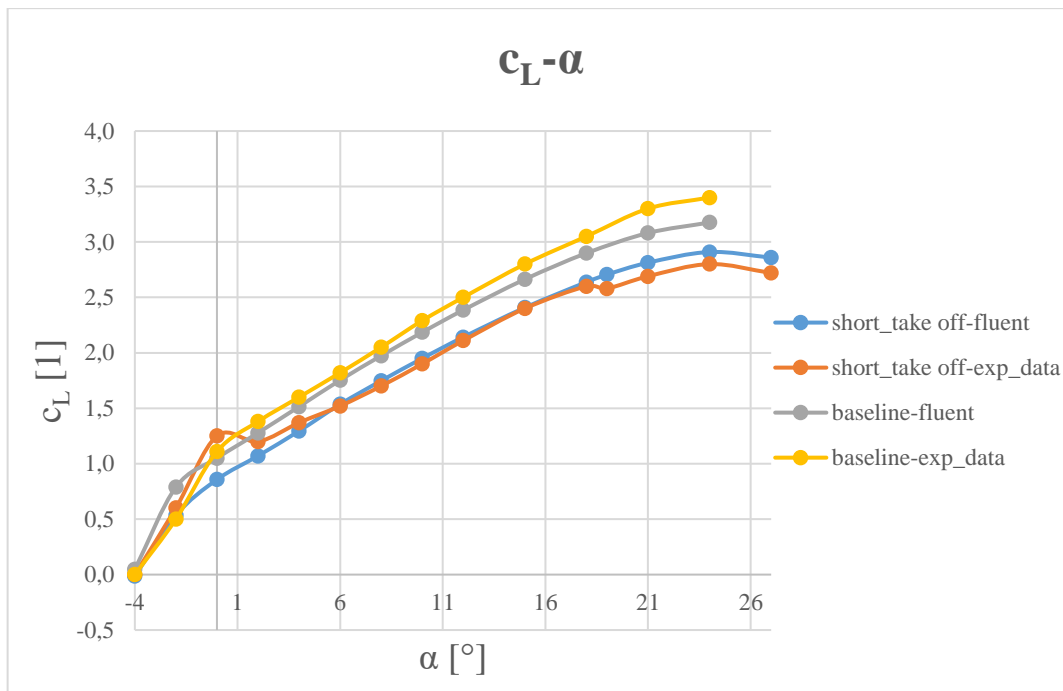
Vzhledem k Reynoldsově číslu $1.65 \cdot 10^6$ byla při teplotě 20°C stanovena rychlost nerušeného proudu na 36.54 m/s pro Short flap a 34.48 pro Baseline. Kompletní okrajové podmínky jsou uvedeny v Tabulka 1. U okrajových podmínek *Inlet* a *Sides* byl dále specifikován směr proudu vzduchu. Ten byl zadáván pomocí hodnot sinu a cosinu odpovídajících příslušnému úhlu náběhu α .

Konfigurace	Hranice	Typ okrajové podmínky	Hodnota
Baseline	Inlet	Velocity inlet	36.54 m/s
	Sides	Pressure far-field	M=0.107 p=0 Pa*
	Outlet	Pressure Outlet	0 Pa*
Short flap	Inlet	Velocity inlet	34.48
	Sides	Pressure far-field	M=0.101 p=0 Pa*
	Outlet	Pressure Outlet	0 Pa*

Tabulka 1: Okrajové podmínky pro numerickou simulaci

Na následujícím grafu (Obr. 24) jsou vyobrazeny vztahové křivky pro obě varianty (Baseline i Short flap). Ve stejném grafu jsou i experimentální data pro porovnání. Je patrné, že u Short flap je shoda velmi dobrá a pomíneme-li přechodové jevy okolo nulového úhlu náběhu, pohybuje se největší odchylka od naměřených hodnot do 5 %. U Baseline je rozdíl mírně větší, stále však lze výsledky považovat za dostačující. V tomto případě je maximální odchylka 7 %. Největších rozdílů si můžeme všimnout až u vyšších úhlů náběhu, kdy může na některých místech docházet k odtržení proudění.

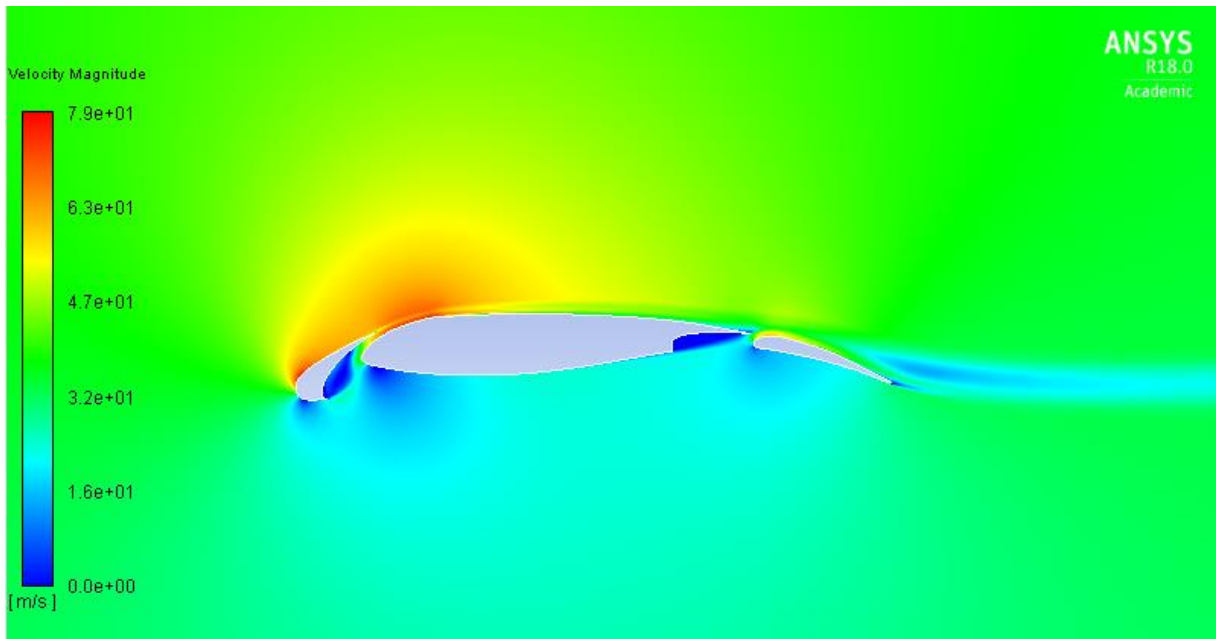
*Zadáván tzv. Gauge pressure, odchylka od referenčního tlaku. Gauge pressure 0 Pa odpovídá 101 325 Pa absolutnímu tlaku, tedy jedné atmosféře.



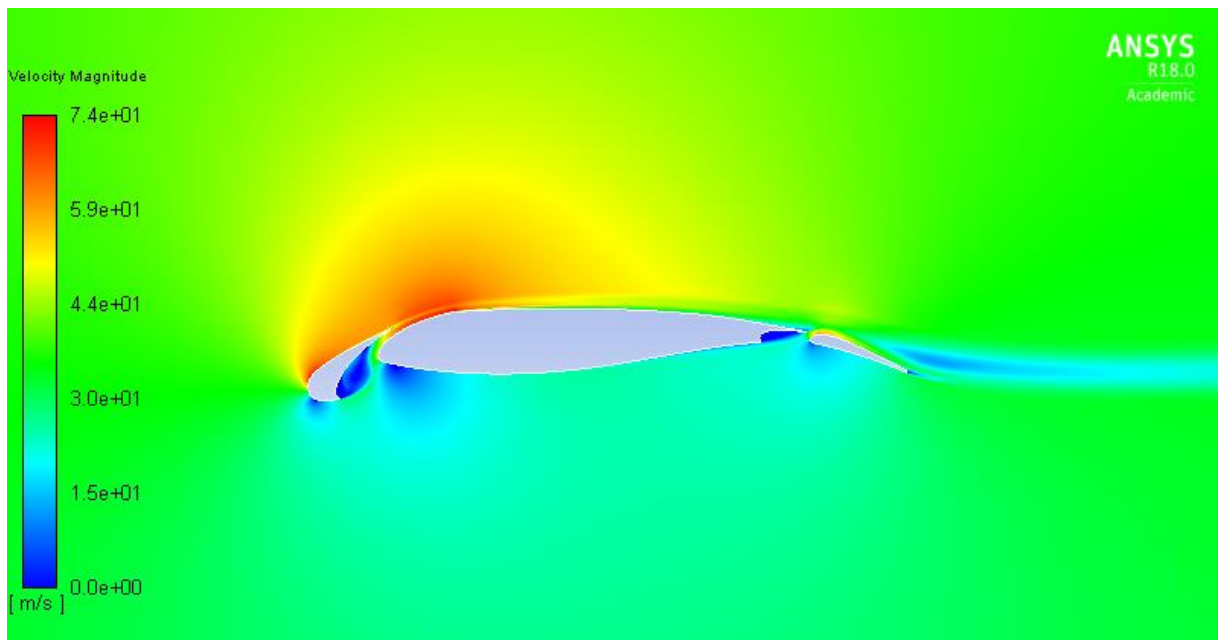
Obr. 24: Porovnání vztakových křivek z numerické simulace a z měření

Pro obě spočítané varianty jsou na následujících stranách uvedeny kontury rychlostního pole a statického tlaku. Všimněme si též patrného oddělení úplavu slotu a mezní vrstvy hlavního profilu, případně úplavu profilu a mezní vrstvy Fowlerovy klapky. To koresponduje s teoretickými předpoklady z kapitoly 2.1 a potvrzuje dobré rozlišení výpočetní sítě. Obrázky proudového pole jsou uvedeny vždy pro dva úhly náběhu, jeden z prostřední části vztakové křivky ($\alpha=10$) a druhý z jejího konce ($\alpha=24$). Jak je patrné z tvaru vztakové křivky, k odtržení proudění by mělo docházet po překročení úhlu náběhu $\alpha=24^\circ$, kde můžeme pozorovat výraznější pokles c_L . Bohužel pro tyto úhly nejsou dostupná experimentální data. Proto je nutné konstatovat, že pro celý počítaný interval kladných úhlů náběhu je proudění přilehlé.

