

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

CFD ANALÝZA TVORBY NÁMRAZY NA LETOUNU KATEGORIE COMMUTER

CFD ANALYSIS OF ICING EFFECTS ON COMMUTER AIRCRAFT CONFIGURATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Zima

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Popela, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Martin Zima
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	Ing. Robert Popela, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

CFD analýza tvorby námrazy na letounu kategorie commuter

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Námraze představuje velice nebezpečný jev omezující provoz dopravních letadel. Studium charakteru jejího vývoje, např. vlivu konfigurace na dopadovou plochu podchlazených kapek které tvoří nebezpečný typ námrazy je důležitým a prakticky využitelným nástrojem pro návrh opatření – odmrazovacích systémů.

Cíle diplomové práce:

Vytipování kritických bodů letové obálky letounu typu commuter z hlediska nebezpečí tvorby námrazy a provedení CFD simulace její tvorby. Vyhodnocení charakteru tvorby námrazy a návrh opatření.

Seznam doporučené literatury:

Ansys FENSAP-ICE user manual

CS-23 Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Aeroplanes, EASA Certification specification

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výpočtem vzniku námrazy a její dopady na letoun L 410 NG. Letadlo je certifikováno podle předpisu FAR/CS/AP-23 v kategorii Commuter (svozová doprava). Byla provedena analýza pneumatického odledňovacího systému křídla letounu pro tři letové konfigurace a námrazové podmínky dle dokumentu Part 25 Appendix C a O. Analýza byla provedena za pomoci CFD prostředků v programu FENSAP-ICE pro případy vztahující se k letové námrazové obálce. Tyto případy byly analyzovány pro dva řezy křídla v místě křídélka s Reynoldsovými čísly v rozmezí $4,5-8,5 \times 10^6$ a za předpokladu normálního provozu pneumatického odledňovacího systému. Zvýšená pozornost byla kladena na potenciální nárůst námrazy za hranicí pneumatického odledňovacího systému. V příloze P6 je možné dohledat anglicky psaný odborný článek shrnující hlavní poznatky diplomové práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

CFD analýza, FENSAP-ICE, námraza v letectví, pneumatický odledňovací systém

ABSTRACT

The Diploma Thesis concerns investigation of icing effects at L 410 NG aircraft. The aircraft is certified under FAR/CS/AP-23 Commuter category. An analysis was performed for existing Pneumatic De-icing Boots System at the wing area according to three flight configurations and icing conditions referring to document Part 25 Appendix C and O. The analysis was done by CFD solver FENSAP-ICE for various runs with respect to the icing envelope. Cases were assigned as two 2D cross-sections situated at the aircraft's wing aileron part. Cross-sectional Reynold's number oscillate between $4.5-8.5 \times 10^6$. Automatic operation of Pneumatic De-icing Boots System was proposed. Attention was paid to the ice accretion aft to the Pneumatic De-icing Boots System. The Appendix (Příloha) P6 contains an English written Article concerning main Diploma Thesis sections.

KEY WORDS

CFD analysis, FENSAP-ICE, aircraft icing, Pneumatic De-icing Boots System

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZIMA, Martin. CFD analýza tvorby námrazy na letounu kategorie Commuter. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117607>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Robert Popela.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval pod vedením Ing. Roberta Popely, Ph.D. a uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a elektronické zdroje, ze kterých jsem čerpal.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Martin Zima', written in a cursive style.

Martin Zima
20. května 2019

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Robertu Popelovi, Ph.D. za odborné konzultace a určování směru ubírání diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlu Pištěckému z firmy Aircraft Industries, a.s. za umožnění tvorby diplomové práce, poskytnutí potřebných informací, rad a kontroly obsahu diplomové práce.

Velké díky patří také celé mé rodině a Tereze Czelisové za trpělivost, podporu během celoroční práce a za zázemí, které mi pro práci na diplomovém projektu poskytovali.

OBSAH

1 ZKRATKY	13
2 ÚVOD	15
3 NÁMRAZA V LETECTVÍ	17
3.1 Fyzikální podstata vzniku námrazy	17
4 POPIS LETOUNU L 410 NG	21
4.1 Odledňovací systém	21
5 DEFINICE PŘEDPISŮ	23
5.1 Dokument CS-23.1419	23
5.2 Dokument AC 23.1419 a AC 20-73A	23
6 NÁMRAZOVÁ OBÁLKA	25
6.1 Definice námrazové obálky dle Appendix C	25
6.1.1 Definice letových případů & Doby námrazových podmínek	25
6.1.2 Definice meteorologické námrazové obálky	27
6.1.2.1 Průběžná námraza s maximální intenzitou	27
6.1.2.2 Přerušovaná námraza s maximální intenzitou	27
6.2 Definice námrazové obálky dle Appendix O	30
6.2.1 Definice meteorologické námrazové obálky	30
6.2.1.1 Namrzající mrholení	31
6.2.1.1 Namrzající déšť	32
7 KALIBRACE CFD ŘEŠIČE	33
7.1 Popis kalibrační úlohy	33
7.2 V&V proudové pole	34
7.2.1 Hodnota y^+	35
7.2.2 Nezávislost sítě	36
7.3 V&V dopadů kapek	41
7.4 V&V tvaru námrazy	45
7.4.1 Parametrická studie termodynamické podmínky OP stěna	47
7.4.2 Parametrická studie počtu kroků simulace námrazy	49
8 CFD ANALÝZA & VYHODNOCENÍ	51
8.1 Vstupní podmínky analýzy	51
8.1.1 Řezy křídla a letové případy	51
8.1.1.1 Geometrie řezu R21 a R30, výpočetní síť	52
8.1.1.2 Stanovení součinitele vztlaku letounu C_L	53
8.1.2 Stanovení AoA v řezech R21 a R30	53
8.1.2.1 Stanovení místních součinitelů vztlaku c_l	53
8.1.2.2 Místní AoA řezů R21 a R30	54
8.1.3 Meteorologické podmínky	55
8.1.4 Nastavení řešičů	55
8.1.4.1 Nastavení řešiče DROP 3D	56
8.1.5 Přehled analyzovaných případů & nomenklatura	57
8.2 Systém vyhodnocení	57
8.3 Konvergence	59
8.4 Vyhodnocení simulací Appendix C	61
8.4.1 Vyhodnocení mohutnosti námrazy	61
8.4.2 Vyhodnocení přesahu námrazy	64
8.5 Vyhodnocení simulací Appendix O	67
8.5.1 Vyhodnocení mohutnosti námrazy	67
8.5.2 Vyhodnocení přesahu námrazy	68
9 ZÁVĚR	71
ZDROJE	73
PŘÍLOHY	75

1 ZKRATKY

AOA	[°]	Úhel náběhu
AS	-	Štíhlost křídla
a	[m]	Proměnná rozvinutá délka
a_f	[m]	Celková délka rozvinu řezu křídla
a_s	[m]	Rozvinutá délka odledňovacího pásu
β		Sběrná účinnost
c_D	-	Součinitel odporu
c_L	-	Součinitel vztlaku
$c_{L_{ice}}$	-	Součinitel vztlaku profilu s námrazou
$c_{L_{max}}$	-	Maximální součinitel vztlaku
c_l	-	Místní součinitel vztlaku
c_p	-	Měrná tepelná kapacita za konst. tlaku
γ	-	Adiabatický exponent
g	[m/s ²]	Tíhové zrychlení
h_s^+	-	Bezrozměrná drsnost povrchu
H_p	[ft]	Tlaková výška
IFR		Instrument Flight Rules
l	[m]	Rozpětí
L_o	[NM]	Mohutnost oblačnosti
k	-	Počet kroků simulace
k_o	-	Korekční faktor oblačnosti
m_{TOW}	[kg]	Vzletová hmotnost letounu
M_∞	-	Machovo číslo nerozrušeného proudu
MVD	[μm]	Střední objemový průměr kapky
LWC	[g/m ³]	Obsah kapalné vody
p_{atm}	[Pa]	Okolní atmosférický tlak
Pr	-	Prandtlovo číslo
q_w	[W/m ²]	Tepelný tok u stěny
Re	-	Reynoldsovo číslo
$S_{kř}$	[m ²]	Referenční plocha křídla
ρ	[kg/m ³]	Hustota
t_{ice}	[mm]	Tloušťka námrazy
T_{adiab}	[K]	Adiabatická stagnační teplota
T_{amb}	[K]	Ambientní teplota
T_f	[K]	Teplota okolní tekutiny
T_{stat}	[K]	Statická teplota
T_w	[K]	Teplota u stěny
T^+	[K]	Bezrozměrná teplota mezní vrstvy
τ	[s]	Čas
τ_c	[s]	Doba mezi cykly odledňovacího systému
τ_d	[s]	Doba detekce námrazy na letadle
τ_k	[s]	Čas jednoho kroku
τ_o	[s]	Doba průletu oblačností
τ_w	[Pa]	Smykové napětí u stěny
u^*	-	Bezrozměrná rychlost v mezní vrstvě
v_{TAS}	[m/s]	Pravá vzdušná rychlost
v_∞	[m/s]	Rychlost nabíhajícího proudu
V&V	-	Verifikace a Validace
y^+	-	Bezrozměrná vzdálenost mezní vrstvy

2 ÚVOD

Tématem diplomové práce je fenomén spojený s námrazou v letectví. Práce je členěna na kapitoly, které na sebe navzájem navazují. Postupně vnáší čtenáře do dané problematiky rozebráním fyzikální podstaty námrazy, přes detailní definici vstupních podmínek provedené analýzy, její zhotovení a následný rozbor výsledků.

Na začátku je popsána podstata vzniku námrazy v letectví. Pojednává o základních fyzikálních principech a procesech přeměny skupenství vody z kapalné, podchlazené kapky v oblačnosti, na led ulpívající na povrchu letounu. V návaznosti je v další kapitole vytvořen *popis letounu L 410 NG*, pro který je provedena analýza tvorby námrazy. Z obecného hlediska je rozebrán základní princip odledňovacího systému letounu se zaměřením na křídlo letounu a v širším kontextu je poté proveden rozbor činnosti odledňovacího systému, ze kterého již vychází parametry pro analyzované případy. Geometrie analyzovaného křídla letounu je detailně rozebrána v úvodní části kapitoly 8 CFD Analýza & Vyhodnocení. Pro úspěšné schválení letounu pro provoz v podmínkách vzniku námrazy je nutné splnit požadavky předpisů, které se k tomu vážou. Jedná se především o kapitolu CS 23.1419 s odkazem na poradní oběžníky a přílohy Part 25 Appendix C a O stanovující obálky námrazových podmínek. Z těchto dokumentů vycházejí meteorologické podmínky případů analýzy.

Samotná analýza je provedena pomocí výpočtu CFD založeném na metodě konečných objemů. V kapitole *Kalibrace CFD řešiče* je provedena kalibrace použitého řešiče FENSAP-ICE. Kalibrace zajišťuje správné nastavení CFD řešiče a validitu výsledků následné analýzy.

Vyhodnocení případů analýzy bylo provedeno v programech CFD-Post a Matlab. Vybrané kritické případy analýzy jsou rozebrány v již zmíněné kapitole 8. Zbylé případy analýzy jsou uvedeny v přílohách stejně tak i přehled analyzovaných případů.

3 NÁMRAZA V LETECTVÍ

Snaha o provoz letadlové techniky za jakýkoli povětrnostních a meteorologických podmínek vede výrobce letadel k stále sofistikovanějším palubním systémům, které tuto službu umožní. Vývoj palubních soustav jde ruku v ruce s historickým vývojem stavby a vybavenosti letadel. Není tomu jinak ani u protinámrazových palubních soustav.

V období před a během I. Světové války byly provozovány lety pouze za dobrého počasí. V této době nebyly natolik vyvinuty palubní soustavy letadel, aby bylo umožněno létat IFR. Tato podmínka vedla k tomu, že se piloti vyhýbali letu v oblačnosti, kde mohlo docházet k výskytu námrazových podmínek, a tedy nebylo potřeba vyvíjet protinámrazové palubní systémy.

Během II. Světové války a v 50. letech došlo k bouřlivému vývoji letadlové techniky včetně palubních přístrojů. Z počátku byly ošetřeny proti námraze aerometrické snímače a postupně i nosné plochy. Z pohledu predikce námrazy měl na teoretický vývoj velký podíl Irving Langmuir, Američan, který se v období 40. let zabýval měření námrazových podmínek v atmosféře a vývojem teorie námrazy jako fyzikálního jevu. Podle něj se nyní nazývají spektra rozložení kapek Langmuir A–E.

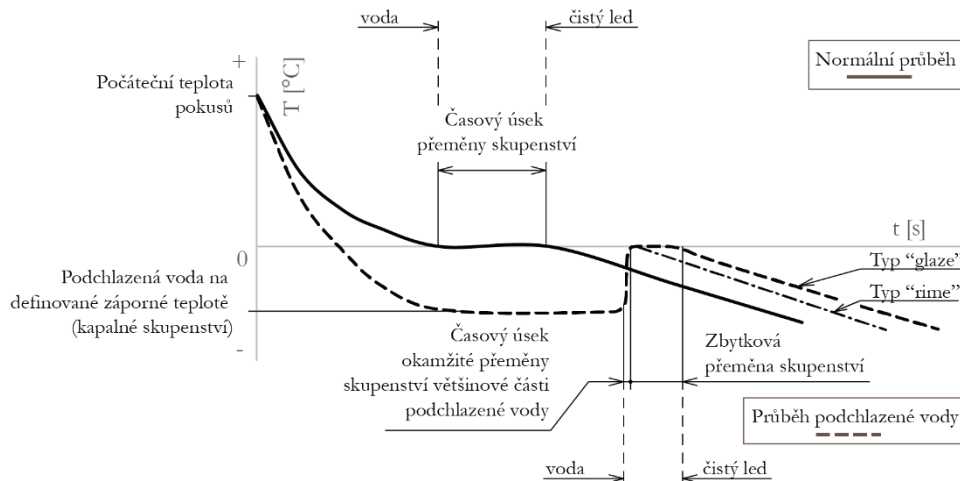
V 70. letech vznikl na základě nehod způsobených námrazou program NASA Lewis Research, který měl za cíl vytvořit databázi tvarů námrazy a k tomu vázaných fyzikálních proměnných. K měření byly využívány speciálně upravené námrazové aerodynamické tunely. Na základě výzkumu byl následně naprogramován první řešič simulace námrazy LEWICE, založen na potenciálním proudovém poli.

Od 80. let do současnosti je kladen důraz na snižování počtu měření v aerodynamických tunelech. Využití námrazových aerodynamických tunelů se postupně překlenulo do spolupráce s vývojáři pro validaci řešičů. I přesto však certifikační předpisy požadují ve velké míře provedení průkazů letovými měřeními nebo i částečně v aerodynamických tunelech.

3.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA VZNIKU NÁMRAZY

Námraza vzniká fyzikálním procesem změny skupenství z tekutého na pevné (krystalizace). Při běžné změně skupenství dochází k pozvolnému procesu krystalizace, kdy teplota klesá dle Obr. 3.1 (plná křivka) k bodu tuhnutí. Zde začne kapalina (voda) krystalizovat a v okamžiku, kdy dojde k úplné přeměně skupenství (led), může soustava opět snižovat teplotu.

V *oblasti letectví*, kdy proudění kolem letounu má konvektivní charakter a doba přeletu částice po hloubce křídla trvá přibližně 1/100 s, je jediný způsob, jak může proběhnout nárůst námrazy *podchlazená tekutina (voda)*. V takovém případě dokáže voda ztuhnout během krátkého okamžiku, jak je vidět na Obr. 3.1, rychlým přechodem ze záporné teploty na teplotu bodu mrazu, kde dochází k přeměně skupenství.



Obr. 3.1 Teplotní závislost normální přeměny skupenství vody z kapalného na pevné (plná).
Průběh přeměny skupenství podchlazené vody (prerušovaná).

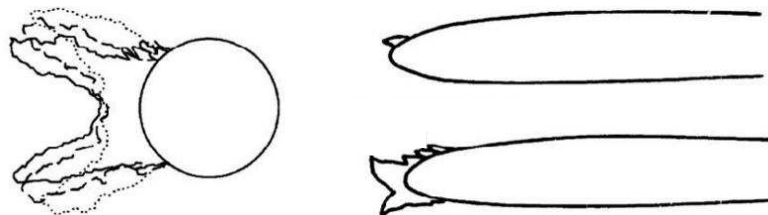
V letectví se dle meteorologických podmínek vyskytují 2 základní typy námrazy, „rime“ a „glaze“.

Podstata námrazy typu „rime“ je v okamžitém zamrznutí celého obsahu kapky (minimální zbytková přeměna skupenství) vody v místě kontaktu s tělesem. Tento typ námrazy se vyskytuje v místech s nízkou okolní teplotou v atmosféře. Simulace tohoto typu námrazy je relativně jednoduchá (není potřeba užití iteračního postupu) a výsledky dobře odpovídají experimentům.



Obr. 3.2 Námraza typu „rime“. Zamrznutí celého objemu kapky v místě dopadu. [10]

Podstata námrazy typu „glaze“ je v částečném zamrznutí obsahu kapky vody v místě kontaktu s tělesem. V okamžiku kontaktu kapky s tělesem dochází k zamrznutí části kapky a změně teploty podchlazené kapky ze záporné na teplotu tuhnutí. Tím dochází k uvolnění tepla, které má za následek částečnou přeměnu skupenství objemu kapky. Zbytek objemu kapky, která nezamrzne, putuje díky konvektivnímu charakteru proudění po již vzniklé námraze směrem k odtokové hraně „runback“. Během pohybu je kapalina chlazená (teplota atmosféry je pod bodem mrazu) a postupně tento objem vody zamrzá. Místo dopadu kapky s částí zamrzlého objemu kapky (z ang. „bead“ nebo „beading“) má specifický tvar a drsnost, která má velký vliv na proces růstu námrazy.

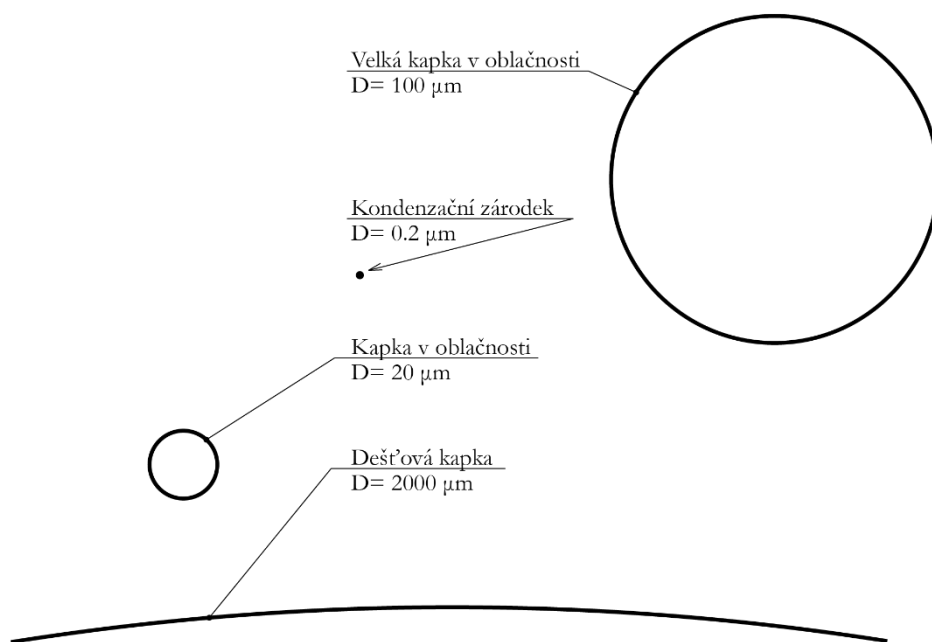


Obr. 3.3 Námraza typu „glaze“. Částečné zamrznutí objemu kapky v místě dopadu. Zbylý objem kapky zamrzne vlivem konvekce dál po proudnici. [10]

V případě námrazy typu „glaze“ může dojít k tečení nezmrzlé části objemu kapky do míst, kde již není instalován odledňovací systém. Takto vzniklou námrazu nelze během letu odstranit a může způsobit degradaci jak aerodynamických vlastností letounu, tak jeho ovladatelnosti. V případě vzniku tohoto jevu v oblasti křídélka na křídle, nebo ocasních kormidel, může dojít k reverzi řízení a ztrátě kontroly nad letounem.

Velké podchlazené kapky, SLD (Super Large Droplets), viz Obr. 3.4, jsou podchlazené kapky vody s průměrem od 50 μm do přibližně 2 mm. V případě horní hranice se jedná již o kapky vyskytující se v namrzajícím dešti. Tento typ kapek má za následek radikální přesah dopadu kapek za odledňovací systém. Samotný mechanismus dopadu kapek a růst námrazy je zkomplikován jak potřebným uvážením gravitačního působení, možnosti dělení kapky během letu, tak rozprsknutí kapky při dopadu na těleso.

Havárie stroje ATR-72 poblíž Roselawn v Indianě (USA) v listopadu roku 1994 došlo na základě kombinace dvou jevů, a to výskytu velkých podchlazených kapek (SLD) s velkou intenzitou výskytu těchto kapek (LWC), která zapříčinila nárůst námrazy v místě za odledňovacím systémem a znemožnění ovladatelnosti stroje, který se následně zřítí. Informace na základě úvodní kapitoly v [11].



Obr. 3.4 Porovnání velikosti kapek v atmosféře [11].

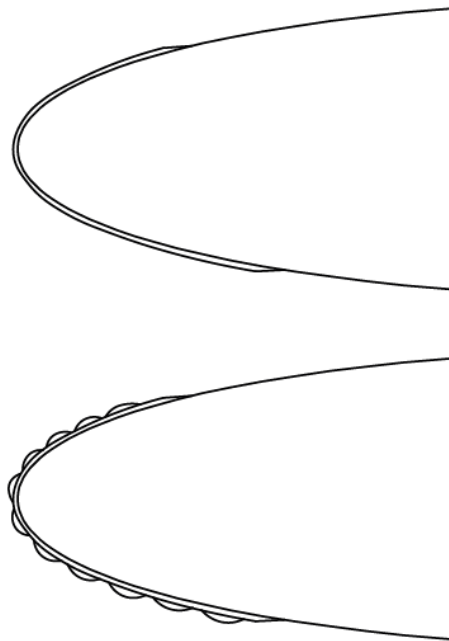
4 POPIS LETOUNU L 410 NG

Letoun L 410 NG patří do kategorie letounů Commuter. Typové certifikáty agentury EASA získal v roce 2017 a MAK získal v roce 2018. Letoun vychází z rodiny L 410. Na rozdíl od starších verzí má verze NG nová křídla s integrálními nádržemi, větší zavazadlový prostor v místě přední části letounu a nové pohonné jednotky GE H-85. Díky těmto inovacím dosahuje letoun delšího doletu, vytrvalosti a má větší užitečné zatížení. Základní charakteristiky:

- Rozpětí: $l = 19,1 \text{ m}$
- Plocha křídel: $S_{kř} = 34,86 \text{ m}^2$
- Štíhlost: $A_s = 10,45$
- Maximální vzletová hmotnost: $m_{TOW} = 7\,000 \text{ kg}$
- Maximální cestovní rychlost: $v_{TAS} = 417 \text{ km/h}$

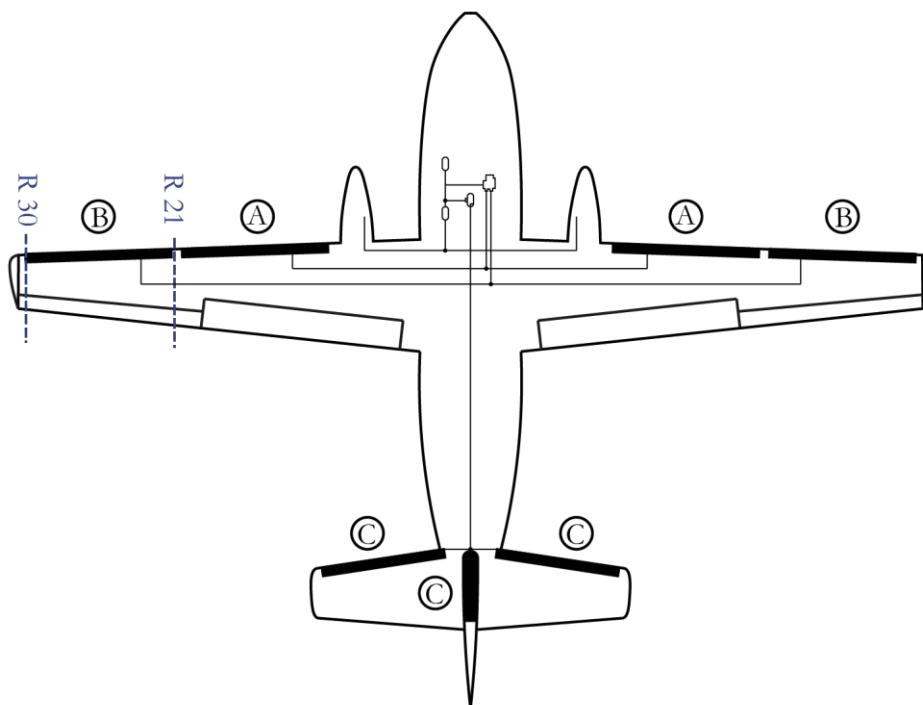
4.1 ODLEDŇOVACÍ SYSTÉM

Letoun L 410 NG je vybaven pneumatickým odledňovacím systémem náběžných hran nosných a stabilizačních ploch od firmy GOODRICH. Jedná se o pneumatický odledňovací systém s mechanickým odstraněním námrazy. Princip spočívá v cyklickém tlakování gumových komor, které vlivem změny tvaru mechanicky poruší vrstvu námrazy a dojde k jejímu odpadnutí. Na Obr. 4.1 je zobrazen odledňovací pás ve stavu vypnuto (nahore) a odledňovací pás při natlakování gumových komor (dole).



Obr. 4.1 Odledňovací pneumatický systém. Vypnuto (nahore). V pracovní poloze (dole).

Umístění odledňovacích systémů letadla je zobrazeno na Obr. 4.2. Systém je rozdělen do 3 sekcí (A, B, C), které se při provozu spouští samostatně. Dodávka stlačeného vzduchu je realizována odběrem z kompresorů pohonných jednotek. Následně skrze řídicí jednotku je distribuován stlačený vzduch do požadované sekce. Vždy je možné spustit pouze jednu sekci.



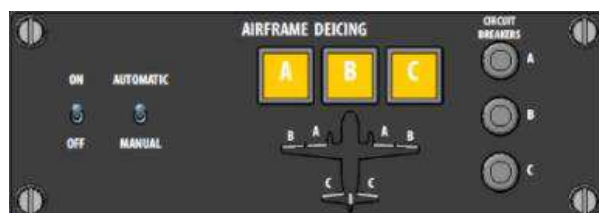
Obr. 4.2 Instalace odledňovacího systému L 410 NG. (Analyzované řezy R21 a R30).

Systém se ovládá pomocí avionického přístroje zobrazeném na Obr. 4.3. Z obrázku jsou patrné dvě polohy ovládání:

- o Automatické
- o Manuální

V případě automatického spuštění jsou postupně spuštěny všechny tři sekce. Pracovní pozice (natlakování) trvá 5 s. Následuje 45 s pauza.

V případě manuálního spuštění délka pracovní pozice je stejná, 5 s. Následně je nutné dodržet časový rozestup minimálně 6 s před spuštěním další sekce.



Obr. 4.3 Přístroj avioniky. Spuštění pneumatického odledňovacího systému.

5 DEFINICE PŘEDPISŮ

Pro analýzu a certifikaci odledňovacího systému letadla je potřeba vycházet z certifikačních předpisů dané kategorie letadel. V případě zadání této práce se jedná o předpis CS-23 kategorie Commuter. Pro schválení provozu letounu v námrazových podmínkách je obecné pojednání uvedené v *CS 23.1419* (rozepsáno v kapitole 5.1).

Detailní popis doporučujících požadavků pro certifikaci je uveden v dokumentu *AC 23.1419* a *AC 20-73A* s odkazy na specifikaci námrazové obálky v dokumentu *Part 25 Appendix C*. Pro případy velkých podchlazených kapek (SLD) je specifikace námrazové obálky uvedena v *Part 25 Appendix O*.

5.1 DOKUMENT CS-23.1419

Letadla kategorie CS-23 Commuter mohou být certifikována s ohledem na provoz v námrazových podmínkách. Dle CS 23.1419 [8] je nutné pro certifikaci splnit požadavky:

- a) Předepsaný postup použití odledňovacího systému musí být popsán v manuálu letadla, nebo manuálu k tomu určeném.
- b) Musí být provedena analýza navrženého odledňovacího systému na základě provozní obálky letounu včetně průkazných testů systému v podmínkách nepřetržité maximální námrazy a občasné maximální námrazy.
- c) V případě částí nebo i celého letadla, může být provedena certifikace na základě podobného letounu s již udělenou typovou certifikací.
- d) Pokud je navržena pro zajištění správné činnosti systému nutná vizuální inspekce vnějších ploch letounu pilotní posádkou, je nutné zajistit přiměřené osvětlení těchto ploch v noci.

Tento obecný požadavek na certifikaci je dále rozšířen podrobným popisem požadavků v dokumentu AC 23.1419 [9] a dále také v AC 20-73A [14]. Zde jsou již rozepsány jednotlivé námrazové provozní požadavky a doporučení pro návrh a dimenzování odledňovacích systémů.

5.2 DOKUMENT AC 23.1419 A AC 20-73A

Dokument Advisory Circular 23.1419 [9] obsahuje doporučující požadavky potřebné pro certifikaci. Dle dokumentu lze rozdělit certifikaci na úkony:

- o Definovat námrazovou obálku
- o Definovat kritické body vnějších ploch letadla (náběžné hrany křídel, výškového stabilizátoru, vrtule, systémy snímání tlaku, antény)
- o Specifikovat použitý druh odledňovacího systému pro vytypované plochy nebo systémy
- o Provést průkazy navržených odledňovacích systémů na základě
 - o Letových zkoušek s reálnou námrazou
 - o Letových zkoušek s instalovanými tvary námrazy (simulované)
 - o Průkazných tunelových měření
- o Vytvořit uživatelský manuál nebo podobný typ dokumentace odledňovacích systémů

Dokument Advisory Circular 20-73A [14] obsahuje podrobnější informace o provedení jednotlivých průkazů s uvedením teoretických informací a historickém vývoji předpisu. Na základě tohoto dokumentu byly určeny některé vstupní parametry analýzy. Jedná se o čas simulace a ošetření drsnosti povrchu.

6 NÁMRAZOVÁ OBÁLKA

Pro certifikaci letounu pro let v námrazových podmínkách je nutné definovat námrazovou obálku, ze které vychází vstupní meteorologické podmínky a letové konfigurace pro analýzu odledňovacího systému. Definice námrazové obálky je uvedena v dokumentech:

- o Part 25 Appendix C
- o Part 25 Appendix O (SLD)¹

Do definice námrazové obálky vstupuje několik parametrů, které je potřeba zohlednit:

- o Meteorologické podmínky typu vrstevné oblačnosti (průběžná námraza)
- o Meteorologické podmínky typu kupovité oblačnosti (přerušovaná námraza)
- o Výškový profil vrstevné oblačnosti
- o Výškový profil kupovité oblačnosti
- o Výkony a dostup analyzovaného letounu
- o Letové konfigurace letounu

Námrazové obálky předpisů Part 25 Appendix C, O byly vytvořeny na základě dat získaných sondováním atmosféry a obsahují nejvíce pravděpodobné případy námrazových podmínek, do kterých se může letoun dostat.

6.1 DEFINICE NÁMRAZOVÉ OBÁLKY DLE APPENDIX C

Námrazová obálka pro letoun L 410 NG vychází z předpisu Part 25 Appendix C [12]. Předpis (nebo viz podkapitola 6.1.2) stanovuje meteorologické podmínky pro kapky do průměru 40 μm v závislosti na typu námrazových podmínek. Dále stanovuje výškový rozsah do tlakové výšky $H_p = 22\,000$ ft. Nad touto hranicí se již nepředpokládá vznik námrazových podmínek. Struktura předpisu je členěna na dvě části:

- o Definice letových případů & Doby námrazových podmínek
- o Definice meteorologické námrazové obálky

6.1.1 DEFINICE LETOVÝCH PŘÍPADŮ & DOBY NÁMRAZOVÝCH PODMÍNEK

Na základě předpisu Part 25 Appendix C-Part II. je definováno několik letových případů. Pro potřeby analýzy byly vybrány *tři kritické letové případy* dle konzultace se zadavatelem Aircraft Industries, a.s. Letové případy jsou stanoveny na základě interní analýzy odledňovacího systému draku letounu L 410 NG, kde jsou provedena letová měření dle námrazové obálky předpisu Part 25 Appendix C. Vybrané případy jsou uvedeny v Tab. 6.1.

Tab. 6.1 Vybrané letové případy pro analýzu odledňovacího systému letounu L 410 NG

	Výška		Teplota		V_{TAS}		m_{TOW}
	[ft]	[°C]	[K]	[°F]	[km/h]	[m/s]	[kg]
LP01	20 000	-16	257,15	3,2	357,4	99,3	4686
LP02	0	0	273,15	32,0	248,3	69,0	1
LP03	1	1	1	1	189,1	52,5	7000

¹ Pro kategorii letadel FAR/CS-23 není zatím vyžadováno provedení průkazu dle tohoto dokumentu

Všechny tři analyzované letové případy LP01 až 03 jsou konfigurace letounu *s uvážením ustáleného horizontálního letu*. Pro tyto letové případy jsou meteorologické podmínky stanoveny v následující kapitole.

Dále je nutné určit časový průběh námrazových podmínek. Rozhodující je čas, kdy dochází k nerušené tvorbě námrazy na vystavených plochách letounu dopadům kapek. Doba trvání námrazových podmínek (čas τ) je dána ze vstupních parametrů:

τ_o – doba průletu mohutnosti oblačnosti definované předpisem. Je vypočítána na základě mohutnosti oblačnosti a rychlosti letu:

$$\tau_o = \frac{L_o}{v_{TAS}} \text{ [s]} \quad (6.1)$$

Výsledné hodnoty jsou uvedené v Tab. 6.2 a Tab. 6.3.

τ_d - doba detekce námrazy čidlem a úkonů posádky pro zajištění spuštění odledňovacího systému. Doba detekce je možné odhadnout na základě poradního oběžníku AC 23-73A [14]. Pro letadlo vybavené čidlem detekce námrazových podmínek (případ L 410 NG) je doporučená hodnota:

$$\tau_d = 41 \text{ [s]}$$

τ_c - doba mezi cykly spuštění odledňovacího systému. Doba je dána na základě provozního manuálu letadla L 410 NG. V případě automatického módu je doba mezi cykly spuštění:

$$\tau_c = 45 \text{ [s]}$$

V případě, kdy délka letu v námrazových podmínkách je delší než doba detekce námrazy τ_d , dochází k opakovanému spuštění odledňovacího systému v intervalech definované dobou τ_c . Proto je nutné zavést podmínku v případě analýzy mohutnosti námrazy *v místě odledňovacího pásu* (popsané níže):

$$\text{pokud } \tau_o > \tau_d \rightarrow \tau_o = \tau_d$$

Dále je doba detekce námrazy τ_d a doba mezi cykly τ_c podobná a časový rozdíl 4 s je možné zanedbat co do velikosti nárůstu námrazy. Proto je zavedena konzervativní podmínka:

$$\tau_d = \tau_c = 45 \text{ [s]}$$

Pro analýzu jsou mandatorní dvě podmínky v závislosti na typu simulace:

- o *Mohutnost námrazy v místě odledňovacím pásu*. Vyšetření nosných ploch s aktivním odledňovacím systémem, kde doba námrazy je dána dobou mezi cykly nebo dobou průletu mohutností oblačnosti:

$$\tau = \max(\tau_c ; \tau_o) = \max(45 \text{ s} ; \tau_o)$$

- o *Přesah námrazy mimo odledňovací pás*. Vyšetření nosných ploch mimo odledňovací systém, kde doba námrazy je dána dobou průletu mohutností oblačnosti

$$\tau = \tau_o$$

6.1.2 DEFINICE METEOROLOGICKÉ NÁMRAZOVÉ OBÁLKY

Meteorologická námrazová obálka je definována třemi základními podmínkami specifikovanými v jednotlivých podkapitolách:

- a) Průběžná námraza s maximální intenzitou (vrstevná oblačnost Stratus)
- b) Přerušovaná námraza s maximální intenzitou (kupovitá oblačnost Cumulus)
- c) Námraza při vzletu s maximální intenzitou

Dle konzultace se zadavatelem Aircraft Industries, a.s. a byly v Tab. 6.1 určeny letové případy. Na základě letových případů LP01–03 jsou dále definovány případy analýzy ve tvaru viz popsání nomenklatury 8.1.5.

6.1.2.1 PRŮBĚŽNÁ NÁMRAZA S MAXIMÁLNÍ INTENZITOU

Z anglického ekvivalentu *Continuous maximum icing*, je tato obálka definována Obr. 6.1, kde je popsána (shora):

- o grafem závislosti teploty na výšce letu
- o grafem závislosti LWC na průměru kapek (MVD)
- o grafem závislosti korekčního faktoru LWC na ulétnuté vzdálenosti v námrazových podmínkách (mohutnosti oblačnosti)

Pro zvýšení, nebo snížení podílu obsahu kapalné vody v oblačnosti na základě předpokládané mohutnosti oblačnosti vyjádřené ulétnutou horizontální vzdáleností v oblačnosti s jednotkou Námořní míle [NM] je zaveden korekční faktor k_o .

V grafech jsou vyznačeny (znakem „o“) letové případy určené pro analýzu odledňovacího systému. Ty vychází již ze zmíněné interní zprávy a dále z vybraných kombinací meteorologických podmínek. Podmínky jsou volené na základě

- o maximálního korekčního faktoru LWC (mohutnost oblačnosti 5 NM)
- o jednotkového korekčního faktoru LWC (mohutnost oblačnosti 17,4 NM)

s ohledem na potenciální rozhodující případ a závislosti práce odledňovacího systému na čase.

6.1.2.2 PŘERUŠOVANÁ NÁMRAZA S MAXIMÁLNÍ INTENZITOU

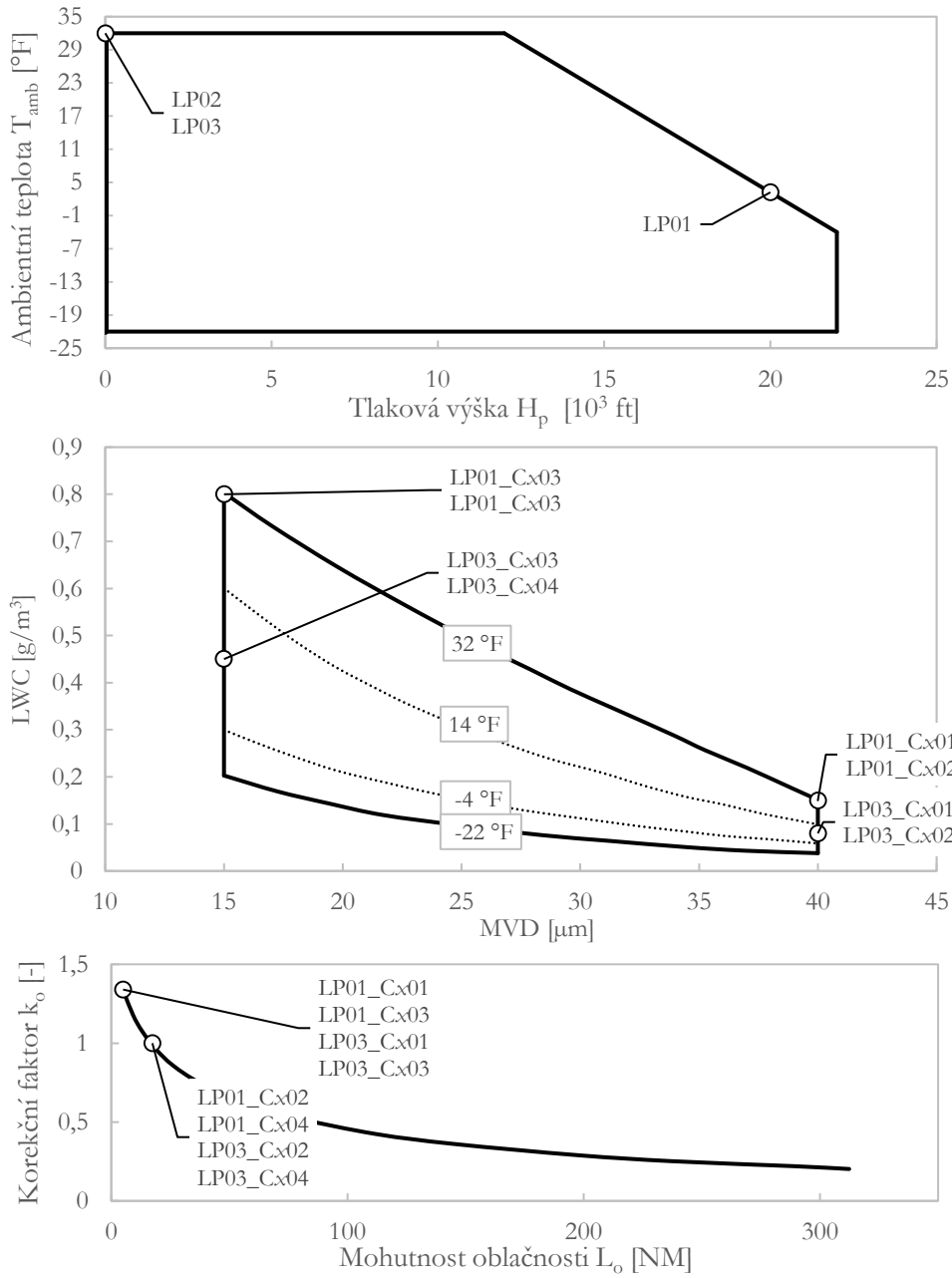
Z anglického ekvivalentu *Intermittent maximum icing*, je tato obálka definována Obr. 6.2, kde je popsána (shora):

- o grafem závislosti teploty na výšce letu
- o grafem závislosti LWC na průměru kapek (MVD)
- o grafem závislosti korekčního faktoru LWC na mohutnosti oblačnosti

V grafech jsou vyznačeny (znakem „o“) letové případy určené pro analýzu odledňovacího systému v závislosti na kombinacích meteorologických podmínek. Podmínky jsou volené na základě

- o hodnoty mohutnosti oblačnosti s korekčním faktorem $k_o = 1$
- o maximální mohutnosti oblačnosti při vzdálenosti 5,21 NM
- o maximální korekční faktor LWC (pro $\tau = 10 \text{ s}$)
- o ekvivalentní délka mezicyklu odledňovacího systému

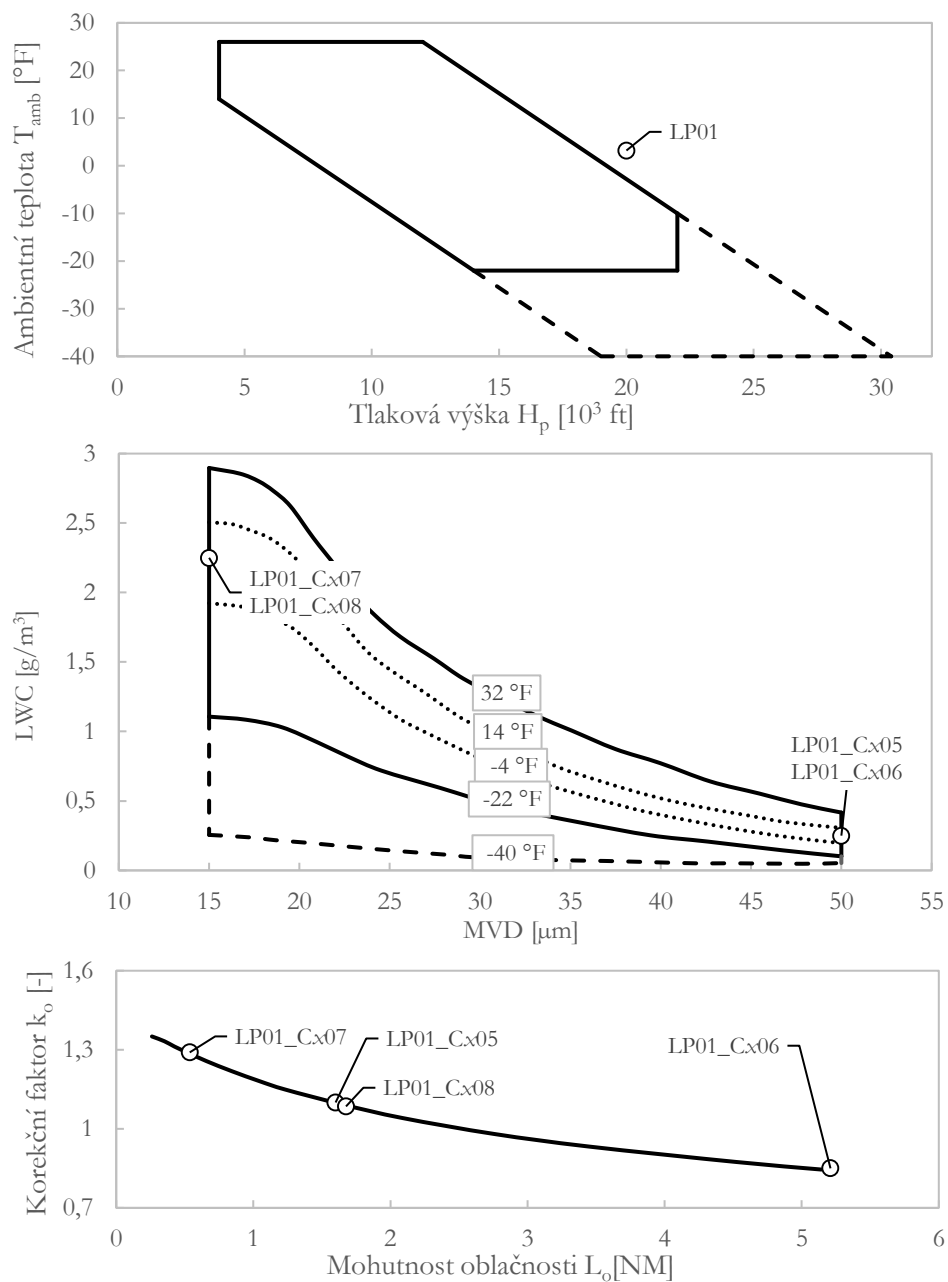
s ohledem na potenciální rozhodující případ, závislosti práce odledňovacího systému na čase a dosažení co největší hodnoty LWC.