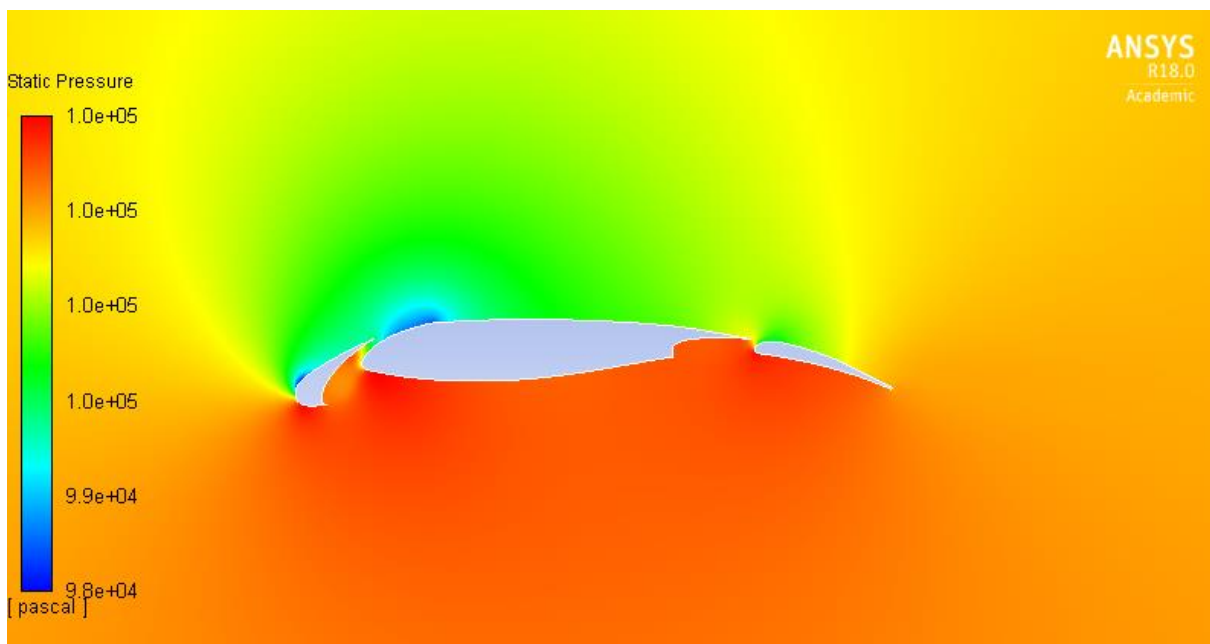
Z porovnání vypočtených a naměřených dat plyne, že výpočetní model a nastavení solveru pro naše účely dostatečně odpovídá reálným hodnotám. Toto porovnání tak bude sloužit jako opěrný bod pro věrohodnost numerického modelu vzhledem k dalším výpočtům, jelikož naměřená data nejsou k dispozici pro všechny počítané varianty a rovněž nebylo provedeno měření pro konfigurace profilu s aplikací Gurneyho klapky.



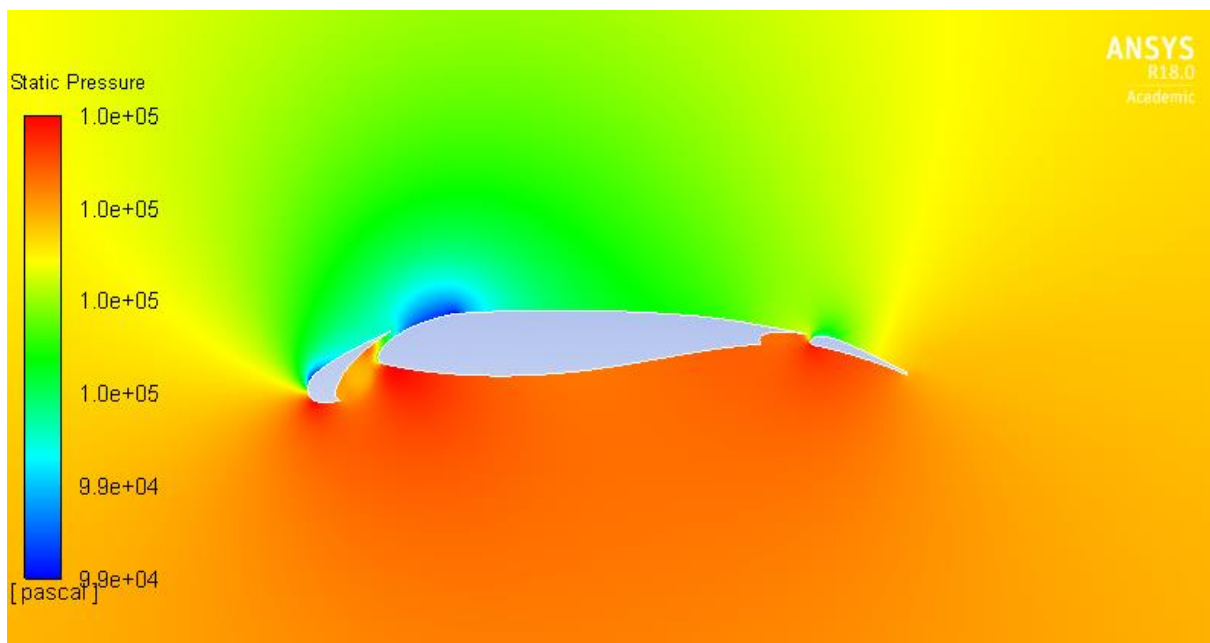
Obr. 25: Kontury rychlosti pro variantu Baseline při úhlu náběhu $\alpha=10$



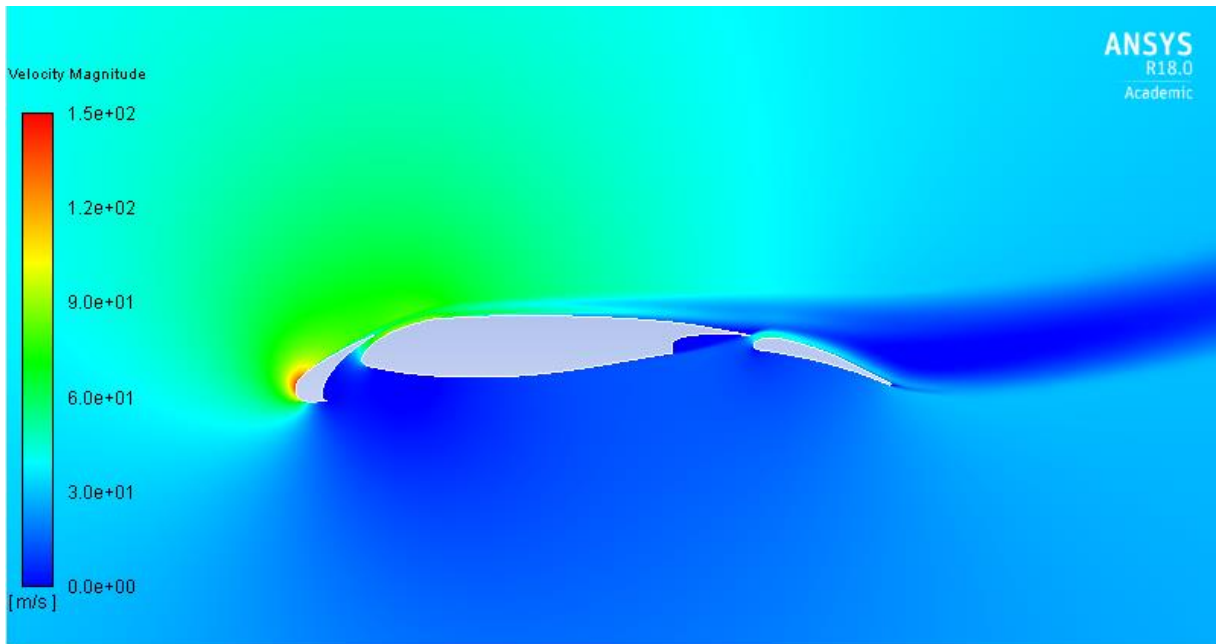
Obr. 26: Kontury rychlosti pro variantu Short flap při úhlu náběhu $\alpha=10$



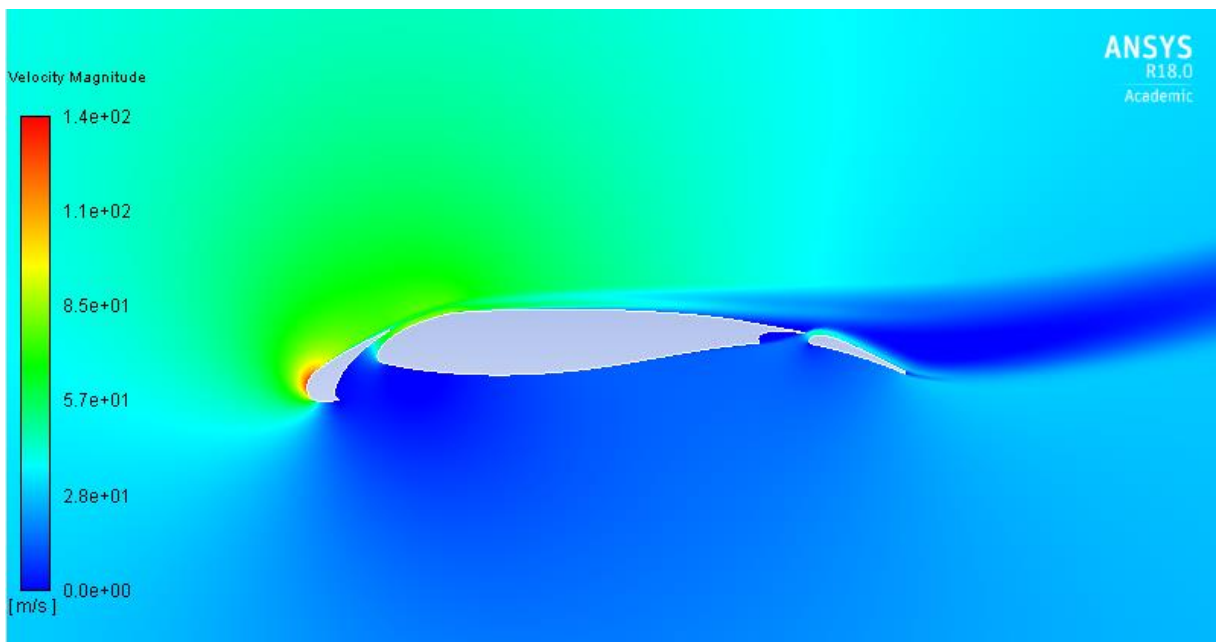
Obr. 27: Kontury statického tlaku pro variantu Baseline při úhlu náběhu $\alpha=10$



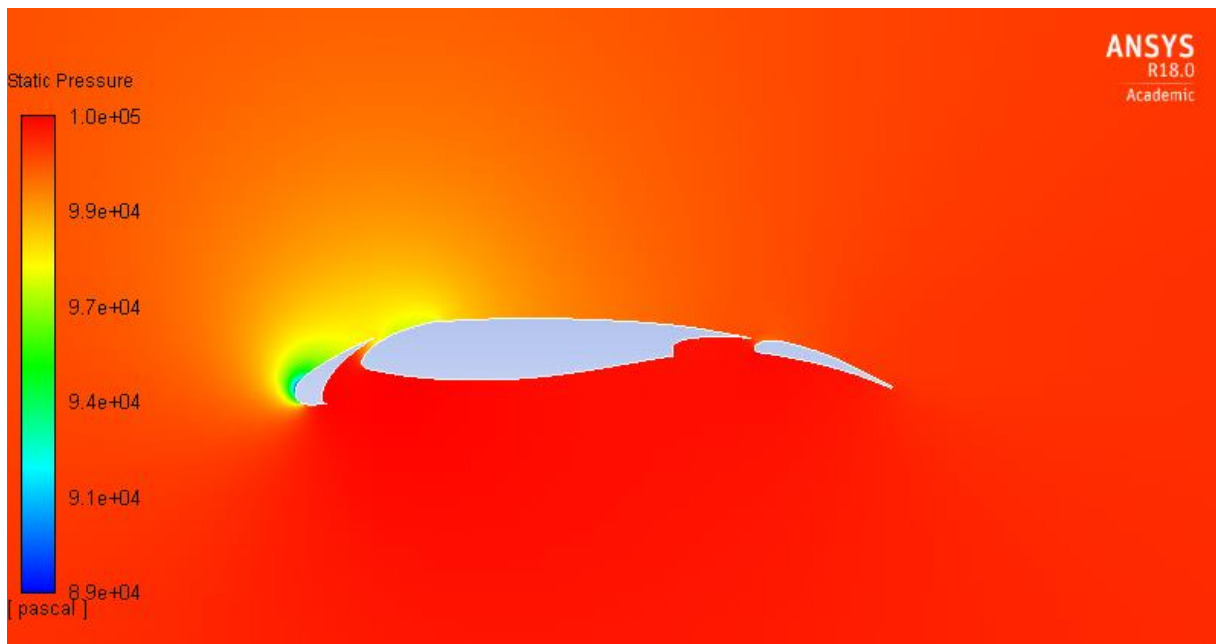
Obr. 28: Kontury statického tlaku pro variantu Short flap při úhlu náběhu $\alpha=10$



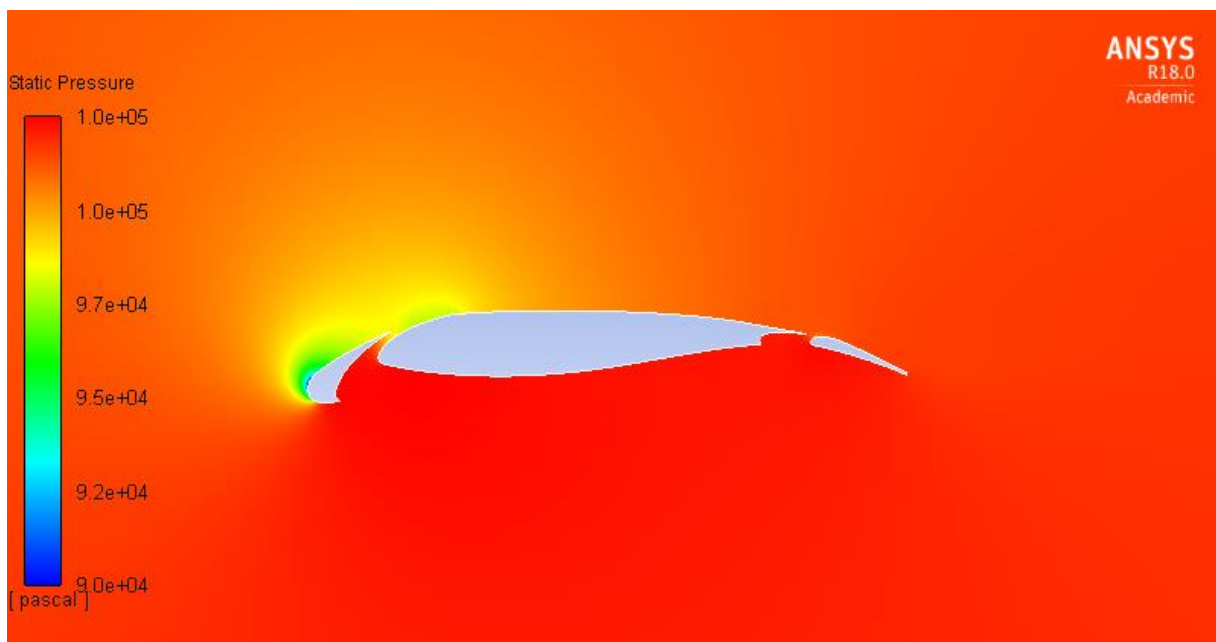
Obr. 29: Kontury rychlosti pro variantu Baseline při úhlu náběhu $\alpha=24$



Obr. 30: Kontury rychlosti pro variantu Short flap při úhlu náběhu $\alpha=24$



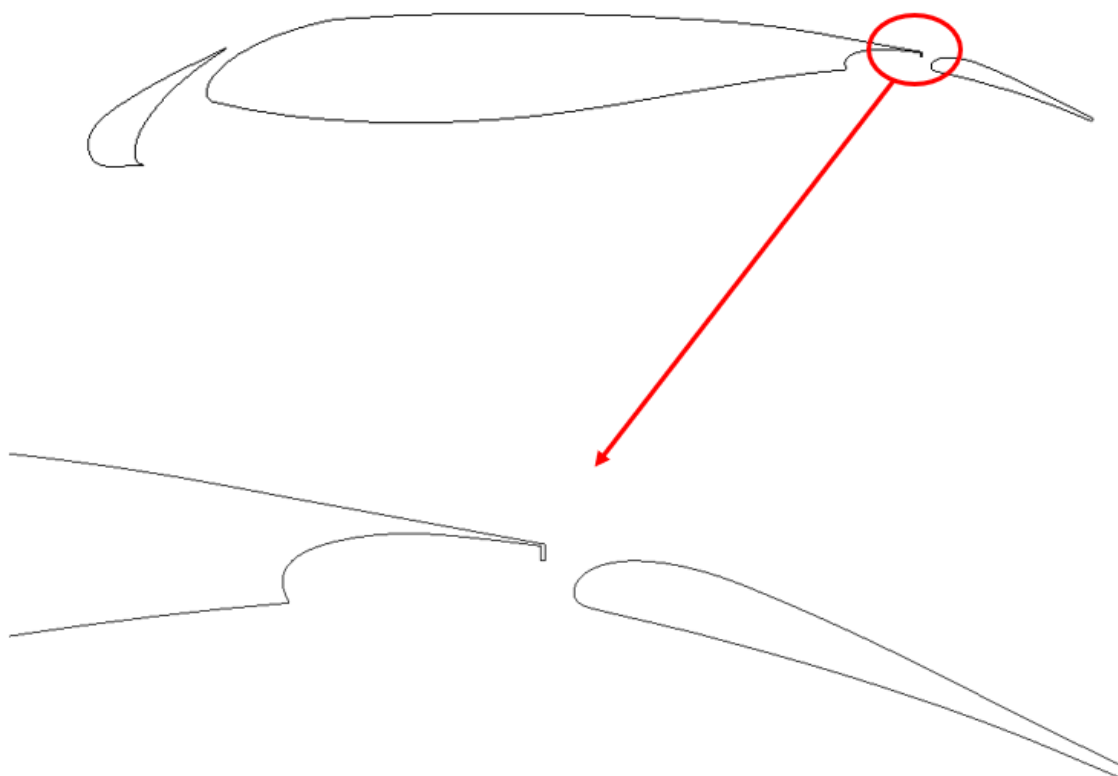
Obr. 31: Kontury statického tlaku pro variantu Baseline při úhlu náběhu $\alpha=24$



Obr. 32: Kontury statického tlaku pro variantu Short flap při úhlu náběhu $\alpha=24$