Obr. 6.1 Námrazová obálka letounu. Průběžná námraza s maximální intenzitou.

Tab. 6.2 Meteorologické podmínky případů. Průběžná námraza s maximální intenzitou.

	T_{amb} [°F]	MVD [μ m]	k_o [-]	LWC [g/m ³]	L_o [NM]	L_o [m]	τ_o [s]
LP01_Cx01	3,2	40	1,34	0,20	5	9 260	93
LP01_Cx02	1	1	1	0,15	17,4	32 225	325
LP01_Cx03	1	15	1,34	1,07	5	9 260	93
LP01_Cx04	1	1	1	0,80	17,4	32 225	325
LP03_Cx01	32	40	1,34	0,11	5	9 260	176
LP03_Cx02	1	1	1	0,08	17,4	32 225	613
LP03_Cx03	1	15	1,34	0,60	5	9 260	176
LP03_Cx04	1	1	1	0,45	17,4	32 225	613



Obr. 6.2 Námrazová obálka letounu. Přerušovaná námraza s maximální intenzitou.

Tab. 6.3 Meteorologické podmínky případů. Přerušovaná námraza s maximální intenzitou.

	T_{amb} [°F]	MVD [μm]	k_o [-]	LWC [g/m ³]	L_o [nm]	L_o [m]	τ_o [s]
LP01_Cx05	3,2	50	1,1	0,28	1,6	2 963	30
LP01_Cx06	1	1	0,85	0,21	5,21	9 649	97
LP01_Cx07	1	15	1,29	2,90	0,54	993	10
LP01_Cx08	1	1	1,085	2,44	1,68	3 104	45

6.2 DEFINICE NÁMRAZOVÉ OBÁLKY DLE APPENDIX O

Předpis Part 25 Appendix O [13] se zabývá meteorologickými jevy *namrzajícího mrholení a deště*. Také je tento typ námrazy nazýván *velké podchlazené kapky*, vycházející z ang. ekvivalentu Super Large Droplets (SLD). Pro certifikaci odledňovacího systému letounu kategorie CS-23 Commuter (nyní Level IV) není průkaz předpisu vyžadován. I přes tuto skutečnost se letoun může do těchto meteorologických podmínek dostat. Proto bude provedena analýza námrazy typu *namrzajícího mrholení*.

Předpis Part 25 Appendix O je dělen podobně jako předpis Appendix C. Specifikace letových případů je definována stejně jako v kapitole 6.1.1 a Tab. 6.1. Specifikace doby trvání námrazových podmínek je také definována v kapitole 6.1.1.

6.2.1 DEFINICE METEOROLOGICKÉ NÁMRAZOVÉ OBÁLKY

Meteorologická námrazová obálka je definována na základě dvou meteorologických jevů:

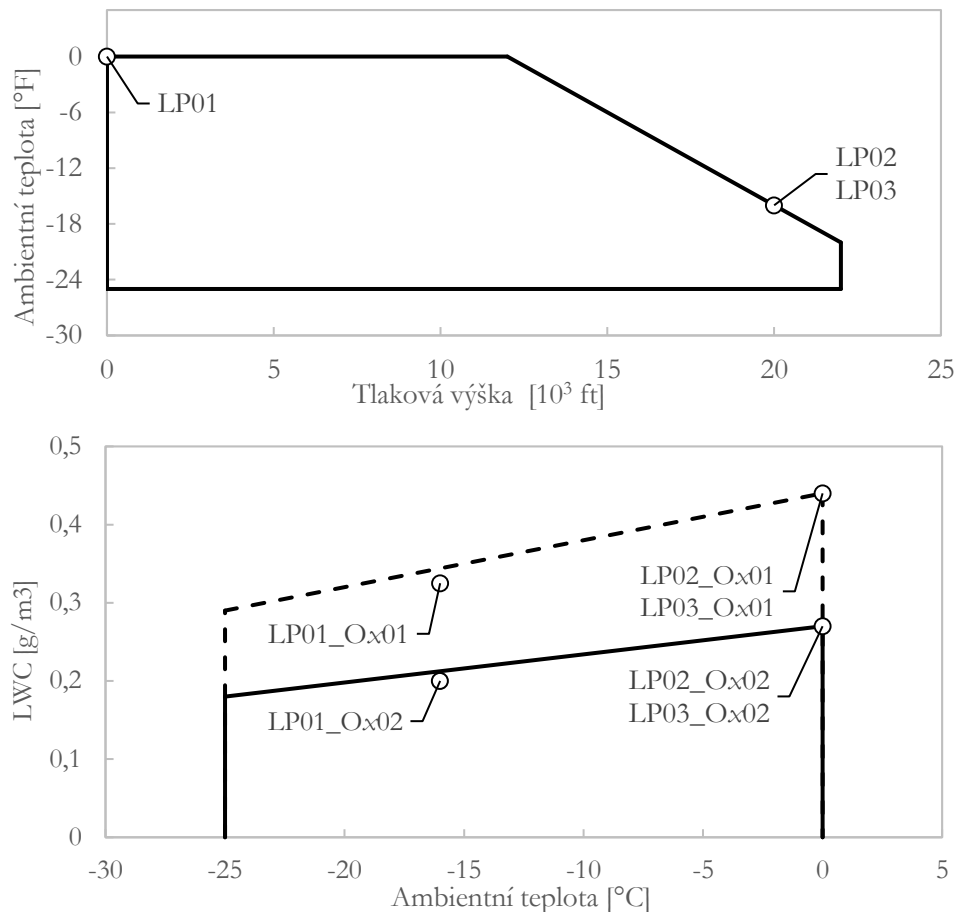
- a) Namrzající mrholení (Freezing Drizzle)
- b) Namrzající déšť (Freezing Rain)

6.2.1.1 NAMRZAJÍCÍ MRHOLENÍ

Namrzající mrholení je těžké predikovat co do místa výskytu. Meteorologická obálka je definována Obr. 6.3, kde je popsána (shora):

- o grafem závislosti teploty na výšce letu
- o grafem závislosti LWC na průměru kapek (MVD)

Korekční faktor k_o je volen pro všechny případy 1. Mohutnost oblačnosti odpovídá $L_o = 17,4$ NM. Hodnoty meteorologické obálky jsou uvedeny v Tab. 6.4.



Obr. 6.3 Námrazová obálka letounu. Namrzající mrholení.

Tab. 6.4 Meteorologické podmínky případů. Namrzající mrholení.

	T_{amb} [°F]	MVD [μm]	k_o [-]	LWC [g/m ³]	L_o		τ_o [°F]
					[nm]	[m]	
LP01_Ox01	3,2	<40 μm^2	1	0,33	17,4	32 225	325
LP01_Ox02	1	>40 μm^3	1	0,20	1	1	1
LP02_Ox01	32	<40 μm	1	0,44	1	1	467
LP02_Ox02	1	>40 μm	1	0,27	1	1	1
LP03_Ox01	1	<40 μm	1	0,44	1	1	613
LP03_Ox02	1	>40 μm	1	0,27	1	1	1

² Dále v práci popsáno jako Drizzle L

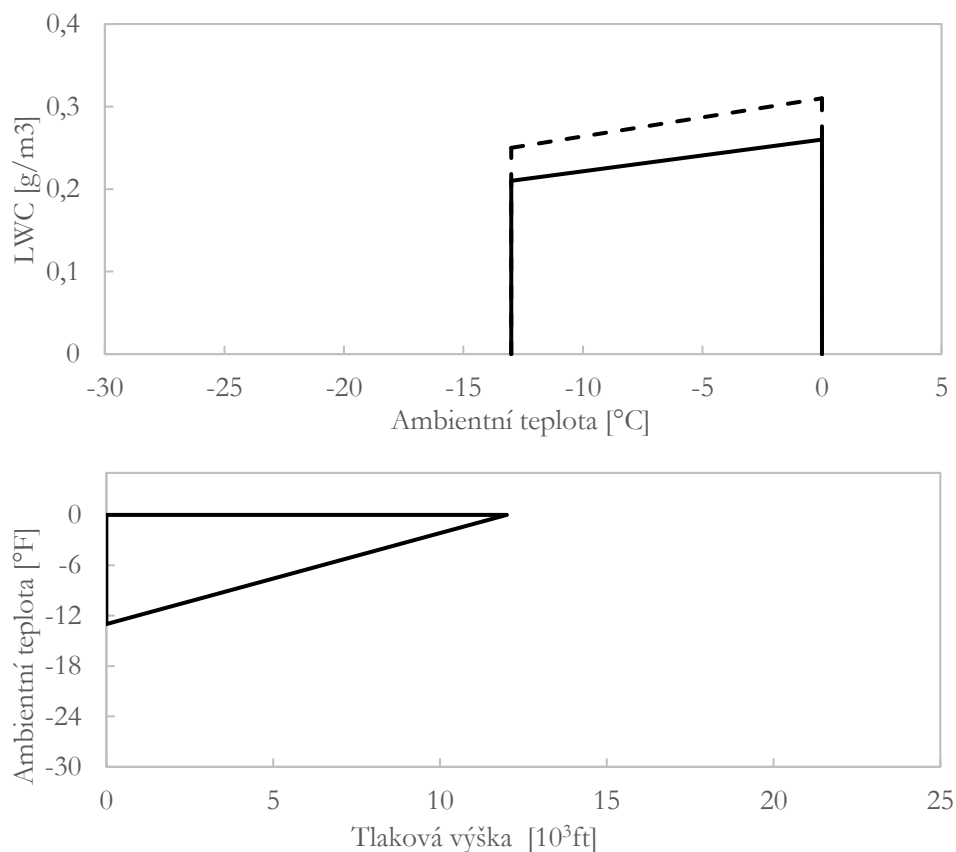
³ Dále v práci popsáno jako Drizzle H

6.2.1.1 NAMRZAJÍCÍ DÉŠŤ

Namrzající déšť je jev, který lze dobře předpovídat meteorologickými předpověďmi počasí a objevuje se při pojíždění, vzletu a přistání. Meteorologická obálka je definována Obr. 6.3, kde je popsána (shora):

- o grafem závislosti teploty na výšce letu
- o grafem závislosti LWC na průměru kapek (MVD)

Mohutnost oblačnosti odpovídá $L_o = 17,4$ NM.



Obr. 6.4 Námrazová obálka letounu. Namrzající déšť.

7 KALIBRACE CFD ŘEŠIČE

Kalibrační úloha má za úkol verifikovat a validovat (dále V&V) zadaný problém pomocí experimentálních úloh, tzv. benchmarků. Význam kalibrační úlohy spočívá v V&V řešiče s reálným experimentem. V případě simulace námrazy se jedná o kalibraci těchto řešičů:

1. Proudové pole (FENSAP flow solver)
2. Trajektorie a dopad částic (DROP 3D)
3. Nárůst a tvar námrazy (ICE 3D)

Každý řešič je V&V podle různých experimentálních dat, která se co nejvíce blíží zadané úloze a vyžaduje validaci více proměnných. Následující kapitoly jsou rozřazeny dle řešičů a podkapitoly dle validovaných proměnných. Pro výběr experimentálních dat byly užity tyto referenční hodnoty:

- Reynoldsovo číslo $Re = 2 - 4 \cdot 10^6$
- Prandtlovo číslo $Pr = 1,3$
- Objekt *Aerodynamický profil*
- Úhel náběhu $AoA = 0 - 5^\circ$

Zdroje jsou s ohledem na zadanou úlohu a dostupnost uvedeny u každé podkapitoly. Následující odstavce popisují V&V jednotlivých řešičů a proměnných.

7.1 POPIS KALIBRAČNÍ ÚLOHY

Kalibrační úlohu je možné popsat těmito charakteristikami:

- Dvoudimenzionální
- Vnější obtékání
- Stacionární proudění
- Zanedbání stlačitelnosti
- Turbulentní proudění
- Drsnost povrchu na okrajové podmínce
- Termodynamická úloha

Výpočetní doména (Obr. 7.1) je tvořena, dle zmíněné charakteristiky kalibrační úlohy kvazi 2D geometrií. Jedná se o plošnou doménu (rovina $x-y$) extrudovanou jedním elementem ve směru osy z . Jednotlivé části výpočetní domény – okrajové podmínky (také OP) jsou:

Vstup (Inlet) je definován parametry

- Relativní tlak [Pa]
- Statická teplota [K]
- Složky nabíhajícího proudu V_x, V_y [m/s]

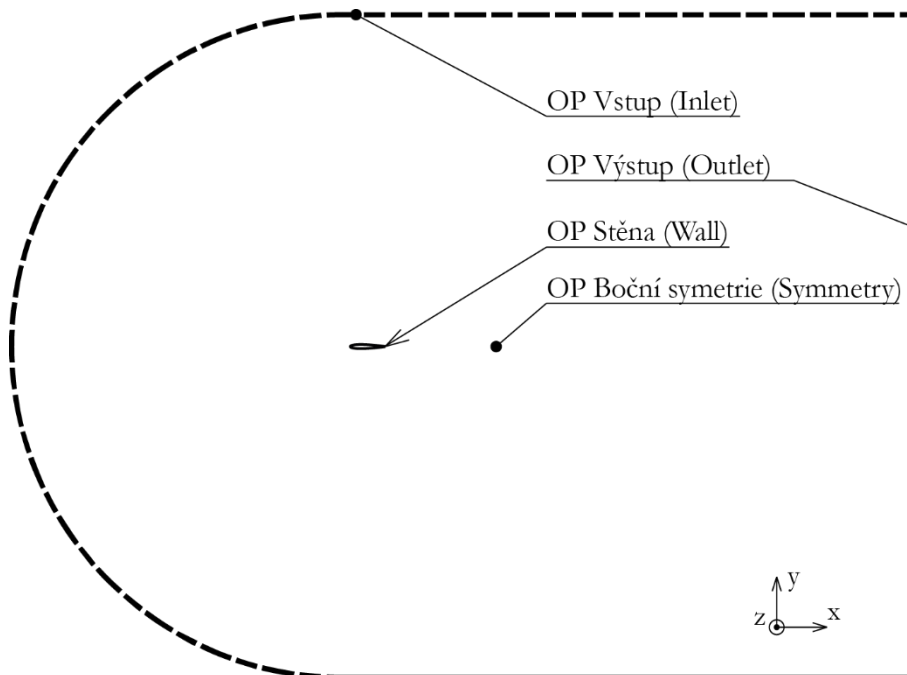
Outlet (výstup) je definován parametrem:

- Absolutní tlak [Pa]

Boční symetrie (Symmetry) je definována nastavením okrajové podmínky v řešiči

Stěna (Wall) je definována parametry:

- Podmínka ulpívání na povrchu (No-slip)
- Teplota [K] nebo Tepelný tok [W/m²]



Obr. 7.1 Výpočetní doména kalibračních úloh.

OP Výstup je svázán s OP Vstup, kde je uvažován nulový tlakový spád a tedy:

- OP Vstup – relativní tlak je 0 [Pa]

OP Stěna je definována neměnnou podmínkou ulpívání na povrchu. Další parametry OP se mění dle zadání úlohy. Vlivem nutnosti kalibrace více parametrů bylo použito více zdrojů experimentálních dat. U každé kalibrační úlohy je uvedeno nastavení okrajových podmínek.

7.2 V&V PROUDOVÉ POLE

Pro výpočet proudového pole byly zvoleny dva řešiče pro dosažení křížové V&V s experimentálními daty. Křížová V&V byla použita z důvodu dřívější zkušenosti s řešičem CFX a lepší kontrolou výpočtu. Použité řešiče:

- CFX
- FENSAP flow solver

Verifikace řešičů byla provedena vývojáři společnosti ANSYS a nebyla více v této diplomové práci prokazována. Jedná se zejména o numerickou konvergenci výpočetního kódu. Avšak je nutné brát v zřetel průběh reziduí během iteračního procesu, kdy by nemělo docházet k extrémním výkyvům hodnot reziduí během jednoho konkrétního nastavení řešiče. Pokud by k takovým výkyvům došlo, i přes výslednou dobrou úroveň konvergence, by výsledek nemusel odpovídat fyzikální podstatě věci.

Validace řešičů byla rozdělena do několika skupin. Hlavní cíl výpočtu proudového pole je zajistit správný výpočet *mezí vrstvy*. A to jak hybnostní, tak termodynamické.

7.2.1 HODNOTA y^+

Pro nastavení řešičů byl použit turbulentní model proudění k-omega SST nebo Spalart-Allmaras. V obou případech je potřebné pro dosažení dobrých výsledků vytvořit takovou síť v oblasti předpokládané mezní vrstvy, aby bylo dostatečné množství buněk v celém profilu mezní vrstvy. Jelikož se jedná o turbulentní mezní vrstvu, dělí se na

- o Viskózní podvrstvu (Viscous Sublayer)
- o Mezivrstvu (Buffer Layer)
- o Logaritmickou svrchní vrstvu (Log-law layer)

Viskózní podvrstva je v případě hydraulicky hladké stěny v oblasti hodnot $1 < y^+ < 5$. V případě stěny s drsností se viskózní podvrstva nevyvine.

Pro správné ošetření *hybnostní mezní vrstvy* (okrajové podmínky Wall) je nutné docílit hodnot proměnné y^+

- a) hydraulicky čistý povrch: $y^+ \leq 1$
- b) povrch s drsností: hodnota y^+ možné o jeden řád vyšší ve srovnání s hydraulicky čistým povrchem. Řešič automaticky zanedbává viskózní podvrstvu a odečtená hodnota y^+ odpovídá maximu z bezrozměrné drsnosti povrchu $\frac{h_s^+}{2}$, výšky první buňky sítě, hodnotou 11,06.

V případě *energetické mezní vrstvy* je podmínka rozšířena o hodnotu Prandtlůva čísla a bere se v úvahu hodnoty $Pr \cdot y^+$, kde Prandlovo číslo pro vzduch je 1,3:

- a) hydraulicky čistý povrch: $Pr \cdot y^+ \leq 1$
- b) povrch s drsností odpovídá podmínce hybnostní mezní vrstvy

Nastavení řešiče je uvedeno v Tab. 7.1.

Tab. 7.1 Nastavení řešičů pro analýzu hodnoty y^+ .

Rychlost	$v_\infty = 44,39 \text{ m/s}$
AoA	$AoA = 0 \text{ deg}$
Okolní atmosferický tlak	$p_{atm} = 101\,325 \text{ Pa}$
Statická teplota	$T_{stat} = 265,5 \text{ K}$
Reynoldsovo číslo	$Re = 3,5 \text{ mil}$
OP Stěna	Hydraulicky hladká / Drsnost

Jako řídicí prvek kontroly hodnot y^+ slouží tloušťka první buňky mezní vrstvy, která je dále uváděna jako bezrozměrná veličina vzhledem k hloubce profilu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 7.2.

Tab. 7.2 Výsledné hodnoty analýzy hodnoty y^+ .

Název sítě	Tloušťka	Ošetření okrajové	y^+	$Pr \cdot y^+$
	první vrstvy	podmínky		
Rev 23	$1 \cdot 10^{-8}$	hydraulicky hladká	0,002	0,0026
Rev 23	$1 \cdot 10^{-7}$		0,02	0,026
Rev 24	$1 \cdot 10^{-6}$		0,2	0,26
Rev 25	$1 \cdot 10^{-5}$		2	2,6
Rev 26	$1 \cdot 10^{-4}$		10	13
Rev 23	$1 \cdot 10^{-8}$	4ekv. drsnost $5,5 \cdot 10^{-4}$	123	160
Rev 22	$1 \cdot 10^{-7}$		80	104
Rev 24	$1 \cdot 10^{-6}$		90	117
Rev 25	$1 \cdot 10^{-5}$		90	117
Rev 26	$1 \cdot 10^{-4}$		160	208

Na základě analýzy byla pro další výpočty zvolena síť s:

- o tloušťkou první vrstvy: $1 \cdot 10^{-6}$,

která má hodnotu y^+ 0,2 resp. $Pr \cdot y^+$ 0,26. Je bráno do úvahy variace Reynoldsova čísla pro různé úlohy, a tedy i rozptyl hodnot y^+ resp. $Pr \cdot y^+$.

7.2.2 NEZÁVISLOST SÍTĚ

Pro vyšetření nezávislosti výsledků řešení na použité síti byla provedena analýza s proměnným počtem buněk. Nezávislost sítě byla provedena na proměnných:

- o Součinitel odporu c_D
- o Součinitel vztlaku c_L
- o Smykové napětí na povrchu τ_w [Pa]

Síť je vypracována v programu ICEM CFD. Síť je zobrazena na Obr. 7.2 a detail na Obr. 7.3. Charakteristika sítě:

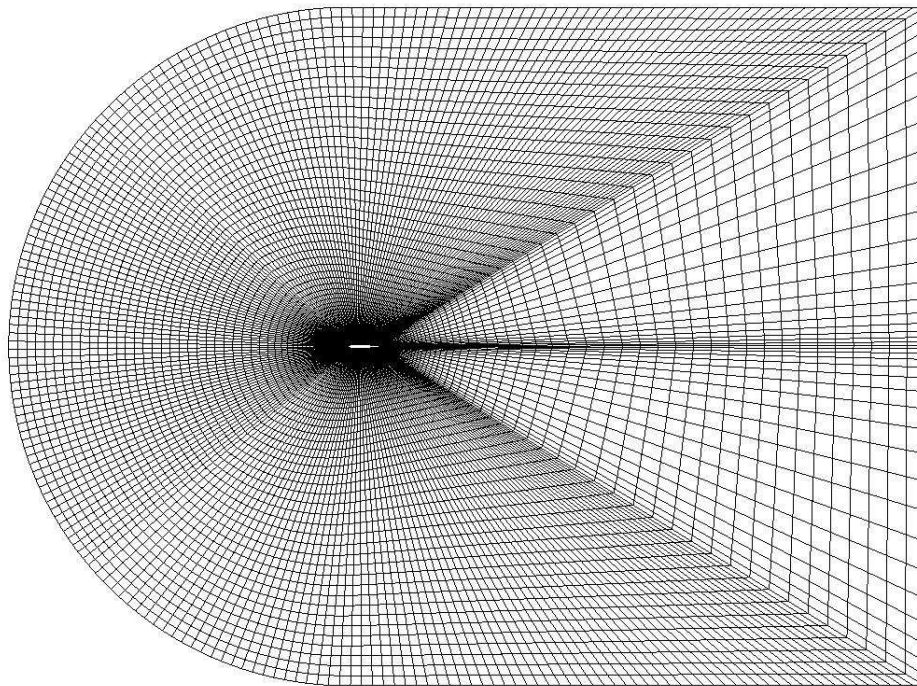
- o kvazi 2D síť – extruze jedné buňky ve směru osy x
- o strukturovaná síť s řídicími bloky

Na základě předchozí kapitoly byla určena tloušťka první buňky na OP Stěna, která je pro všechny síť v této analýze stejná. Počet a rozložení buněk po profilu (OP Stěna) se řídí bloky znázorněných na Obr. 7.5. Charakteristika sítě je uvedena v Obr. 7.5 a Tab. 7.3.

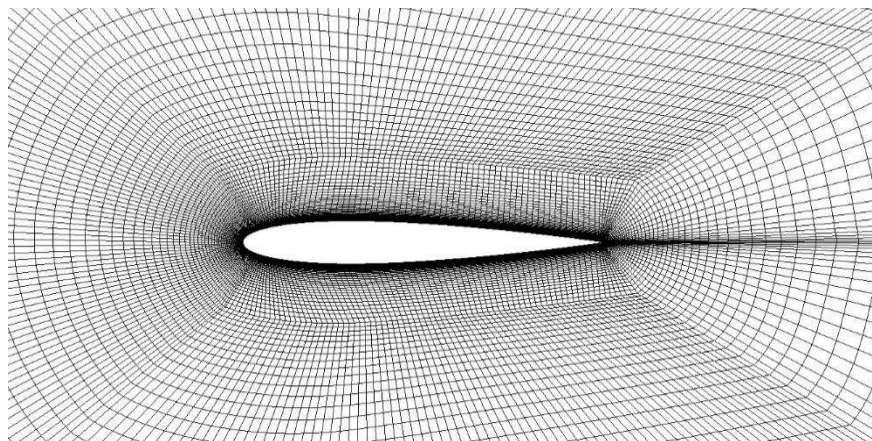
Tab. 7.3 Nastavení řešičů pro analýzu nezávislosti sítě.

Rychlost	$v_\infty = 44,39 \text{ m/s}$
AoA	$AoA = 4 \text{ deg}$
Okolní atmosférický tlak	$p_{atm} = 101\,325 \text{ Pa}$
Statická teplota	$T_{stat} = 265,5 \text{ K}$
Reynoldsovo číslo	$Re = 3,5 \text{ mil}$
OP Stěna	Drsnost, Tepelný tok=0
Turbulentní model	SST

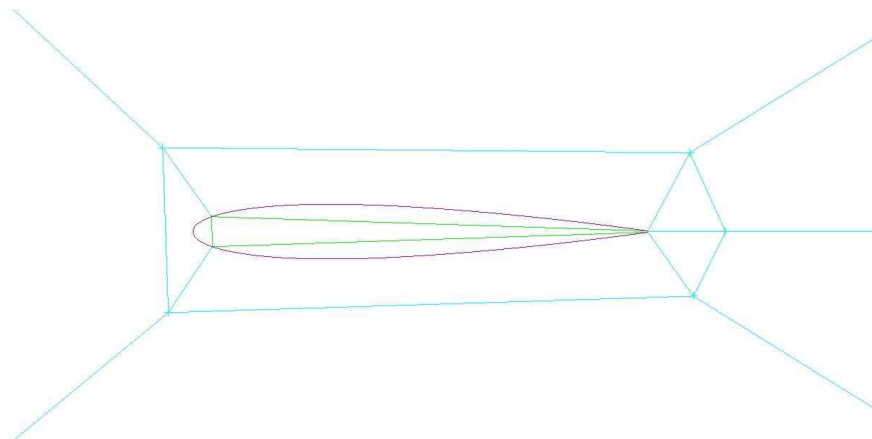
⁴ Nastavení řešiče na Send-grain Roughness $5,5 \cdot 10^{-4}$



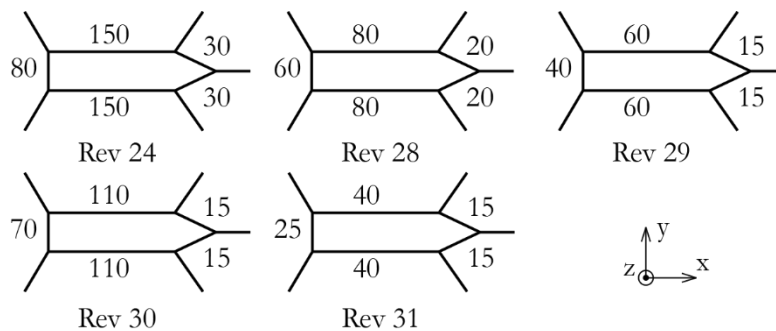
Obr. 7.2 Síť použita pro analýzu nezávislosti sítě. V podobných variantách je použita síť i pro další výpočty. Rev28, 122 000 buněk.



Obr. 7.3 Detail sítě na profil (OP Stěna). Rev28, 122 000 buněk.



Obr. 7.4 Detail rozložení bloků sítě. Rev28, 122 000 buněk.



Obr. 7.5 Schéma počtu buněk sítě na povrchu profilu (OP Stěna).

Tab. 7.4 Charakteristika sítí pro analýzu nezávislosti sítě.

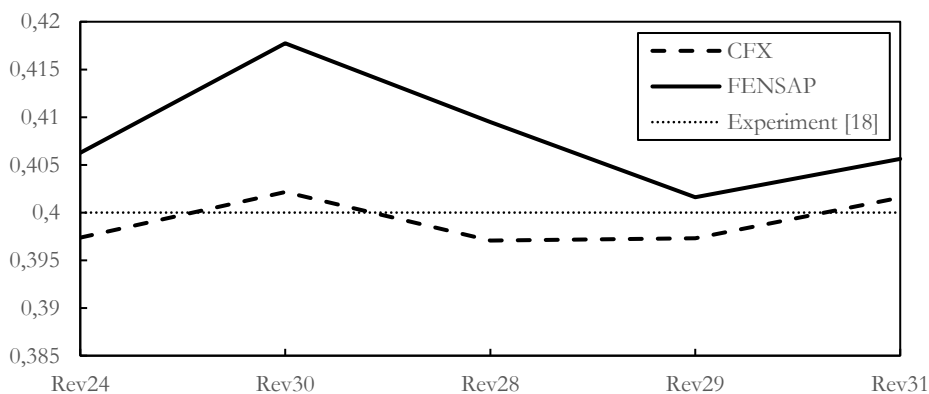
Název sítě	Počet buněk na OP Wall	Celkový počet buněk
Rev 24	430	208 000
Rev 30	320	161 000
Rev 28	260	122 000
Rev 29	190	89 000
Rev 31	135	62 000

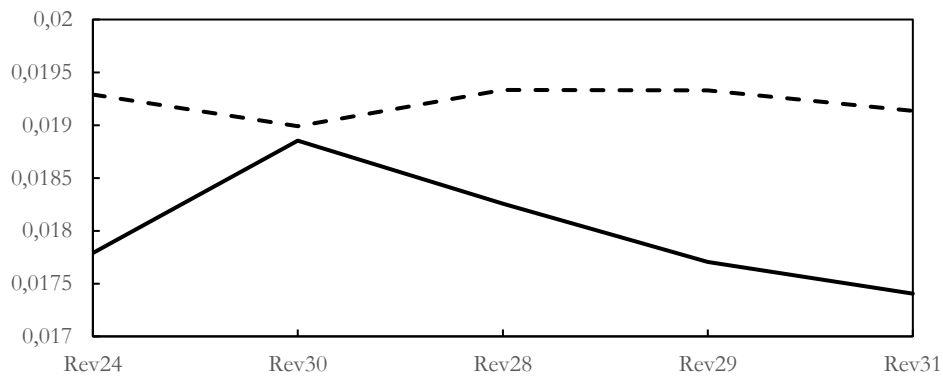
Analýza byla provedena v řešičích CFX a FENSAP flow solver.

CFX řešič vykazoval velmi dobrou konvergenci. Při nejhrubší síti mělo maximální RMS residuum MomV $5 \cdot 10^{-4}$. Konvergence zbylých sítí splnily kritérium RMS $1 \cdot 10^{-6}$.

FENSAP flow solver vykazoval konvergenci podobnou jako v případě CFX řešiče. Při nejhrubší síti mělo maximální residuum Omega $1 \cdot 10^{-3}$. Což je možné pokládat také za dostačující.

Sledované hodnoty součinitele vztlačku (Obr. 7.6 nahoře) vykazují pro oba řešiče konstantní průběh. Součinitel odporu (Obr. 7.6 dole) je u řešiče CFX konstantní. Řešič FENSAP vykazuje mírnou závislost u sítí s menším počtem buněk (Rev29, 31).





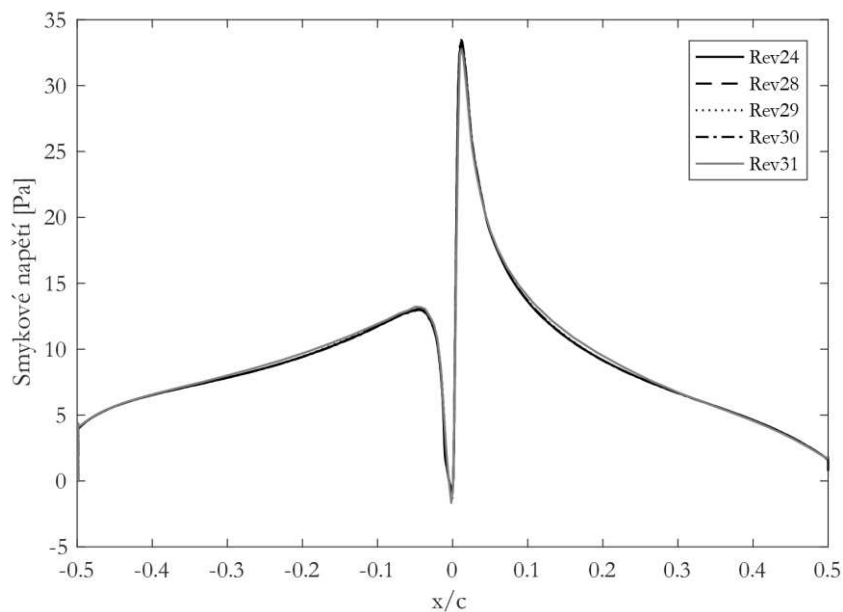
Obr. 7.6 Závislost součinitele c_L na typu sítě (nahoře). Závislost součinitele c_D na typu sítě (dole).

Dále byla provedena analýza rozložení smykového napětí τ_w u povrchu profilu. Tato analýza se zaměřuje na správnou predikci mezní vrstvy.

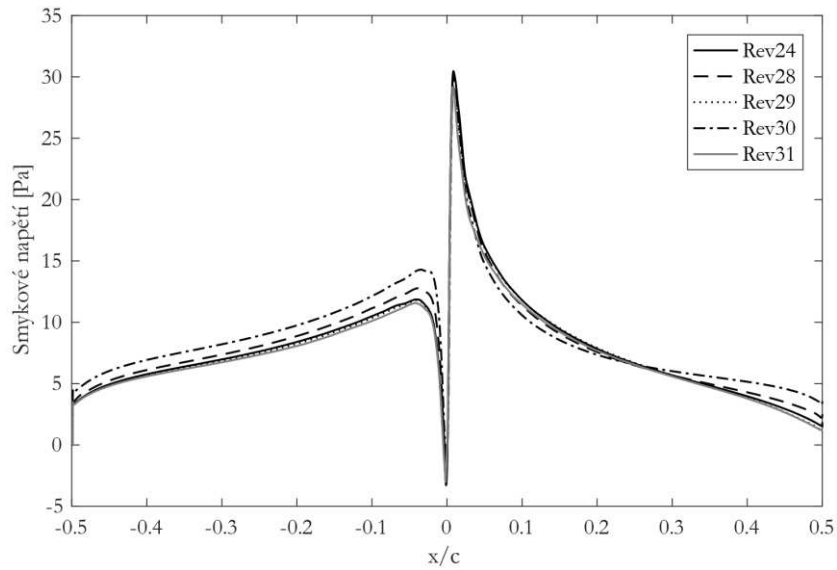
CFX řešič vykazuje dobrou schodu hodnot smykového napětí u všech sítí (Obr. 7.7).

FENSAP řešič vykazuje větší rozpětí hodnot smykového napětí po povrchu profilu. Tento rozptyl není závislý na počtu buněk sítě, jak je patrné z Obr. 7.8. Závislost je dána menším počtem dosažených iterací u sítí Rev 28, 30. V obou případech je proměnná c_D a c_L ustálená, ovšem energetické proměnné nebyly v čase ukončení výpočtu dostatečně ustálené.

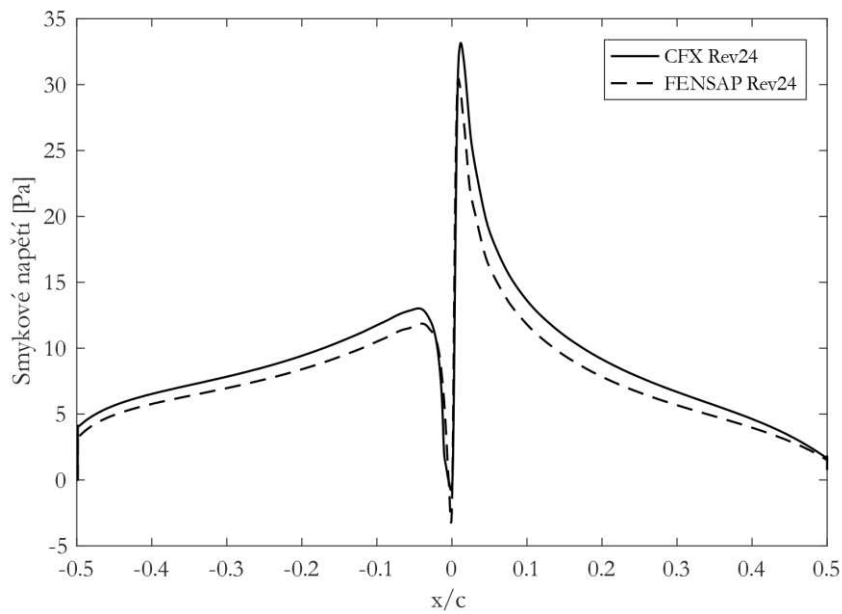
Z porovnání obou řešičů (Obr. 7.9) vyplývá, že řešič CFX vykazuje větší hodnoty smykového napětí po profilu, a to jak v maximu, tak v minimum.



Obr. 7.7 Smykové napětí po povrchu profilu. Řešič CFX.



Obr. 7.8 Smykové napětí po povrchu profilu. Řešič FENSAP.



Obr. 7.9 Smykové napětí po povrchu profilu. Porovnání řešičů CFX a FENSAP. Síť Rev 24.

Na základě analýzy nezávislosti sítě byla zvolena pro další výpočty síť s:

- o Minimální počet buněk na OP Stěna: 300
- o Minimální celkový počet buněk: 150 000
- o Řešič FENSAP s dostatečným počtem iterací

7.3 V&V DOPADŮ KAPEK

Pro výpočet dopadů kapek je použit řešič DROP3D, který je součástí balíčku FENSAP. Tento řešič je vyvinut pro potřeby simulace námrazy a je propojen s řešičem proudového pole FENSAP flow solver a řešičem růstu námrazy ICE3D.

Verifikace řešiče byla provedena vývojáři společnosti ANSYS a nebyla více v této diplomové práci prokazována.

Validace řešiče byla provedena na základě experimentálních dat [10]. Byla provedena simulace se vstupními podmínkami proudového pole a čtyř rozdílných MVD kapek: 11, 21, 79 a 168 μm . V prvních dvou případech se jedná o malé kapky, kde MVD 20 μm je střední hodnota užívaná pro prokazování námrazových podmínek dle předpisu FAR 23/CS 23. Zbylé dvě velikosti jsou již kategorie SLD (Super Large Droplets) velké podchlazené kapky, které se již velikostí blíží charakteristikám namrzajícího mrholení.

Nastavení řešiče proudového pole je uvedeno v Tab. 7.5 a řešiče DROP3D je uvedeno v Tab. 7.6.

Tab. 7.5 Nastavení řešiče FENSAP flow solver analýzy dopadu kapek

Rychlost	$v_{\infty} = 78,25 \text{ m/s}$
AoA	$AoA = 1,5 \text{ deg}$
Okolní atmosférický tlak	$p_{atm} = 101\,325 \text{ Pa}$
Statická teplota	$T_{stat} = 289,0 \text{ K}$
Reynoldsovo číslo	$Re = 4,8 \text{ mil}$
OP Stěna	Tepelný tok=0
Aerodynamický profil	GLC 305

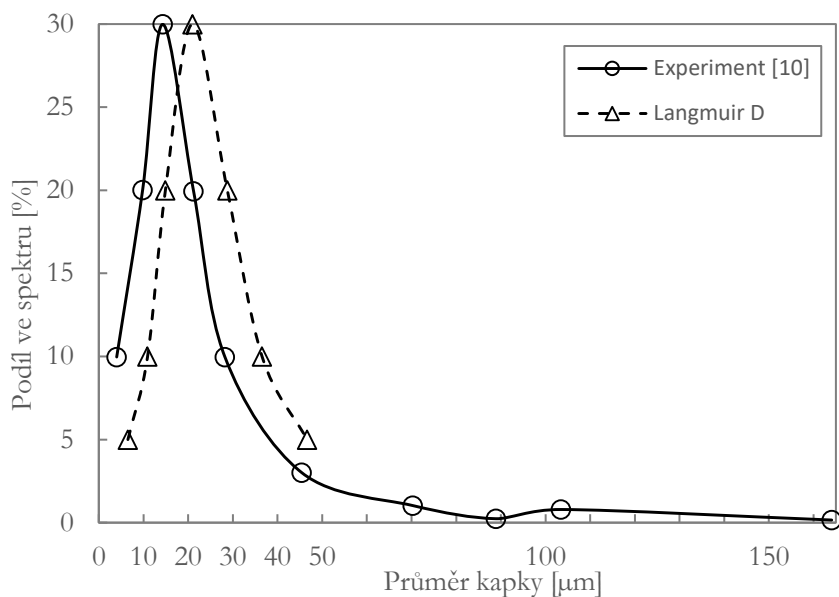
Tab. 7.6 Nastavení řešiče DROP3D analýzy dopadu kapek

Název simulace	MVD	LWC
Val_1	11	0,118
Val_2	21	0,521
Val_3	79	0,496
Val_4	168	0,747

Při analýze dopadu částic byl zvolen aerodynamický model odporu částic „extended Reynolds“, kde korelovaný odpor kapek je závislý na Reynoldsově čísle. Na rozdíl od základního nastavení „Default“ obsahuje model více korelačních vztahů. Do výpočtu není zahrnuto gravitační zrychlení, konečná rychlost částic ani případný dopad kapek s rozprsknutím.