4.4 Simulace profilu s Gurneyho klapkou

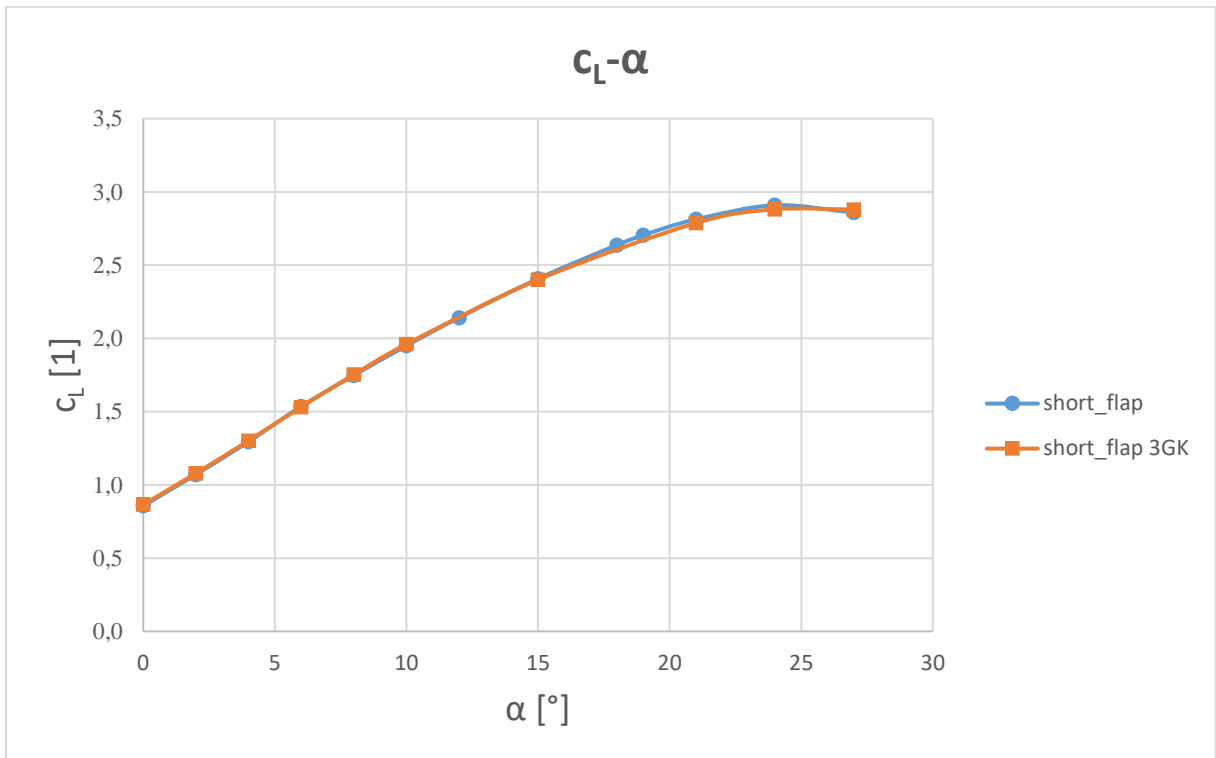
Po ověření správnosti numerického modelu na hodnotách z experimentu, byla na hlavní profil s kratší Fowlerovou klapkou (Short flap) aplikována Gurneyho klapka. Její výška je 3 mm a šířka 1 mm . Detail upravené geometrie je na Obr. 33.



Obr. 33: Detail profilu s Gurneyho klapkou

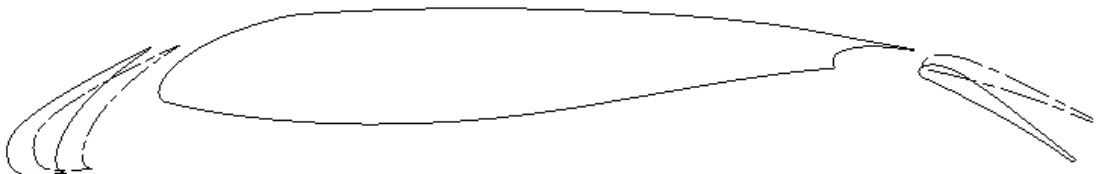
Polohy slotu a Fowlerovy klapky zůstaly nezměněné, tedy v konfiguraci pro vzlet. Z grafu na Obr. 34 je zřetelné, že Gurneyho klapka se výrazně neprojevila a nedošlo tak ke zlepšení vztlakové křivky. Ačkoliv by se tento výsledek mohl zdát na první pohled překvapivý, ve skutečnosti se dal očekávat vzhledem k charakteru proudového pole pro profil bez Gurneyho klapky, které jsou na obrázcích na stranách 34 až 37. Funkce Gurneyho klapky tkví ve zvyšování cirkulace kolem hlavního profilu. Za hlavním profilem následuje Fowlerova klapka, která již tuto funkci plní. Gurneyho klapka tedy může cirkulaci zvýšit jen v případě, že na

klapce dojde alespoň k částečnému odtržení proudu. Jelikož ale téměř pro všechny úhly náběhu je již bez Gurneyho klapky proudění na všech elementech přilehlé, nemá se Gurneyho klapka možnost dostatečně projevit.



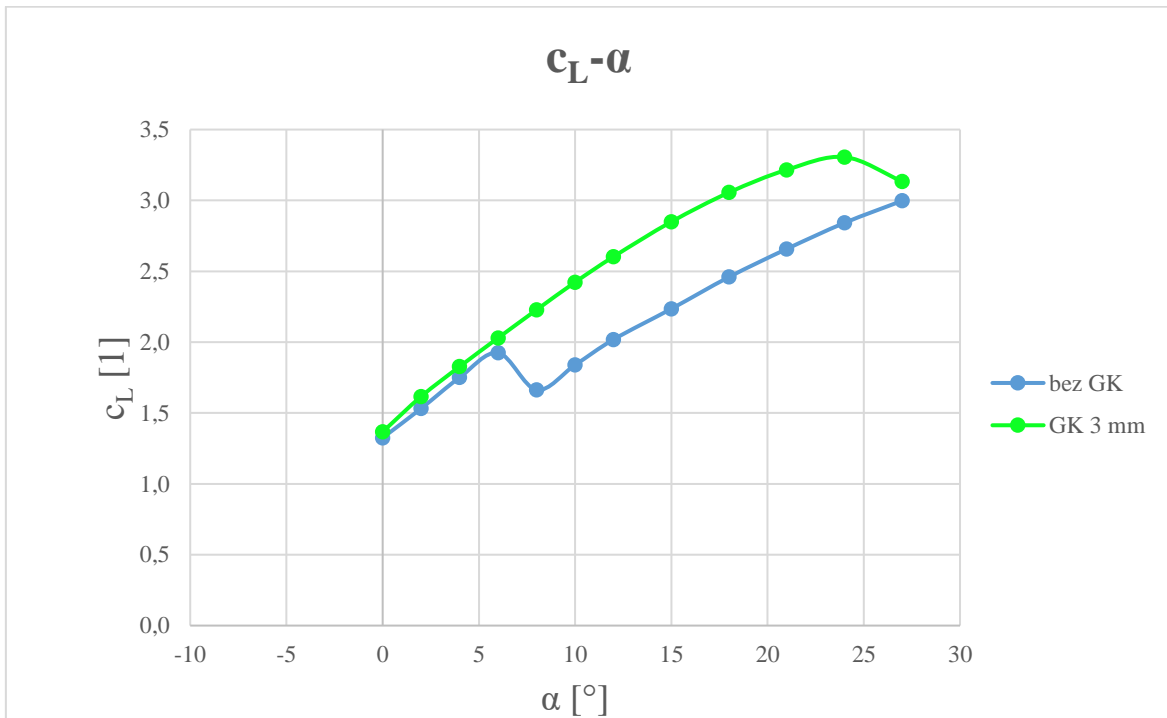
Obr. 34: Graf závislosti vztakového součinitele na úhlu náběhu pro variantu s a bez Gurneyho klapky pro vzletový režim

V dalším kroku proto byla změněna poloha slotu a Fowlerovy klapky tak, že nynější konfigurace představuje jiný letový režim (přistávací). Slot i klapka byly vychýleny dle Obr. 35.



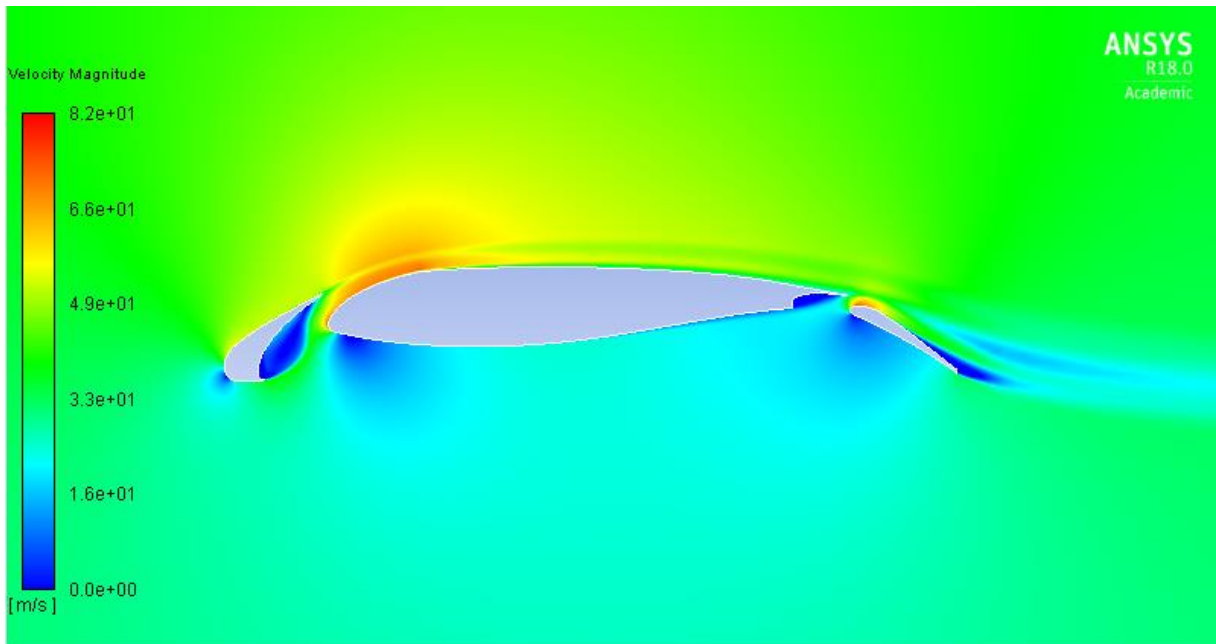
Obr. 35: Nová poloha slotu a Fowlerovy klapky (plnou čarou)

Pro tuto novou polohu byl nejdříve napočítán stav bez Gurneyho klapky a poté s klapkou. Geometrické parametry Gurneyho klapky zůstaly totožné z předchozího výpočtu. Vztlakové křivky můžeme vidět v grafu na Obr. 36.