Střední objemový průměr kapky MVD je definován jako střední hodnota průměrů celého spektra kapek nalétávajících na těleso. Velikost průměru vychází z průměru koule zaujímající stejný objem jako kapka. Za tímto účelem byla dříve provedena letová měření v námrazových podmínkách, která definovaly reálná spektra Langmuir A až E. V experimentálním měření [10], se kterým byla provedena validace dopadu kapek, je spektrum Langmuir D bráno jako referenční. Ovšem během experimentálního měření bylo v aerodynamickém tunelu vyhodnocené reálné spektrum, které poté vstupovalo do srovnávacích simulací programem LEWICE. Aplikované rozložení pro LEWICE simulaci bylo definováno 27 frakcí. Pro další sadu simulací bylo použito ekvivalentní spektrum s 10 frakcemi.

Validace byla v této práci provedena na spektru Langmuir D se 7 frakcemi se srovnáním se spektrem z experimentu [10] s 10 frakcemi. Porovnání spekter je uvedeno na Obr. 7.10 a výsledné srovnání sběrné účinnosti spekter je na Obr. 7.12.



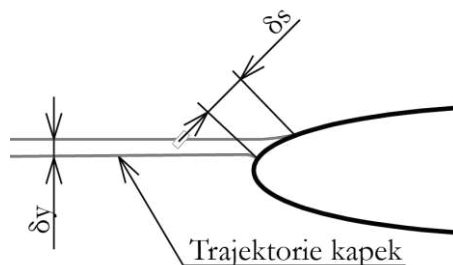
Obr. 7.10 Spektra dopadajících kapek.

Obsah kapalné vody LWC v atmosféře je dán okamžitou hodnotou v dané fázi letu letounu, který prolétá oblačností. V případě simulace je obsah kapalné vody bráno jako konstantní hodnota. V opačném případě by simulace byla nestacionární. V případě kalibrační úlohy jsou hodnoty LWC uvedeny v Tab. 7.6.

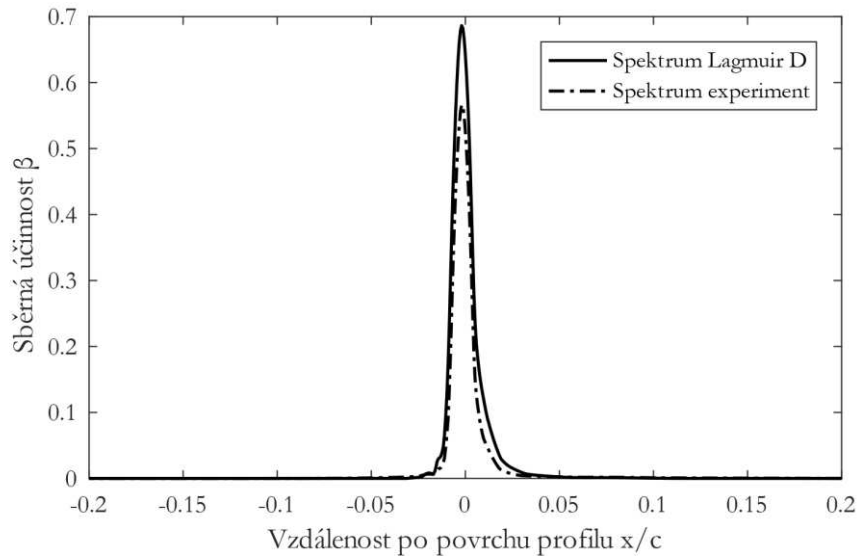
Vyhodnocení dopadu kapek je na Obr. 7.13 - Obr. 7.14. Jedná se o závislost sběrné účinnosti β na vzdálenosti po povrchu profilu od počátku souřadnic profilu (způsob vyhodnocení viz kapitola 8.2).

Sběrná účinnost β je hodnota vyjadřující rozložení dopadajících kapek na těleso (Obr. 7.11). Kde pro každý rozsah δy odkud vylétají částice z nerušeného proudu vzduchu existuje rozsah δs na povrchu tělesa na který kapky dopadají. V případě proměnných průměru dopadajících kapek se vyšetří jednotlivé frakce a následně je vypočítán vážený průměr sběrné účinnosti jednotlivých frakcí.

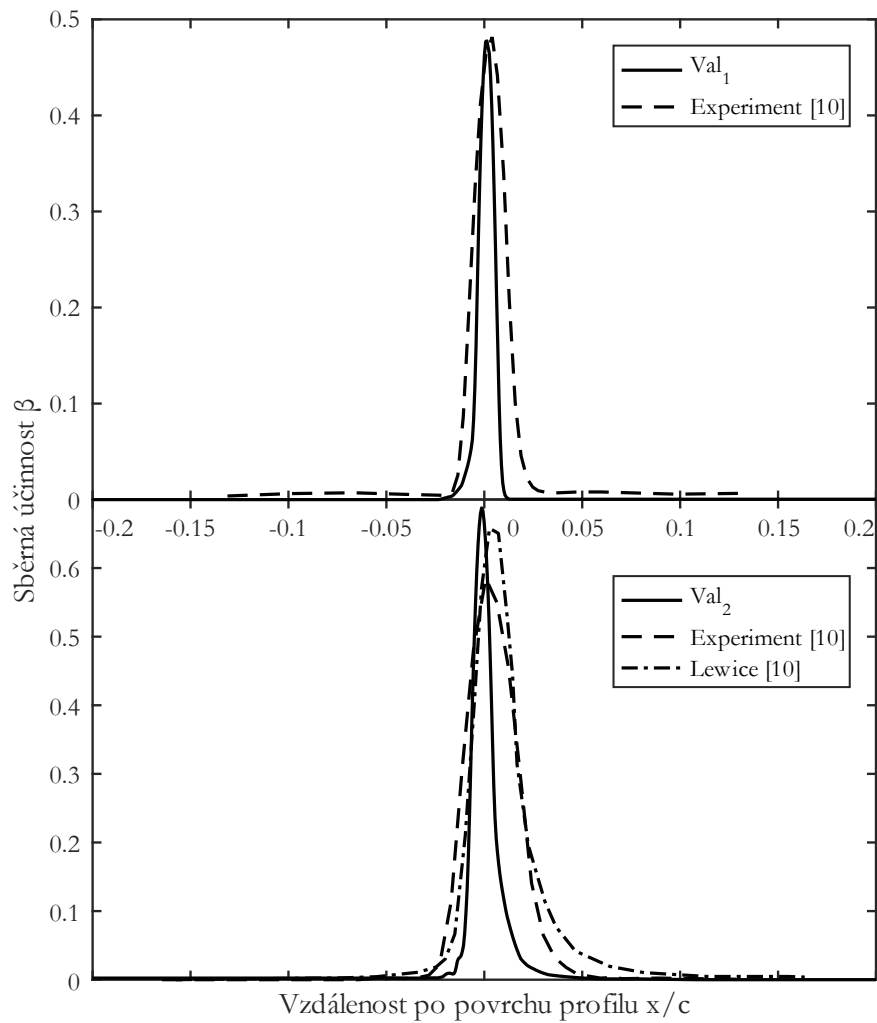
$$\beta = \frac{\delta y}{\delta s} \quad (7.1)$$



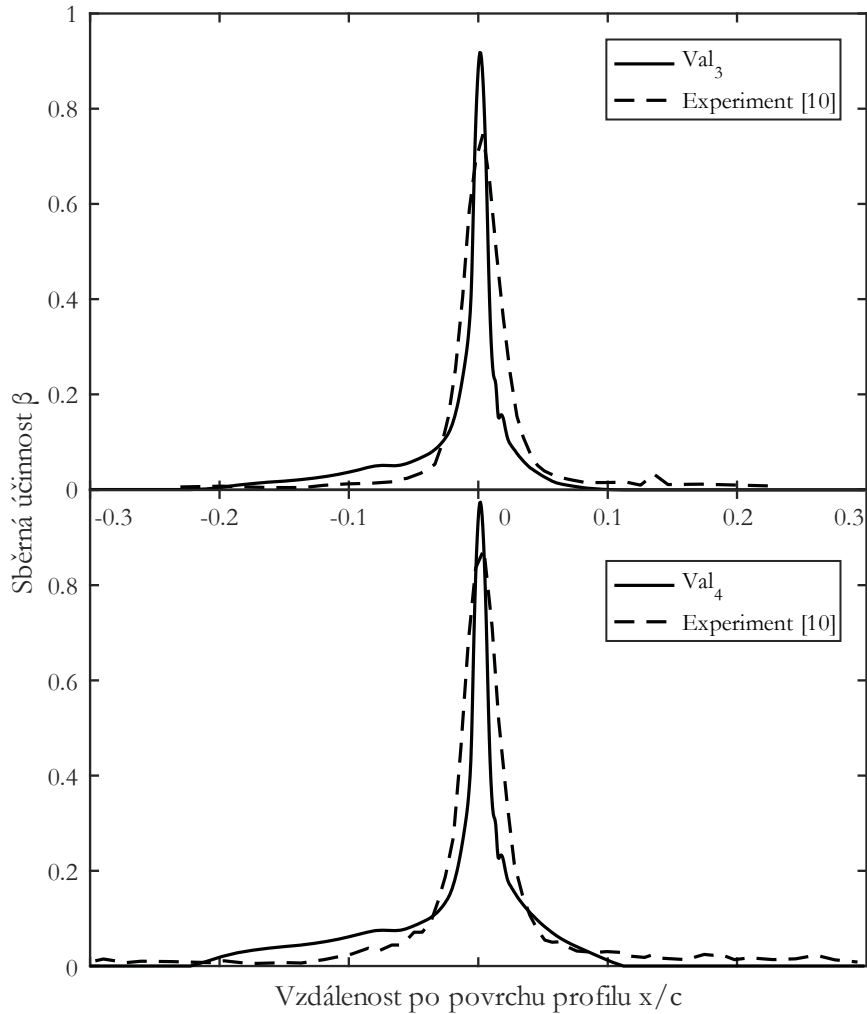
Obr. 7.11 Sběrná účinnost β



Obr. 7.12 Porovnání spekter Langmuir D a experimentálně naměřeného spektra [10].



Obr. 7.13 Celková sběrná účinnost MVD 11 μm (nahoře) a 21 μm (dole). Spektrum Langmuir D.



Obr. 7.14 Celková sběrná účinnost. MVD $79 \mu\text{m}$ (nahoře) a $168 \mu\text{m}$ (dole).
Spektrum Langmuir D.

Maximum sběrné účinnosti je v případě Val_1 totožné. V případě Val_2–4 jsou maxima vyšší než experimentální průběhy. Zde je nutné podotknout, že pokud se použije spektrum dopadajících částic stejné s experimentem (v simulacích použito Langmuir D), je výsledek přesnější. Srovnání je patrné z Obr. 7.12, kde je provedena simulace Val_2 na porovnání obou spekter.

Dolní rozhraní dopadu částic je takové místo, kde je hranice dopadu jakýchkoli částic na dolní straně profilu. To v případech Val_1–2 vykazuje dobrou shodnost s experimentem, v případech Val_3–4 je výsledek konzervativní vůči experimentu.

Horní rozhraní dopadu částic je v případech Val_1–2 menší, než je experiment, na co je nutné brát ohled při následné analýze. Val_3–4 vykazuje velmi dobré výsledky.

7.4 V&V TVARU NÁMRAZY

Pro výpočet tvaru námrazy byl použit řešič ICE3D, který je součástí balíčku FENSAP. Tento řešič je vyvinut pro potřeby simulace námrazy a je propojen s řešičem proudového pole FENSAP flow solver a řešičem dopadu kapek DROP3D.

Jako vstupní data pro simulaci námrazy slouží proudové pole, „Gresho“ tepelný tok, zejména v oblasti mezní vrstvy, sběrná účinnost dopadu kapek a meteorologické námrazové podmínky. Vstupní data vychází ze simulací řešičů FENSAP flow solver a DROP3D.

Simulace námrazy je komplexní termodynamický proces, který je citlivý na změnu vstupních podmínek.

Verifikace řešiče byla provedena vývojáři společnosti ANSYS a nebyla více v této diplomové práci prokazována.

Validace byla provedena pro šest námrazových podmínek dle experimentálních dat [6]. Jedná se o experimentální měření v námrazovém tunelu IRT s následným srovnáváním tvarů námrazy s řešiči námrazy DRA, NASA a ONERA. Další informace vychází z [5] [3] a [7].

Meteorologické podmínky jednotlivých validačních příkladů jsou uvedeny v Tab. 7.7. Nastavení řešiče proudového pole je uvedeno v Tab. 7.8. Simulace byla provedena na profilu NACA 0012.

Tab. 7.7 Meteorologické podmínky analýzy růstu námrazy

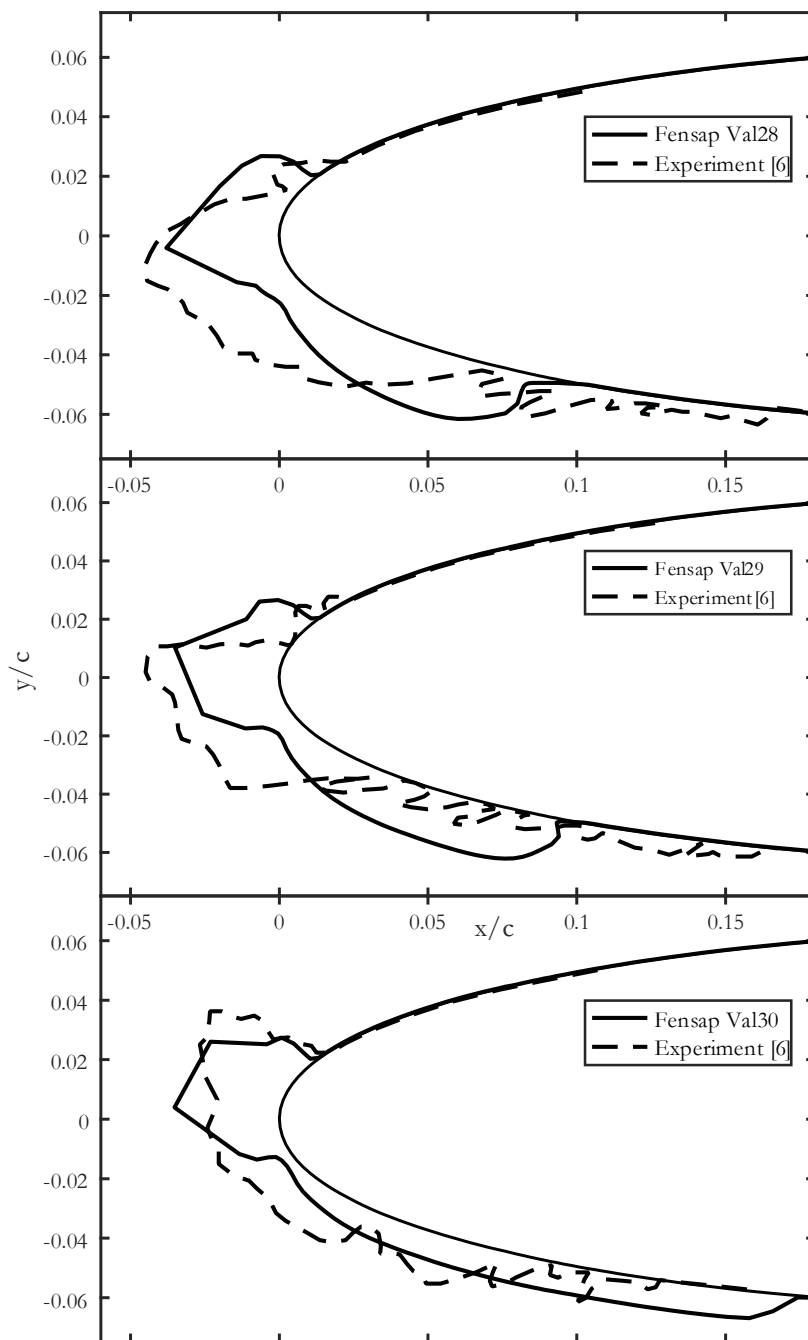
	T		LWC	MVD	τ
	[°C]	[K]	[g/m ³]	[μ m]	[s]
Val_27	-27,8	245,35	1,3	20	480
Val_28	-19,8	253,35			
Val_29	-13,9	259,25			
Val_30	-6,7	266,45			
Val_34	-16,6	256,55	1,05		372

Tab. 7.8 Nastavení řešiče FENSAP analýzy růstu námrazy

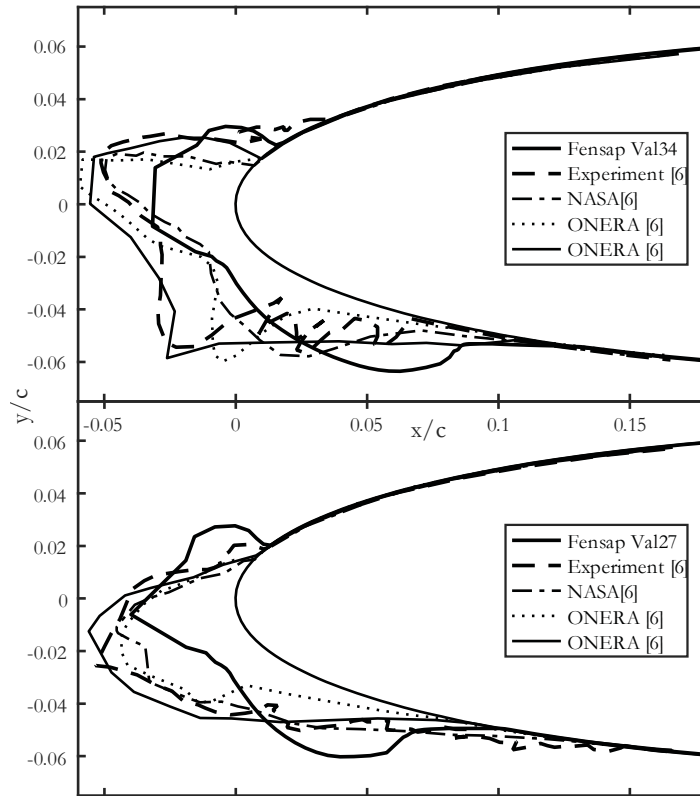
	v_{∞}	AoA	p_{amb}	Re
	[m/s]	[deg]	[kPa]	[-]
Val_27	58,1	4	95,61	2,6 mil
Val_28				
Val_29				
Val_30				
Val_34	93,9		92,06	3,0 mil

Na základě zdrojů [1], [2] a [17] byly navrženy základní okrajové podmínky pro OP Stěna, které mají vliv na tvorbu námrazy. Srovnání tvarů námrazy je na Obr. 7.15 a Obr. 7.16. Dále byly provedeny parametrické studie, které objasňují nastavení okrajových podmínek řešiče pro potřebný růst námrazy. Jedná se o parametrické studie:

- o Stanovení termodynamické podmínky OP Stěna
- o Počet kroků simulace – deformace sítě, přepočítání proudového pole a dopadu kapek



Obr. 7.15 Srovnání tvarů nábřazy simulace Val 28-30 s experimentálními daty [6].



Obr. 7.16 Srovnání tvarů námrazy simulace Val 27 a 34 s experimentálními daty [6] včetně srovnání s jinými řešiči.

7.4.1 PARAMETRICKÁ STUDIE TERMODYNAMICKÉ PODMÍNKY OP STĚNA

Vlivem termodynamického procesu dochází ke změně energetické bilance na povrchu křídla. Tento proces může být klasifikován dle [17] jako:

- Proces s nulovým tepelným tokem $q_w = 0$ na rozhraní OP Stěna, kde v CFD řešičích je bezrozměrná teplota T^+ mezní vrstvy dána vztahem (3.1).
- Proces s nenulovým tepelným tokem $q_w \neq 0$, kde je zadána teplota T_w a následně dopočítán tepelný tok q_w

$$T^+ = \frac{\rho c_p u^* (T_w - T_f)}{q_w}, \quad (7.2)$$

kde T_w je teplota stěny, T_f je teplota okolní tekutiny. Okrajové podmínky použité v parametrické studii jsou uvedeny v Tab. 7.9. Adiabatická teplota T_{adiab} je teplota stagnačního bodu dána vztahem

$$T_{adiab} = T_{stat} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_\infty^2 \right), \quad (7.3)$$

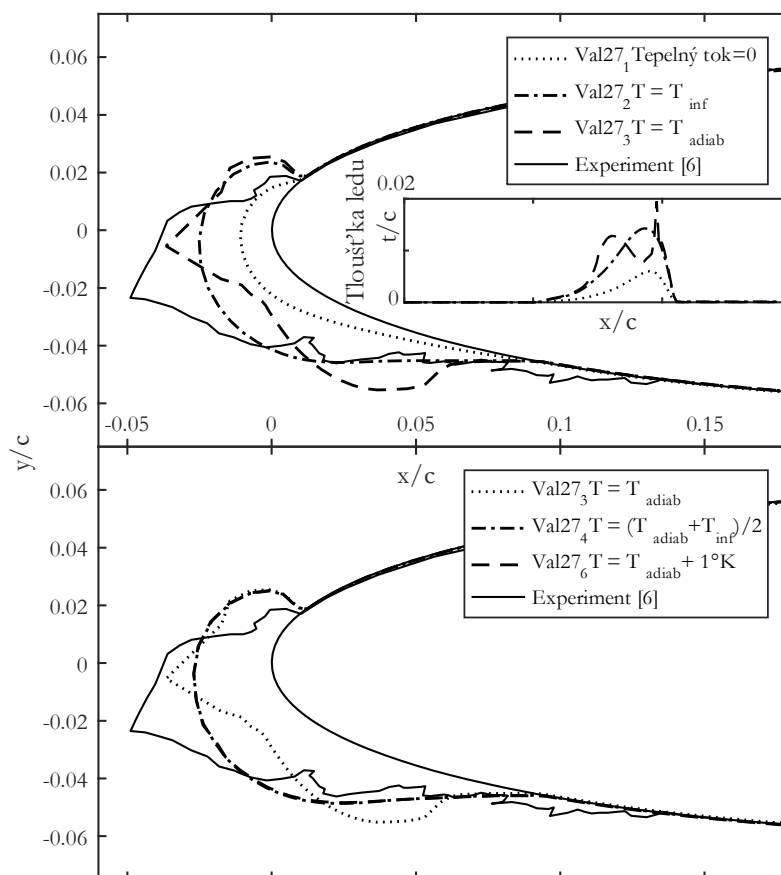
kde γ je polytropický (zde adiabatický) exponent) a M_∞ je Machovo číslo. Teplota T_{adiab} je doporučena v Uživatelské příručce FENSAP-ICE [17].

Tab. 7.9 Parametrické ošetření okrajových podmínek OP Stěna

Název simulace	Okrajová podmínka OP Stěna
27_1	$q_w = 0$
27_2	$T_w = T_{stat}$
27_3	$T_w = T_{adiab}$
27_4	$T_w = \frac{T_{stat} + T_{adiab}}{2}$
27_6	$T_w = T_{adiab} + 1K$

Nastavení řešiče proudového pole FESNAP flow solver a meteorologických podmínek je uvedeno v Tab. 7.7 a Tab. 7.8.

Při simulaci tvaru námrazy byl zvolen typ námrazy Matný led „Glaze“ s využitím Gresho přepočtu tepelného toku a uvážením vzniku drsnosti vlivem okamžitě zamrzajících částí kapek tzv. lůžek („beading“). Je zanedbán vliv gravitace a proměnná hustota ledu. Dále se jedná o simulaci s jedním krokem.



Obr. 7.17 Porovnání tvarů námrazy parametrické studie termodynamické podmínky OP Stěna.

Rozsah pokrytí námrazou S_{ice} je definován jako plocha profilu pokrytá námrazou. V případě simulací námrazy se jedná o dobře definovatelné rozhraní, viz Obr. 7.17 (nahore). V případě experimentu může námraza tvořit malé námrazové struktury i mimo hlavní tvar námrazy. Ve všech případech Val27 1–6 je rozsah pokrytí námrazou téměř shodný, viz Obr. 7.17 (nahore).

Tvar námrazy má velký vliv na změnu aerodynamických charakteristik profilu (potažmo křídla). Tvar námrazy nejvíce se blíží experimentálnímu tvaru námrazy dle Obr. 7.17 je Val27_3. Proto bude v následující analýze použit nastavení řešiče s:

- o termodynamickou podmínkou na OP Stěna $T_w = T_{adiab}$.

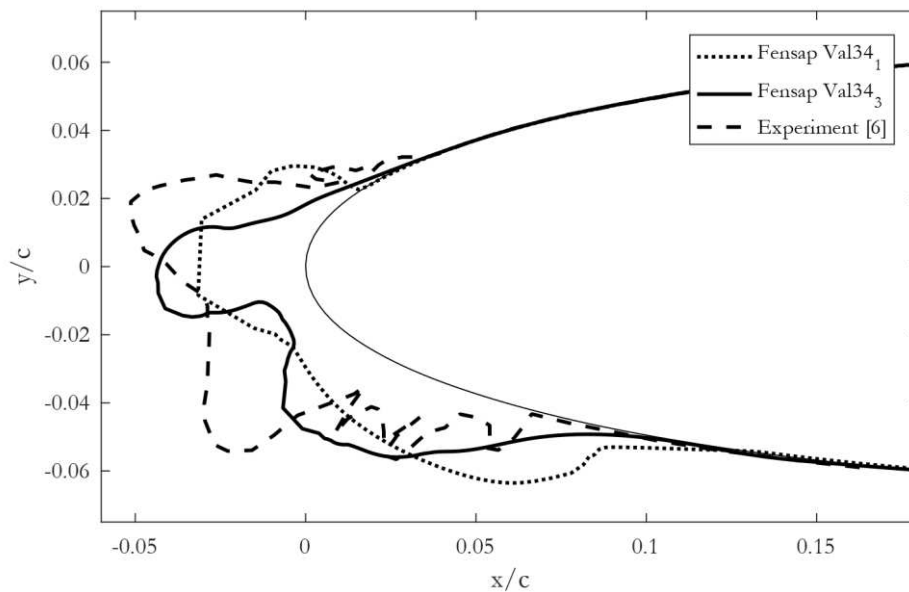
7.4.2 PARAMETRICKÁ STUDIE POČTU KROKŮ SIMULACE NÁMRAZY

Pro přesné určení tvaru námrazy je potřebné docílit co největšího počtu kroků simulace námrazy. Jedná se o simulaci proudového pole, dopadu kapek, nárůstu námrazy po dobu

$$\tau_k = \frac{\tau}{k'} \quad (7.4)$$

kde τ_k je doba námrazových podmínek jednoho kroku a k' je počet kroků simulace. Ze zdrojů [1] a [2] je možné ověřit dostatečnou přesnost použití jednokrokové simulace růstu námrazy. Pro složitější tvary námrazy je ovšem nezbytné aktualizovat tvar profilu s vytvořenou námrazou a následně aktualizovat proudové pole a dopad kapek na povrch profilu.

Nastavení řešiče proudového pole FESNAP flow solver a meteorologických podmínek je uvedeno v Tab. 7.7 a Tab. 7.8 simulace Val_34.



Obr. 7.18 Porovnání jednokrokové a tříkrokové simulace námrazy.

Porovnání jednokrokové Val34_1 a tříkrokové Val34_3 simulace tvaru námrazy je uvedeno v Obr. 7.18. Je patrné, že v případě vícekrokové simulace dochází k vývinu zřetelného rohu na horní části námrazy. Rozsah pokrytí profilu námrazou je v případě tříkrokové simulace přesnější.

8 CFD ANALÝZA & VYHODNOCENÍ

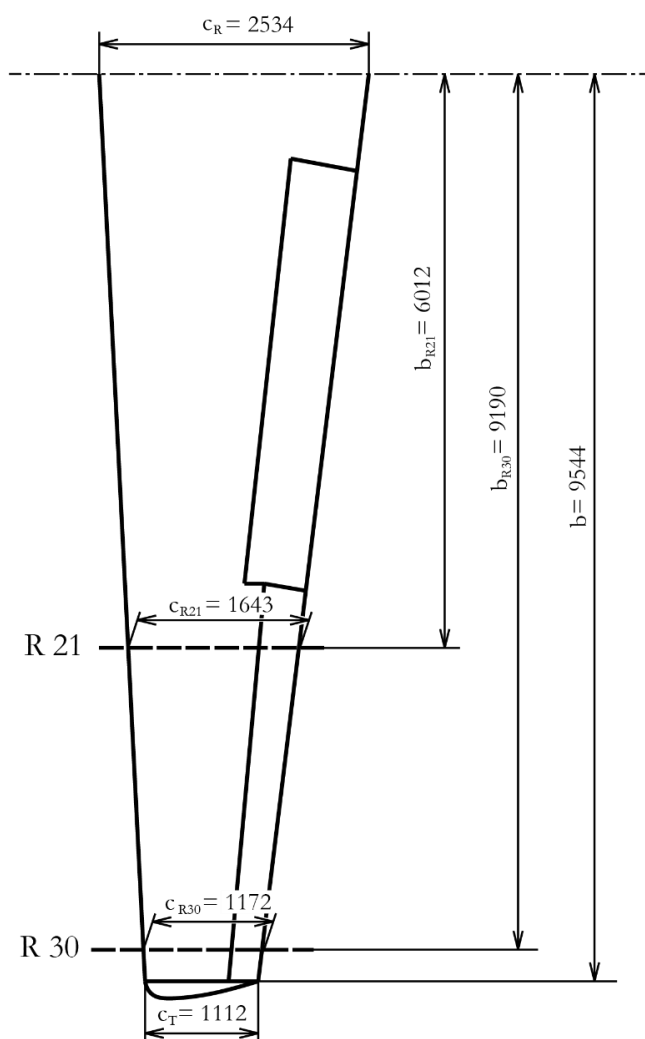
Analýza je provedena za účelem zjištění rozsahu pokrytí náběžné hrany křídla námrazou a potenciální přesahy námrazy mimo pryžový odledňovací pás. Analýza je provedena jako 2D úloha v předem definovaných řezech na křídle R21 a R30. Tyto řezy jsou v oblasti křídla s křídélkem. Poloha řezů jsou vybrány s ohledem na kritické místo potenciálního přesahu námrazy mimo odledňovací pás. V takovém případě může dojít k odtržení proudu v místě ulpívání námrazy za odledňovacím pásem a k potenciálnímu snížení nebo znemožnění ovladatelnosti letadla kolem osy x (klonění).

8.1 VSTUPNÍ PODMÍNKY ANALÝZY

Vstupní podmínky zahrnují souhrn parametrů z minulých kapitol potřebných pro provedení analýzy, zbylé parametry jsou definovány v následujících podkapitolách.

8.1.1 ŘEZY KŘÍDLA A LETOVÉ PŘÍPADY

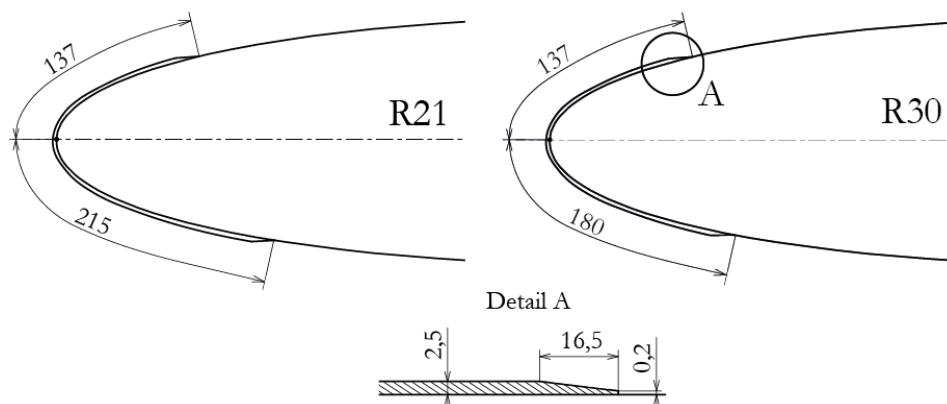
Díky dostupným zdrojům dat je možné řešit úlohu jako 2D případy v řezech křídla R21 a R30. Poloha řezů křídla je uvedena na Obr. 8.1. Toto řešení snižuje výpočetní nároky, zjednodušuje přípravu simulace a snižuje výpočetní čas. Pro každý řez je v následujících podkapitolách stanovena geometrie a místní AoA.



Obr. 8.1 Základní rozměry křídla a pozice analyzovaných řezů

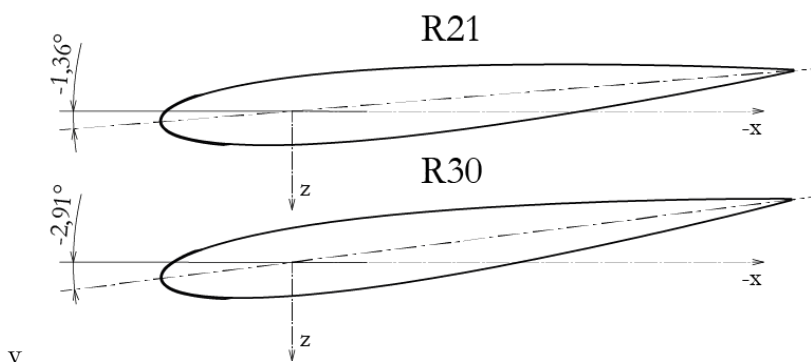
8.1.1.1 GEOMETRIE ŘEZU R21 A R30, VÝPOČETNÍ SÍŤ

Geometrie řezů R21 a R30 vychází z konstrukce letadla, jak bylo dříve zmíněno. Pro účely simulace bylo nutné na čistý profil navinout odledňovací pás dle zadaných rozměrů, viz Obr. 8.2.



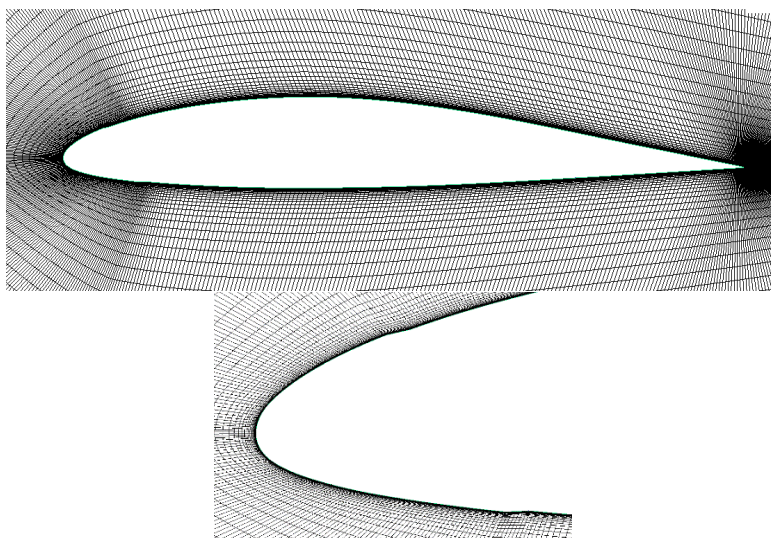
Obr. 8.2 Geometrie řezů R21, R30 a geometrie odledňovacího pásu.

Geometrické zkroucení v řezích R21 a R30 s ohledem na základní rovinu letounu je zobrazeno v Obr. 8.3.



Obr. 8.3 Zkroucení řezů R21 a R30 vůči základní rovině letounu.

Parametry výpočetní sítě vychází ze závěrů kalibrace. Detaily sítě jsou na Obr. 8.4. Celá doména vychází ze stejného konceptu jako Obr. 7.2.



Obr. 8.4 Detail výpočetní sítě. R21S_Rev01, 246 000 buněk.

8.1.1.2 STANOVENÍ SOUČINITELE VZTLAKU LETOUNU c_L

Stanovení součinitele vztlaku vychází ze základních charakteristik letounu a z letových případů LP01–03 (Tab. 6.1). Součinitel vztlaku je následně vypočítán dle rovnice vycházející z předpokladu ustáleného, přímočarého a horizontálního letu. Můžeme tedy psát:

$$c_L = \frac{m_{TOW} \cdot g}{\frac{1}{2} \rho v_{TAS}^2 S_W}, \quad (8.1)$$

kde g je tíhové zrychlení, ρ je hustota vzduchu v dané letové výšce a S_W je referenční plocha křídla. Výsledné hodnoty c_L a Reynoldsova čísla řezů R21 a R30 jsou uvedeny v Tab. 8.1. Úhel náběhu letounu (AOA) je stanoven na základě interní analýzy firmy Aircraft Industries a.s.

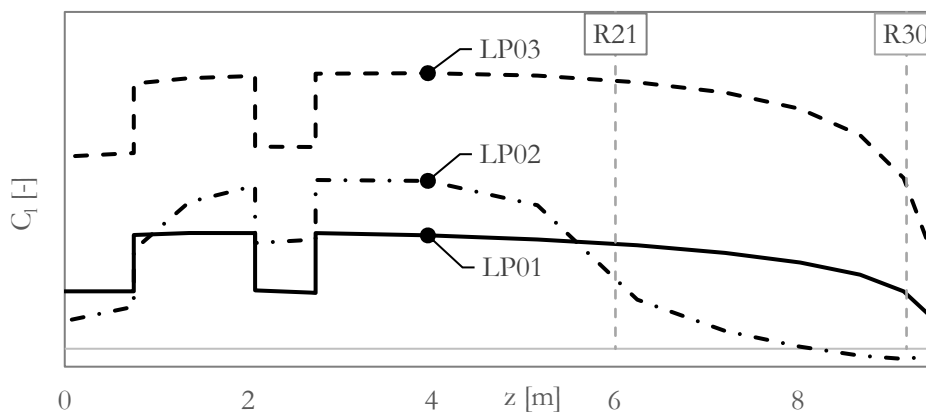
Tab. 8.1 Letové případy. Součinitel vztlaku letadla a Reynoldsova čísla řezů křídla.

	Výška letu		$c_{L_{Letoun}}$ [-]	AOA_{Letoun} [°]	Reynoldsovo číslo	
	H_p [ft]	m_{TOW} [kg]			R21 [-]	R30 [-]
LP01	20 000	4686	0,424	1,56	6,3 mil	4,5 mil
LP02	0	1	0,429	-1,59	8,5 mil	6,0 mil
LP03	1	7000	1,104	8,46	6,5 mil	4,6 mil

8.1.2 STANOVENÍ AOA V ŘEZECH R21 A R30

8.1.2.1 STANOVENÍ MÍSTNÍCH SOUČINITEŮ VZTLAKU c_l

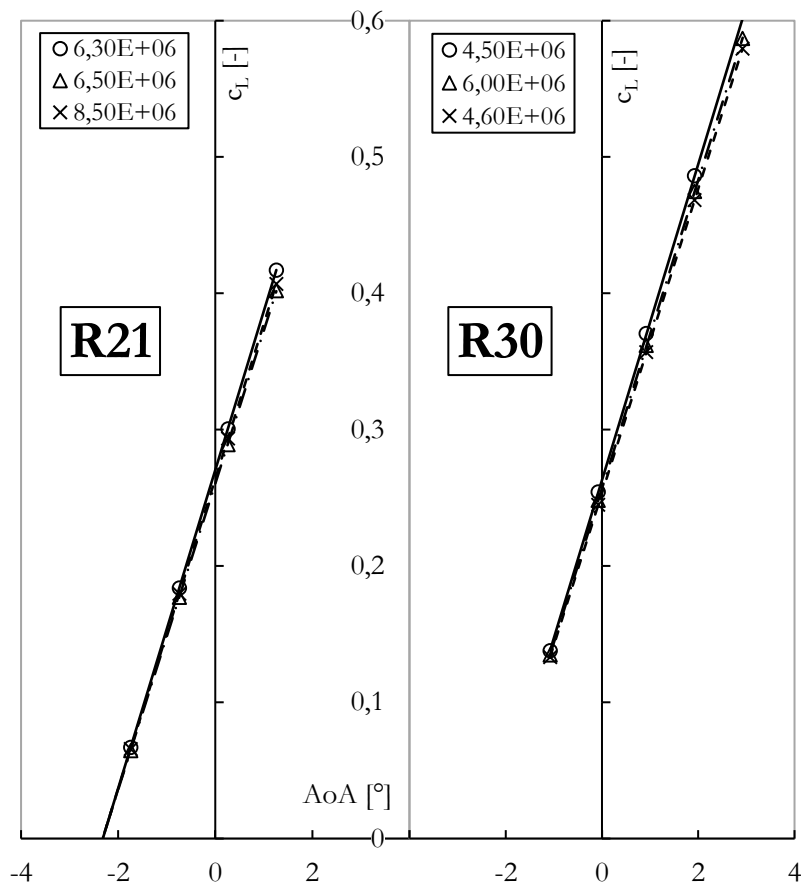
Následně je potřeba stanovit místní součinitele vztlaku v řezech R21 a R30. Stanoví se na základě rozložení vztlaku po křídle náležící dané konfiguraci letounu. Rozložení vztlaku po křídle (Obr. 8.5) je definováno na základě interní analýzy firmy Aircraft Industries a.s. Výsledné hodnoty jsou uvedené v Tab. 8.2.



Obr. 8.5 Rozložení vztlaku po křídle pro letové případy LP01 až 03. Řezy R21 a R30 (šedá, přerušovaná)

8.1.2.2 Místní AoA řezů R21 a R30

Místní AoA v řezech R21 a R30 je možné odečíst ze vztlkových čar (Obr. 8.6) pro příslušná Reynoldsova čísla. Z důvodu specifických tvarů profilů v řezech R21 a R30 byly provedeny simulace v programu FENSAP flow solver. Na základě vyhodnocení *simulací* byly definovány vztlkové čáry. Parametry simulací vychází z letových případů LP01–03 (Tab. 8.1). Výsledné hodnoty místních AoA jsou uvedeny v Tab. 8.2.



Obr. 8.6 Vztlkové čáry (oblast lineární závislosti) řezů R21 a R30 v závislosti na Reynoldsově číslu. Body jsou proloženy lineární funkcí.

Tab. 8.2 Definice místních AoA pro řezy křídla R21 a R30 v závislosti na letových případech.

	R21			R30		
	Re [-]	C_l [-]	AoA [°]	Re [-]	C_l [-]	AoA [°]
LP01	6,3 mil	0,466	1,68	4,5 mil	0,250	-0,11
LP02	8,5 mil	0,310	0,44	6,0 mil	-0,047	-2,68
LP03	6,5 mil	1,193	8,17	4,6 mil	0,747	4,42

8.1.3 METEOROLOGICKÉ PODMÍNKY

Meteorologické podmínky vycházejí z kapitoly 6.1a 6.2, kde jsou v Tab. 6.2 až Tab. 6.4 uvedeny detailně meteorologické případy vztahující se k analýze dle certifikačních požadavků.

8.1.4 NASTAVENÍ ŘEŠIČŮ

Nastavení řešičů vychází z kapitoly 7. Ve shrnutí jsou zde uvedeny základní parametry úlohy a použitých řešičů. Úloha (simulace) je definována dle Tab. 8.3 až Tab. 8.6.

Tab. 8.3 Definice úlohy analýzy

2D úloha	Řez křídla
Typ obtékání	Vnější
Časová závislost	Stacionární
Stlačitelnost tekutiny	Zanedbána
Turbulentní proudění	Model Spalart-Allmaras
Energetický výpočet	Ano, PDR

Tab. 8.4 Základní nastavení řešiče FENSAP flow solver

Pohybové rovnice	Navier-Stokes
Tekutina	Ideální plyn (vzduch)
Drsnost OP Stěna	$5,5 \cdot 10^{-4}$
Numerický profil N-S rovnic	2 nd order Upwind

Tab. 8.5 Základní nastavení řešiče DROP 3D

Fyzikální model	Dopad kapek (částic)
Odporový model	Extended Reynolds
Spektrum kapek	Langmuir D (7 frakcí)

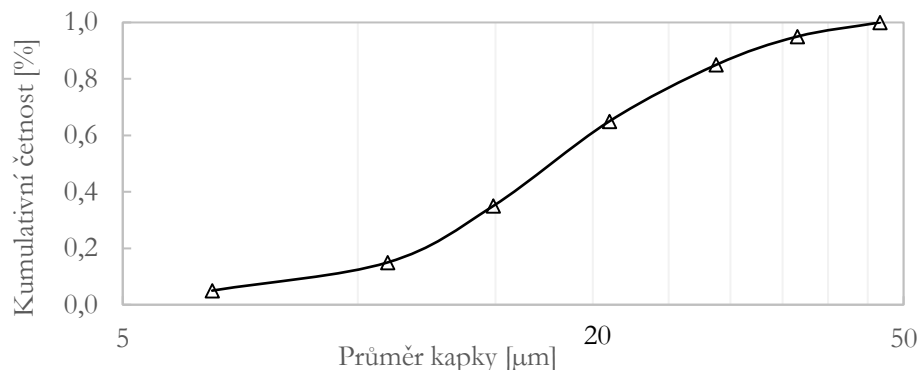
Tab. 8.6 Základní nastavení řešiče ICE 3D

Model námrazy	Glaze – Advanced
Tepelný tok	Gresho
Recovery factor ⁵	0,9

⁵ *Recovery factor* je proměnná ovlivňující teplotní podmínky v mezní vrstvě. Výpočet celkové teploty v mezní vrstvě vychází ze statické teploty a Machova čísla. Viz rovnice (7.3). *Recovery factor* zajišťuje správnou bilanci konvektivního přenosu tepla v energetické PDR. Odhad hodnoty vychází z teorie mezní vrstvy rovné desky.

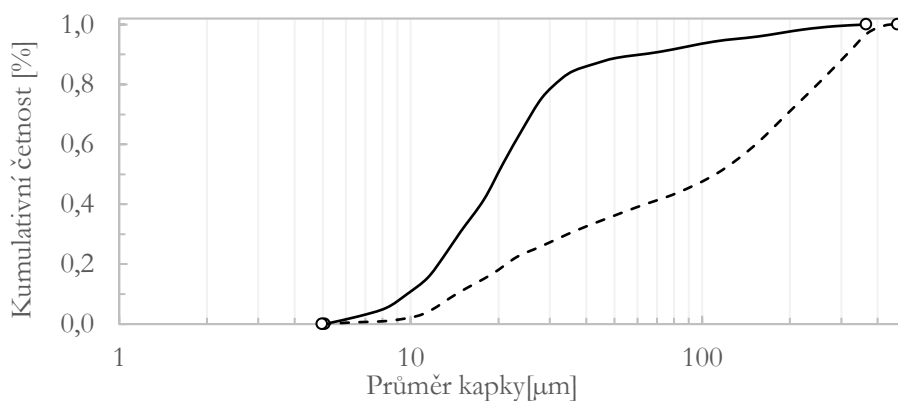
8.1.4.1 NASTAVENÍ ŘEŠIČE DROP 3D

Dle námrazové obálky v *Part 25 Appendix C* je určen rozměr kapek proměnnou MVD – Střední objemový průměr kapky [μm]. Pro výpočet dopadu kapek se uvažuje využití spektra Langmuir D. Popsáno v kapitole 7.3 a na Obr. 8.7. Rozložení je použito pro případy LPxx_Cxxx.

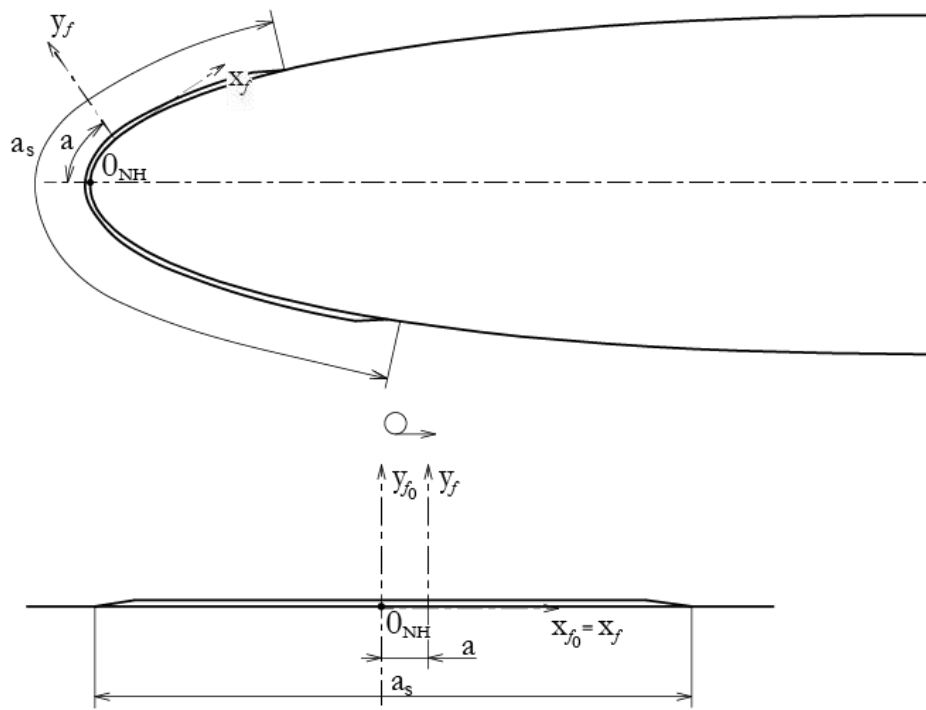


Obr. 8.7 Rozložení spektra dopadu kapek. *Part 25 Appendix C. Langmuir D*, $MVD=20[\mu\text{m}]$. 7 frakcí.

Dle námrazových obálek *Part 25 Appendix O* jsou přímo určeny spektra rozložení kapek. V grafu Obr. 8.8 jsou uvedena jednotlivá spektra. Označení koresponduje s Přehledem analyzovaných případů v příloze P1. Rozložení je použito pro případy LPxx_Oxxx.



Obr. 8.8 Rozložení spektra dopadu kapek. *Part 25 Appendix O*. Drizze L (plná), Drizze H (přerušovaná).



Obr. 8.9 Definice souřadnicového systému a proměnných pro vyhodnocování

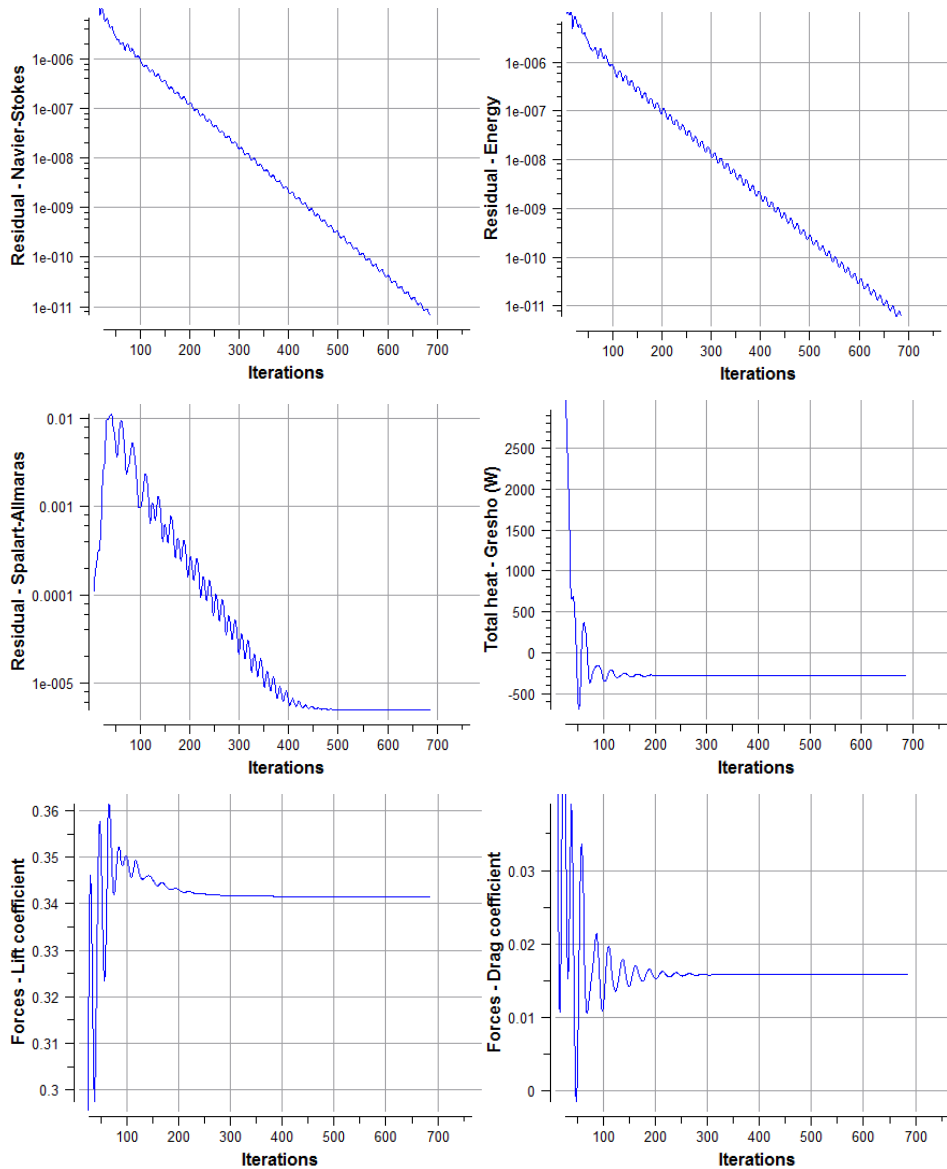
V analýze je každý případ vyhodnocen na základě faktoru:

- $t_{ice} = f(a)$ Rozsah pokrytí řezu křídla námrazou formou normálové tloušťky námrazy k povrchu

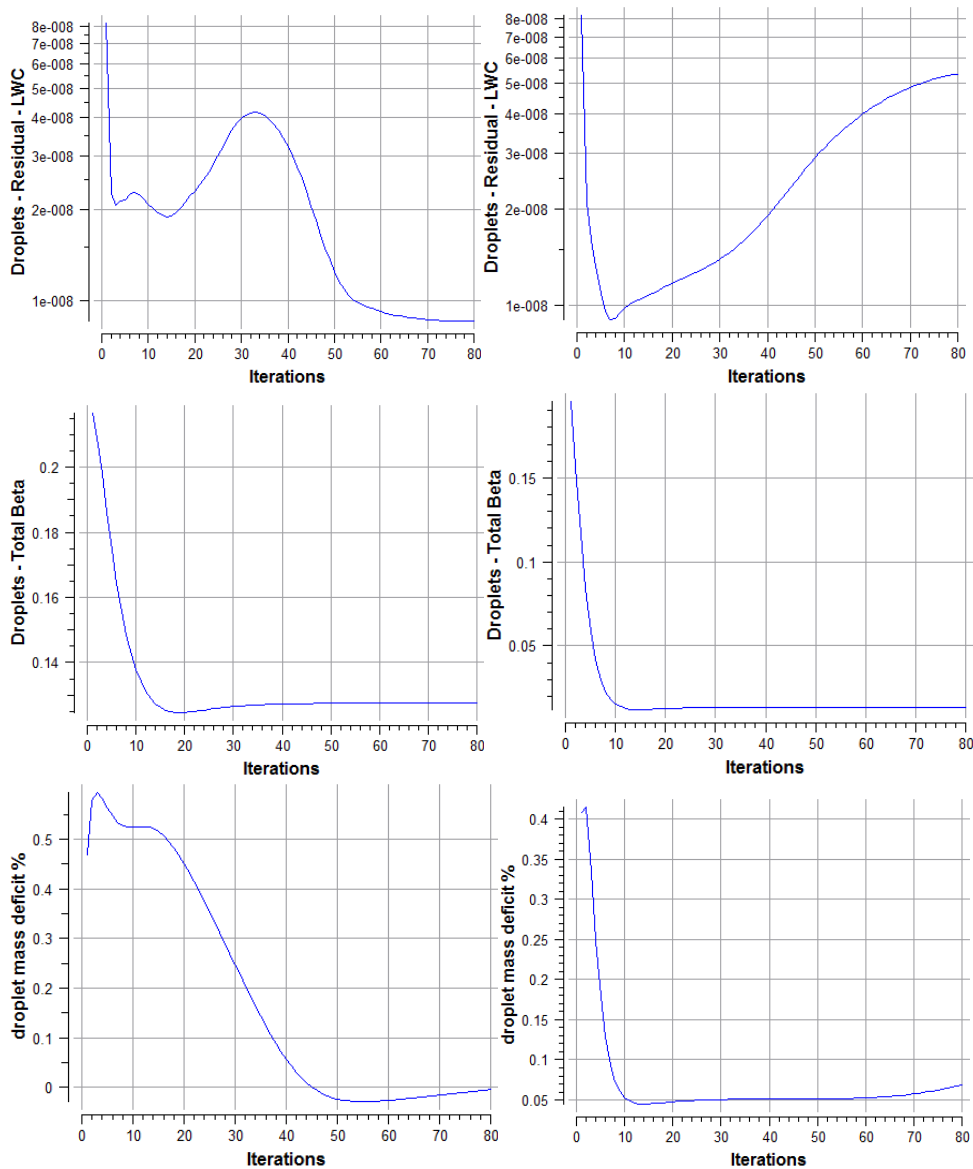
V případech s nízkou statickou teplotou je rozsah sběrné účinnosti dopadu kapek a rozsah pokrytí námrazou shodný. Ovšem za určitých fyzikálních podmínek dochází k jevu, kdy dopadající podchlazená kapka zmrzne pouze částečně a vlivem uvolnění skupenského tepla tuhnutí dojde k unášení tekuté části kapky po profilu. Kapka následně vlivem vnějšího prostředí zamrzne na jiném místě než místo dopadu kapky. V takovém případě celková sběrná účinnost není totožná s rozsahem pokrytí řezu křídla námrazou.

8.3 KONVERGENCE

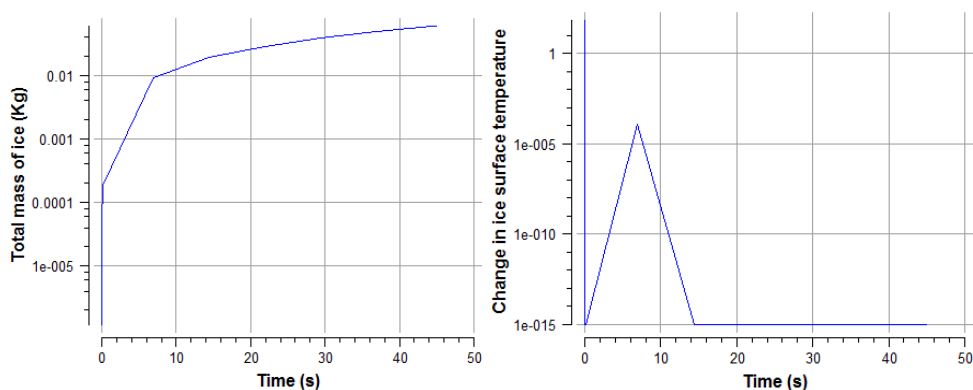
Pro kontrolu adekvátnosti řešení jsou na Obr. 8.10 až Obr. 8.12 zobrazeny grafy konvergenčí residuí a proměnných jednotlivých řešičů případu LP01_C301 pro řez R21. Jedná se o typické konvergence, které byly dosahovány v obdobných hodnotách u všech simulací vztahujících se k Appendix C a O.



Obr. 8.10 Konvergence residuí a proměnných řešiče proudového pole FENSAP flow solver. Příklad LP01_C301 pro řez R21. Sbora residua: Navier-Stokesovy rovnice, Energetická rovnice, Turbulentní model Spalart-Allmaras. Dále proměnné: Gresho tepelný tok, Součinitel vztlaku, součinitel odporu.



Obr. 8.11 Konvergence residuů a proměnných řešiče dopadu kapek DROP 3D. Případ LP01_C301 pro řez R21. Levý sloupec residua pro frakci 88,8 μm , pravý sloupec pro frakci 12,4 μm . Shora residua: LWC. Dále proměnné: β , hmotnostní deficit kapek.



Obr. 8.12 Konvergence proměnných řešiče růstu námrazy ICE 3D. Případ LP01_C301 pro řez R21. Proměnné: Celková hmotnost námrazy (vlevo), změna teploty na povrchu námrazy (vpravo).

8.4 VYHODNOCENÍ SIMULACÍ APPENDIX C

Vyhodnocení má za cíl ověřit *mobutnost námrazy* vytvořené na odledňovacím pásu a možný *přesah* námrazy mimo odledňovací pás. K tomu odpovídají nomenklatura simulovaných případů dle podkapitoly 8.1.5 a seznam analyzovaných případů v příloze P1.

8.4.1 VYHODNOCENÍ MOHUTNOSTI NÁMRAZY

Pro případy s nomenklaturou:

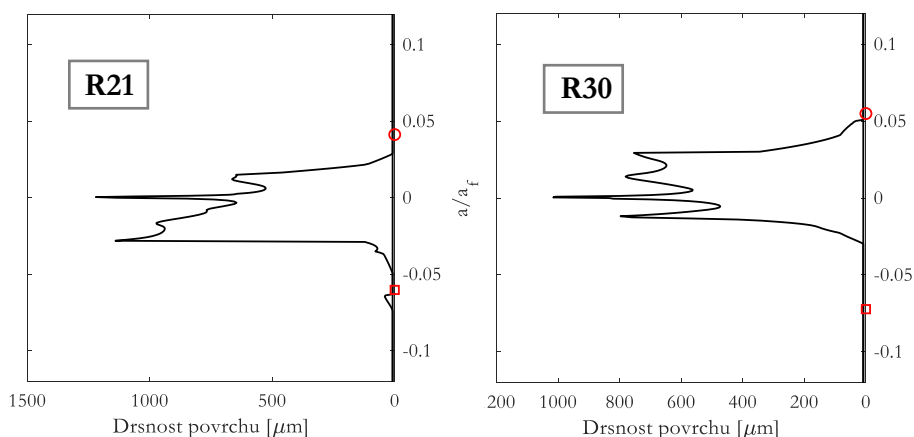
LP_{xx}_C2_{xx}

LP_{xx}_C3_{xx}

Mohutnost námrazy a její tvar ovlivňuje aerodynamické charakteristiky křídla. S námrazou na náběžné hraně se snižují aerodynamické výkony. Hlavní vliv na degradaci mají:

- o drsnost námrazy na povrchu křídla (Obr. 8.13)
- o tvar námrazy (Obr. 8.14)

Tvar námrazy a její mohutnost na řezu křídla posouvá bod odtržení proudění více k náběžné hraně a dochází k vzniku úplavu, který má za následek zvýšení odporu, snížení maximálního součinitele vzlaku a snižuje funkci kormidel. *Drsnost námrazy* ovlivňuje zejména třecí složku odporu, která vzrůstá. Drsnost vzniklá námrazou je zobrazena pro kritický případ v Obr. 8.13.

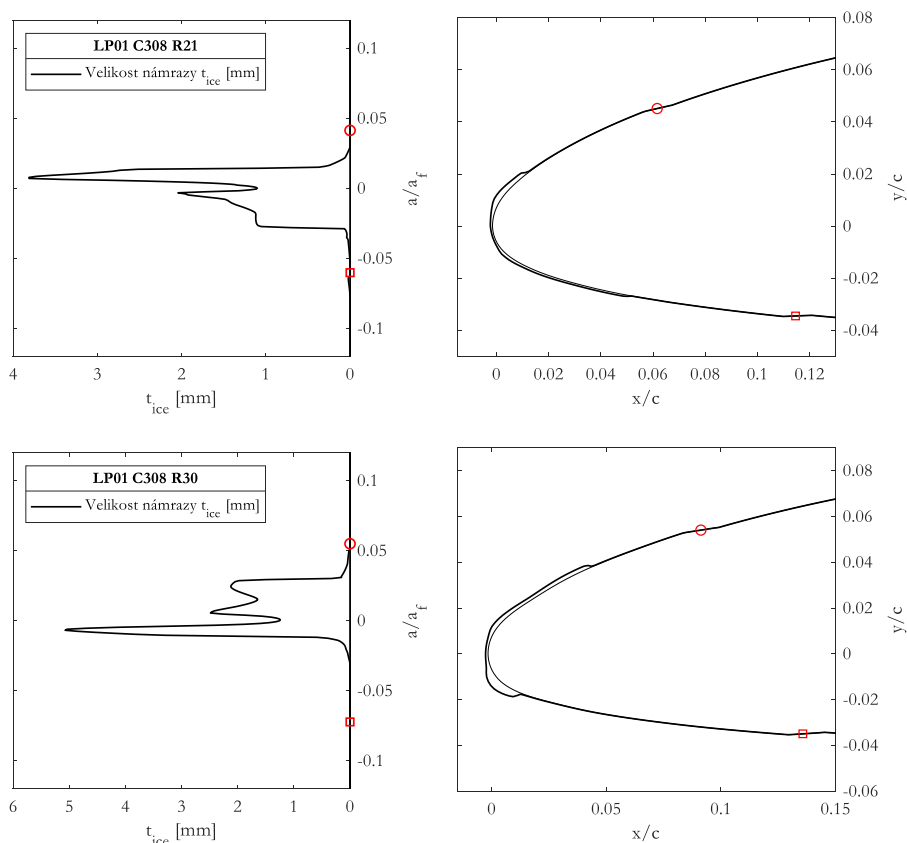


Obr. 8.13 Drsnost povrchu pro kritický případ LP01 C308.

Vyhodnocení má za cíl sledovat tloušťku a tvar námrazy vzniklé na náběžné hraně a její degradační účinky na letové výkony. Odpovídající grafy analyzovaných případů jsou primárně uvedeny v příloze P2. Pro každý případ je:

- o (vlevo) vynesena závislost tloušťky námrazy na bezrozměrné rozvinuté délce řezu křídla a/a_f , kde normalizované hodnoty jsou $a_{f_{R21}} = 3,370 m$ a $a_{f_{R30}} = 2,400 m$.
- o znak „o“ vyjadřuje hranici odledňovacího pásu na vrchní straně řezu křídla
- o znak „□“ vyjadřuje hranici odledňovacího pásu na dolní straně řezu křídla
- o (vpravo) vynesena tloušťka námrazy na řezu křídla, kde normalizované hodnoty jsou $c_{R21} = 1,643 m$ a $c_{R30} = 1,172 m$.

Na základě kvalitativního vyhodnocení byl vytypován *kritický případ LP01 C308*. Jedná se o případ, kde došlo k nárůstu námrazy, které znatelně ovlivňuje proudění kolem řezu křídla. V diagramech, viz Obr. 8.14, kde jsou uvedeny hodnoty tloušťky námrazy pro současně oba analyzované řezy R21 a R30.



Obr. 8.14 Kritický případ pro Part 25 Appendix C, mobilita námrazy na odledňovacím páse. Příklad LP01 C308. $T = -16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $LWC = 2,44\text{ g/m}^3$, $MVD = 15\text{ }\mu\text{m}$, $\tau = 45\text{ s}$

V návaznosti byla provedena aerodynamická analýza kritického případu pro porovnání aerodynamických vlastností s čistým řezem křídla. Na Obr. 8.15 a Obr. 8.16 je vykreslena vztlková čára, respektive odporová polára. Z grafů a Tab. 8.7 je zřetelný pokles $c_{L_{max}}$ u řezu R21 o 4,8 % respektive u R30 o 10,3 %.

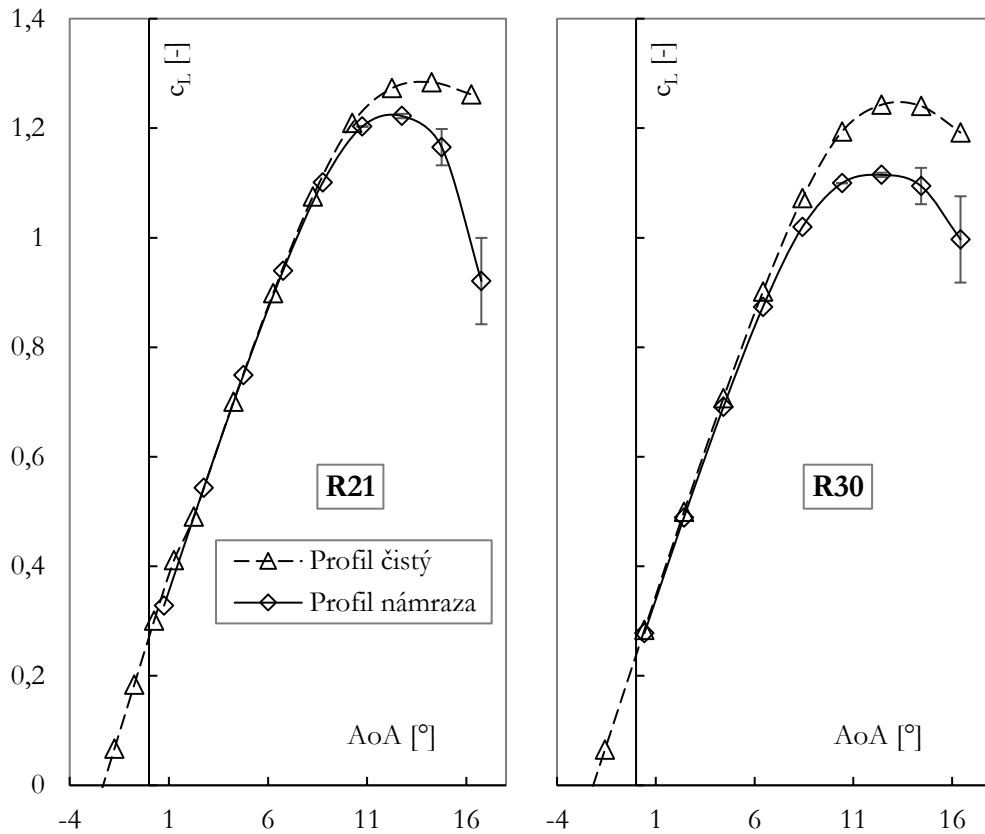
Tab. 8.7 Pokles aerodynamických vlastností řezů R21 a R30 vlivem nárůstu námrazy.

Profil:	R21		R30	
	čistý	námraza	čistý	námraza
o Pokles $c_{L_{max}}$	1,284	1,222	1,243	1,115
o Posun AoA pro $c_{L_{max}}$	14,0	12,0	13,0	12,5
o Nárůst odporu u vyšších AoA				

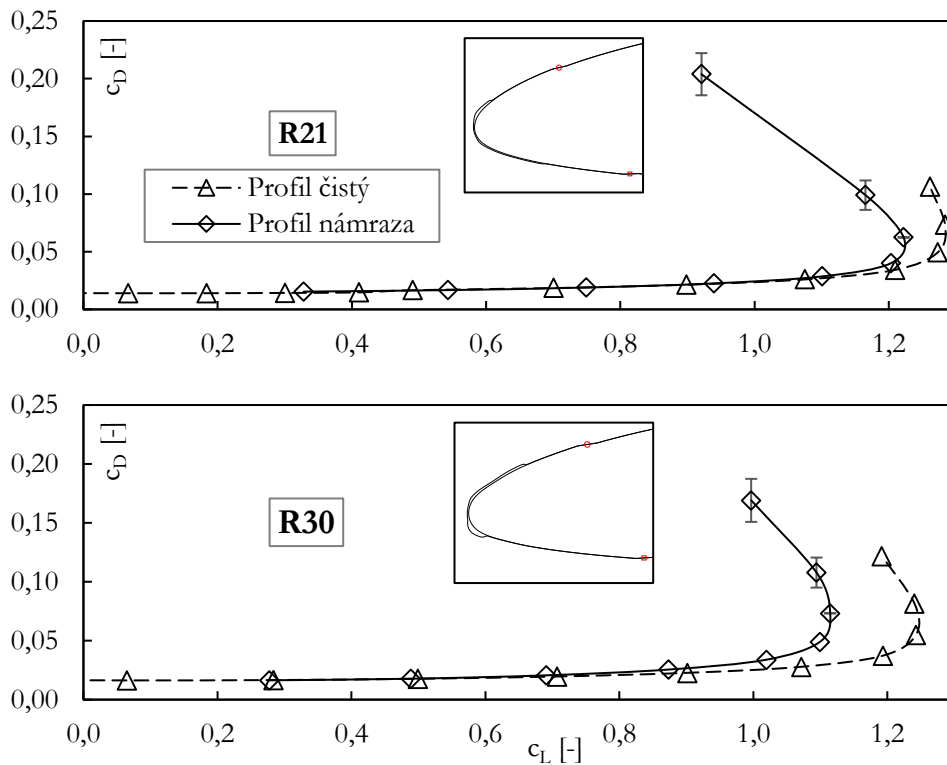
Proto aby nedošlo ke změně letového režimu, tj. zachování hodnoty c_L , je nutné zvýšit úhel náběhu o $\Delta AoA = 0,17^{\circ}$ dle Tab. 8.8. Hodnota je vypočítána jako průměr hodnot řezů R21 a R30.

Tab. 8.8 Charakteristické hodnoty řezů R21, R30 a letounu pro letový režim LP01.

	c_L [-]	AoA [$^{\circ}$]	$c_{L_{ice}}$ [-]	Δc_L [-]	ΔAoA [$^{\circ}$]
řez R21	0,466	1,68	0,437	0,029	0,30
řez R30	0,250	-0,11	0,247	0,003	0,04
Letoun (LP01)	0,424	1,56		Průměr:	0,17



Obr. 8.15 Srovnání aerodynamických vlastností kritického případu pro Appendix C. Vztlaková čára. Profil s námrazou vykazuje nestacionární vlastnosti u AoA vyšší 10° , proto jsou uvedeny hodnoty s chybovými úsečkami vyznačující velikost odchylky.



Obr. 8.16 Srovnání aerodynamických vlastností kritického případu pro Appendix C. Odporová polára.

8.4.2 VYHODNOCENÍ PŘESAHU NÁMRAZY

Pro případy s nomenklaturou:

LP_{xx}_C4_{xx}

LP_{xx}_C5_{xx}

Přesah mimo odledňovací pás je kritický z mnoha aspektů již dříve zmíněných. Tvorbu námrazy na takovém místě nelze během letu zastavit, nebo odstranit.

Vyhodnocení má za cíl sledovat tloušťku a tvar námrazy vzniklé za odledňovacím pásem a dopad na aerodynamické vlastnosti křídla. Pro tento typ simulací je doba trvání růstu námrazy rovna době průletu mohutností oblačnosti $\tau = \tau_o$ a zavedena okrajová podmínka v místě odledňovacího pásu, kde v této oblasti nedochází k ulpívání námrazy na povrchu.

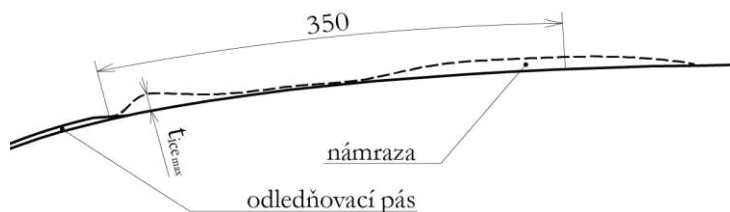
Systém vyhodnocení se skládá z:

- o (vlevo) vynesena závislost tloušťky námrazy na bezrozměrné rozvinuté délce řezu křídla a/a_f , viz podkapitola 8.4.1.
- o (vpravo) vynesena tloušťka námrazy na řezu křídla pro bezrozměrnou vzdálenost x/c nebo y/c , viz podkapitola 8.4.1.
- o znaky „o“ a „□“, viz podkapitola 8.4.1.
- o (uprostřed) dva detaily na konce odledňovacího pásu s námrazou vztažené na bezrozměrnou vzdálenost. Nahoře detail na horní konec odledňovacího pásu a naopak.

Odpovídající grafy analyzovaných případů jsou primárně uvedeny v příloze P3.

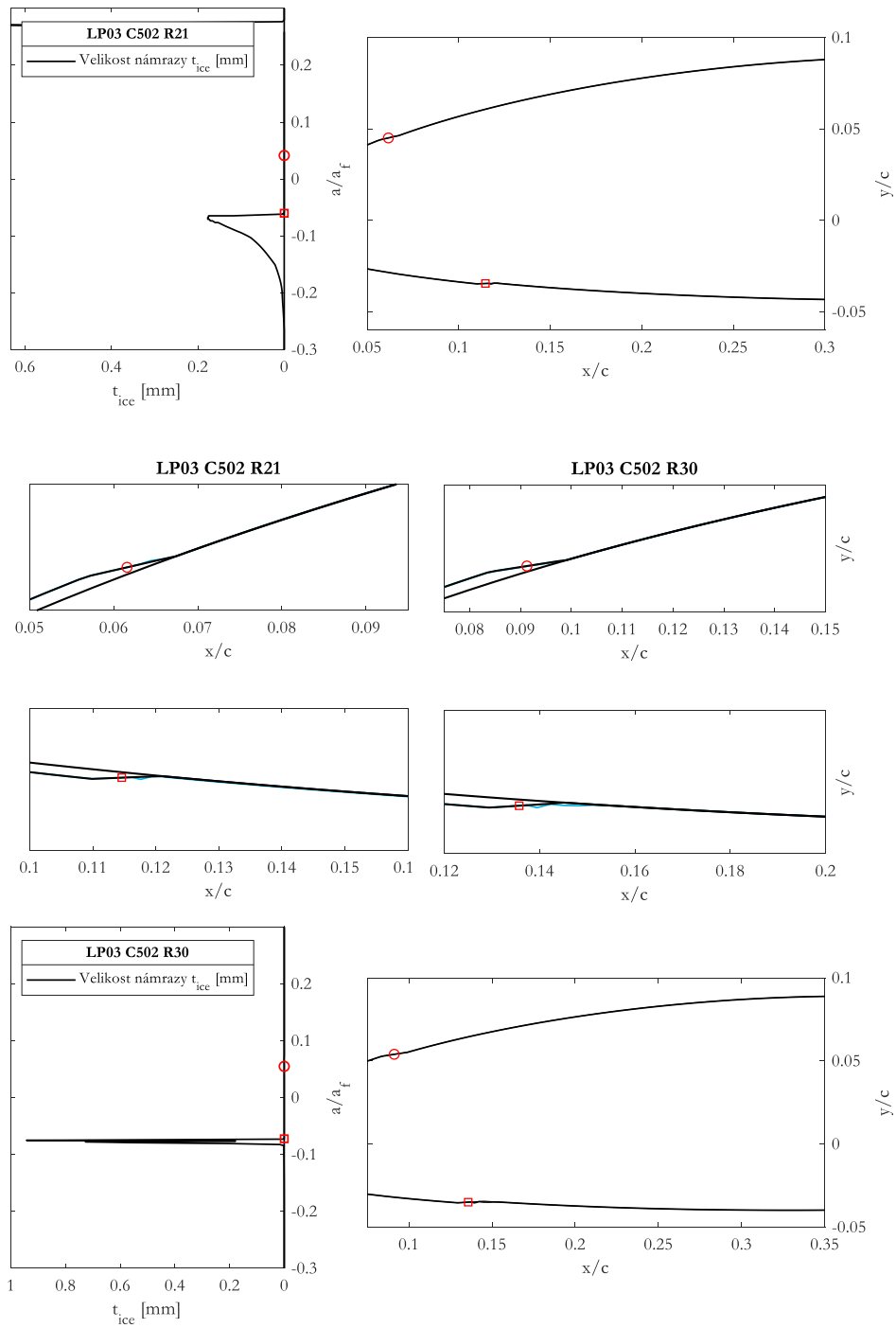
Na základě kvalitativního vyhodnocení byl vytypován *kritický případ LP03 C502*, Obr. 8.18. Z grafu je patrné, že tloušťka námrazy nepřesahuje tloušťku odledňovacího pásu.

Dále byl vytvořen graf závislosti maximální tloušťky námrazy na analyzovaném případě v místě za odledňovacím pásem, viz Obr. 8.19. Zde je uvedena maximální tloušťka námrazy pro každý analyzovaný případ v oblasti od konce odledňovacího pásu do vzdálenosti 350 mm k odtokové hraně řezu křídla. Bílé sloupce (se zápornými hodnotami) vyznačují hodnotu pro dolní konec odledňovacího pásu a naopak. Systém vyhodnocení maximální tloušťky námrazy je patrný z Obr. 8.17.

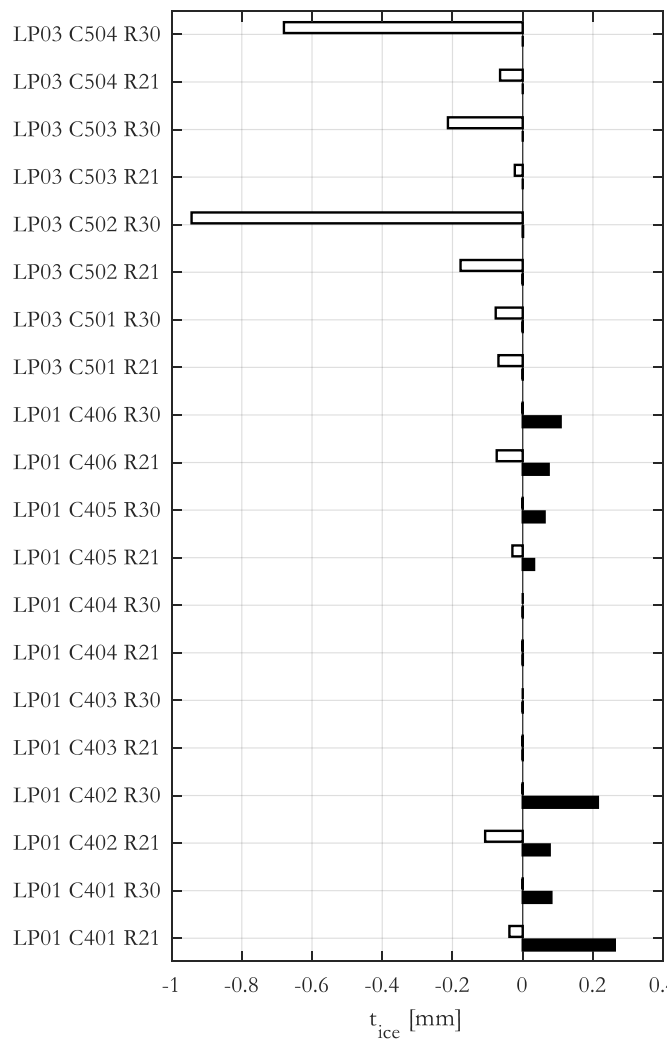


Obr. 8.17 Systém vyhodnocení maximální tloušťky námrazy mimo odledňovací pás.

Ve všech případech této sady simulací je možné konstatovat, že tloušťky námrazy jsou zanedbatelné a nepřesahují tloušťku odledňovacího pásu. Není tedy potřebné analyzovat dopad na aerodynamické vlastnosti křídla. Dále je možné prohlásit, že v případě certifikace dle Part 25 Appendix C *nedochází k tvorbě námrazy znatelného významu* v místě za odledňovacím pásem křídla.



Obr. 8.18 Kritický případ pro Part 25 Appendix C, přesah námrazy mimo odledňovací pás. Případ LP03 C502. $T = -1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $LWC = 0,08\text{ g/m}^3$, $MVD = 40\text{ }\mu\text{m}$, $\tau = 613\text{ s}$



Obr. 8.19 Vyhodnocení tloušťky námrazy analyzovaných případů pro Part 25 Appendix C, přesah námrazy mimo odledňovací pás.

8.5 VYHODNOCENÍ SIMULACÍ APPENDIX O

Vyhodnocení simulací Appendix O má stejnou strukturu jako vyhodnocení z kapitoly 8.4. Cílem je ověřit *mobutnost námrazy* vytvořené na odledňovacím pásu a možný *přesah* námrazy mimo odledňovací pás. K tomu odpovídají nomenklatura simulovaných případů dle podkapitoly 8.1.5 a seznam analyzovaných případů v příloze P1.

8.5.1 VYHODNOCENÍ MOHUTNOSTI NÁMRAZY

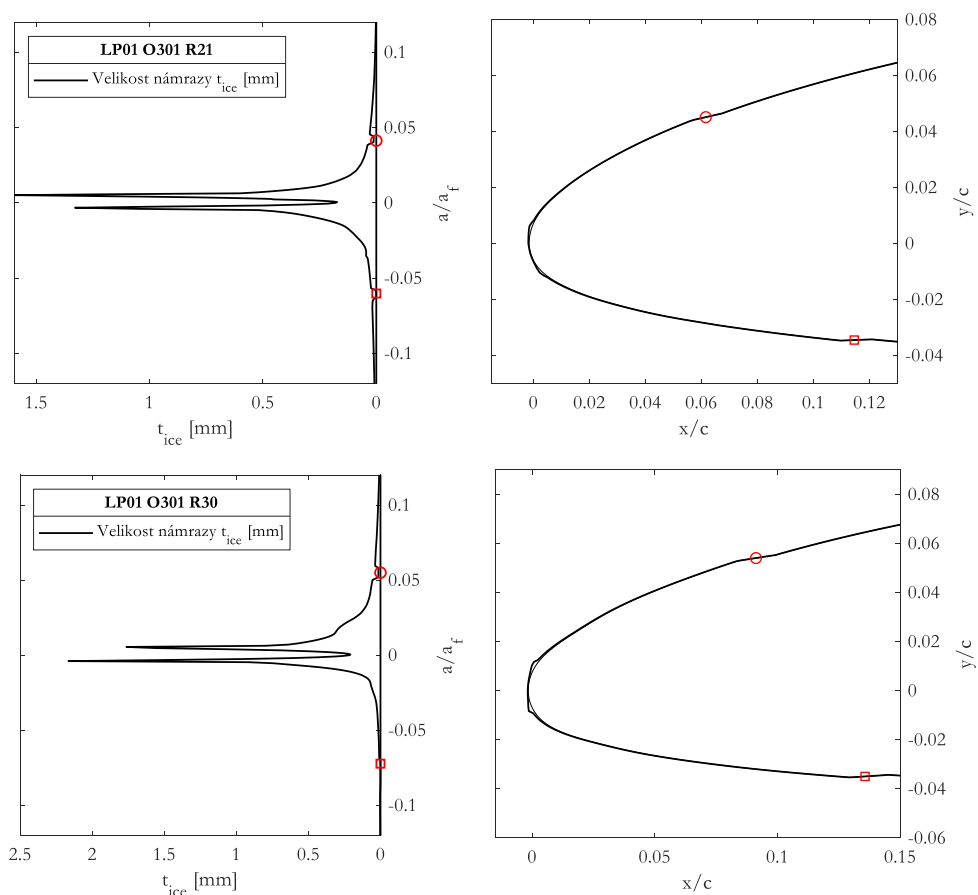
Pro případy s nomenklaturou:

LP_{xx}_O2_{xx}

LP_{xx}_O3_{xx}

Vyhodnocení má za cíl sledovat tloušťku a tvar námrazy vzniklé na náběžné hraně. Odpovídající grafy analyzovaných případů jsou primárně uvedeny v příloze P4.

Na základě kvalitativního vyhodnocení byl vytypován *kritický případ LP01 O301*, viz Obr. 8.20. Z grafů je patrné, že maximální tloušťka námrazy nepřesahuje tloušťku 2 mm. Je možné konstatovat, že v případě certifikace dle Part 25 Appendix O *mobutnost námrazy výrazně neovlivňuje aerodynamické vlastnosti řezu křídla*.