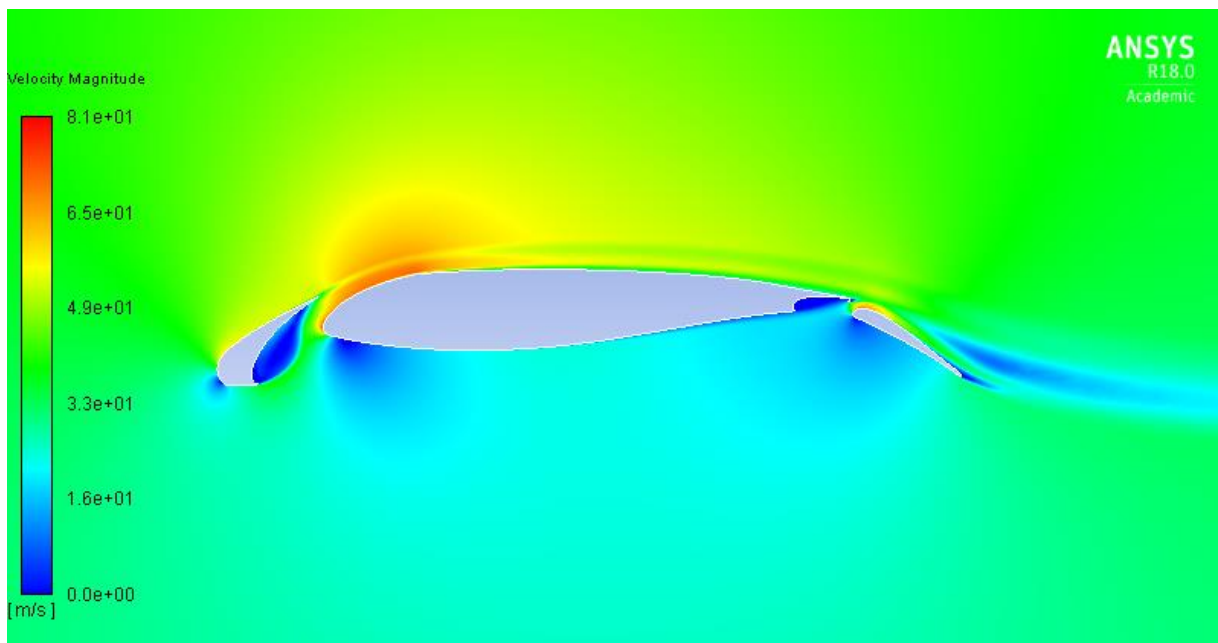


Obr. 36: Graf závislosti vztlakového součinitele na úhlu náběhu pro variantu s a bez Gurneyho klapky pro přistávací režim

V tomto případě již došlo ke zlepšení, a to zejména pro vyšší úhly náběhu. To nám značí, že při nich zřejmě došlo u původní geometrie k odtržení proudu, zatímco po aplikaci Gurneyho klapky ne, respektive ne tak výrazně. To lze pozorovat na obrázcích kontur rychlosti na následujících stranách.

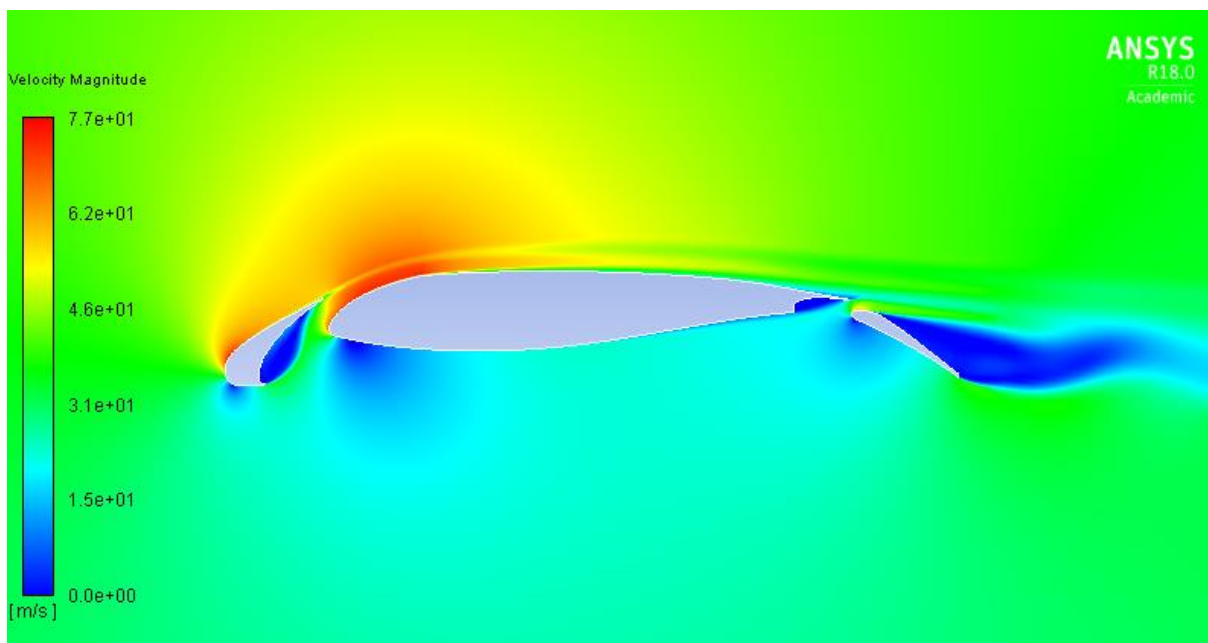


Obr. 37: Kontury rychlosti pro profil bez Gurneyho klapky ($\alpha=6^\circ$)

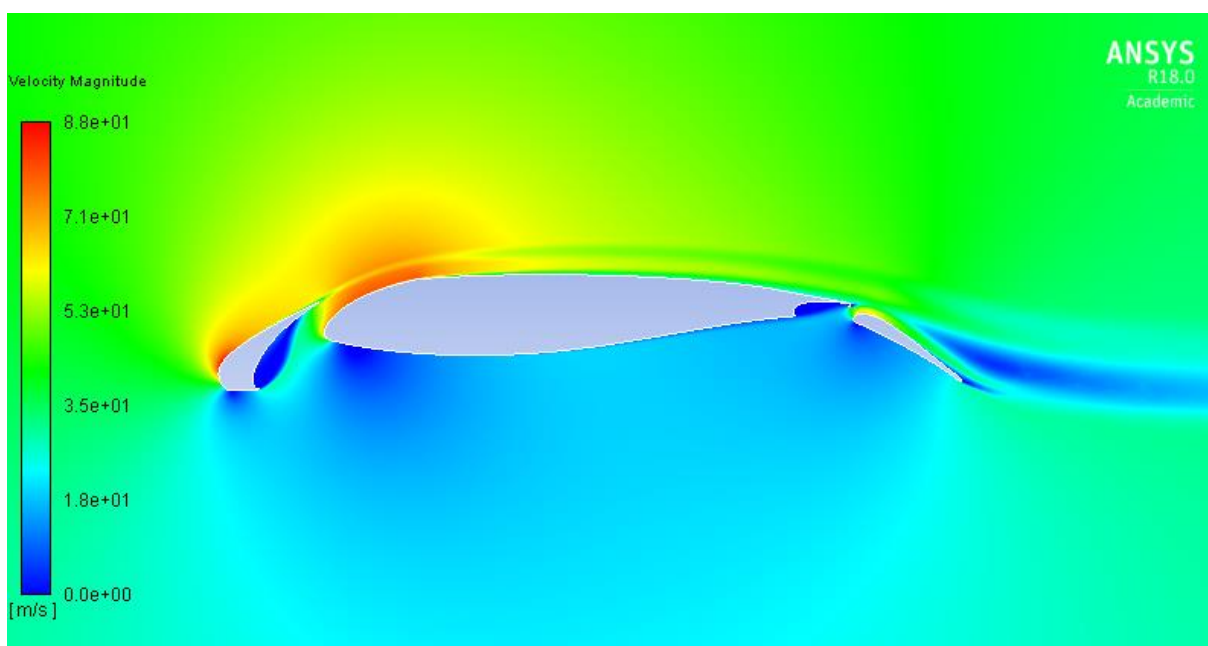


Obr. 38: Kontury rychlosti pro profil s Gurneyho klapkou ($\alpha=6^\circ$)

Dle vztahové křivky je zřetelné, že mezi úhly náběhu 6° a 10° dochází na Fowlerově klapce u profilu bez Gurneyho klapky k odtržení proudu. Na vyobrazených konturách výše je to potvrzeno, kde je patrné z Obr. 37, že se již proudění začíná pomalu odtrhávat, zatímco na profilu s Gurneyho klapkou ne.



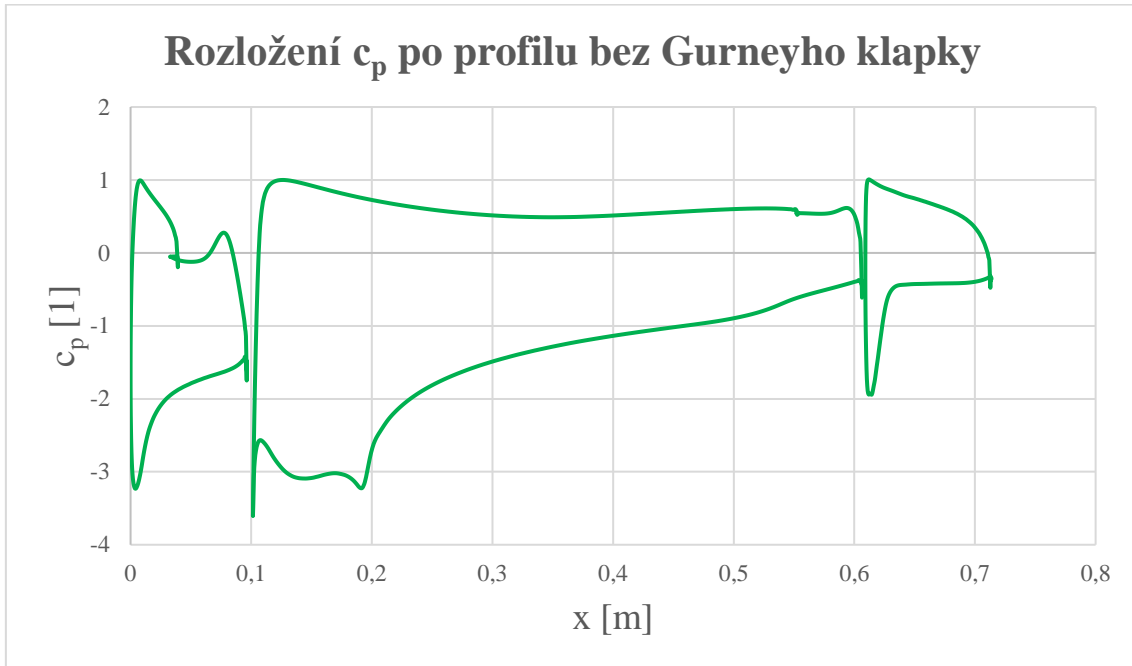
Obr. 39: Kontury rychlosti pro profil bez Gurneyho klapky ($\alpha=12^\circ$)



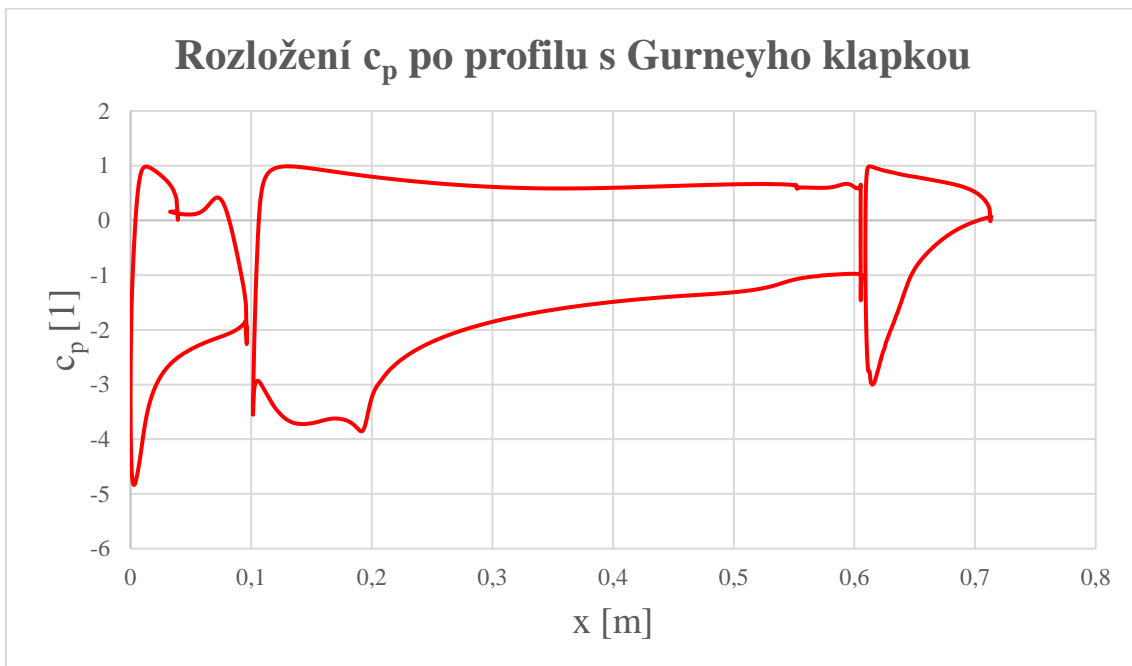
Obr. 40: Kontury rychlosti pro profil s Gurneyho klapkou ($\alpha=12^\circ$)

Z Obr. 39 a je již viditelné, že proudění na Fowlerově klapce je již zcela odtrženo a v úplavu se tvoří vírová stezka. Profil opatřený Gurneyho klapkou vykazuje stále přilehlé proudění na všech třech elementech (Obr. 40).

Gurneyho klapka tedy zajistí přilehlé proudění na Fowlerově klapce pro všechny počítané úhly náběhu, zatímco u profilu bez ní je na Fowlerově klapce proudění odtrženo již od úhlu $\alpha=8^\circ$. Vliv Gurneyho klapky je v tomto případě dobře patrný z rozložení tlakového koeficientu c_p po všech elementech složeného profilu. Porovnání mezi variantami pro úhel náběhu $\alpha=12^\circ$ je na obrázcích Obr. 41 a Obr. 42.