Obr. 8.20 Kritický případ pro Part 25 Appendix O, mobutnost námrazy na odledňovacím pásu. Případ LP01 O301. $T = -16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $LWC = 0,33\text{ g/m}^3$, $MVD = \text{Drizzle L}$, $\tau = 45\text{ s}$

8.5.2 VYHODNOCENÍ PŘESAHU NÁMRAZY

Pro případy s nomenklaturou:

LP_{xx}_O4_{xx}

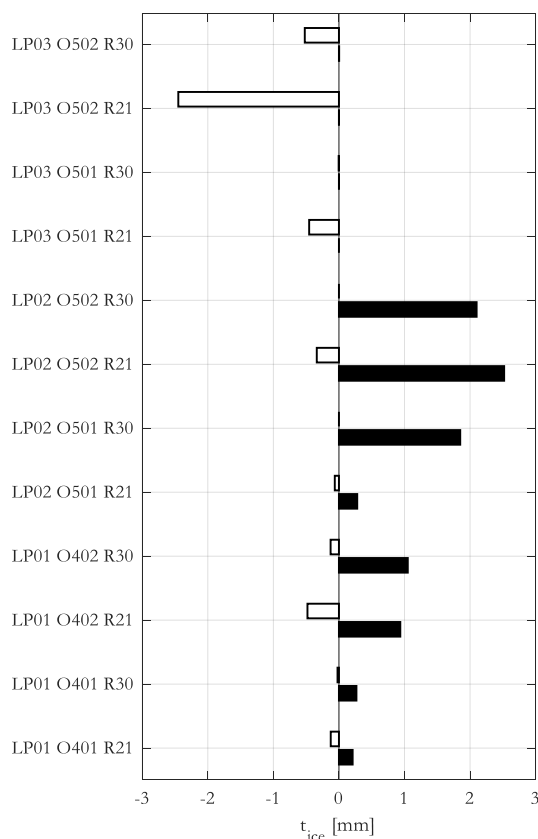
LP_{xx}_O5_{xx}

Přesah mimo odledňovací pás je kritický z mnoha aspektů již dříve zmíněných. Tvorbu námrazy na takovém místě nelze během letu zastavit, nebo odstranit.

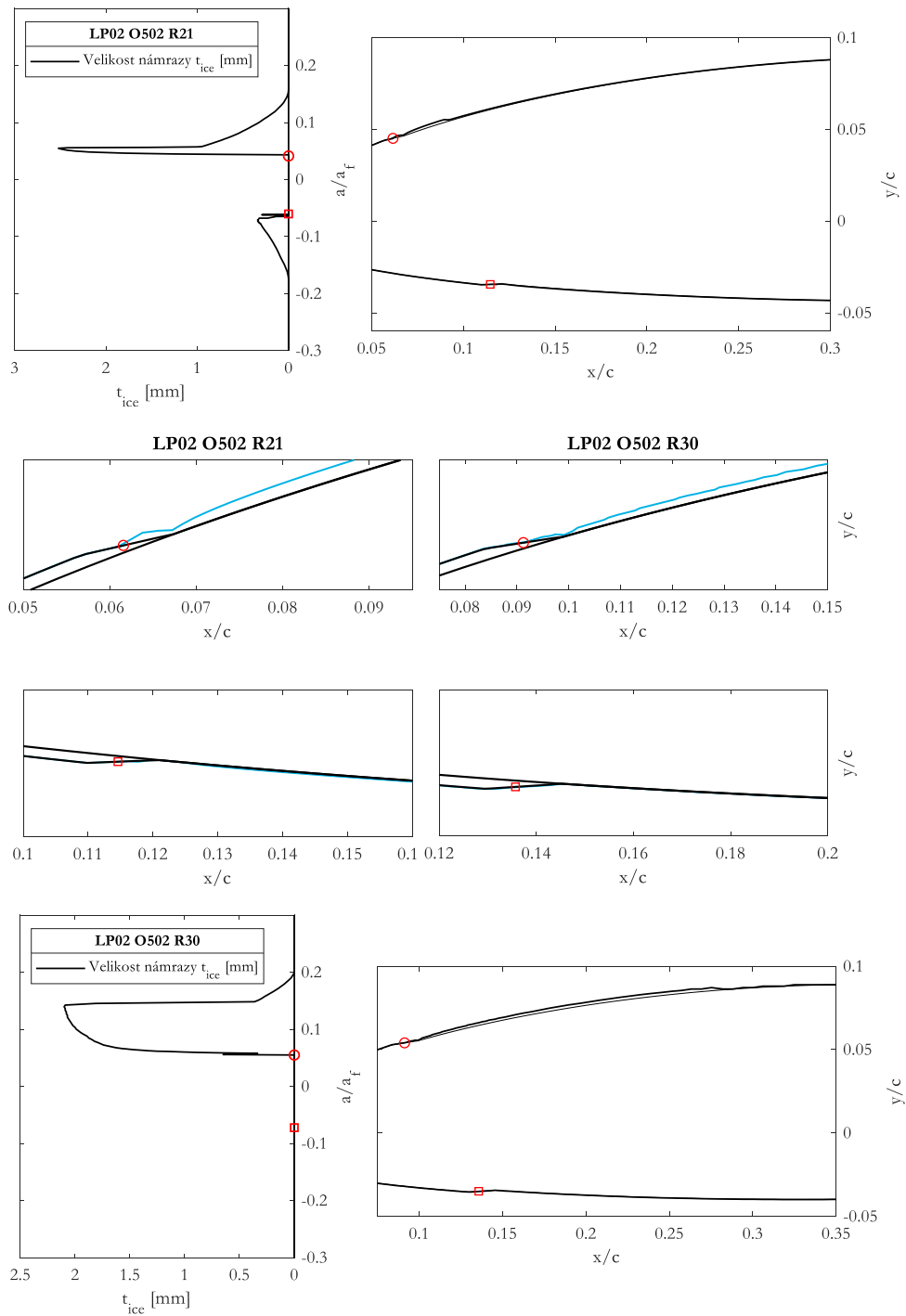
Odpovídající grafy analyzovaných případů jsou primárně uvedeny v příloze P5.

Na základě kvalitativního vyhodnocení byl vytypován *kritický případ LP02 O502*, viz Obr. 8.22. Z grafů je patrné, že tloušťka námrazy dosahuje srovnatelné velikosti s tloušťkou odledňovacího pásu. Tvar námrazy na horní straně řezů křídla navazuje na odledňovací pás a kopíruje jeho tvar. Nepředpokládá se další nárůst námrazy vzhledem k definované době trvání námrazových podmínek. Tvar námrazy nemá charakter tvorby „rohu“ (z ang. „horn“), který by měl za následek preferovaný růst námrazy ve směru normály k řezu křídla.

Dále byl vytvořen graf závislosti maximální tloušťky námrazy na analyzovaném případě v místě za odledňovacím pásem, viz Obr. 8.19.

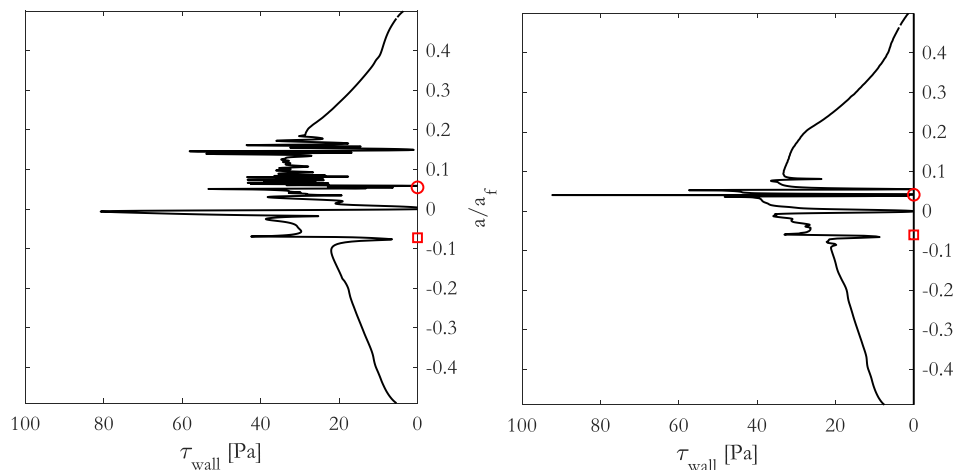


Obr. 8.21 Vyhodnocení tloušťky námrazy analyzovaných případů pro Part 25 Appendix O, přesah námrazy mimo odledňovací pás.



Obr. 8.22 Kritický případ pro Part 25 Appendix C, přesah námrazy mimo odledňovací pás.
Případ LP02 O502. $T = -2,5$ °C, $LWC = 0,27$ g/m³, MVD = Drizzle H,
 $\tau = 467$ s

Pro kontrolu vzniku úplavu, tedy potenciální odtržení mezní vrstvy v oblasti namrzlé vrstvy námrazy, byla provedena analýza proudového pole degenerovaných řezů křídla. Simulace byla provedena na základě daného letového režimu LP02 s hodnotami viz příloha P1 Přehled případů simulace a pro úhly náběhu vztahujících se (dle 8.1.2.2 Místní AoA řezů R21 a R30) k řezům R21 a R30. Vyhodnocení bylo provedeno na základě vykreslení závislosti smykového napětí u stěny τ_w na rozvinuté délce profilu a/a_f . Podmínka odtržení mezní vrstvy je nulový smykový tok. Závislost je vynesena na Obr. 8.23.



Obr. 8.23 Smykové napětí u stěny τ_w řezů křídla R21 a R30. Případ LP02 O502 s námrazou degenerovanými řezy křídla.

Z grafu je patrné pouze *místní odtržení mezní vrstvy* v místě konců odledňovacího pásu a *místní odtržení* v místě končící vrstvy namrzlé námrazy. Je možné tedy konstatovat, že nedochází ke vzniku úplavu jak na horní, tak dolní straně řezů křídla. *Funkce křidélek není námrazou ovlivněna natolik aby byla snížena jejich funkce.*

9 ZÁVĚR

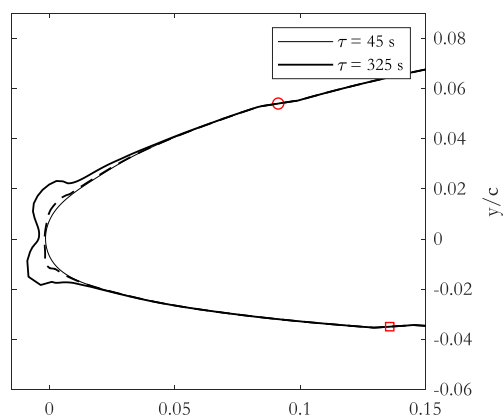
Cílem diplomové práce byla analýza odledňovacího systému letounu L 410 NG. Základní rozbor problematiky je uveden v úvodních kapitolách. Následně byla provedena kalibrace, na kterou byl kladen důraz z důvodu velkého množství fyzikálních mechanismů vstupujících do simulace tvorby námrazy. Kalibrace byla rozdělena do tří fyzikálních dějů, které je možné řešit nezávisle na sobě: *proudové pole, dopad kapek a nárůst námrazy*. Každý děj bylo nutné důkladně prostudovat a kalibrovat dle dostupných tunelových nebo letových měření. Na základě kalibrace byla vytvořena kostra nastavení řešičů pro následnou analýzu.

Analýza měla za cíl porovnat nárůst námrazy s ohledem na navržený pneumatický odledňovací systém letounu. Celkem bylo analyzováno 68 případů, ze kterých byly vybrány 4 kritické případy pro jednotlivé kategorie vyhodnocení. Pro potřeby kvantitativního vyhodnocení kritických případů byly následně provedeny simulace námrazou degradovaných řezů křídla a vyhodnoceny.

Pro kontrolu *mohutnosti námrazy v místě odledňovacího pásu* byla vytvořena vztaková křivka a odporová polára, ze kterých bylo následně možné kvantitativně vyhodnotit degradační vlastnosti řezů s námrazou. Z výsledků je patrný pokles maximálního součinitele vztaku v průměru o 7,5 %.

Pro vyhodnocení *přesahu námrazy za odledňovací pás* byla provedena simulace s kontrolou vzniku úplavu na základě smykového napětí u stěny. Bylo prokázáno, že nedochází ke vzniku úplavu vlivem nárůstu námrazy, a tedy ani snížení funkce křidélek u žádného z analyzovaných případů.

Nutné zohlednit fakt, že byla u všech případů brána v potaz optimální funkce odledňovacího systému. Pro ilustraci je na Obr. 9.1 srovnán nárůst námrazy pro funkční a nefunkční odledňovací systém. Za nefunkční odledňovací systém se pokládá nemožnost odstranit vzniklou námrazu během průletu oblačností. Z grafů je patrný velký rozdíl v mohutnosti námrazy. Z toho vyplývá, že je potřeba klást velké nároky na spolehlivost odledňovacího systému.



Obr. 9.1 Srovnání nárůstu námrazy případu LP01 C304 R30 pro funkční odledňovací systém s dobou mezi cykly $\tau = 45$ s a nefunkčním s dobou průletu oblačností $\tau = 325$ s.

Výsledkem je konstatování, že nárůsty a přesahy námrazy nejsou natolik závažné, aby bylo nutné provést konstrukční úpravy na pneumatickém odledňovacím systému letounu L 410 NG.

ZDROJE

- [1] ANDERSON, David N. a Alejandro FEO. Ice-Accretion Scaling Using Water-Film Thickness Parameters: NASA/CR—2003-211826. Nevada, USA: National Aeronautics and Space Administration, 2002.
- [2] HABASHI, Wagdi G. Development of a second generation in-flight icing simulation code. Montréal, Québec, Canada: McGill University, 2018.
- [3] WRIGHT, William B., R.W. GENT a Didier GUFFOND. DRA/NASA/ONERA Collaboration on Icing Research: Part II-Prediction of Airfoil Ice Accretion. Lewis Research Center: National Aeronautics and Space Administration, 1997.
- [4] DA SILVEIRA, Rafael A., Clovis R. MALISKA, Diego A. ESTIVAM a Rafael MENDES. Evaluation of collection efficiency methods for icing analysis. Florianópolis SC, Brasil: COBEM2003 - 1810, 2003.
- [5] LIU, Yang. Experimental Investigations on Transient Surface Water Transport and Ice Accreting Processes Pertinent to Aircraft Icing Phenomena: Graduate Theses and Dissertations. Ames, Iowa: Iowa State University, 2016.
- [6] WRIGHT, William B. a Adam RUTKOWSKI. Validation Results for LEWICE 2.0: NASA/CR--1999-208690. Ohio, USA: National Aeronautics and Space Administration, 1999.
- [7] JONES, R. a D.H. WILLIAMS. Effect of Surface Roughness on Characteristics of Airfoils N.A.C.A 0012 and R.A.F. 34. GB: AERONAUTICAL RESEARCH COMMITTEE REPORTS AND MEMORANDA, 1936.
- [8] CS 23.1419 Ice protection. Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes: CS-23, Amendment 3. European Aviation Safety Agency, 2012, 1–F–15.As
- [9] Advisory Circular 23.1419-2D: Certification of Part 23 Airplanes for flight in Icing Conditions. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2007.
- [10] P PAPADAKIS, Michael, See-Cheuk WONG, Arief RACHMAN, Kuohsing E. HUNG, Giao T. VU a Colin S. BIDWELL. Large and Small Droplet Impingement Data on Airfoils and Two Simulated Ice Shapes. NASA/TM—2007-213959. National Aeronautics and Space Administration, 2007.
- [11] PARASCHIVOIU, I. a F. SAEED. Aircraft Icing. A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY.
- [12] Appendix C. PART 25 - Airworthiness Standards Transport Category Airplanes. Amdt. 25-129, 74 FR 38340. Federal Aviation Administration, 2009.
- [13] Appendix O. PART 25 - Airworthiness Standards Transport Category Airplanes. Amdt. 25-140. Federal Aviation Administration, 2015.
- [14] Advisory Circular 20-73A: Aircraft Ice Protection. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2006.
- [15] HRNČÍŘ, Zbyněk. Vliv geometrie leteckého profilu na vlastnosti v námrazových podmínkách. Brno, 2006. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Školitel Karol Filakovský.
- [16] HAN, Yiqiang. Theoretical and Experimental Study of scaling methods for Rotor Blade Ice Accretion testing: A Thesis in Aerospace Engineering. The Pennsylvania State University, 2011.
- [17] ANSYS FENSAP-ICE User Manual. Release 18.2. ©ANSYS, 2018.
- [18] JACOBS, Eastman N. a Albert SHERMAN. Airfoil Section Characteristics as affected by variations of the Reynolds number: Report No.586. National Advisory Committee for Aeronautics.

PŘÍLOHY

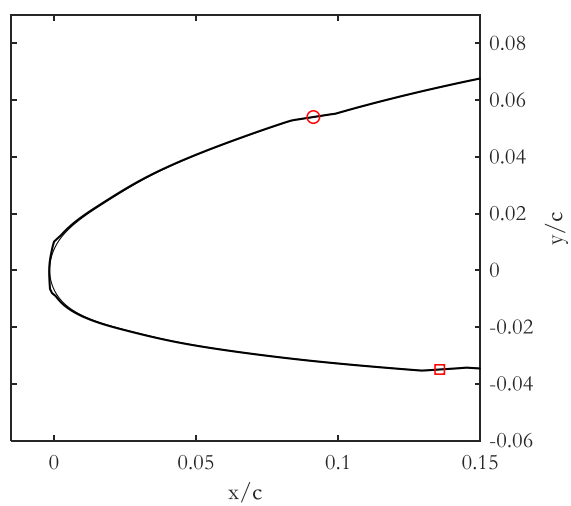
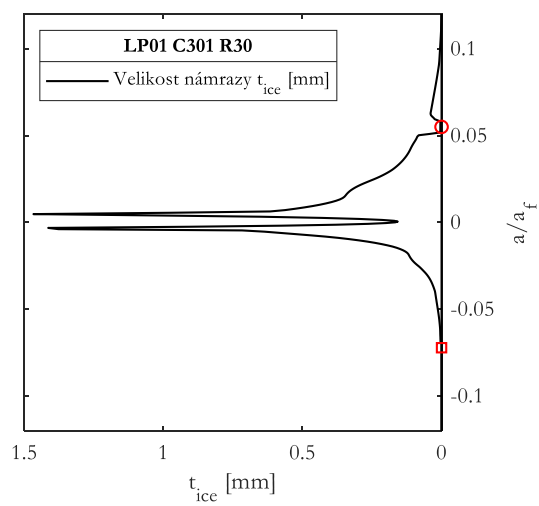
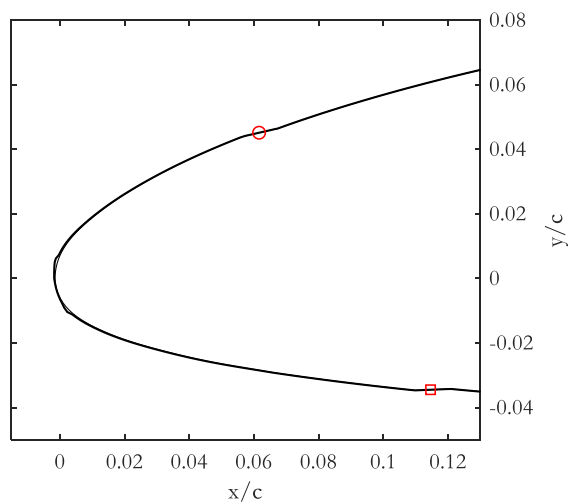
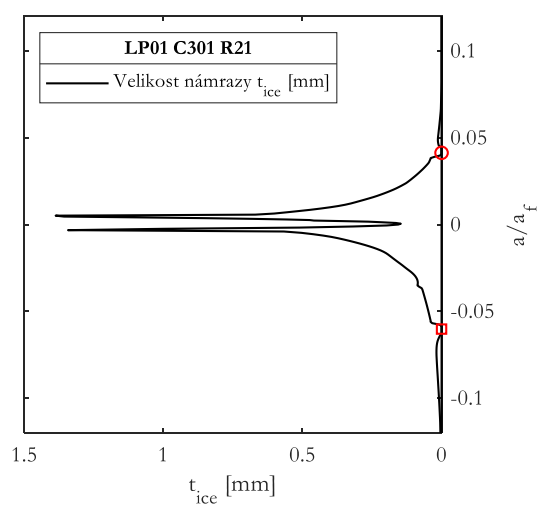
P1 PŘEHLED PŘÍPADŮ SIMULACE

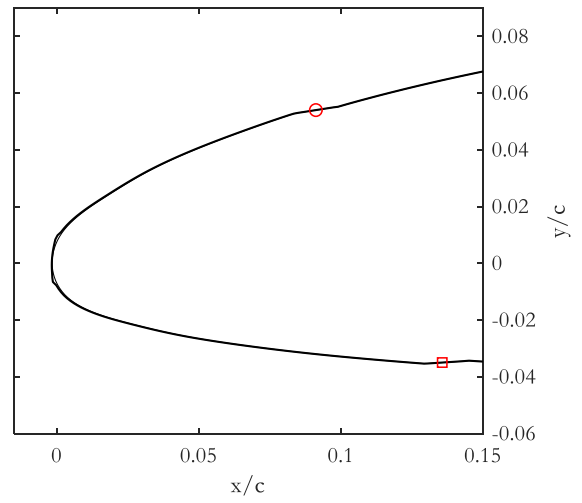
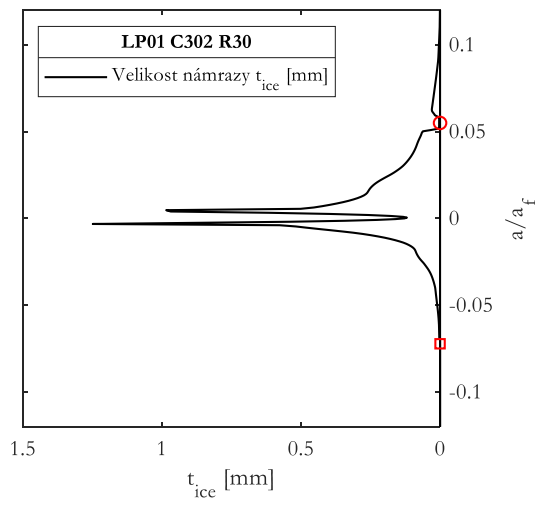
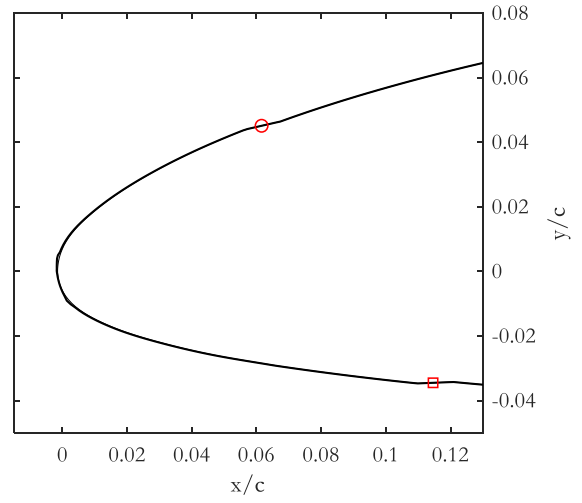
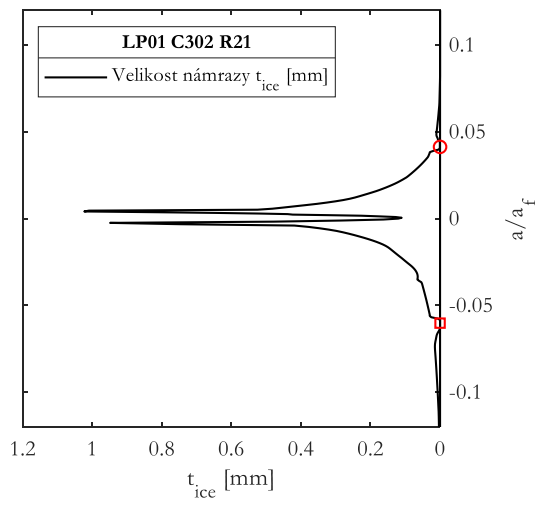
		Teplota	Tlak	v_{TAS}	AoA	Hloubka řezu	LWC	MVD	τ	Re číslo
		[K]	[kPa]	[m/s]	[°]	[m]	[g/m ³]	[μ m]	[s]	[-]
LP01_C301	R21	257,15	46,6	99,3	0,12	1,643	0,20	40	45	6,3 mil
LP01_C302	R21						0,15			
LP01_C303	R21						1,07	15		
LP01_C304	R21						0,80			
LP01_C305	R21	257,15	46,6	99,3	0,12		0,28	50	30	6,3 mil
LP01_C306	R21						0,21		45	
LP01_C307	R21						2,90	15	10	
LP01_C308	R21						2,44		45	
LP01_C301	R30	257,15	46,6	99,3	-0,43	1,172	0,20	40	45	4,5 mil
LP01_C302	R30						0,15			
LP01_C303	R30						1,07	15		
LP01_C304	R30						0,80			
LP01_C305	R30	257,15	46,6	99,3	-0,43		0,28	50	30	4,5 mil
LP01_C306	R30						0,21		45	
LP01_C307	R30						2,90	15	10	
LP01_C308	R30						2,44		45	
<hr/>										
LP01_C401	R21	257,15	46,6	99,3	0,12	1,643	0,20	40	93	6,3 mil
LP01_C402	R21						0,15		325	
LP01_C403	R21						1,07	15	93	
LP01_C404	R21						0,80		325	
LP01_C405	R21	257,15			0,12		0,28	50	30	6,3 mil
LP01_C406	R21						0,21		97	
LP01_C401	R30	257,15			-0,43	1,172	0,20	40	93	4,5 mil
LP01_C402	R30						0,15		325	
LP01_C403	R30						1,07	15	93	
LP01_C404	R30						0,80		325	
LP01_C405	R30	257,15					0,28	50	30	4,5 mil
LP01_C406	R30						0,21		97	
<hr/>										
LP03_C201	R21				4,06	1,643	0,11	40	45	6,5 mil
LP03_C202	R21						0,08			
LP03_C203	R21						0,60	15		
LP03_C204	R21						0,45			
LP03_C201	R30	270,7			3,44	1,172	0,11	40		4,6 mil
LP03_C202	R30						0,08			
LP03_C203	R30						0,60	15		
LP03_C204	R30						0,45			
<hr/>										
LP03_C501	R21	271,7	101,325	52,5	4,06	1,643	0,11	40	176	6,5 mil
LP03_C502	R21						0,08		613	

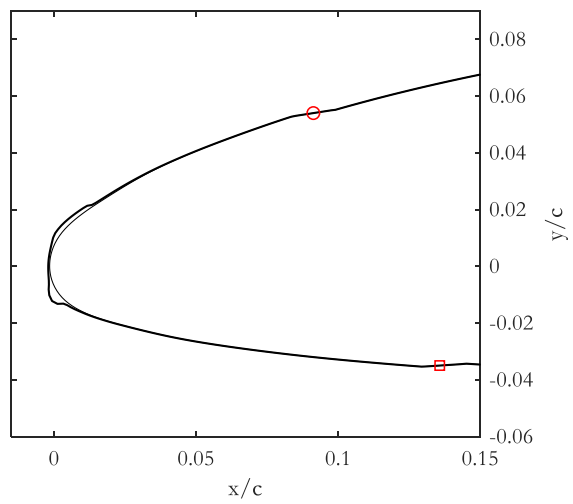
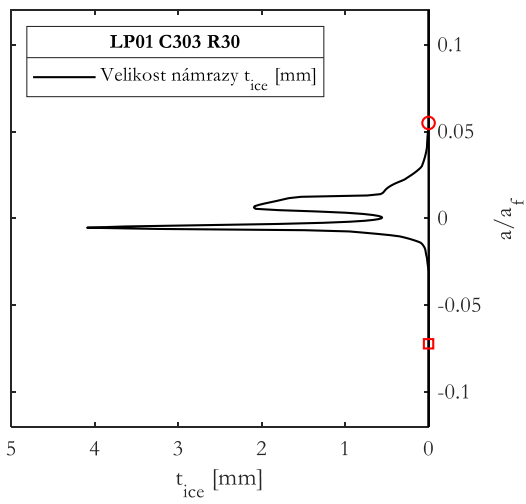
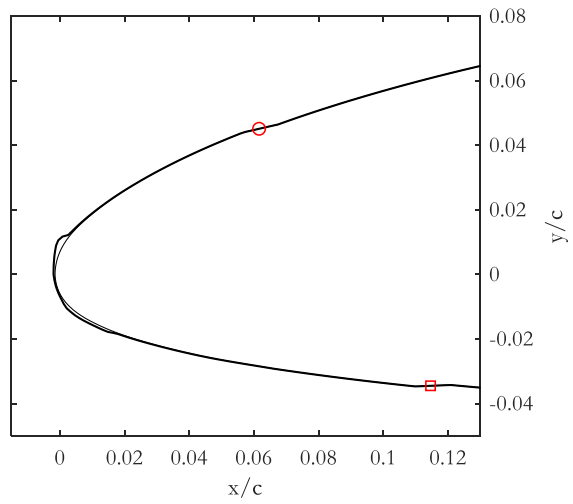
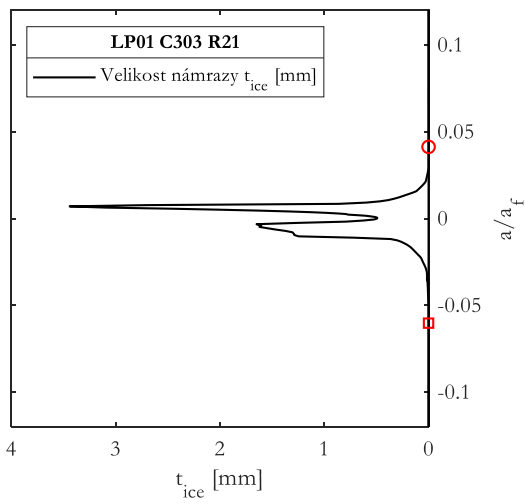
LP03_C503	R21	1	1	1	1	1	0,60	15	176	1
LP03_C504	R21	1	1	1	1	1	0,45	1	613	1
LP03_C501	R30	270,7	1	1	3,44	1,172	0,11	40	176	4,6 mil
LP03_C502	R30	1	1	1	1	1	0,08	1	613	1
LP03_C503	R30	1	1	1	1	1	0,60	15	176	1
LP03_C504	R30	1	1	1	1	1	0,45	1	613	1
LP01_O301	R21	257,15	46,6	99,3	0,12	1,643	0,33	Drizzle L	45	6,3 mil
LP01_O302	R21	1	1	1	1	1	0,20	Drizzle H	1	1
LP01_O301	R30	1	1	1	1	1,172	0,33	Drizzle L	1	4,5 mil
LP01_O302	R30	1	1	1	1	1	0,20	Drizzle H	1	1
LP02_O201	R21	271,7	1	69,0	-0,64	1,643	0,44	Drizzle L	1	8,5 mil
LP02_O202	R21	1	1	1	1	1	0,27	Drizzle H	1	1
LP03_O201	R21	1	1	52,5	4,06	1	0,44	Drizzle L	1	6,5 mil
LP03_O202	R21	1	1	1	1	1	0,27	Drizzle H	1	1
LP02_O201	R30	270,7	1	69,0	-2,62	1,172	0,44	Drizzle L	1	4,5 mil
LP02_O202	R30	1	1	1	1	1	0,27	Drizzle H	1	1
LP03_O201	R30	1	1	52,5	3,44	1	0,44	Drizzle L	1	4,6 mil
LP03_O202	R30	1	1	1	1	1	0,27	Drizzle H	1	1
LP01_O401	R21	257,15	46,6	99,3	0,12	1,643	0,33	Drizzle L	325	6,3 mil
LP01_O402	R21	1	1	1	1	1	0,20	Drizzle H	1	1
LP02_O501	R21	273,15	101,325	69,0	-0,64	1	0,44	Drizzle L	467	8,5 mil
LP02_O502	R21	1	1	1	1	1	0,27	Drizzle H	1	1
LP03_O501	R21	1	1	52,5	4,06	1	0,44	Drizzle L	613	6,5 mil
LP03_O502	R21	1	1	1	1	1	0,27	Drizzle H	1	1
LP01_O401	R30	257,15	46,6	99,3	-0,43	1,172	0,33	Drizzle L	325	4,5 mil
LP01_O402	R30	1	1	1	1	1	0,20	Drizzle H	1	1
LP02_O501	R30	270,7	101,325	69,0	-2,62	1	0,44	Drizzle L	467	4,6 mil
LP02_O502	R30	1	1	1	1	1	0,27	Drizzle H	1	1
LP03_O501	R30	271,7	1	52,5	3,44	1	0,44	Drizzle L	613	4,5 mil
LP03_O502	R30	1	1	1	1	1	0,27	Drizzle H	1	1

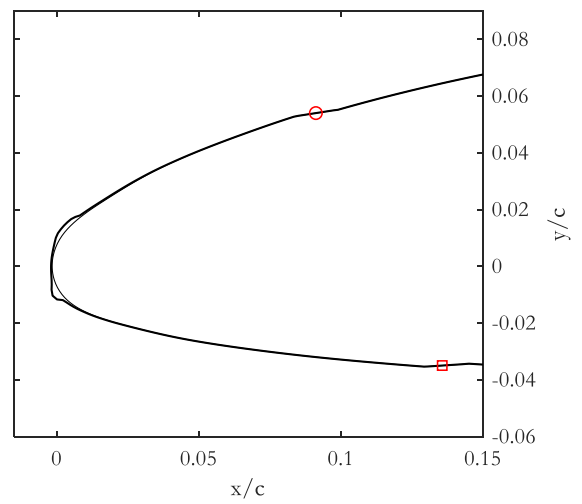
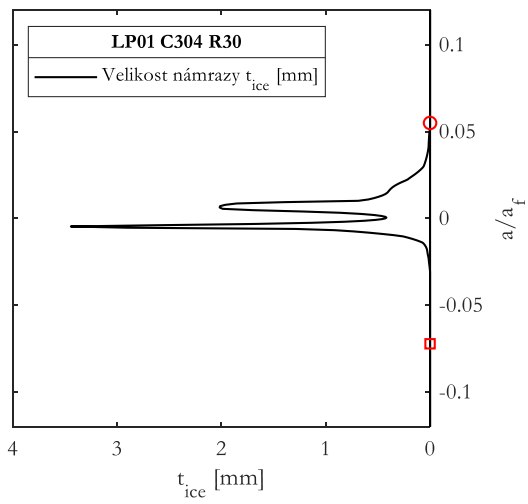
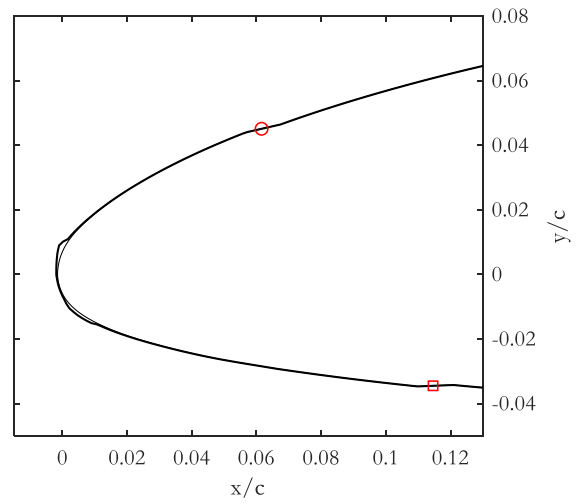
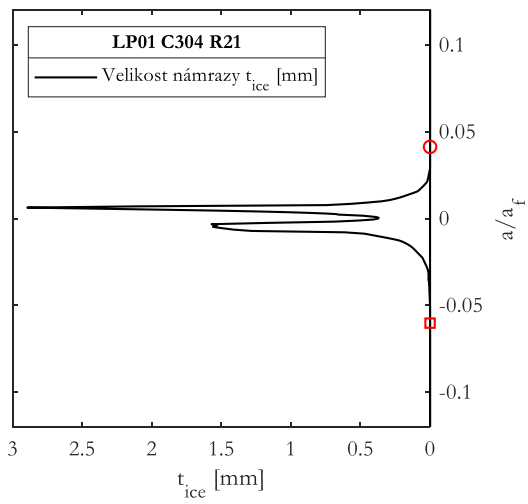
P2 VYHODNOCENÍ APPENDIX C

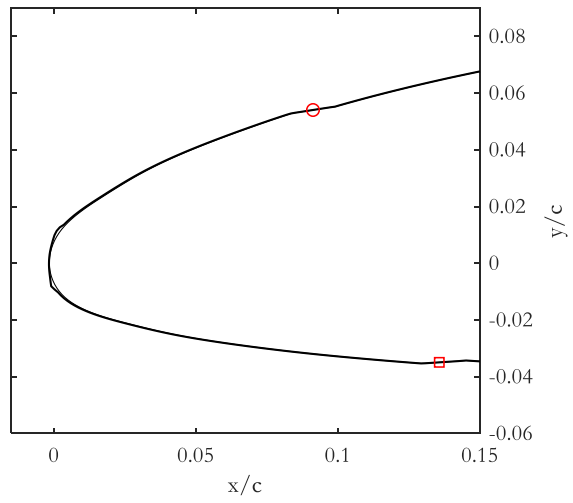
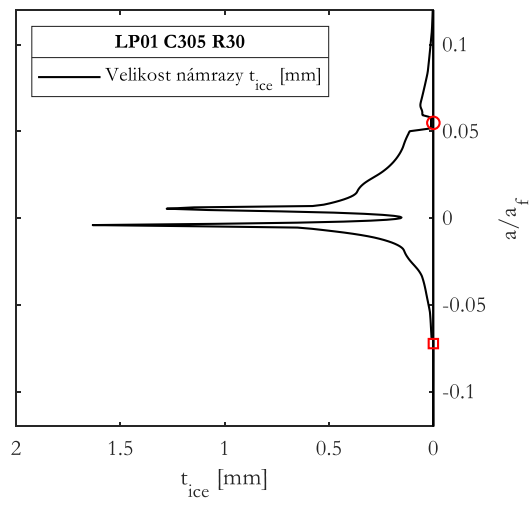
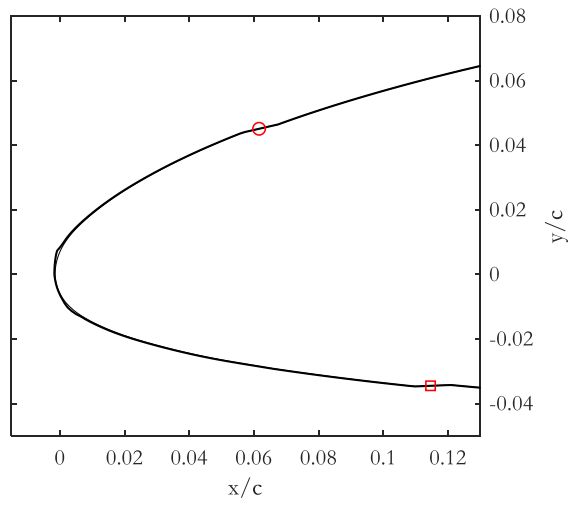
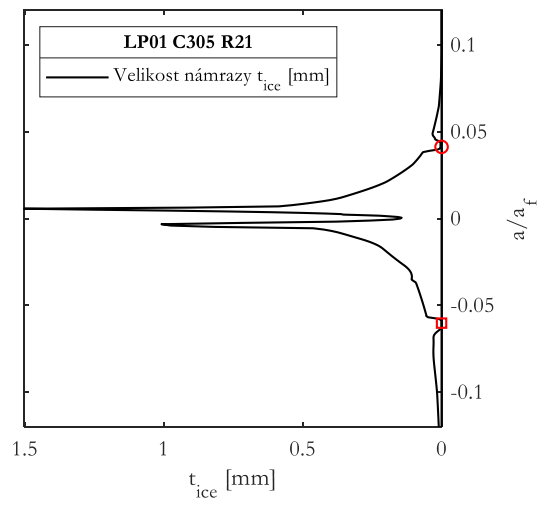
mohutnost námrazy

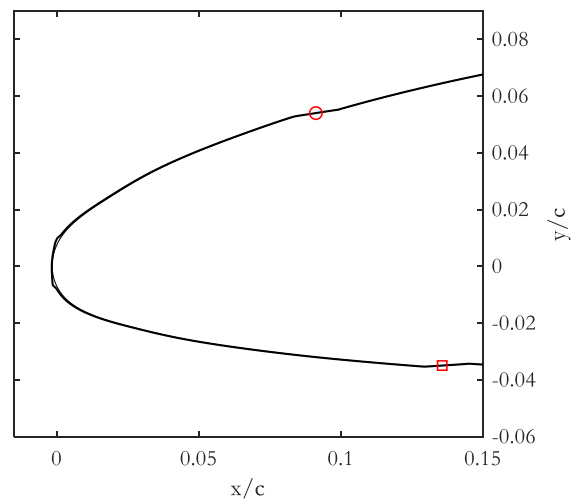
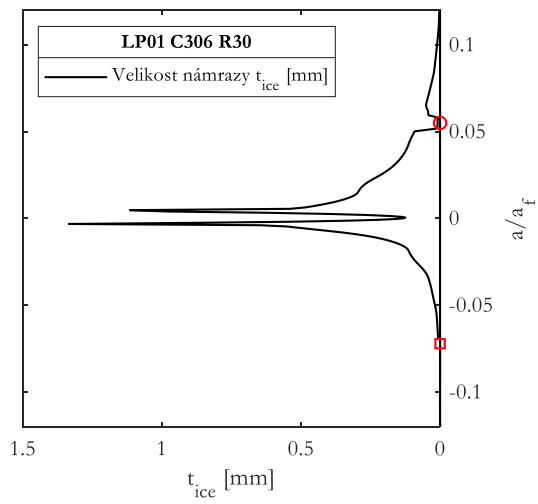
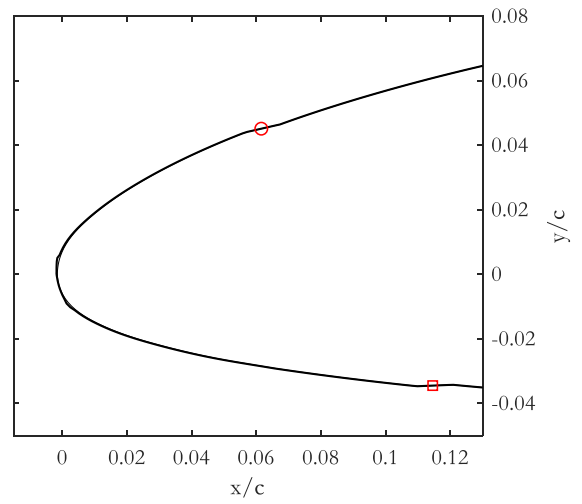
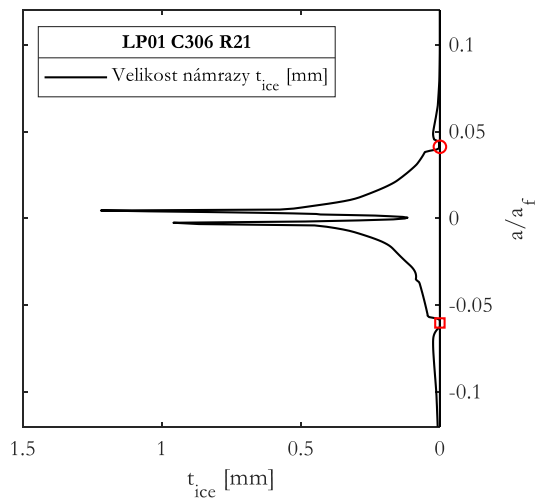


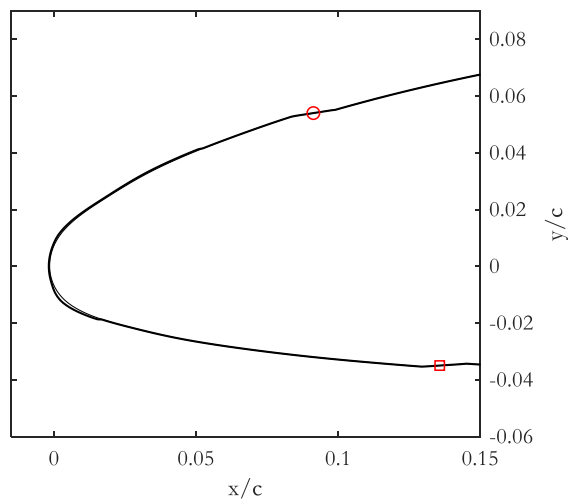
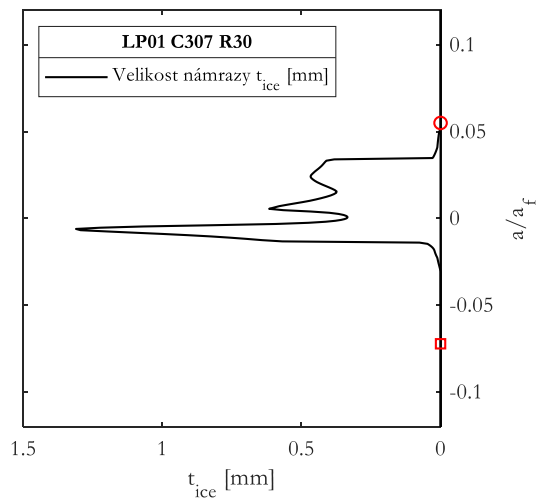
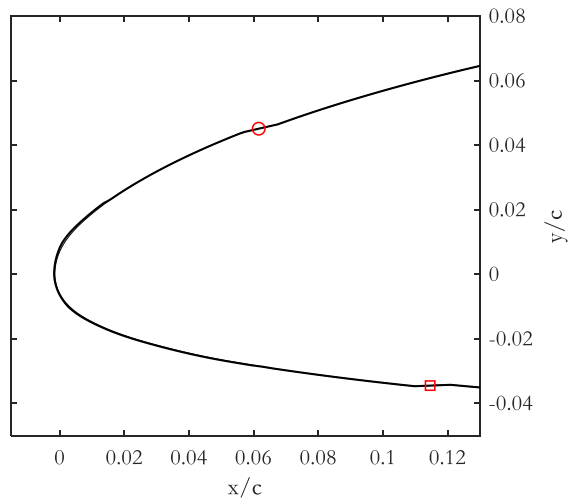
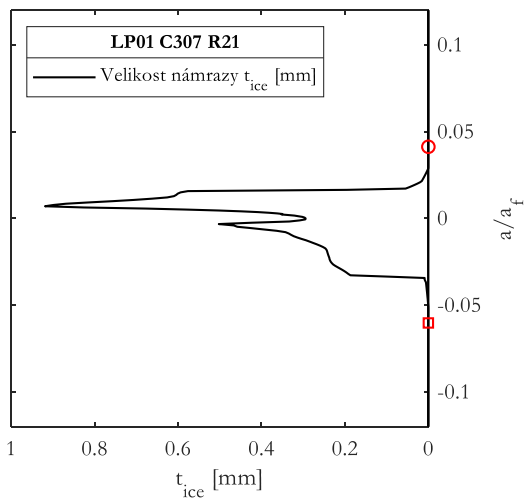


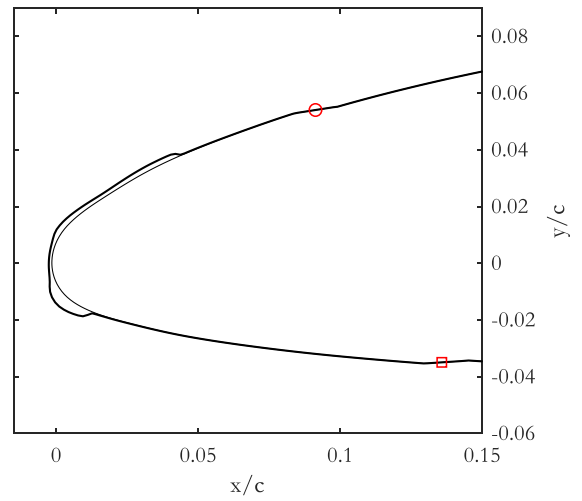
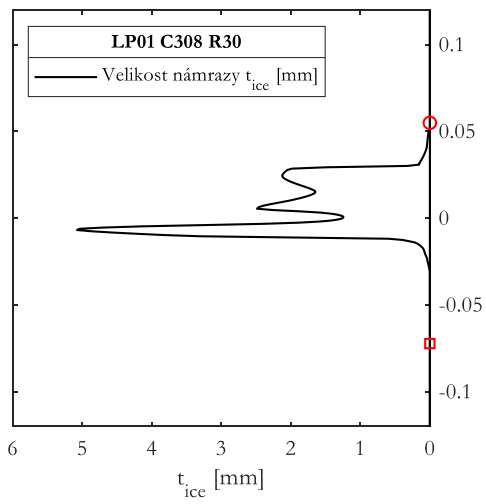
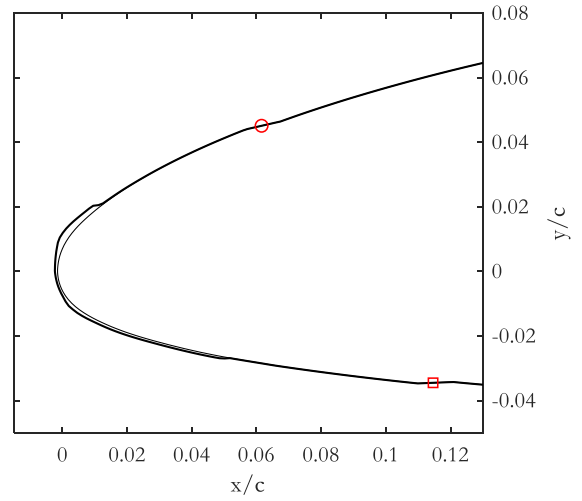
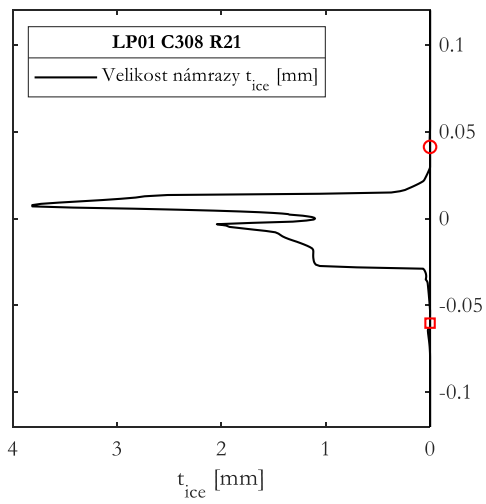


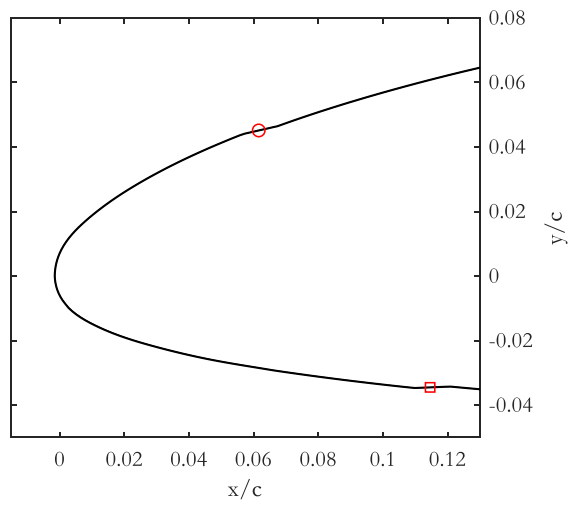
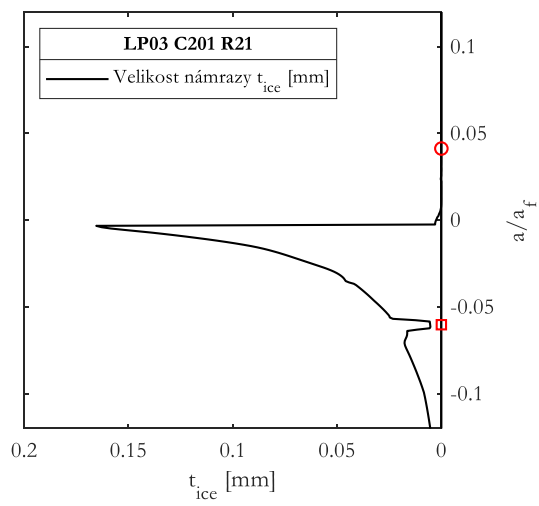
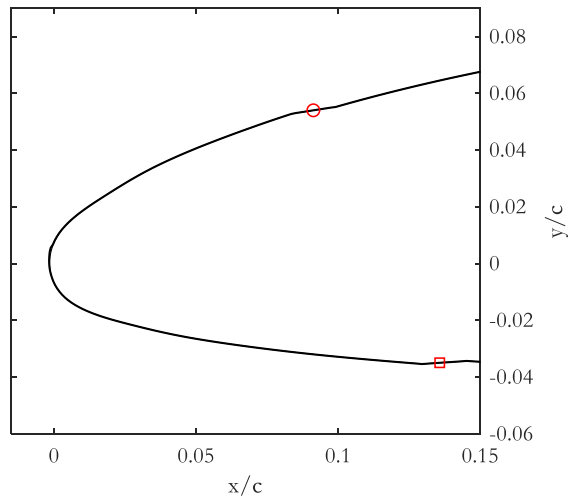
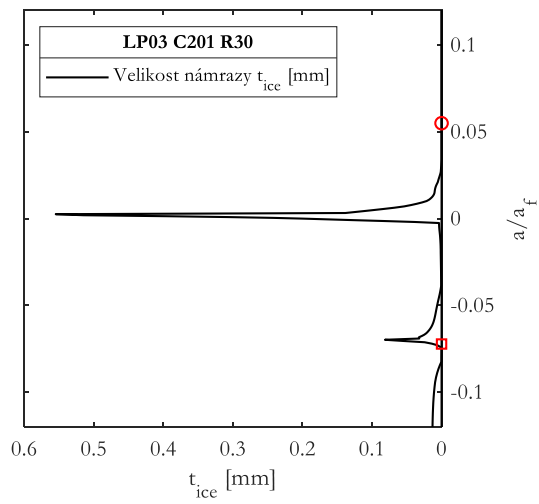


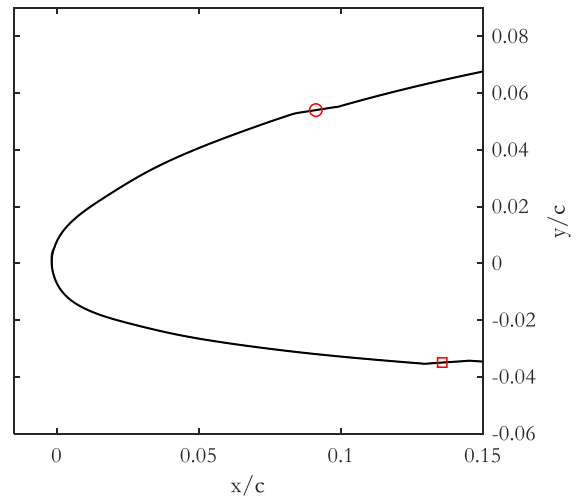
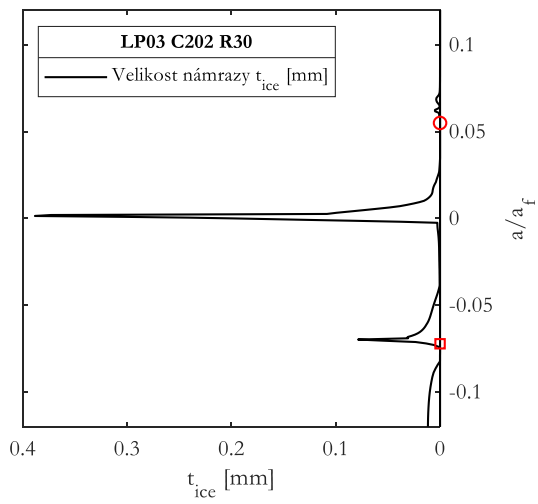
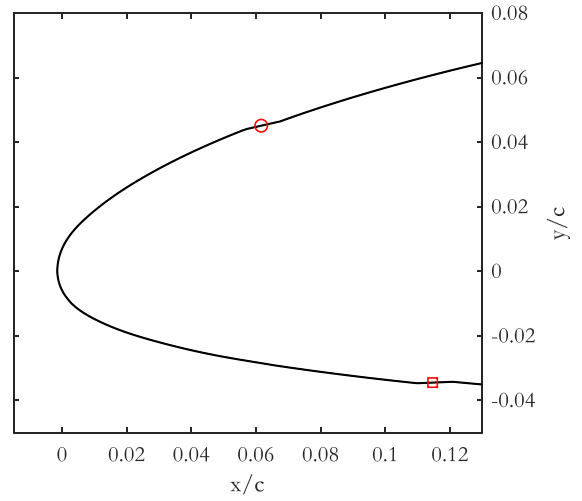
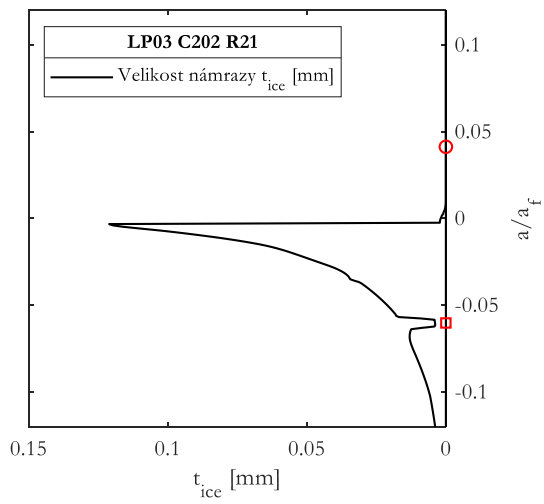


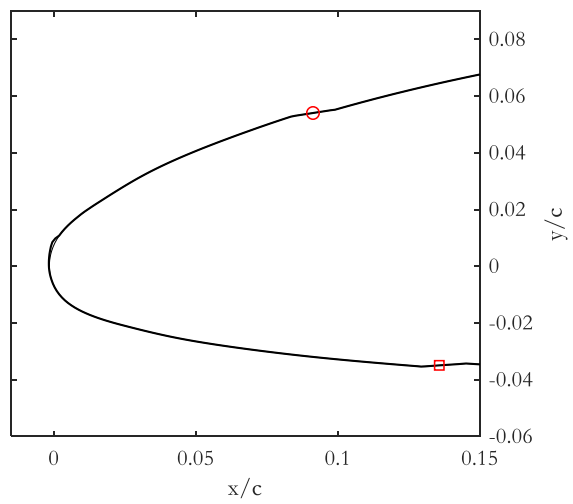
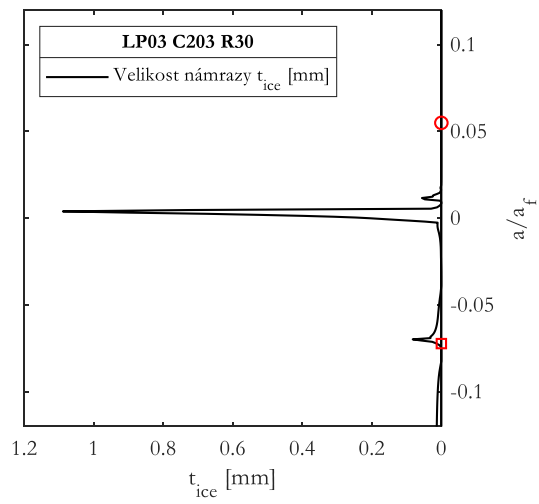
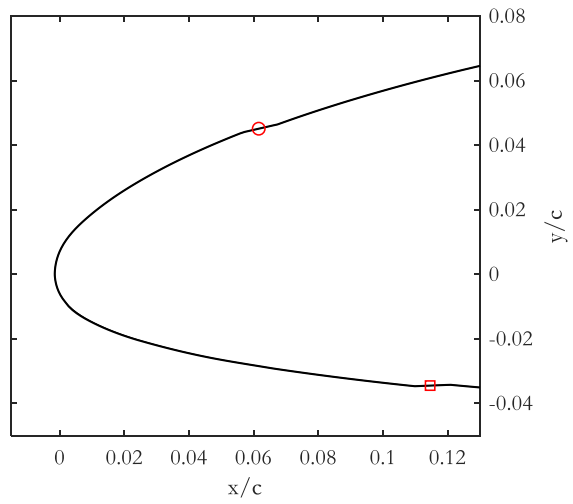
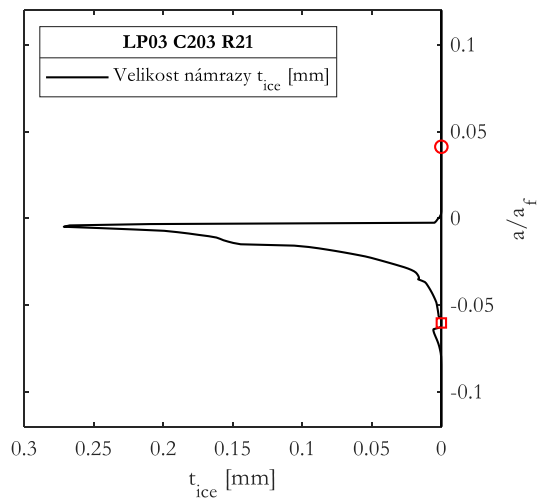


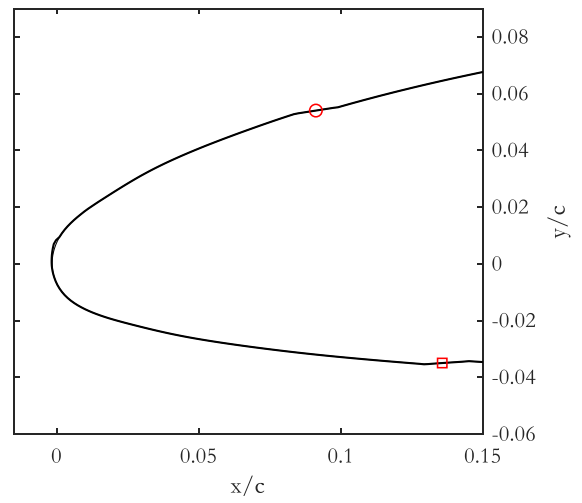
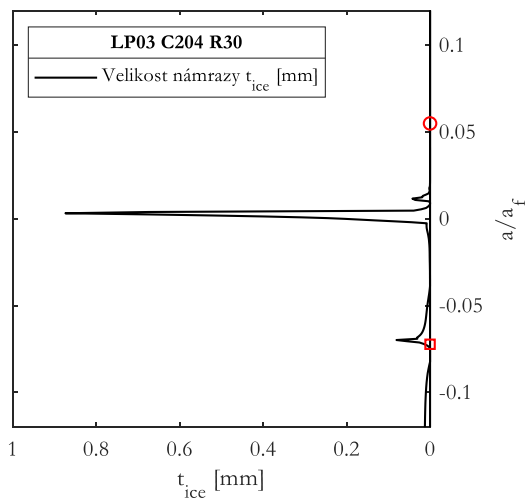
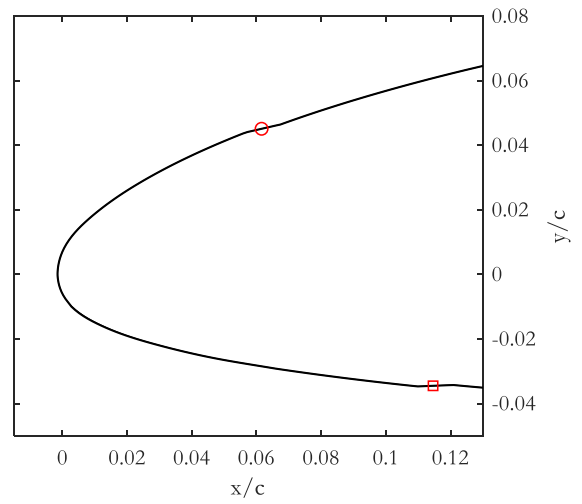
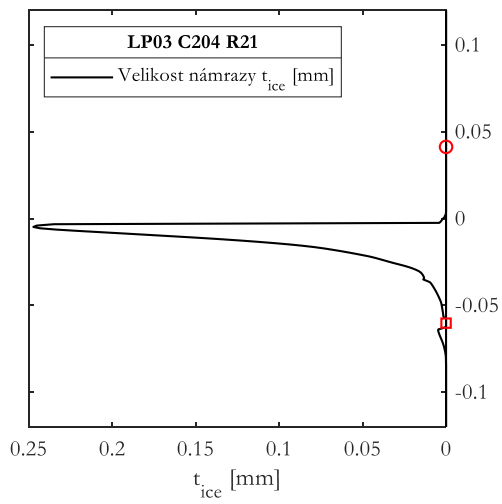




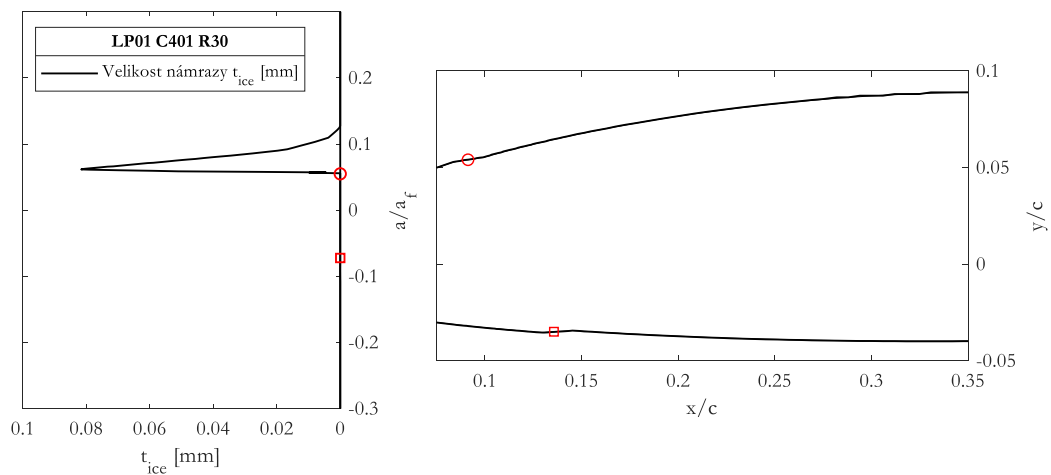
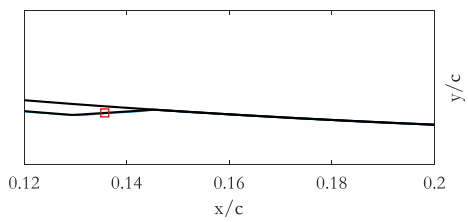
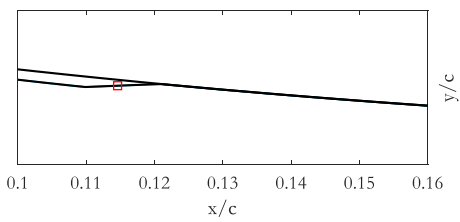
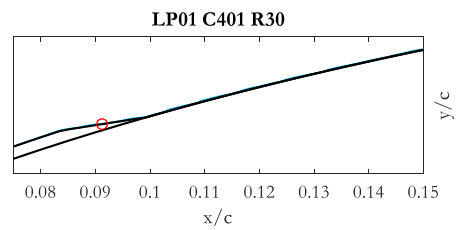
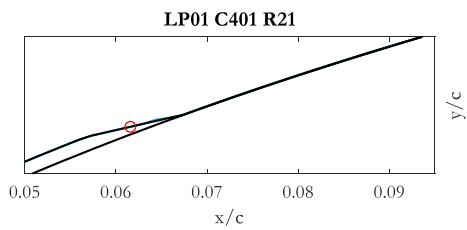
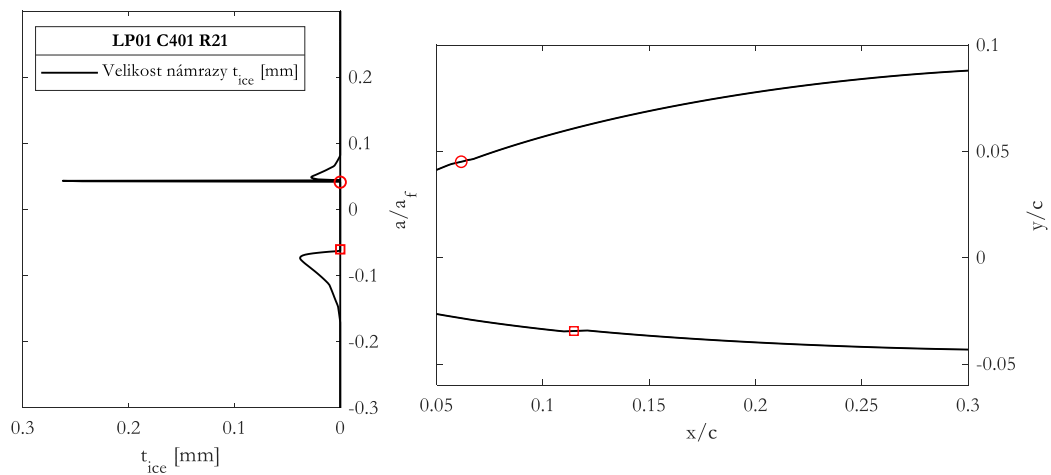


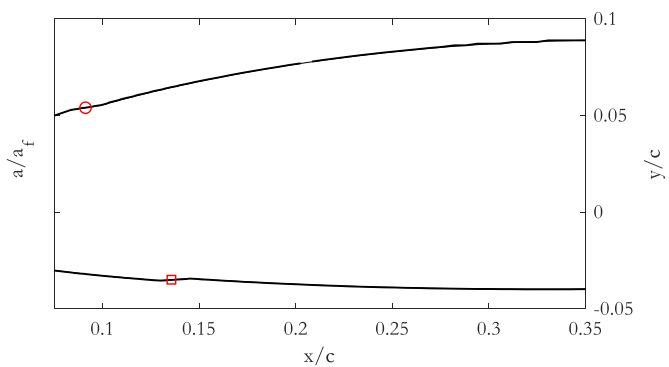
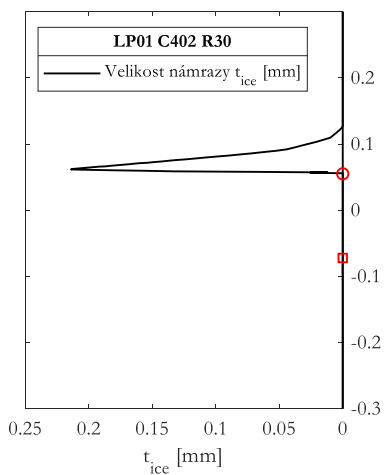
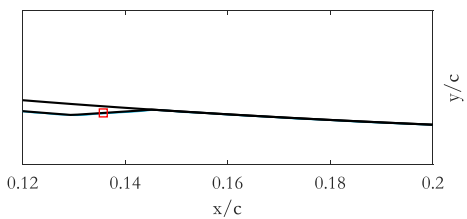
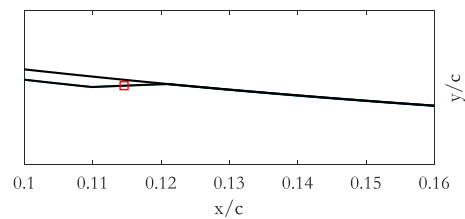
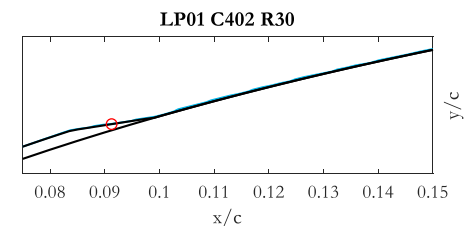
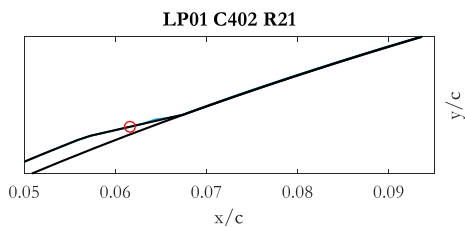
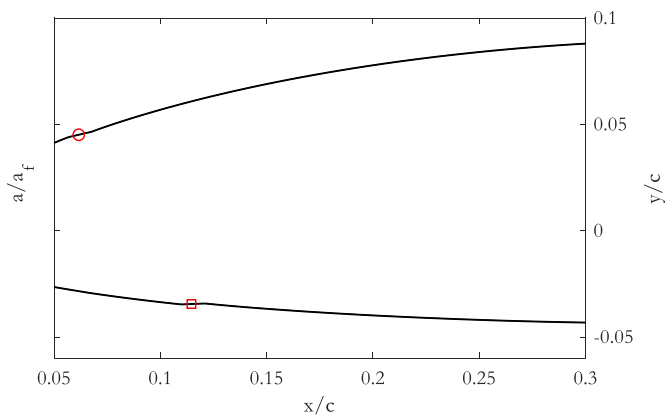
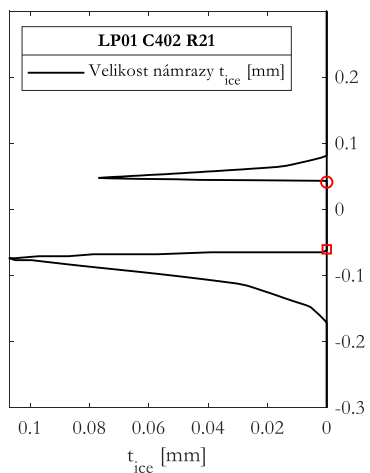


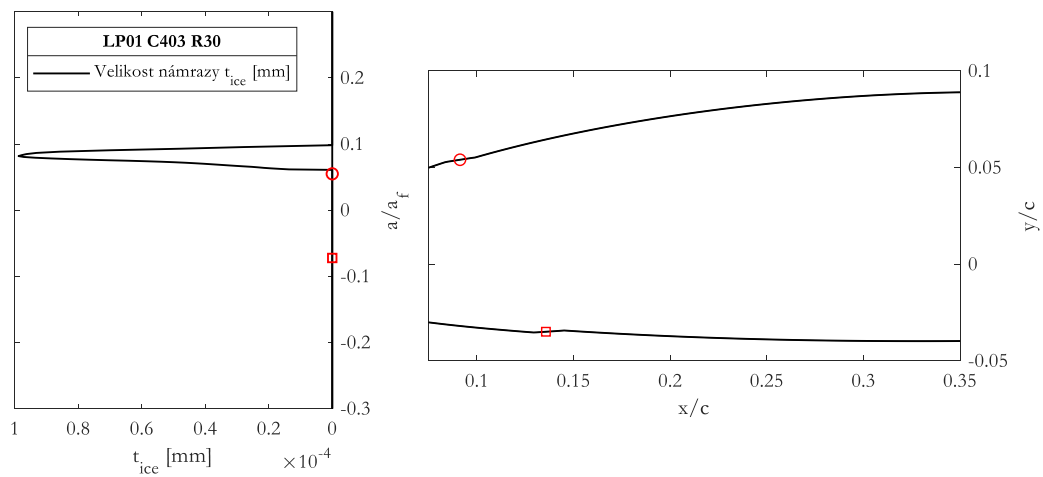
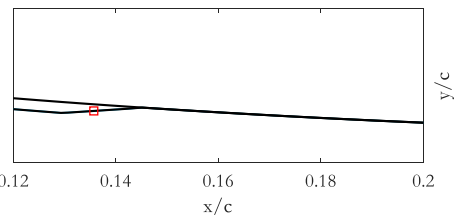
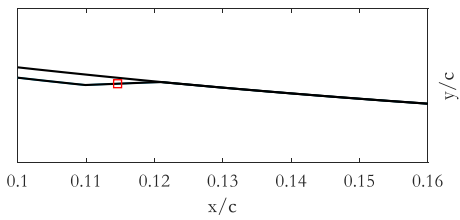
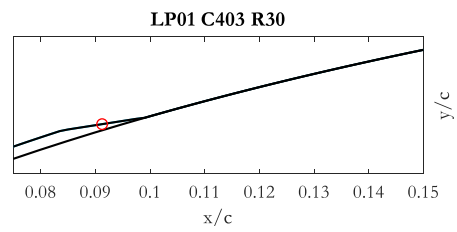
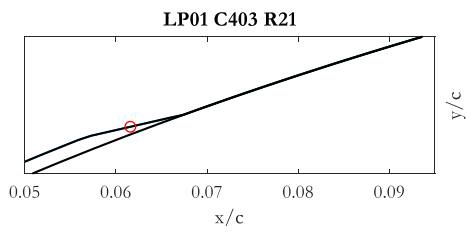
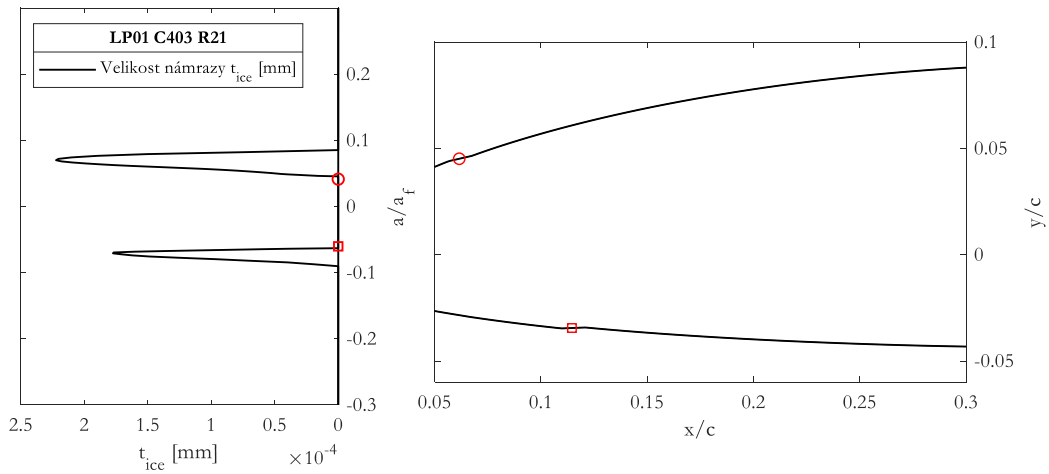


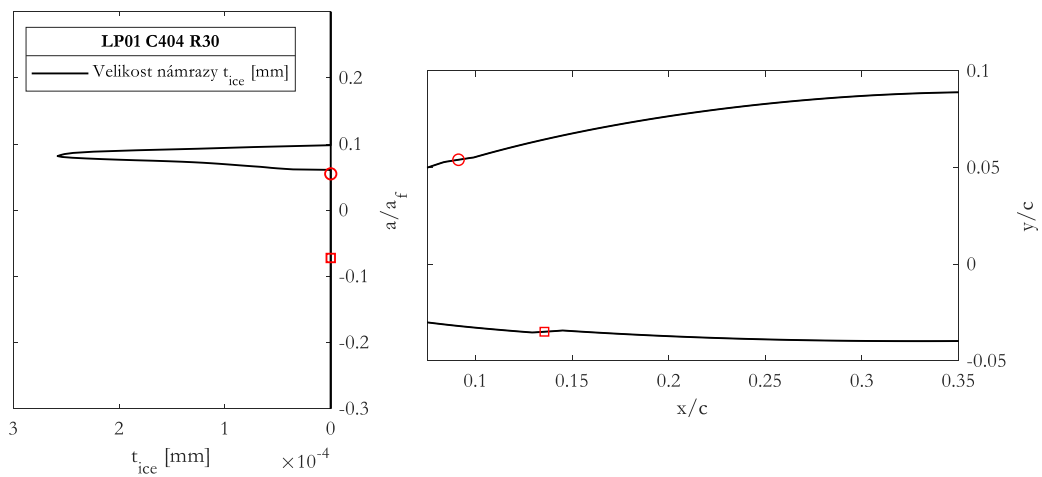
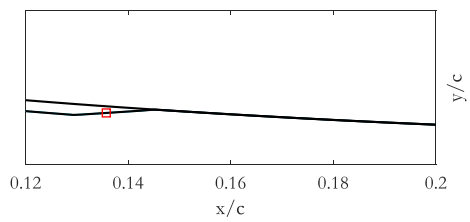
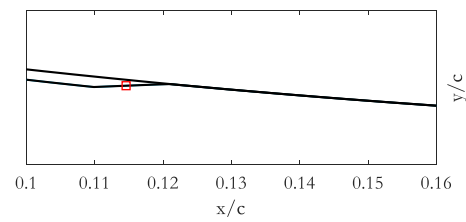
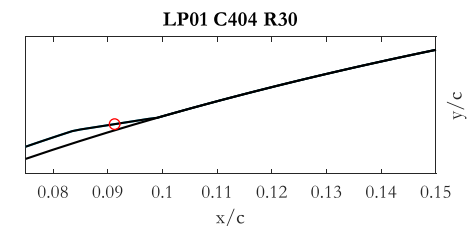
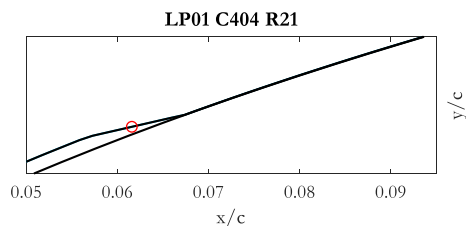
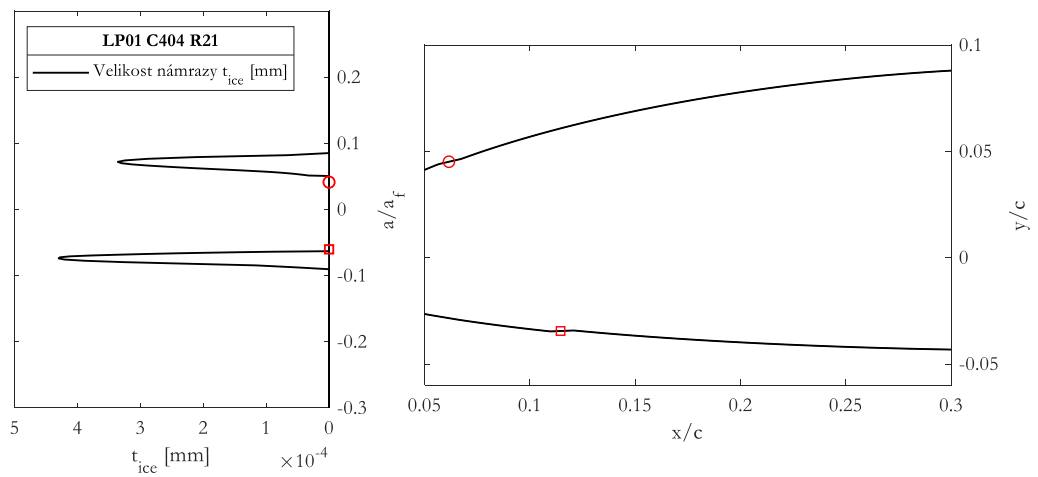


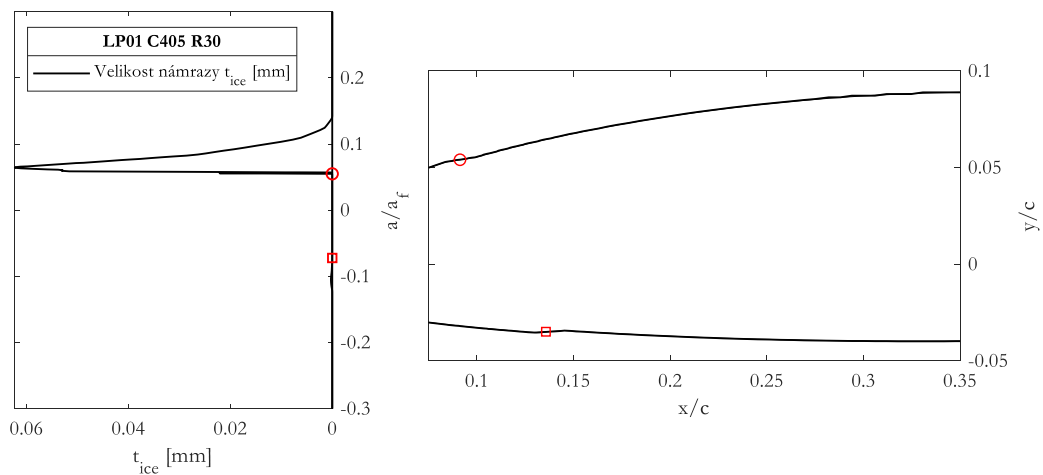
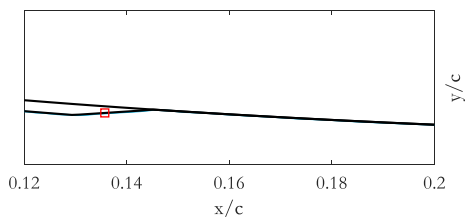
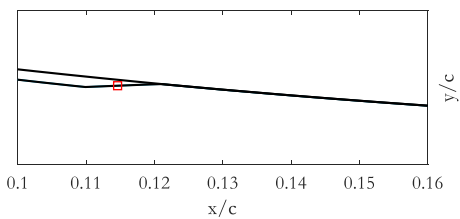
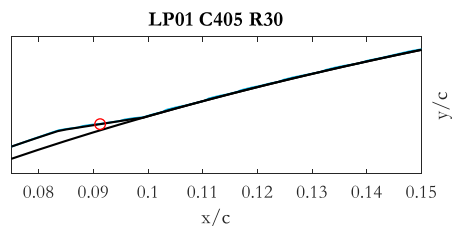
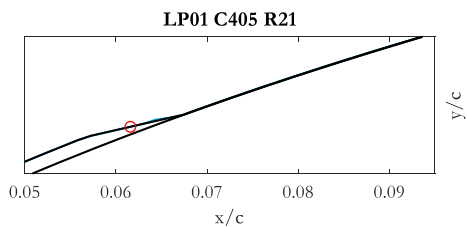
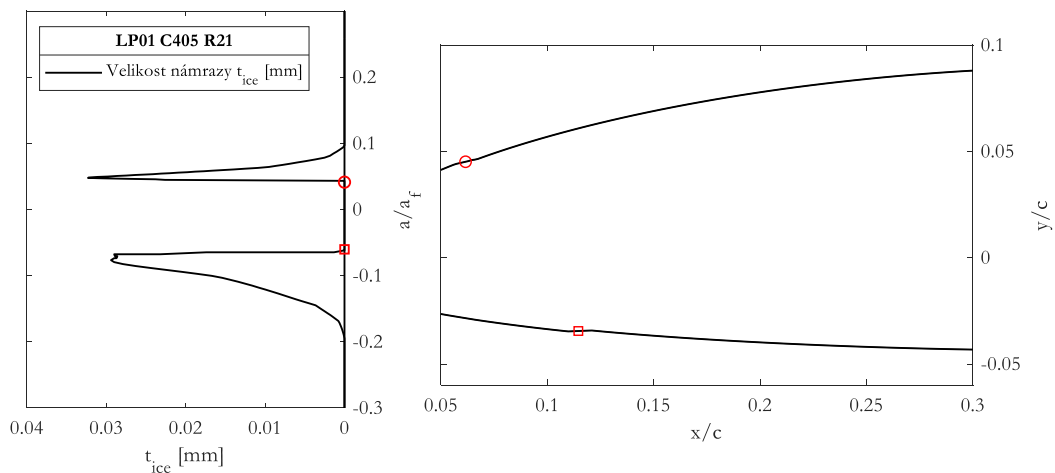
P3 VYHODNOCENÍ APPENDIX C
presah námrazy