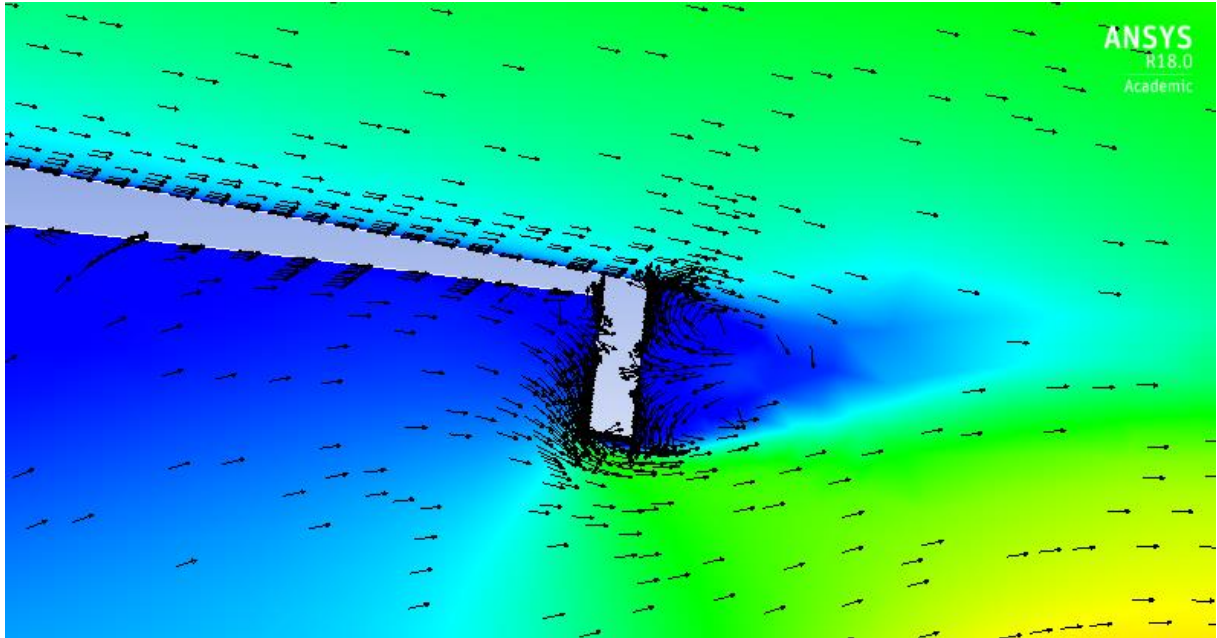


Obr. 41: Rozložení tlakového koeficientu po profilu bez Gurneyho klapky



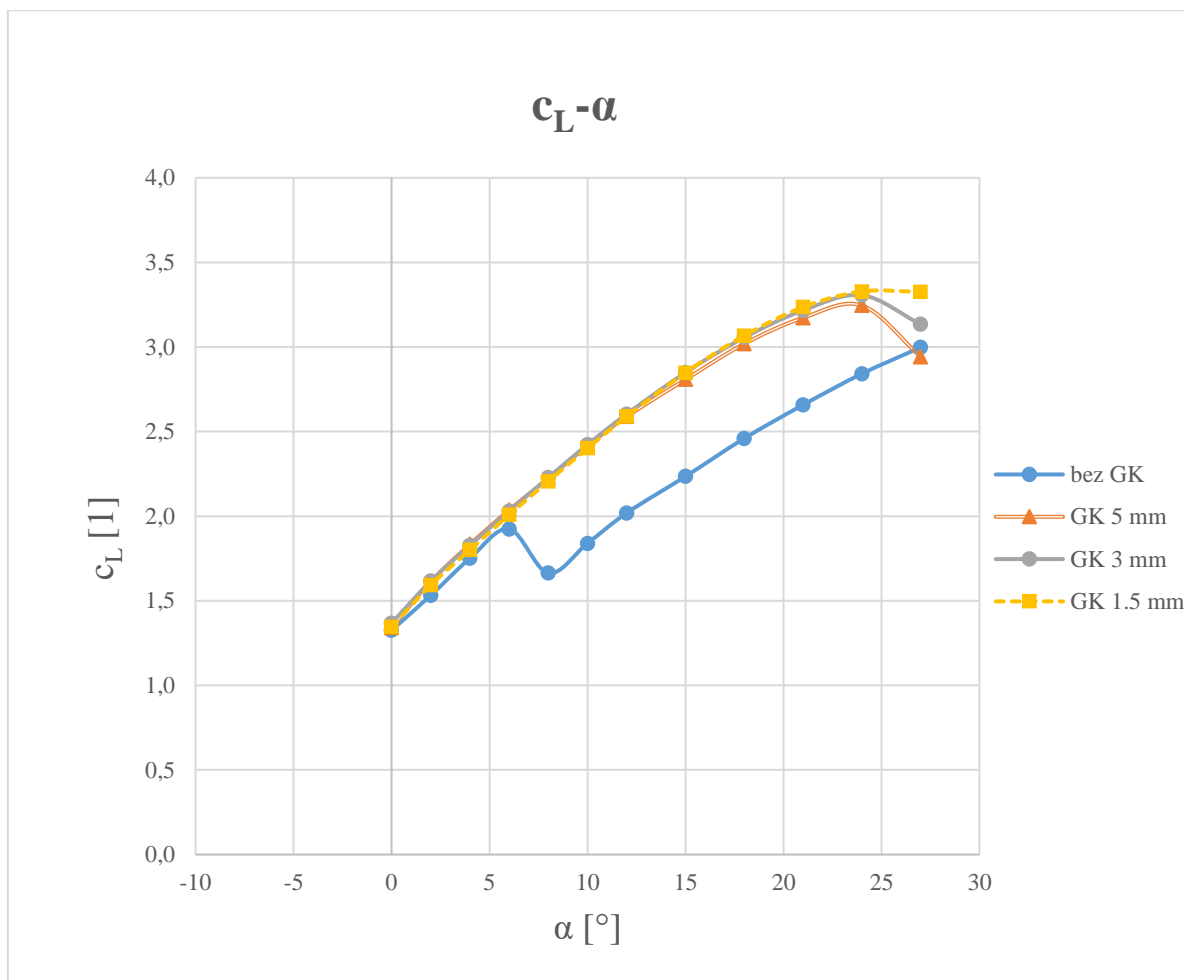
Obr. 42: Rozložení tlakového koeficientu po profilu s Gurneyho klapkou

Níže je přiložen obrázek vektorů, které zobrazují dva vytvořené protichůdné víry za Gurneyho klapkou. To opět dobře koresponduje s teoretickými předpoklady z kapitoly 2.3.



Obr. 43: Vektory znázorňující vytvořené víry za Gurneyho klapkou

Závěrem je uveden graf a tabulka hodnot c_L a c_D pro porovnání vlivu různých výšek Gurneyho klapky. Výpočet byl proveden pro tři konfigurace: $h=1.5\text{ mm}$, $h=3\text{ mm}$ a $h=5\text{ mm}$. Všechny tři konfigurace Gurneyho klapky vykazují podobné hodnoty vztlakového součinitele. Větší rozdíly lze pozorovat až při vyšších úhlech náběhu a kolem kritického úhlu α_{krit} . Při jeho dosažení vykazuje konfigurace s Gurneyho klapkou o výšce 5 mm nejvyšší pokles vztlaku. Nejpozdvolnější trend v tomto ohledu má nejmenší klapka (1.5 mm), a tak i přesto, že pro některé úhly náběhu nemá největší vztlak, je i vzhledem k nejmenšímu odporu zřejmě nejlepší možnou variantou.

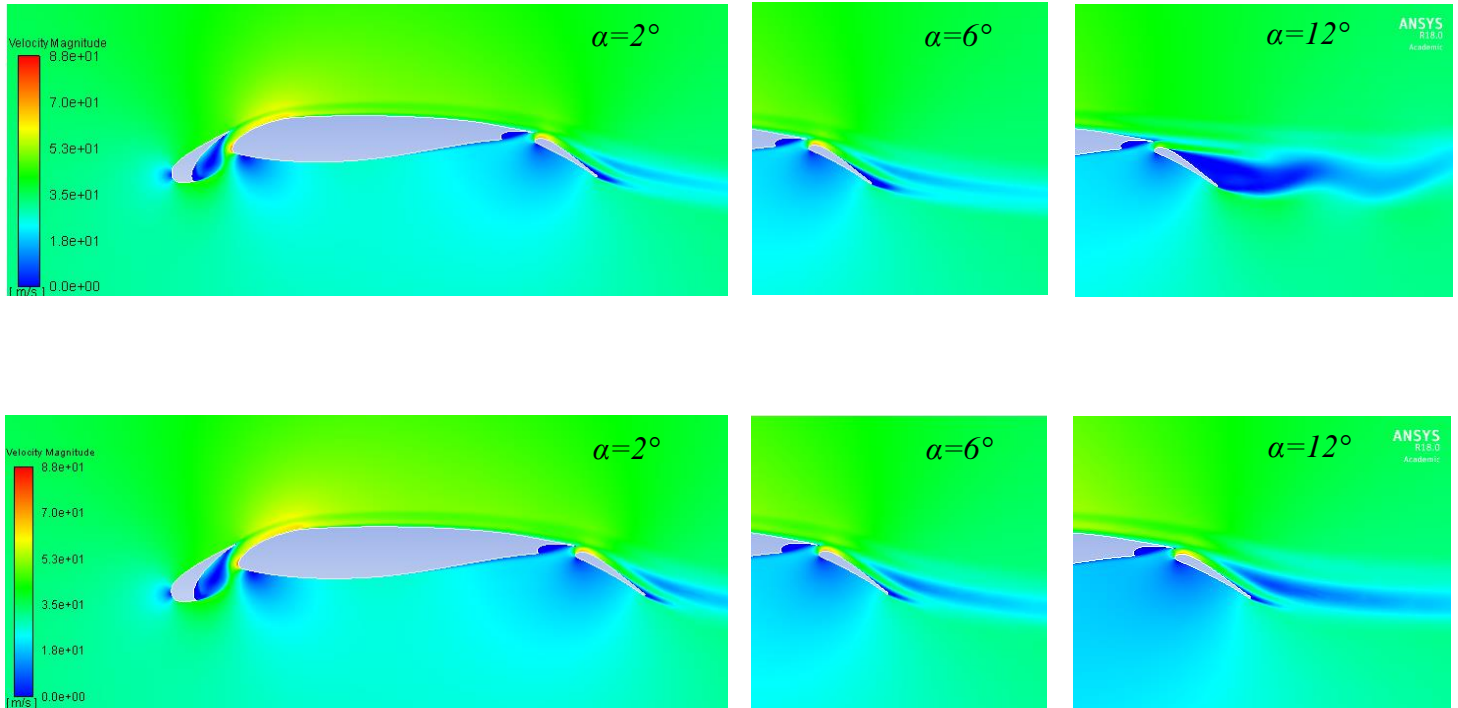


Obr. 44: Porovnání vztlakových křivek pro různé výšky Gurneyho klapky

Basic Airfoil		GK 5 mm		GK 3 mm		GK 1.5 mm		
alfa	c_L	c_D	c_L	c_D	c_L	c_D	c_L	c_D
0	1.33	0.036	1.34	0.040	1.37	0.037	1.34	0.038
2	1.53	0.033	1.61	0.037	1.62	0.034	1.59	0.034
4	1.75	0.037	1.83	0.038	1.83	0.036	1.80	0.036
6	1.92	0.036	2.04	0.040	2.03	0.039	2.01	0.038
8	1.66	0.055	2.22	0.044	2.23	0.042	2.21	0.041
10	1.84	0.054	2.42	0.046	2.42	0.045	2.40	0.044
12	2.02	0.064	2.59	0.050	2.60	0.049	2.59	0.048
15	2.24	0.068	2.81	0.060	2.85	0.056	2.85	0.055
18	2.46	0.089	3.02	0.067	3.06	0.065	3.07	0.065
21	2.66	0.101	3.17	0.078	3.22	0.077	3.24	0.077
24	2.84	0.113	3.25	0.094	3.31	0.092	3.33	0.094
27	3.00	0.127	2.94	0.131	3.13	0.119	3.33	0.112

Tabulka 2: Hodnoty součinitele vzlaku a odporu pro různé výšky Gurneyho klapky

Shrnující porovnání vývoje proudového pole na Fowlerově klapce pro variantu s a bez Gurneyho klapky je na Obr. 45.



Obr. 45: Průběh proudění na klapce pro úhly náběhu 2° , 6° a 12° . Nahoře profil bez Gurneyho klapky, dole s Gurneyho klapkou o výšce 1.5 mm

4.5 Shrnutí

Po provedení zmíněných simulací je patrné, že Gurneyho klapka má pozitivní vliv na proudové pole více-elementového aerodynamického profilu. Tento vliv je nejlépe pozorovatelný při odtržení proudu na Fowlerově klapce, kdy aplikace Gurneyho klapky může tomuto nežádoucímu jevu zabránit. Bylo ukázáno, že pro tento případ nemá výška Gurneyho klapky výrazný vliv na hodnotu vztlakového součinitele c_L , ale nejvíce se projeví na generovaném odporu (c_D). Z tohoto hlediska má největší přínos klapka o výšce $h=1.5\text{ mm}$.

5. Závěr

V této práci byly představeny nejčastěji používané prvky vztlakové mechanizace a jejich princip. Tyto prvky byly doplněny o Gurneyho klapku, která za daných předpokladů může velmi pozitivně ovlivnit vztlakové parametry leteckých profilů. Tato teorie byla podpořena 2D CFD výpočtem, jejichž správnost byla porovnána s experimentálním měřením pro profil bez Gurneyho klapky. Z výpočtu vyplývá, že Gurneyho klapka skutečně přispívá ke zvýšení vztlaku na více-elementovém profilu pro úhly náběhu, kde již na Fowlerově klapce dochází k odtržení proudu. Po aplikaci Gurneyho klapky dojde vlivem zvýšení cirkulace a ohnutí proudu za hlavním profilem k udržení přilehlého proudění na Fowlerově klapce a zvýšení vztlaku.