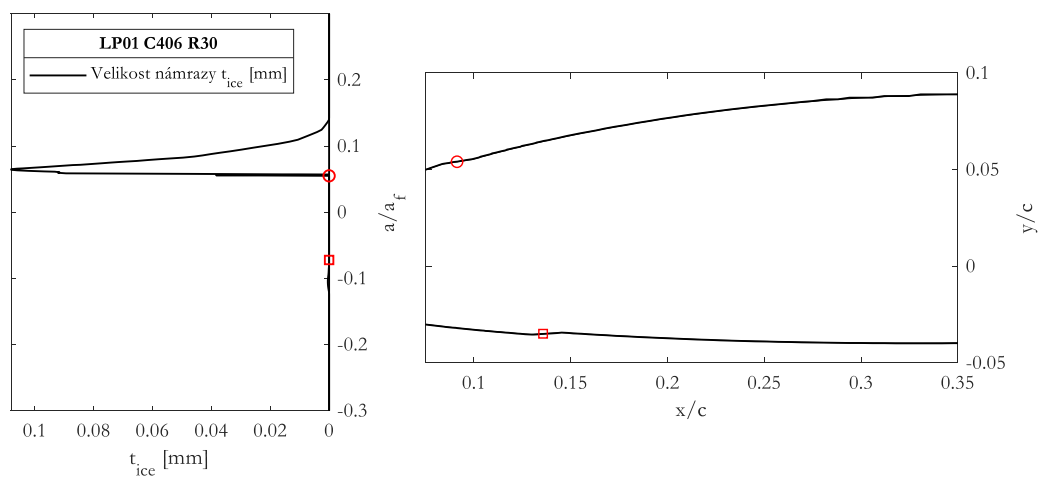
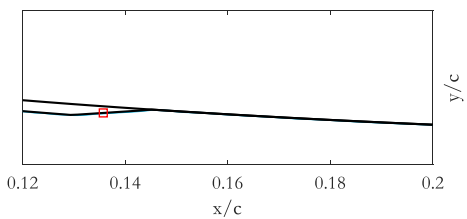
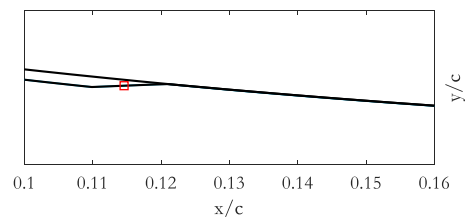
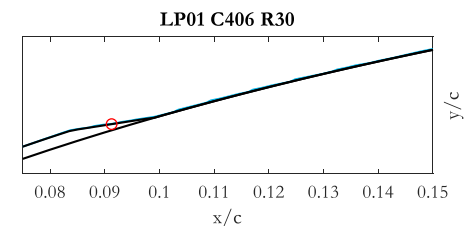
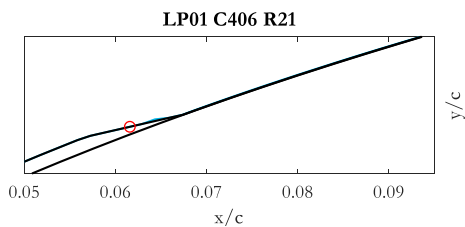
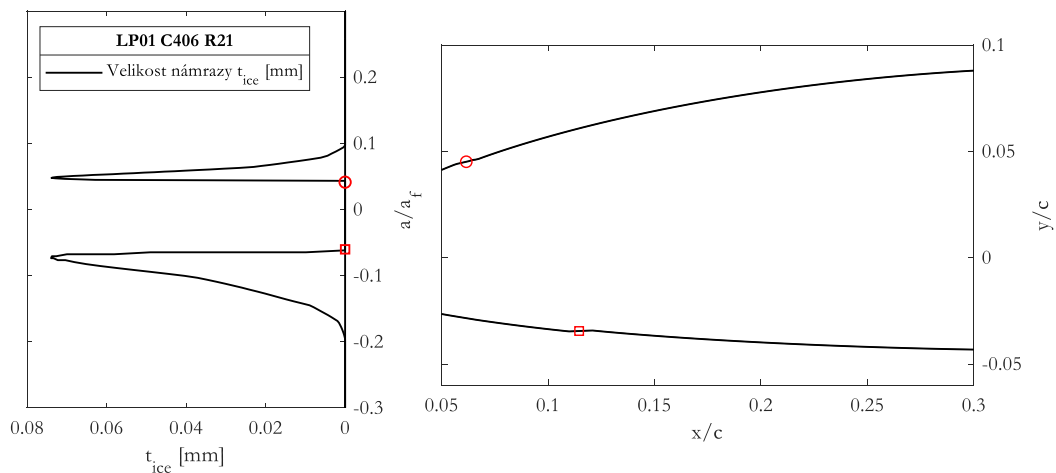


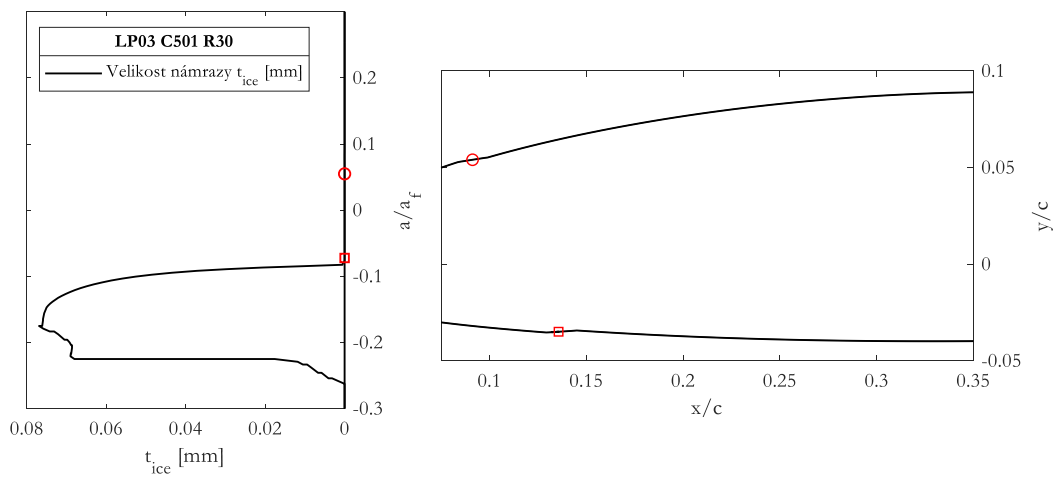
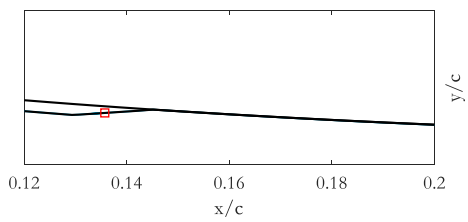
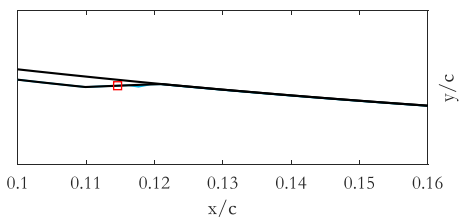
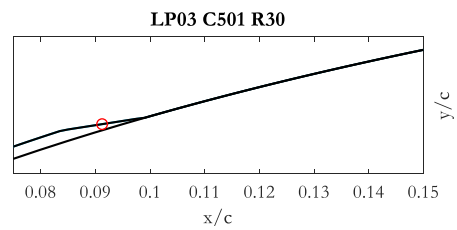
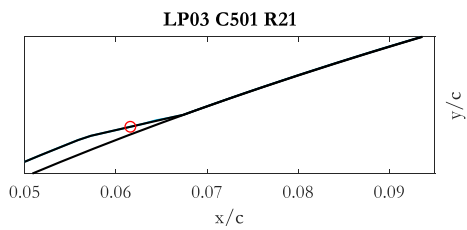
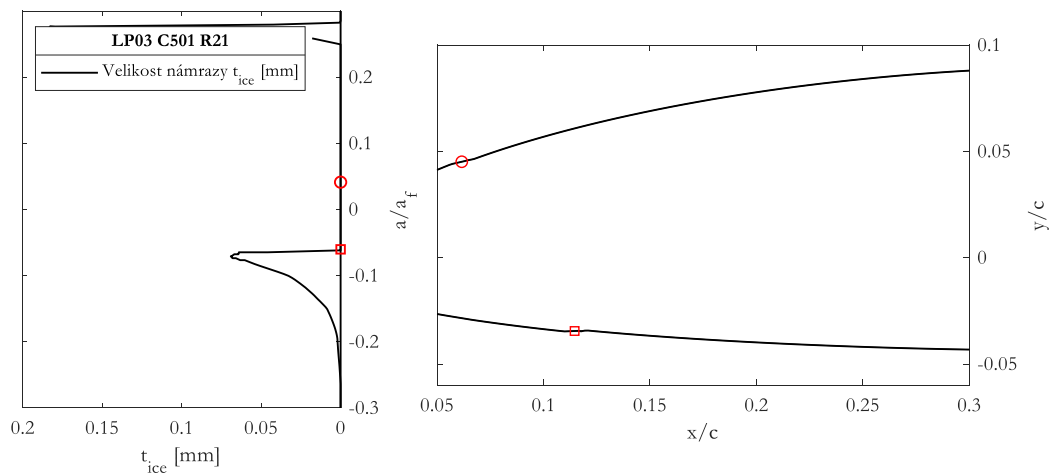


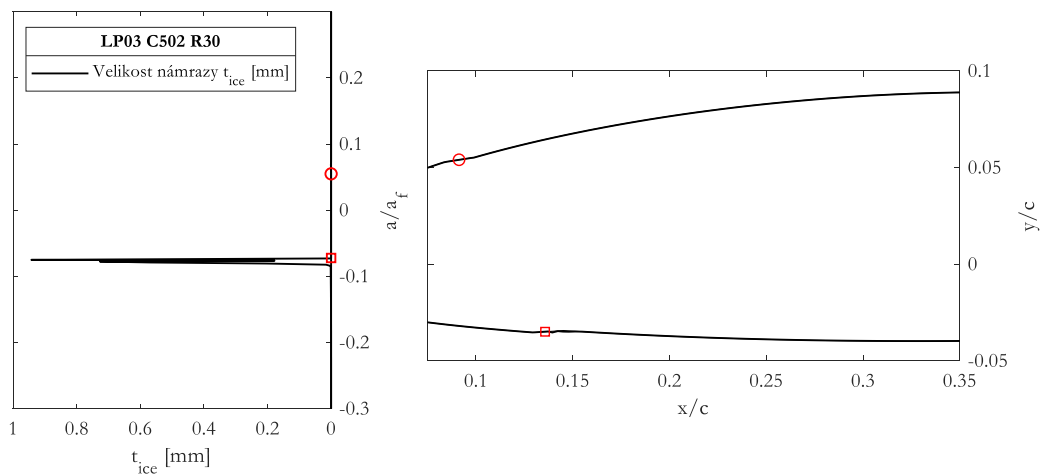
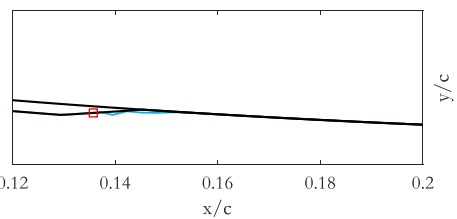
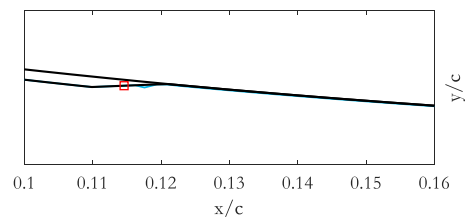
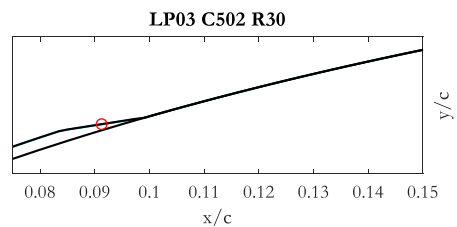
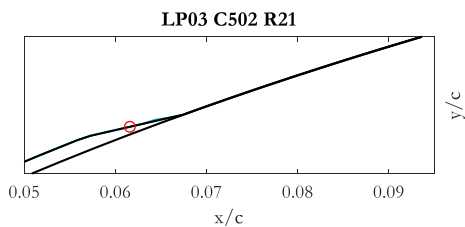
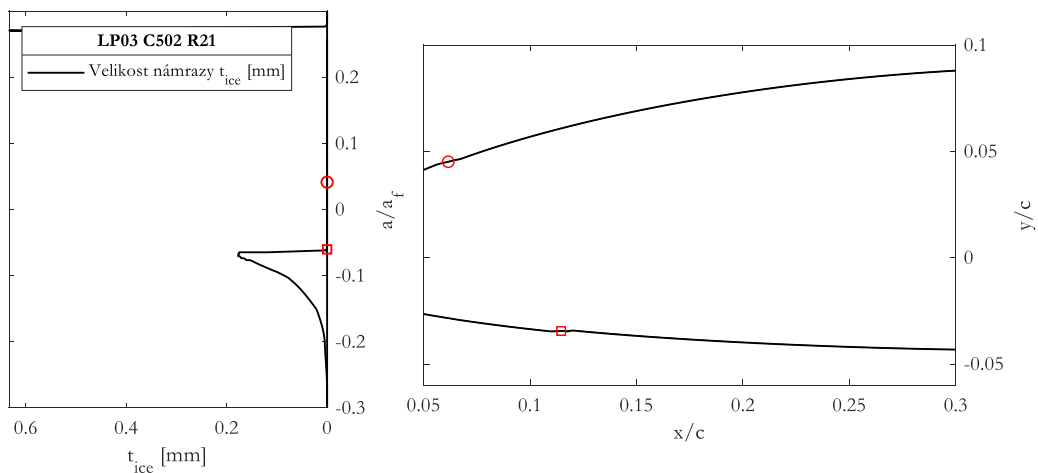


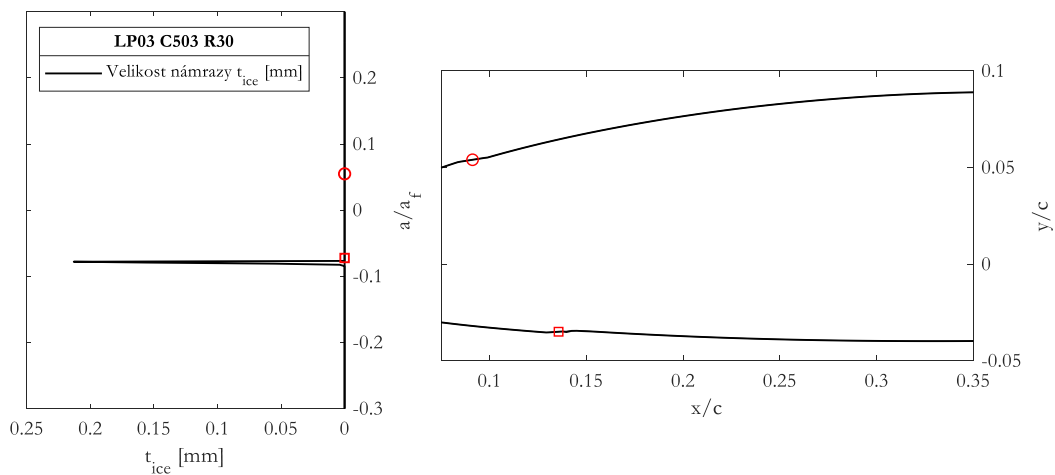
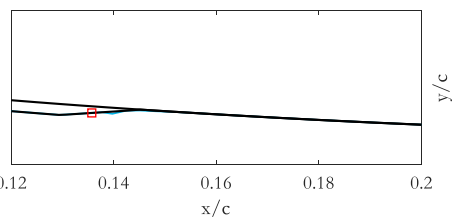
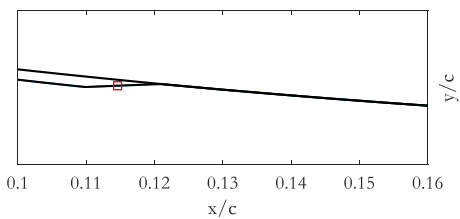
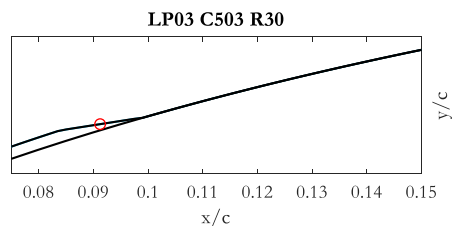
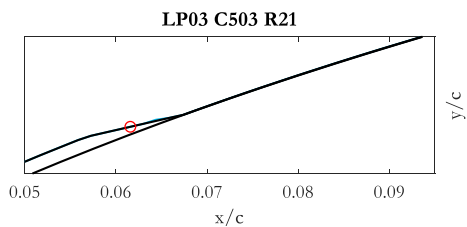
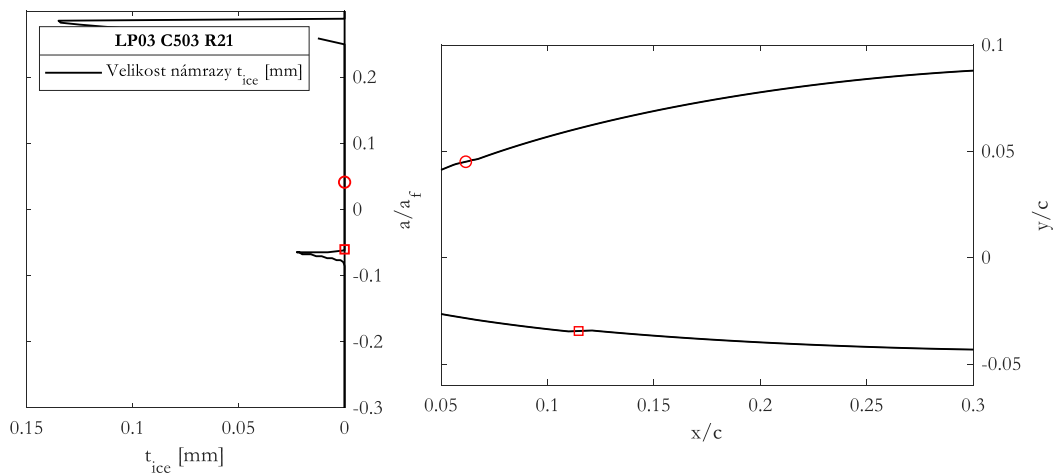


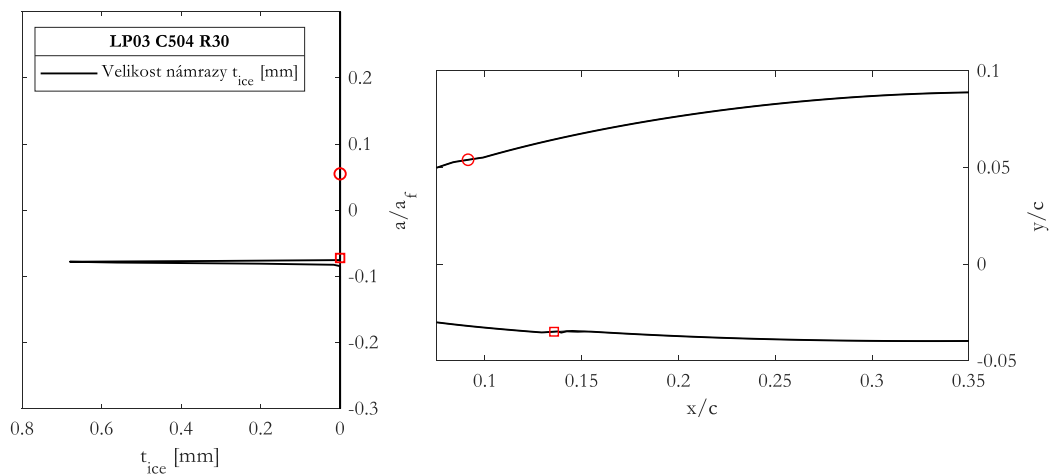
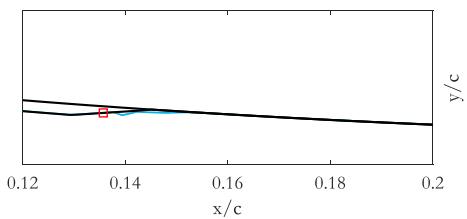
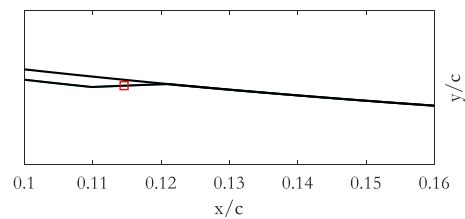
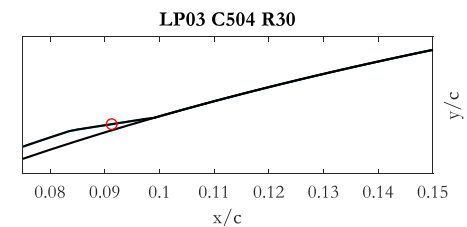
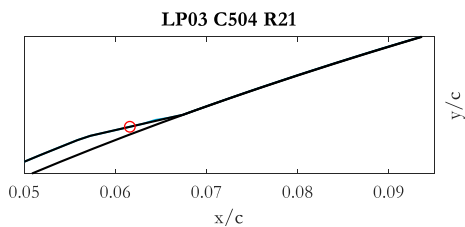
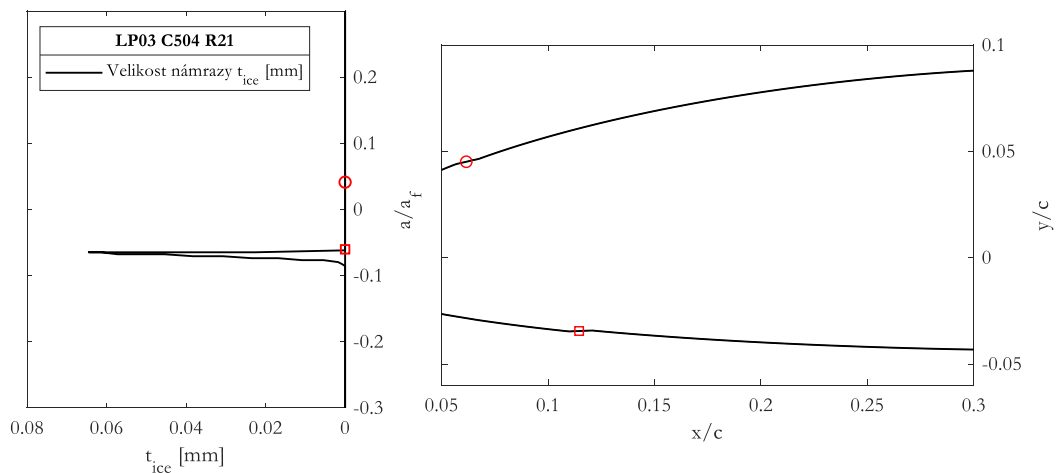




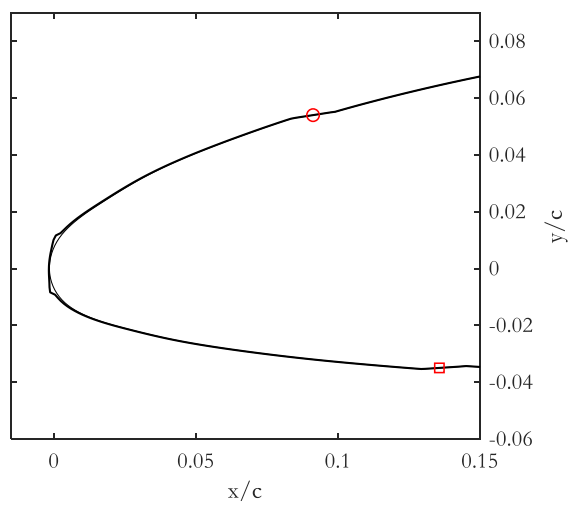
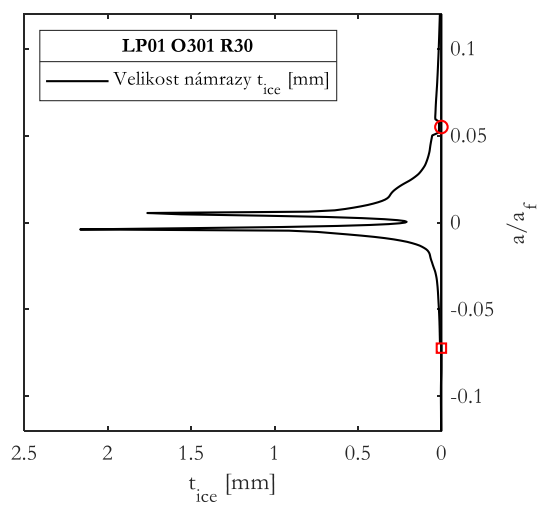
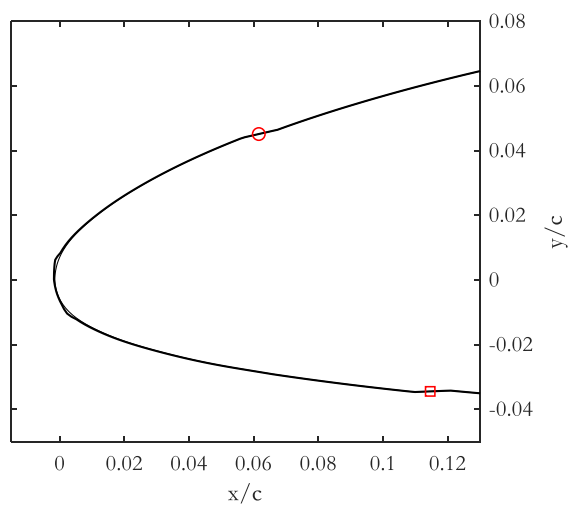
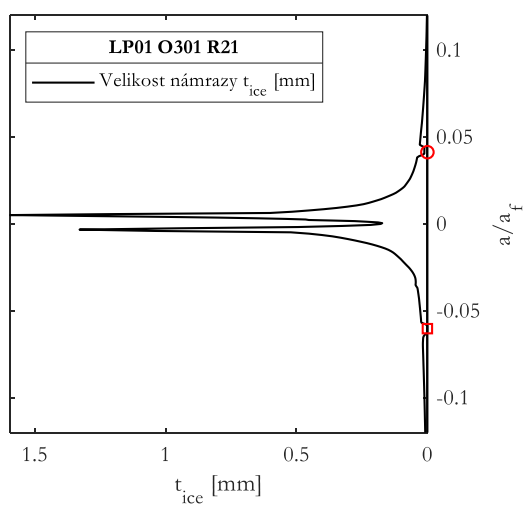


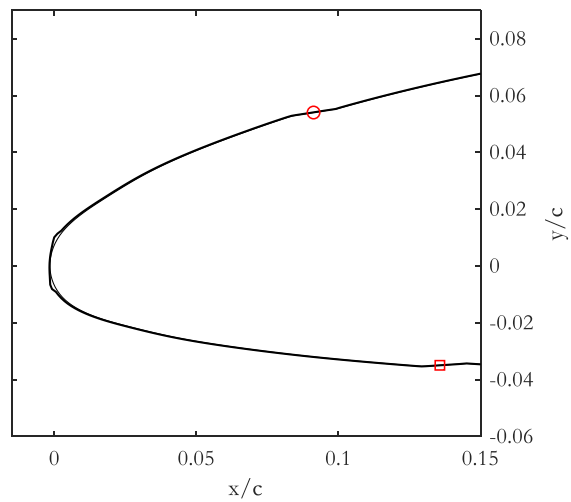
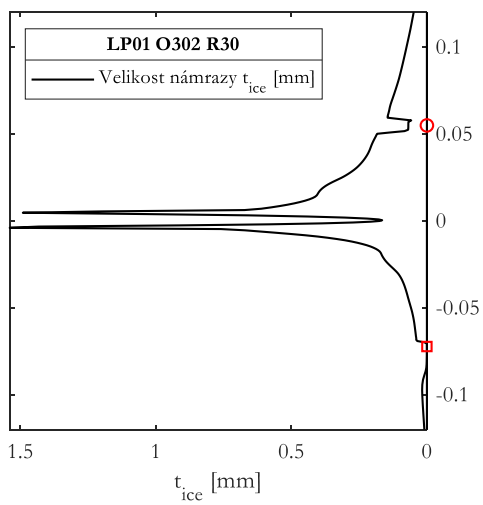
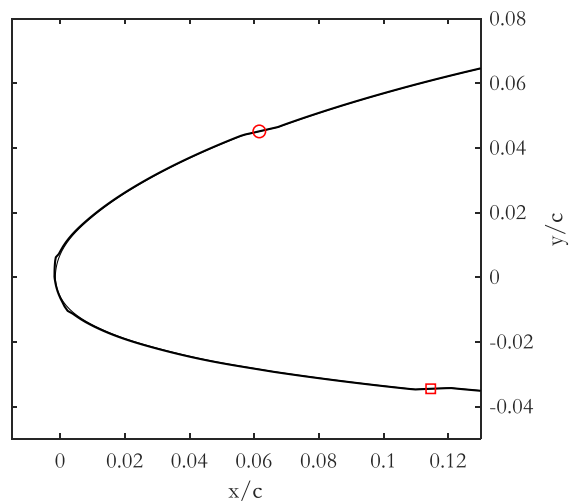
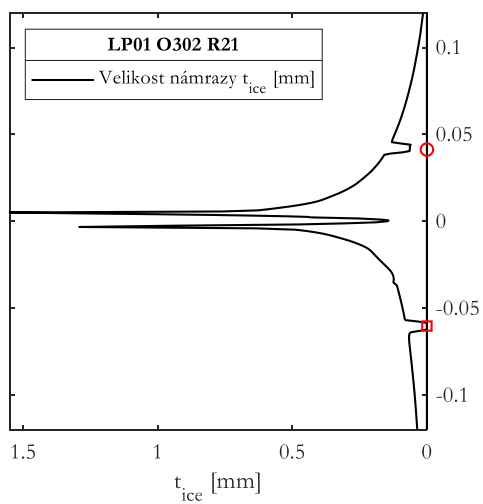


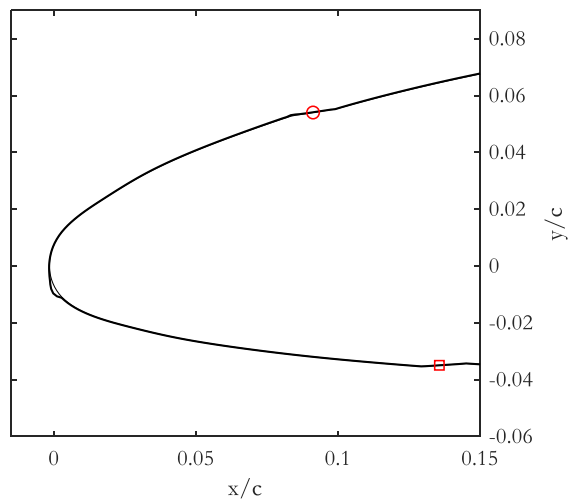
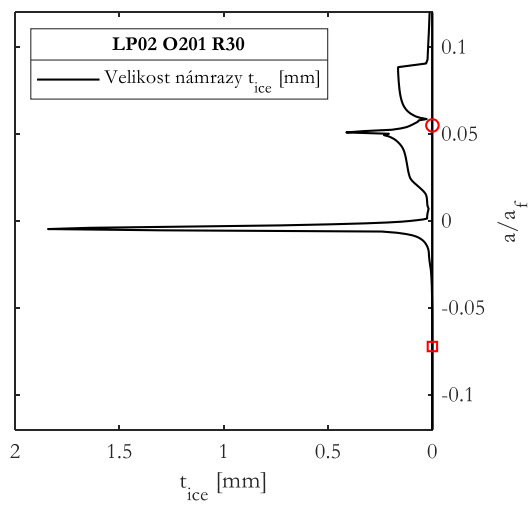
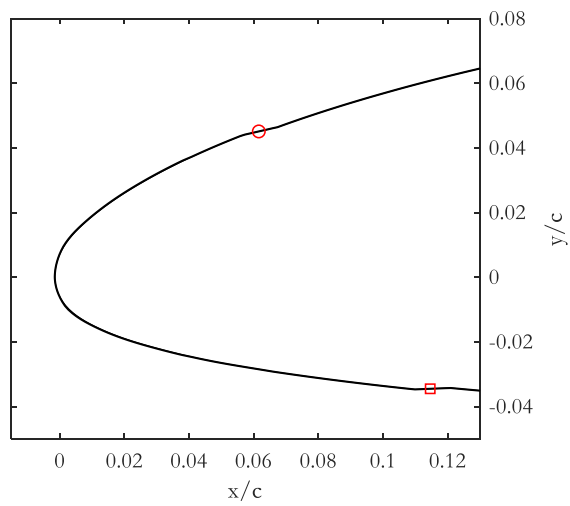
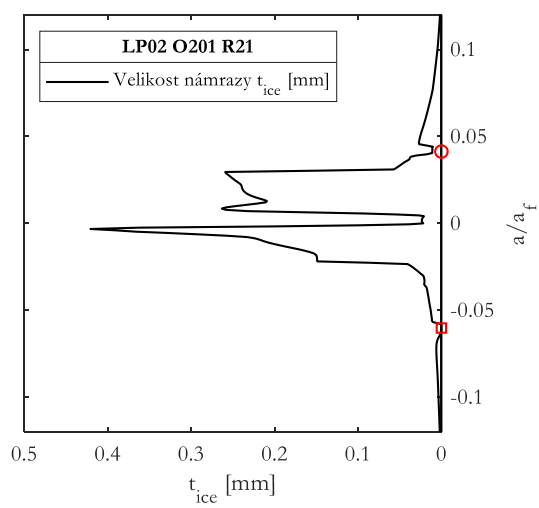


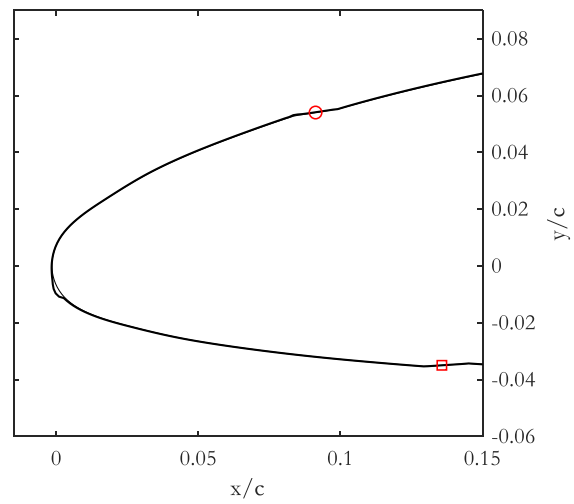
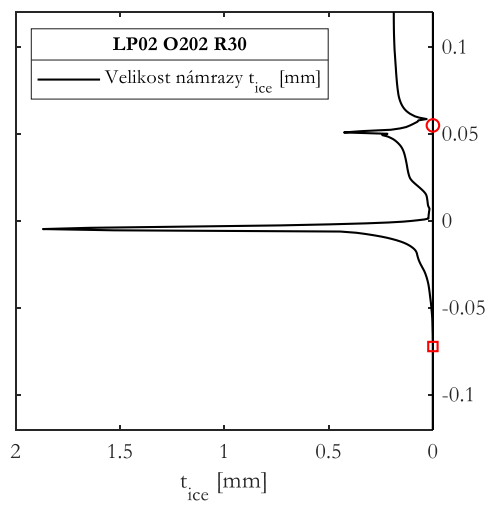
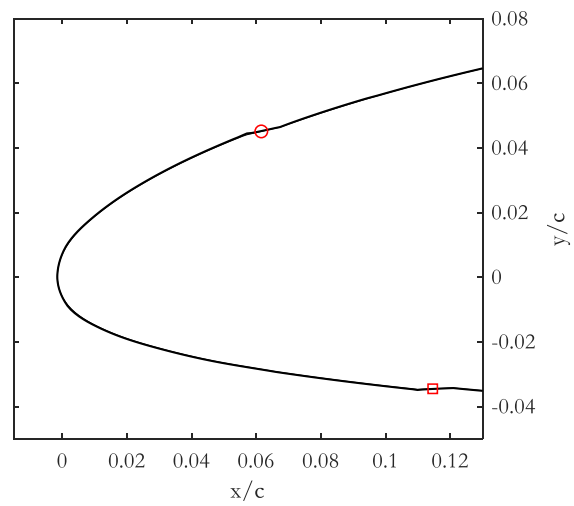
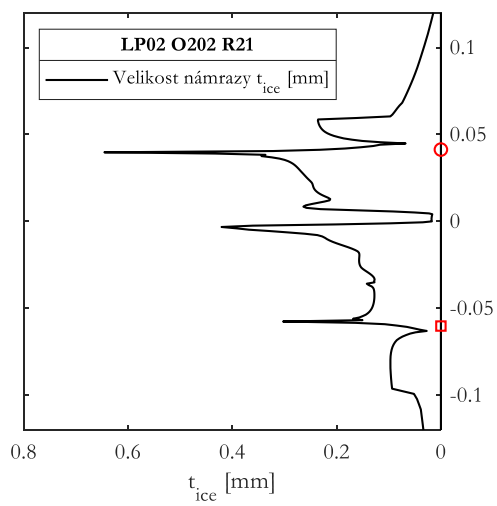


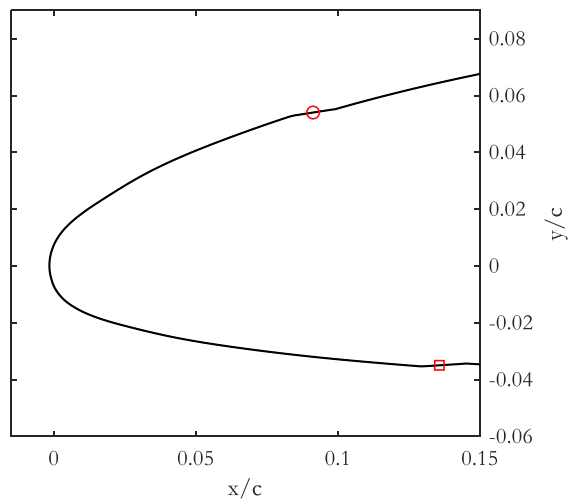
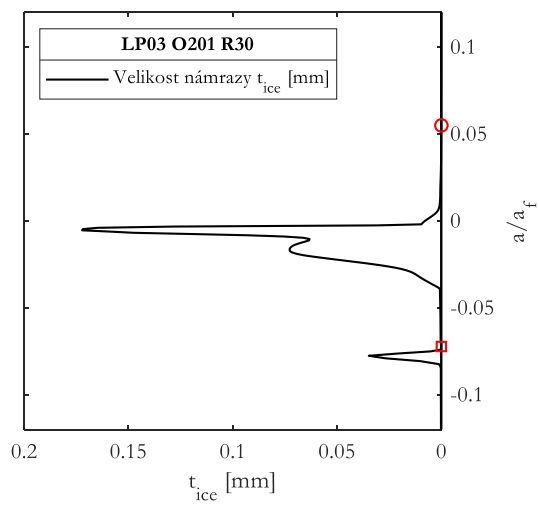
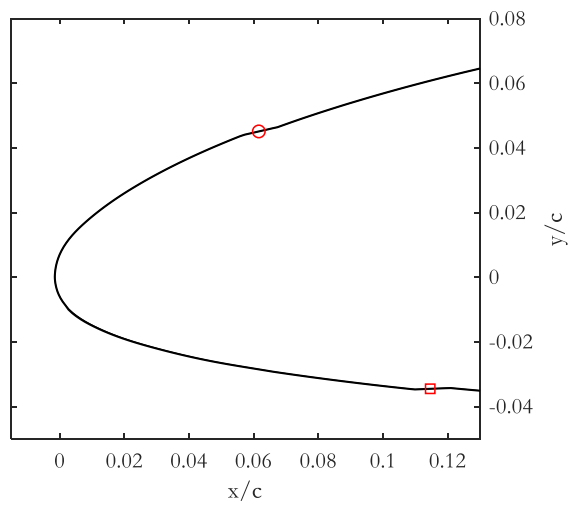
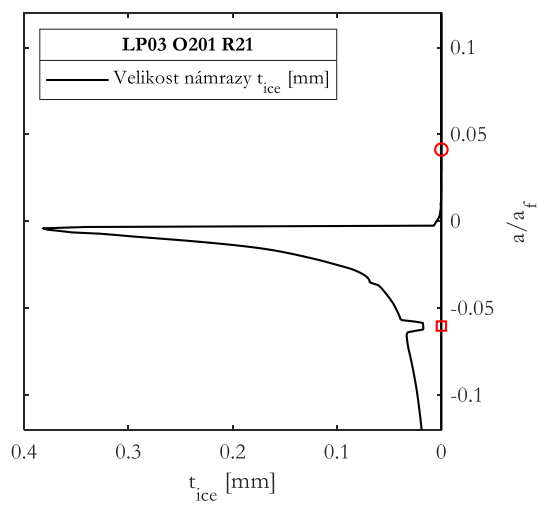
P4 VYHODNOCENÍ APPENDIX O
mobutnost námrazy

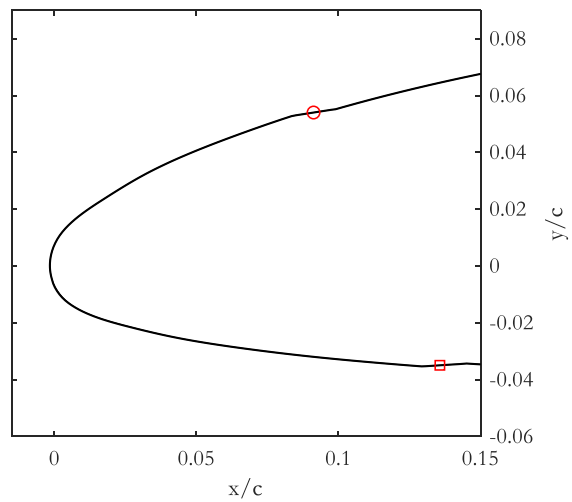
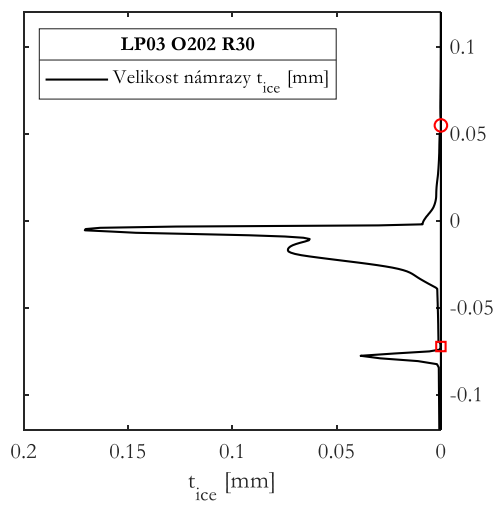
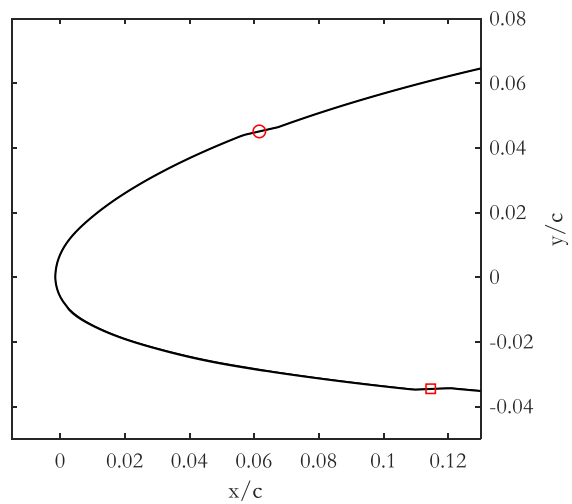
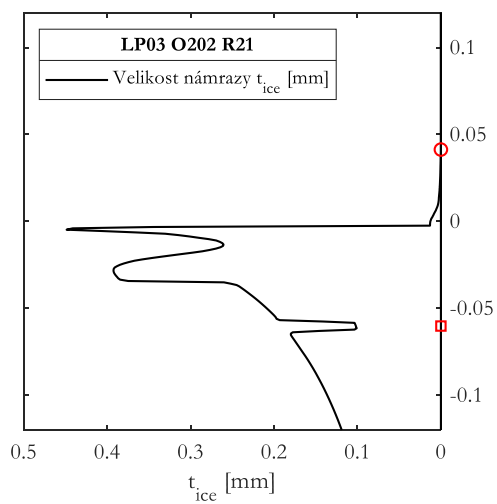