Ačkoliv bylo dosaženo velmi dobré shody s experimentem pro vztlakový koeficient, je potřeba výsledky interpretovat opatrně a vzít v potaz určité faktory, které mají na vypočtené hodnoty značný vliv. Je to zejména volba turbulentního modelu. Turbulence je jev, který splňuje určité parametry, mezi které patří i neuspořádanost. Je proto velice složité ji modelovat. Jelikož se navíc jedná o značně nestacionární jev, dopustíme se průměrováním značné chyby. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, tyto modely jsou z velké části založeny na vztazích, které byly odvozeny na základě hypotéz, ne ve všech případech nutně podložených fyzikálním základem. Jejich konstanty byly stanoveny na základě experimentálního měření pro daný typ úloh. Je tedy zřejmé, že je nelze použít obecně pro libovolný případ. Pro každý výpočet by se tedy měly konstanty lišit a výsledky poté validovat měřením. Zároveň lze hledat mezery i v diskretizaci domény. I přes relativně jemnou síť byl celkový počet elementů méně než 1 milion. U podrobných výzkumů, jejichž součástí jsou CFD simulace, se počet buněk pohybuje v řádu jednotek až desítek milionů. Je tedy zřejmé, že rozlišení sítě v této diplomové práci se nemůže s tímto počtem porovnat. Jedním z ukazatelů, že je proudové pole vyřešeno korektně, je správné určení bodu, kde dojde k odtržení proudu. Jelikož hodnoty rozložení tlakového koeficientu po profilu nebyly z měření k dispozici, stěží lze s jistotou tvrdit, že výpočet uvedený v této práci stoprocentně odpovídá realitě. Je tedy potřeba nehledět na výsledky s ohledem na absolutní čísla, byť jejich shoda je v tomto případě solidní, ale jako spíše na porovnání mezi jednotlivými konfiguracemi. Jelikož veškeré nastavení solveru zůstalo konzistentní pro všechny varianty výpočtů, lze se domnívat, že Gurneyho klapka přínos popsáný v této práci skutečně má.

Z provedených výpočtů vyplynulo, že Gurneyho klapka na profilu se slotem a Fowlerovou klapkou dokáže zvýšit vztlak a zabránit odtržení proudu. Z počítaných variant na tříprvkovém

profilu o těživě ve složené konfiguraci $c=0.6$ měla nejpříznivější vliv Gurneyho klapka o výšce $h=1,5$ mm s ohledem na maximální vztlak a minimální odpor. Zároveň bylo ukázáno, že vliv Gurneyho klapky je patrný téměř výhradně v případech, kdy není na původním profilu zcela přilehlé proudění. V opačném případě je vliv klapky nepatrný, či úplně zanedbatelný. Z toho důvodu tedy není pravděpodobné, že by mohla být Fowlerova klapka o určité hloubce nahrazena klapkou kratší, kterou by doplňovala Gurneyho klapka na odtokové hraně hlavního profilu. Za nižších úhlů náběhu při zcela přilehlém proudění by nebylo dosaženo stejných hodnot vztlakového součinitele. Jako doplňující vztlakový prvek je však Gurneyho klapka velmi vhodná a pro vysoké úhly náběhu, případně pro malá Reynoldsova čísla (malé rychlosti), může být značným přínosem.

6. Seznam použité literatury

- [1] SMITH, Apollo Milton Olin. High-Lift Aerodynamics. *Journal of Aircraft*. 1975, 1975(vol. 12, no. 6), 501-530. ISSN 0021-8669.
- [2] All in Flap. In: *Ultralight Design* [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://ultralightdesign.wordpress.com/2017/10/23/all-in-a-flap/>
- [3] HOUGHTON, E. L. a P. W. CARPENTER. *Aerodynamics for engineering students*. 4th ed. New York: Halsted Press, 1993. ISBN 0470221305.
- [4] Flaps And Slats. In: *Aviation Stack Exchange* [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/1734/what-is-the-difference-between-flaps-and-slats>
- [5] WANG, J.J., Y.C. LI a K.-S. CHOI. Gurney flap—Lift enhancement, mechanisms and applications. *Progress in Aerospace Sciences*[online]. 2008, 44(1), 22-47 [cit. 2018-06-28]. DOI: 10.1016/j.paerosci.2007.10.001. ISSN 03760421. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376042107000784>
- [6] TRAUB, Lance W. a Guarav AGARWAL. Exploratory Investigation of Geometry Effects on Gurney Flap Performance. *Journal of Aircraft*[online]. 2007, 44(1), 349-351 [cit. 2018-06-28]. DOI: 10.2514/1.28385. ISSN 0021-8669. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.28385>
- [7] ROSS, James C., Bruce L. STORMS a Paul G. CARRANNANTO. Lift-enhancing tabs on multielement airfoils. *Journal of Aircraft* [online]. 1995, 32(3), 649-655 [cit. 2018-06-28]. DOI: 10.2514/3.46769. ISSN 0021-8669. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.46769>
- [8] GREENBLATT, David, Stefan VEY, Oliver C. PASCHEREIT a Robert MEYER. Flap Vortex Management Using Active Gurney Flaps. *AIAA Journal* [online]. 2009, 47(12), 2845-2856 [cit. 2018-06-28]. DOI: 10.2514/1.41767. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.41767>

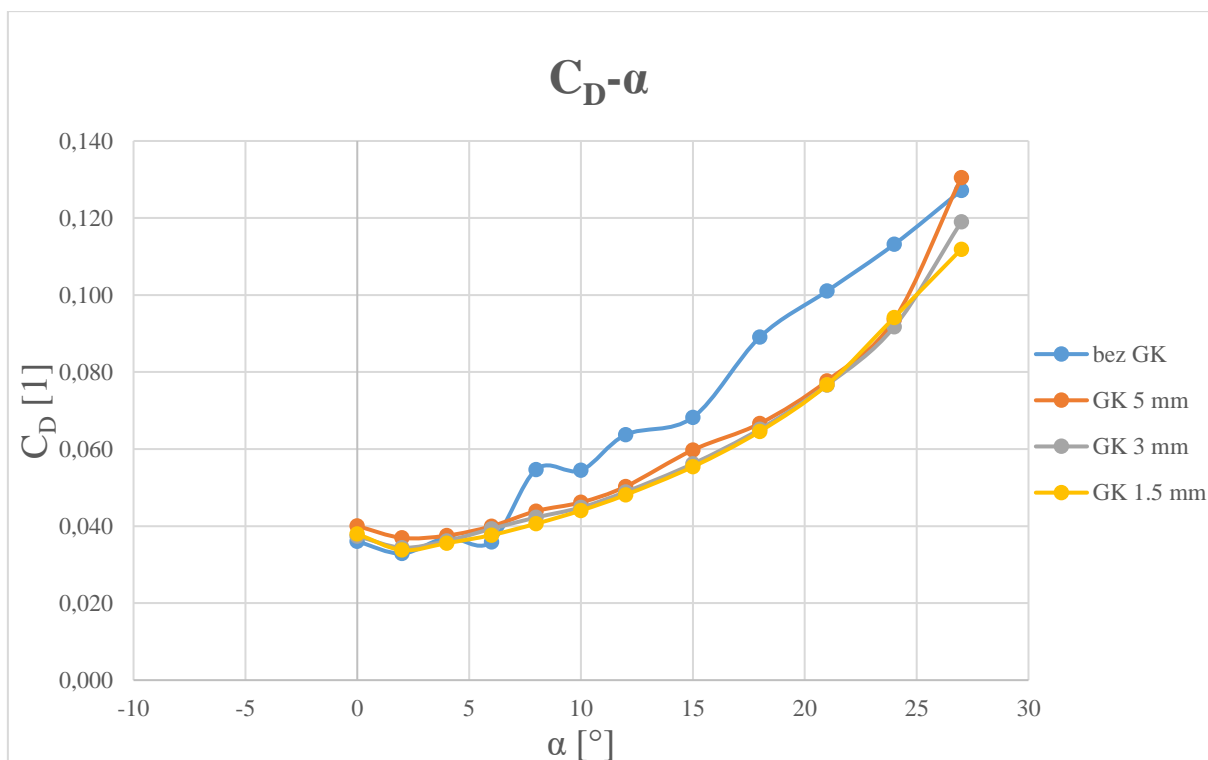
- [9] TRAUB, Lance W. Prediction of Gurney-Flap Lift Enhancement for Airfoils and Wings. *AIAA Journal* [online]. 2014, 52(9), 2087-2090 [cit. 2018-06-28]. DOI: 10.2514/1.J053234. ISSN 0001-1452. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.J053234>
- [10] LI, Yachen, Jinjun WANG a Panfeng ZHANG. Influences of Mounting Angles and Locations on the Effects of Gurney Flaps. *Journal of Aircraft* [online]. 2003, 40(3), 494-498 [cit. 2018-06-28]. DOI: 10.2514/2.3144. ISSN 0021-8669. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/2.3144>
- [11] PŘÍHODA, Jaromír a Petr LOUDA. *Matematické modelování turbulentního proudění*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03623-5.
- [12] Ing. VLČEK, Petr. *Modelování turbulentního proudění*. Praha, 2013. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Školitel doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>

Seznam příloh

Příloha 1: Závislost součinitele odporu na úhlu náběhu pro různé výšky Gurneyho klapky
(Short flap – přistávací konfigurace)

Příloha 2: Polára více-elementového profilu pro různé výšky Gurneyho klapky
(Short flap – přistávací konfigurace)

Příloha 1: Závislost součinitele odporu na úhlu náběhu pro různé výšky Gurneyho klapky (Short flap – přistávací konfigurace)



Příloha 2: Polára více-elementového profilu pro různé výšky Gurneyho klapky (Short flap – přistávací konfigurace)