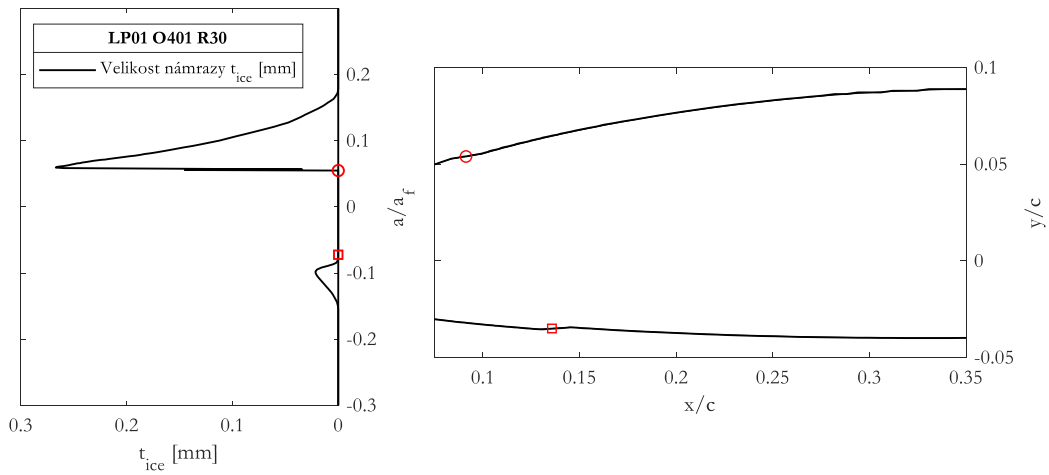
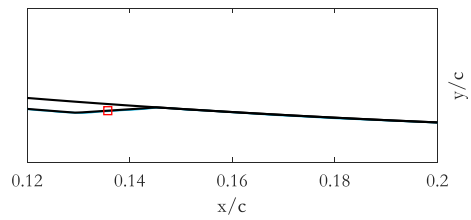
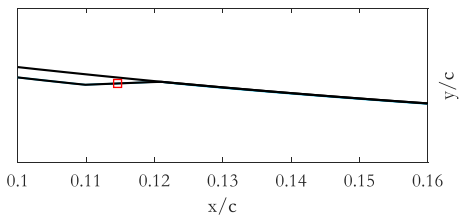
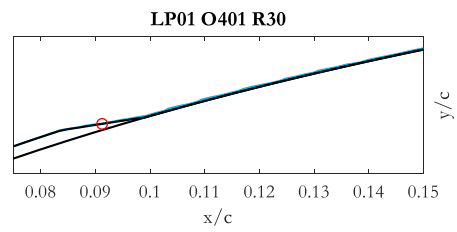
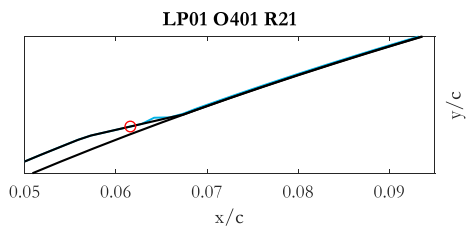
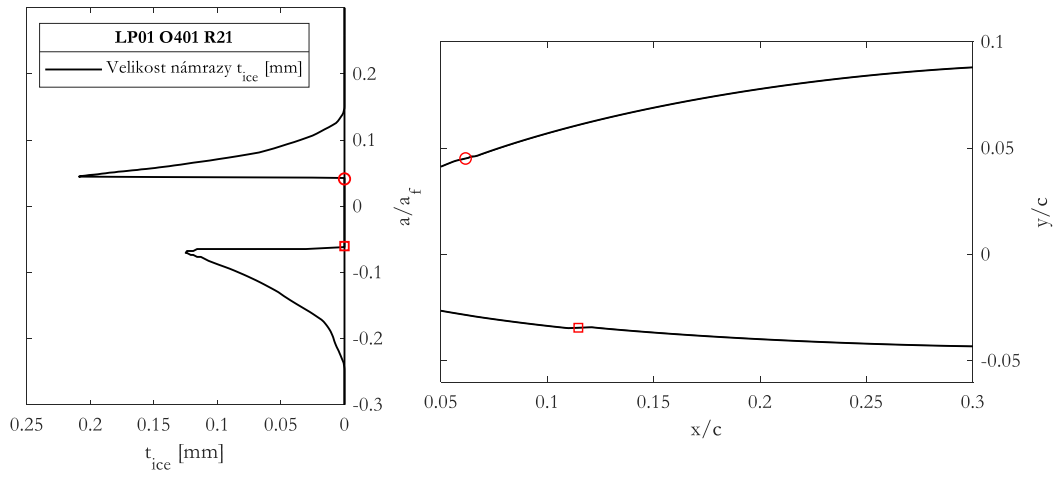


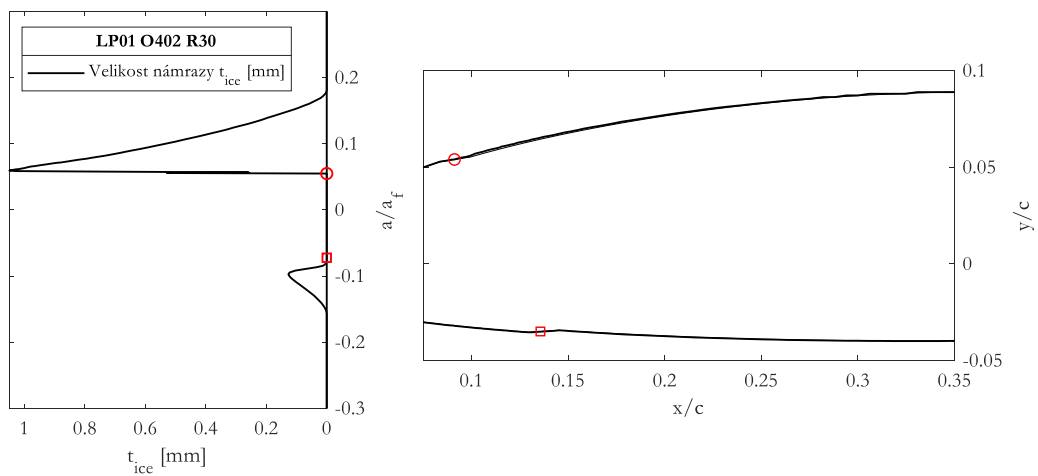
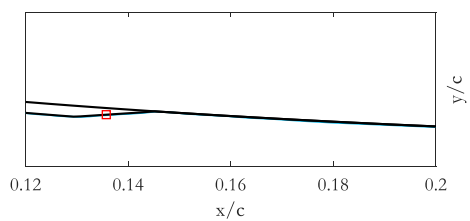
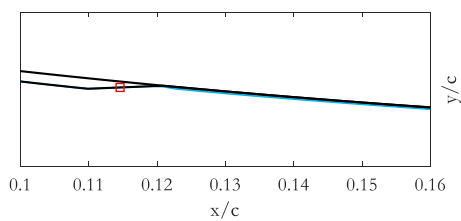
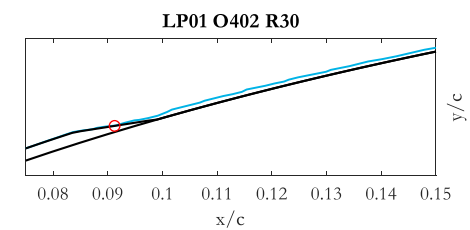
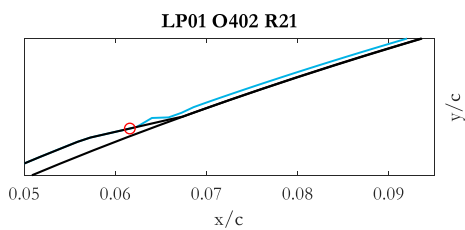
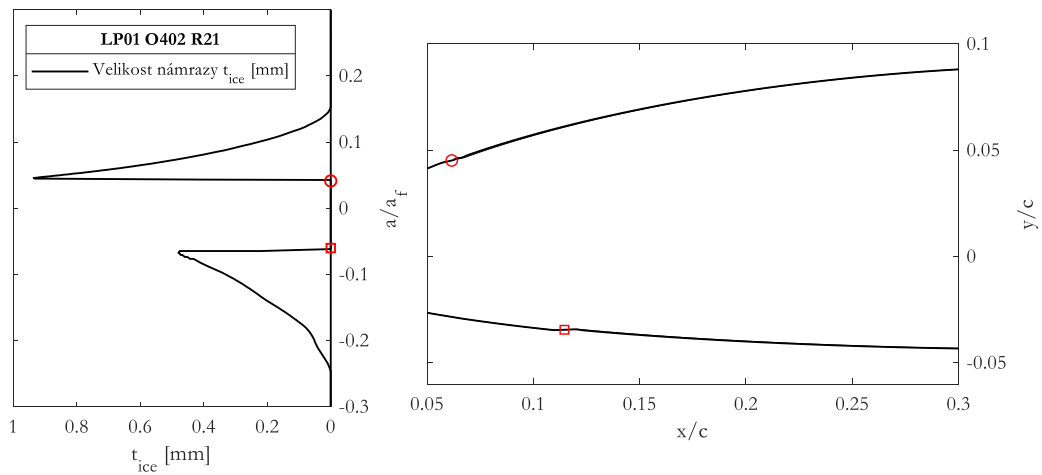


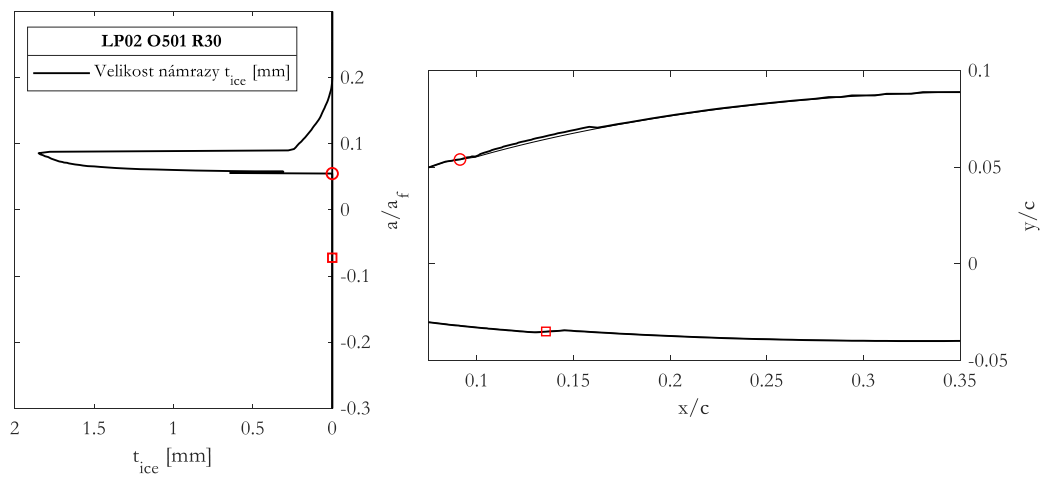
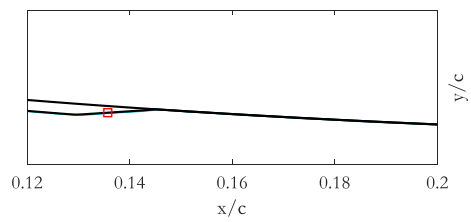
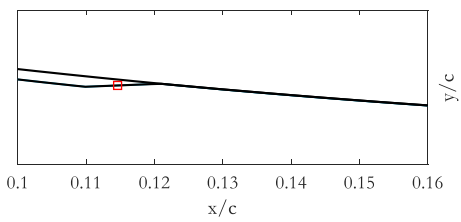
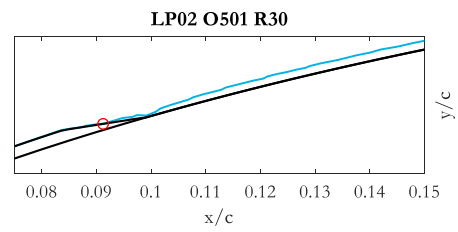
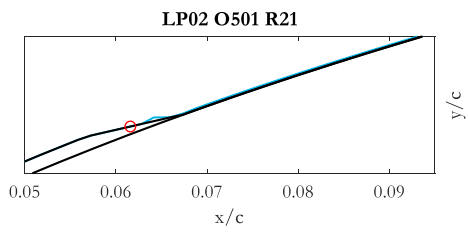
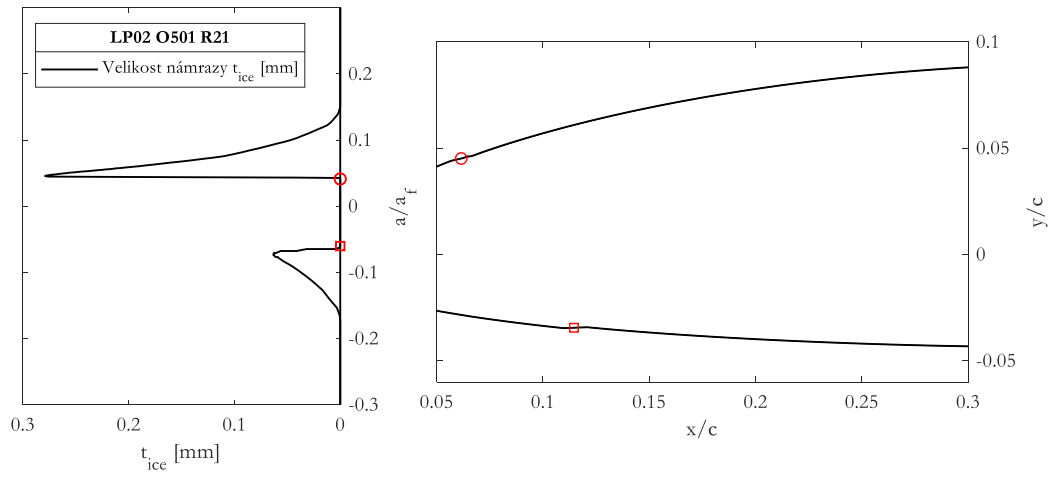


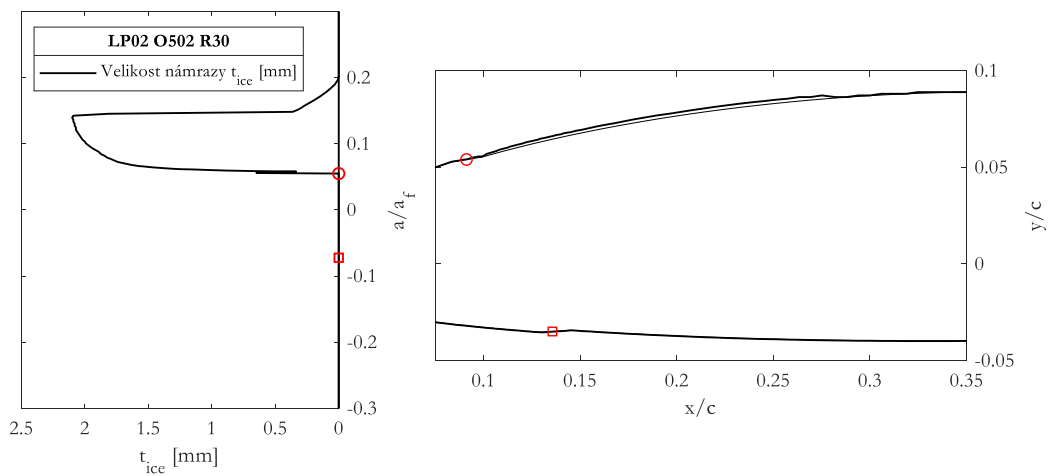
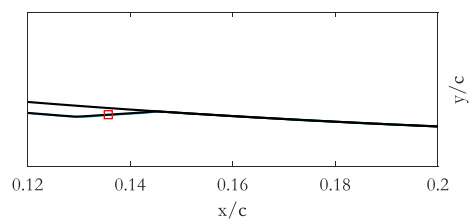
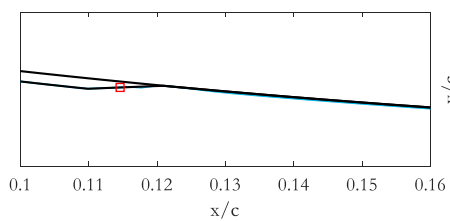
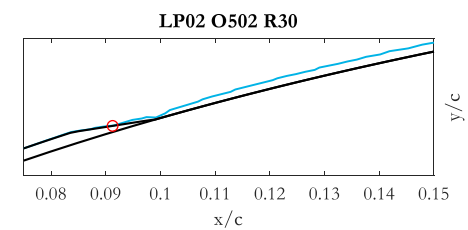
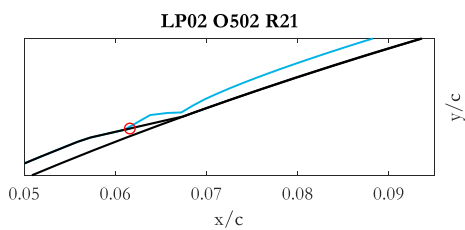
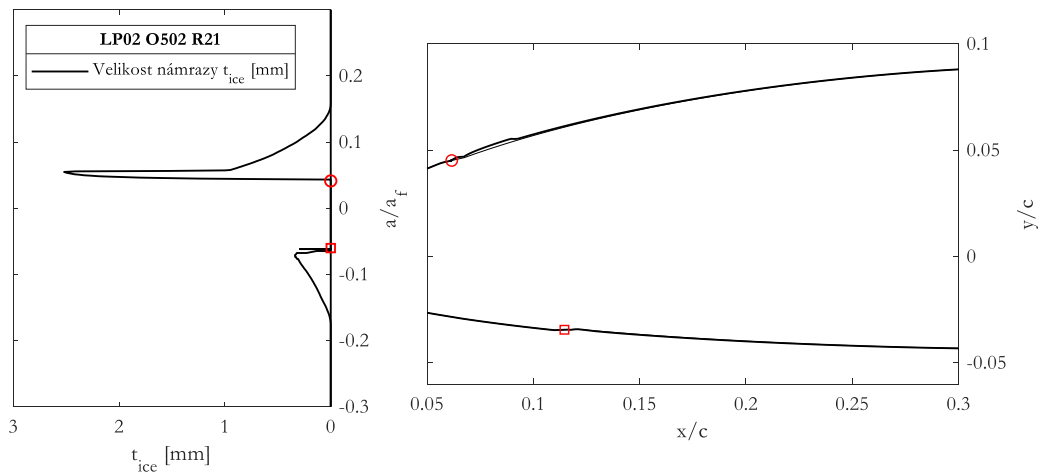


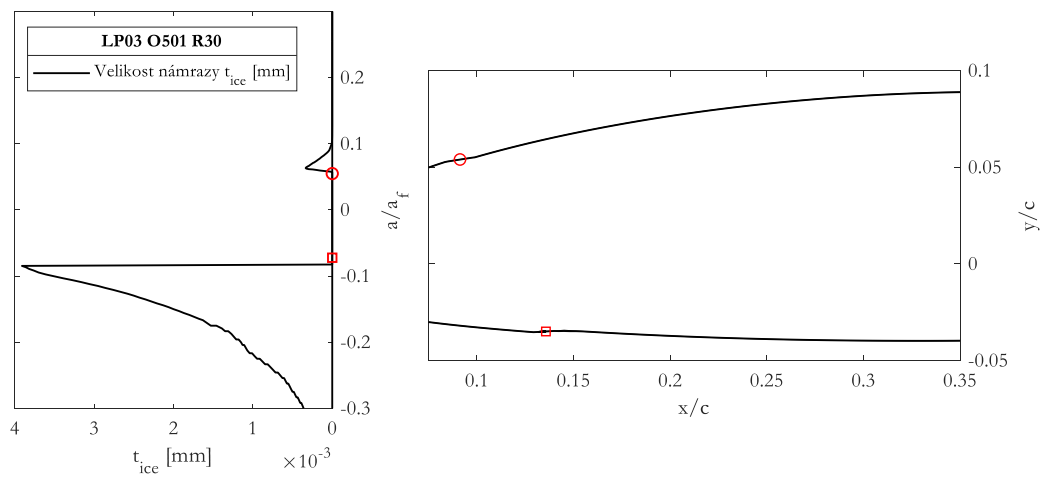
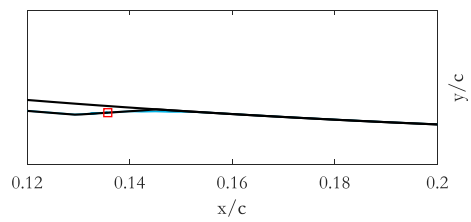
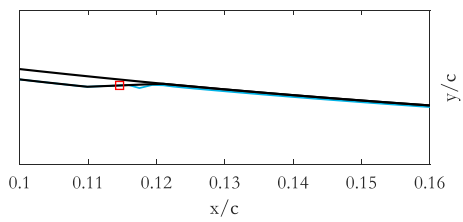
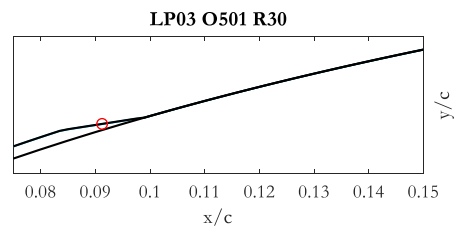
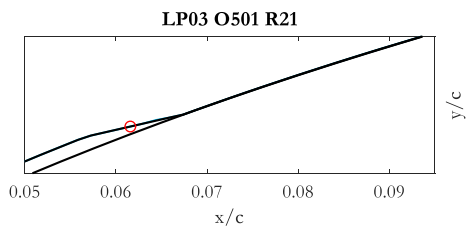
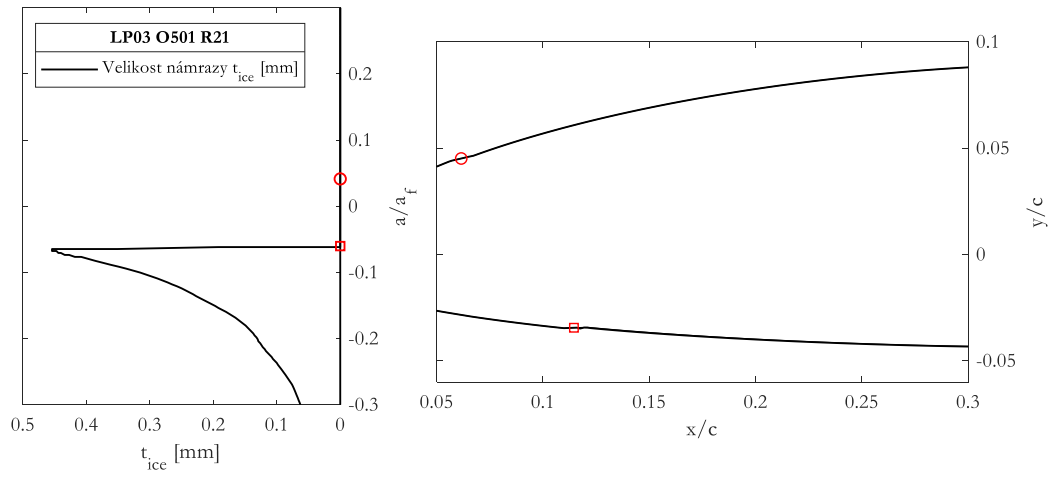
P5 VYHODNOCENÍ APPENDIX O
přesah námrazy

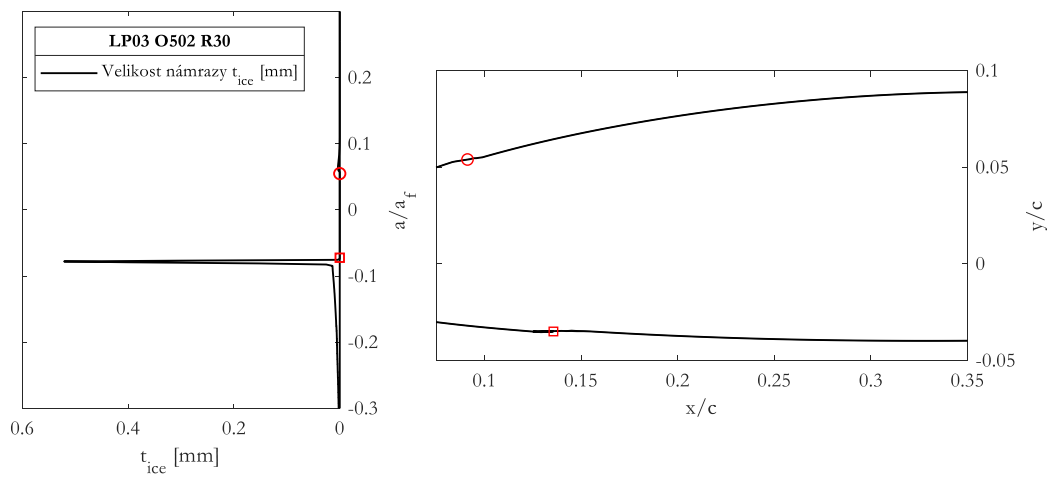
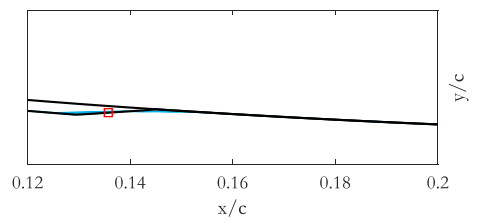
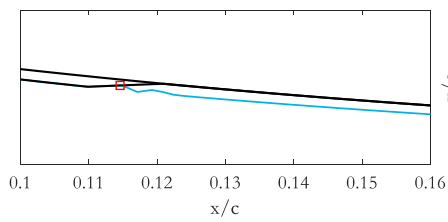
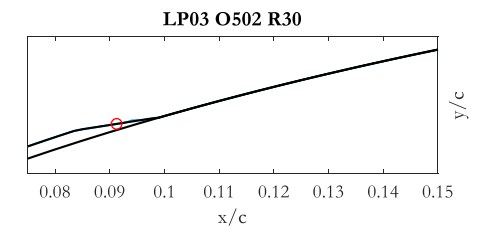
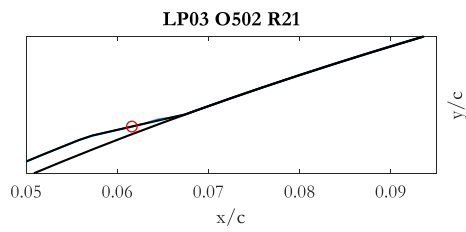
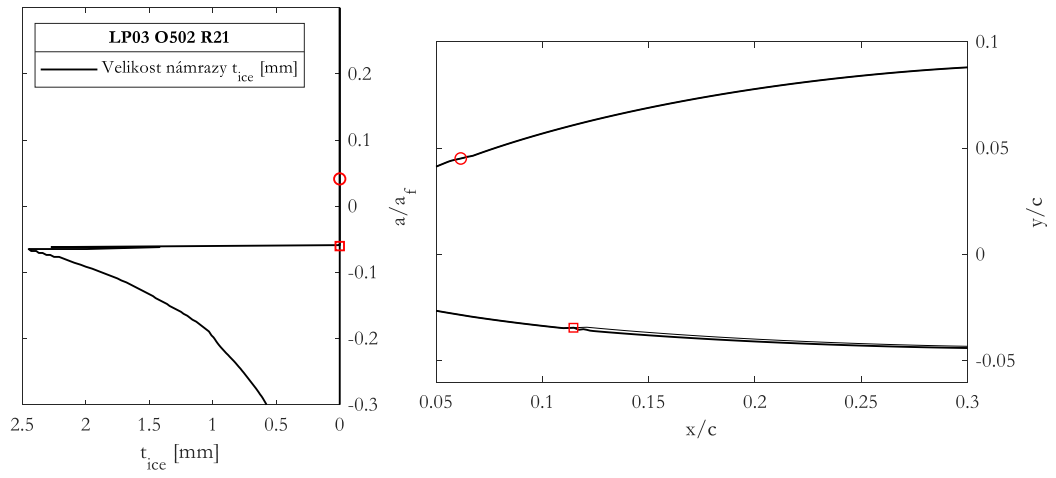












P6 ODBORNÝ ČLÁNEK V ANGLIČTINĚ

The English written Article

CFD ANALYSIS OF ICING EFFECTS ON COMMUTER AIRCRAFT CONFIGURATION

DIPLOMA THESIS

MARTIN ZIMA

MASTER'S DEGREE PROGRAMME | AIRCRAFT DESIGN

ABSTRACT

Icing effects on L 410 NG aircraft were investigated. The aircraft has been certified under CS-23 category and equipped by Pneumatic De-icing Boots System (PDBS). Analysis was performed via CFD solver FENSAP-ICE for various runs according to three flight configurations and icing conditions refer to document Part25 Appendix C and O. Cases were assigned as two 2D cross-sections which are situated at the tip part of the aircraft's wing with Re number range $4.5 - 8.5 \times 10^6$ (see Figure 1.2). Automatic operation of PDBS was proposed and attention was paid to ice accretion aft to PDBS.

1 INTRODUCTION

In-flight icing condition might cause danger situations with possible risk of aircraft accident. There are several accidents caused by direct ice accretion, indirect losses of manoeuvrability or aerometric gauges freezing and malfunction in the history. [2]

Aircraft L 410 NG covers category CS-23 Commuter which can involve certification for in-flight icing conditions according to the document AC 23.1419 [1] and Part 25 Appendix C, O with icing condition specification. Aircraft's de-icing wing and tail system PDBS works on mechanical de-icing principle with membranes air inflation by engine compressor in prescribed time intervals. See Figure 1.1.

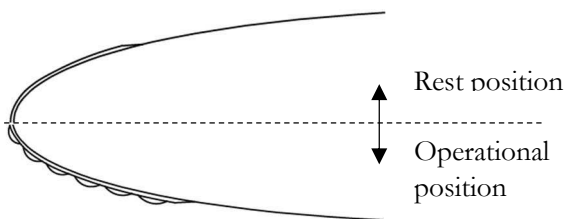


Figure 1.1 Pneumatic De-icing Boots modes Rest position and Operational position.

Two cross-sections R21 and R30 are investigated (see Figure 1.2). The specific location is set according to possible ice accretion aft to PDBS affecting flow field at aileron unit and causing possible malfunction. Cross-sectional geometry includes 2,5 mm thick layer of rubber PDBS. It is mounted to a wing surface after its assembly.

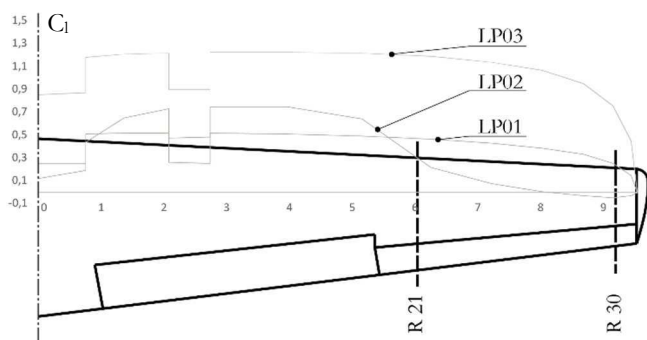


Figure 1.2 L 410 NG wing, R21 and R30 cross-section locations. Wing lift distribution for flight configurations according to Tab. 3.1.

2 ICING PHYSICS & ICING ENVELOPE

Icing conditions are present in clouds formations (stratus and cumulus) hence severe ice condition such as freezing rain would occur under clouds. A supercooled water cloud droplet impinging to airframe and freezing with contact to surface suddenly following to supercooled fluid physics. Water droplet freezes completely when icing conditions are at low temperatures hence conditions around freezing point has runback behaviour. The volume of supercooled droplet doesn't freeze completely. Unfreeze water runs downstream until freezes by convection cooling.

Icing envelope is specified by documents:

Part 25 Appendix C [3] ice envelope see Figure 2.1. Two different conditions are specified: Continuous maximum and Intermittent maximum. Droplets diameter up to $50 \mu\text{m}$. Conditions assigned for analysis are marked in graph by black circles.

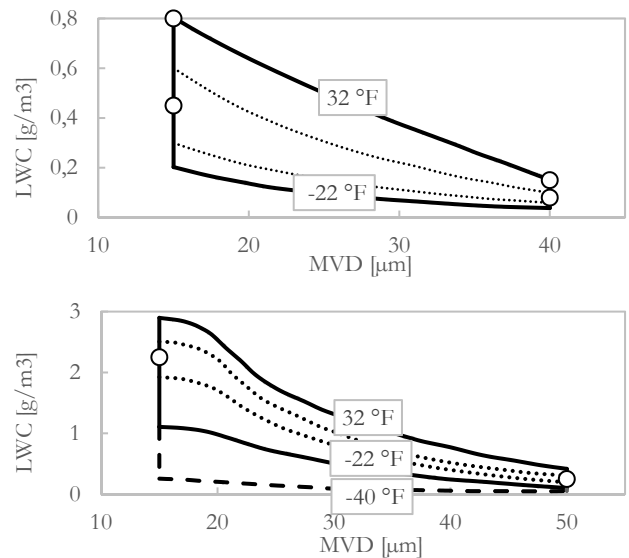


Figure 2.1 Icing envelope for Part 25 Appendix C. Continuous maximum (upper), Intermittent maximum (lower) conditions.

Part 25 Appendix O [4] ice envelope see Figure 2.2. Drizzle conditions are analysed. The droplet diameter is between $5-600 \mu\text{m}$.

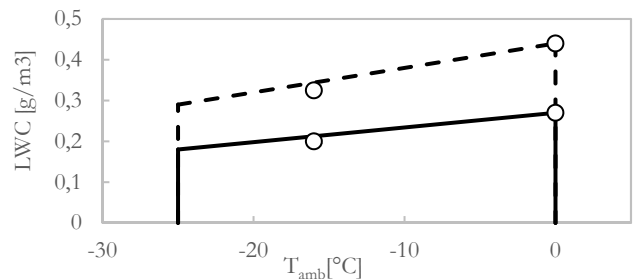


Figure 2.2 Icing envelope for Part 25 Appendix O. Drizzle conditions.

3 ANALYSIS

The analysis is divided into two parts.

The first part maintains ice accretion at area of PDBS with icing time duration specified by lower value of intercycle

time between PDBS inflation and cloud horizontal extend time flown by aircraft. *The second part* maintains ice accretion aft to PDBS with icing time duration calculated for cloud horizontal extend time flown by aircraft. [5]

Analysis is performed behind the background of CFD solver calibration. Calibration was done for all three solver parts: FENSAP-ICE flow solver, DROP 3D and ICE3D.

Three *flight configurations* are assigned for analysis according to Tab. 3.1 and wing lift distribution according to Figure 1.2.

Tab. 3.1 Flight conditions. Horizontal flight.

	Altitude [ft]	T [°C]	VTAS [m/s]	mTOW [kg]
LP01	20 000	-16	99,3	4686
LP02	0	0	69,0	1
LP03	1	1	52,5	7000

The computational mesh is shown in Figure 3.1.

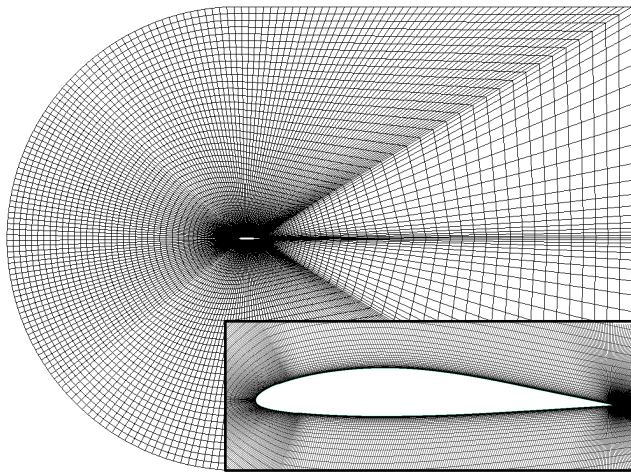


Figure 3.1 Computational mesh. Structured mesh extruded by one element.

4 RESULTS

Results reflect 68 runs performed at the analysis. Critical cases were chosen according to severity of ice accretion and its impact on aerodynamic performance.

For ice accretion at area of PDBS the critical case is shown in the Figure 4.1 with described meteorological conditions:

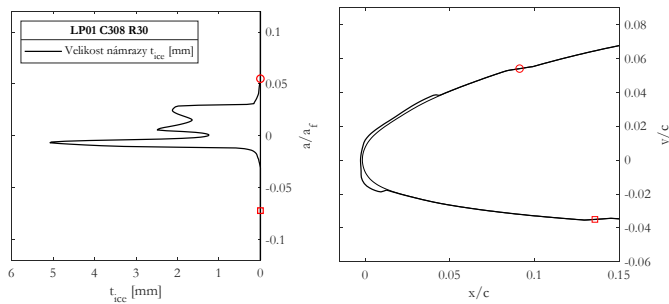


Figure 4.1 Critical case from Part 25 Appendix C. Iceshape thickness along normalized curve length (left), iceshape (right). Conditions: $T = -16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $LWC = 2,44\text{ g/m}^3$, $MVD = 15\text{ }\mu\text{m}$, $\tau = 45\text{ s}$.

The impact of ice shape is evaluated throughout lift and drag curve, see Figure 4.2. The c_{Lmax} drops down by 10 % and moves to lower AoA. The c_D increases at higher AoA.

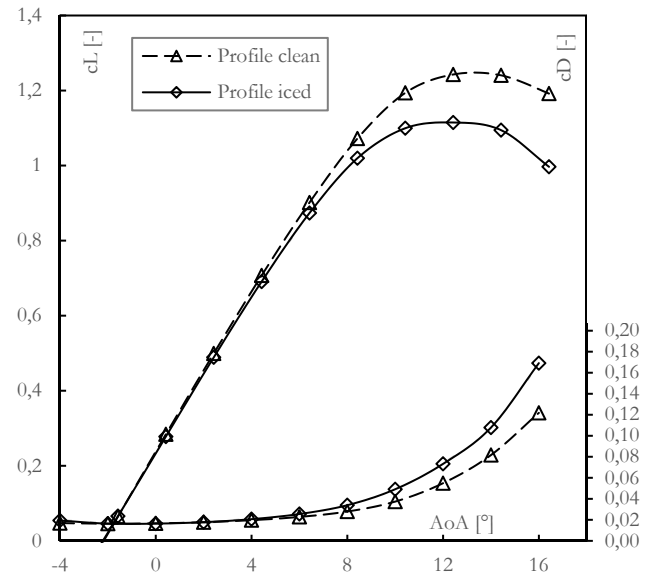


Figure 4.2 Lift and drag curve comparison of clean and iced cross/section

For ice accretion aft to PDBS the critical case is shown in the Figure 4.3 with described meteorological conditions.

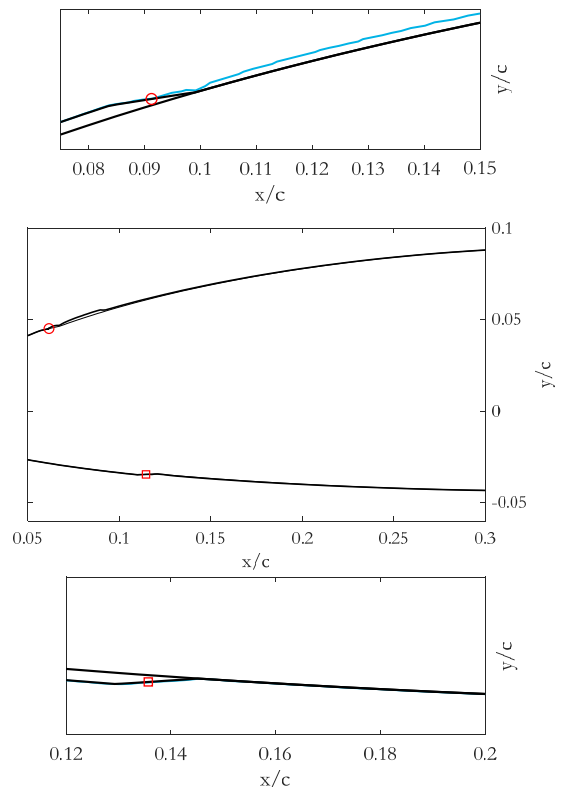


Figure 4.3 Critical case for Part 25 Appendix O. Ice thickness aft to PDBS (endings showed by red marking). PDBS endings details show at top and bottom graphs. Conditions: $T = -2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $LWC = 0,27\text{ g/m}^3$, $MVD = \text{Drizzle distribution}$, $\tau = 467\text{ s}$.

The impact of ice accretion is evaluated by ice degenerated cross-section simulation. Zero wall shear stress provides an information about boundary layer separation which indicates wake formation, see Figure 4.4. The picture shows local boundary layer separation. No wake formation is present therefore.

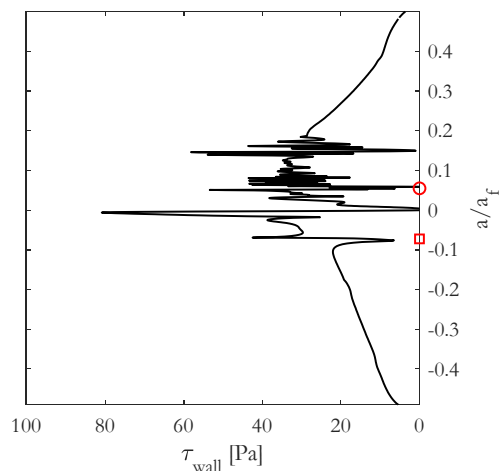


Figure 4.4 Wall shear stress at cross-section curve length. Local boundary layer separation can be seen at upper PDBS ending (red circle) and at iceshape ending ($a/a_f = 0,15$).

5 CONCLUSIONS

- o The most critical iceshape of 68 cases following ice envelope cases showed 10 % decrease of maximum lift coefficient.
- o The most critical ice accretion aft to PDBS showed no wake formation effecting aileron maneuverability
- o The analysis showed that there is no need for design changes of PDBS according to the documents Part 25 App. C and O.

6 REFERENCES

- [1] CS 23.1419 Ice protection. Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes: CS-23, Amendment 3. European Aviation Safety Agency, 2012, 1–F–15.As
- [2] PARASCHIVOIU, I. a F. SAEED. Aircraft Icing. A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY.
- [3] Appendix C. PART 25 - Airworthiness Standards Transport Category Airplanes. Amdt. 25-129, 74 FR 38340. Federal Aviation Administration, 2009.
- [4] Appendix O. PART 25 - Airworthiness Standards Transport Category Airplanes. Amdt. 25-140. Federal Aviation Administration, 2015.
- [5] Advisory Circular 23.1419-2D: Certification of Part 23 Airplanes for flight in Icing Conditions. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2007.

7 NOMENCLATURE

a/a_f	Dimensionless cross-sect. curve length	-
c_l	Local lift coefficient	-
c_L	Lift coefficient	-
c_D	Drag coefficient	-
LWC	Liquid water content	g/m ³
MVD	Mean volumetric diameter	μm
T_{amb}	Ambient temperature	°C
t_{ice}	Ice Thickness	mm
τ_w	Wall shear stress	Pa
v_{TAS}	True air speed	m/s
m_{TOW}	Take-off weight	kg
Re	Reynold's number	-
x/c	Dimensionless x-distance acc. chord	-
y/c	Dimensionless y-distance acc. chord	-
x, y	Cartesian's coordinate components	m
PDBS	Pneumatic De-Icing System	