



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## VLIV SYNTETICKY GENEROVANÝCH POVRCHOVÝCH TEXTUR NA PROUDĚNÍ KOLEM HYDRAULICKÉHO PROFILU

EFFECT OF SYNTHETICALLY GENERATED SURFACE TEXTURES ON THE FLOW AROUND A HYDRAULIC  
PROFILE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Fabříci

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2024

# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Tomáš Fabřící**  
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství  
Studijní obor: Fluidní inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**  
Akademický rok: 2024/25

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:

## **Vliv synteticky generovaných povrchových textur na proudění kolem hydraulického profilu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Proudění kolem hydraulického profilu je zásadně ovlivněno vlastnostmi mezní vrstvy. Ty lze modifikovat tvarem povrchu, který může např. indukovat přechod laminární mezní vrstvy do turbulentní, ovlivnit hodnoty odporového součinitele, bod odtržení mezní vrstvy atd. Současné technologické postupy (např. 3d tisk) umožňují generování pravidelných struktur libovolného tvaru a ovlivnění proudění v mezní vrstvě.

### **Cíle diplomové práce:**

Cílem diplomové práce je provedení rešerše vlivu makronerovností na charakter mezní vrstvy (mj. součinitel odporu, bod odtržení, charakter proudění v úplavu) a následně provedení výpočtového modelování proudění pro studentem navržené nerovnosti. Vybraná modifikace bude výpočtově validována na NACA profilu v hydraulickém tunelu.

### **Seznam doporučené literatury:**

SCHLICHTING, H. a GERSTEN, K. Boundary-Layer Theory. Springer, 2017.

WEN, L.; WEAVER, J.C. a LAUDER, G.V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. Journal of Experimental Biology. 2014, roč. 217, č. 10.

RAAYAI, S. a MCKINLEY, G.H. Geometric optimization of riblet-textured surfaces for drag reduction in laminar boundary layer flows. Physics of Fluids. 2019, roč. 31, č. 5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Povrchové modifikácie predstavujú zaujímavý spôsob, ako ovplyvniť prúdenie okolo hydraulického profilu. Toto prúdenie výrazne závisí od charakteru medznej vrstvy, ktorú môžu tieto úpravy meniť, čím môžu priaznivo pôsobiť na odporový koeficient  $C_D$ , oblasť separácie prúdenia a vznik vírového úplavu. Radia sa medzi formy pasívnej kontroly medznej vrstvy – na rozdiel od aktívnej kontroly nevyžadujú prísun externej energie, čo predstavuje významnú výhodu. Vďaka súčasným technológiám, ako je napríklad 3D tlač, je možné vytvárať rozmanité tvary týchto povrchových štruktúr. Ich geometria je v diplomovej práci navrhnutá pre profil NACA2412 na základe odporúčaní vychádzajúcich z už experimentálne alebo numericky overených variantov a následne podrobená detailnej CFD analýze.

### **Kľúčové slová**

Hydraulický profil, jamky, odporový koeficient, separácia prúdenia, CFD

## **ABSTRACT**

Surface modifications represent an interesting way to influence the flow around a hydraulic profile. This flow significantly depends on the nature of the boundary layer, which these surface modifications can change, which can have a positive effect on the drag coefficient  $C_D$ , the flow separation and wake. They are considered a form of passive boundary layer control – as opposed to active boundary layer control, they do not require external energy input, which is a significant advantage. Thanks to current technologies, such as 3D printing, it is possible to create various shapes of these surface structures. In this thesis, the geometry is designed for the NACA 2412 profile based on variants that have already been experimentally or numerically verified and is subsequently subjected to detailed CFD analysis.

### **Key words**

Hydraulic profile, dimples, drag coefficient, flow separation, CFD

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

FABRÍCI, Tomáš. Vliv synteticky generovaných povrchových textur na proudění kolem hydraulického profilu. Online, diplomová práce. Pavel RUDOLF (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165949>.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

---

V Brne dňa 23.mája 2025

---

Fabřici Tomáš

## **POĎAKOVANIE**

Rád by som sa poďakoval vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. a Ing. Jakub Stareček, Ph.D., Mgr. Tomáš Krátky, Ph.D. za odbornú pomoc pri vypracovaní diplomovej práce, za ich cenné rady a pripomienky. Ďalej by som sa rád poďakoval svojej rodine za podporu pri štúdiu a vypracovaní diplomovej práce.

## Obsah

Úvod .....	9
1 Prúdenie okolo hydraulického profilu .....	10
1.1 Sily pôsobiace na profil .....	11
1.1.1 Odporová sila .....	11
1.1.2 Vztlková sila .....	13
1.2 Koncept medznej vrstvy .....	15
1.2.1 Definovanie veľkosti medznej vrstvy a iných parametrov .....	18
1.3 Separácia prúdenia .....	22
2 Vplyv povrchových štruktúr na prúdenie okolo profilu .....	25
2.1 História a inšpirácia v prírode a budúcnosť pasívnych povrchových štruktúr .....	25
2.2 Jamky .....	28
2.2.1 Základné geometrické parametre .....	29
2.2.2 Geometrický návrh a odporúčania .....	31
2.2.3 Predpokladané mechanizmy redukcie odporu .....	33
3 Numerická simulácia profilu NACA 2412 bez povrchových modifikácií .....	37
3.1 Okrajové podmienky .....	37
3.2 Výpočetná sieť a nastavenie simulácie .....	39
3.3 Výsledky .....	45
3.3.1 Odporový koeficient .....	45
3.3.2 Ukážka charakteru prúdenia .....	46
3.3.3 Zhodnotenie .....	51
4 Numerická simulácia s povrchovými modifikáciami – návrh Sigma .....	52
4.1 Geometria .....	52
4.2 Okrajové podmienky .....	54
4.3 Výsledky .....	55
4.3.1 Odporový koeficient .....	55
4.3.2 Ukážka charakteru prúdenia .....	56
4.3.3 Zhodnotenie .....	60
5 Numerická simulácia povrchových modifikácií s optimalizovanými geometrickými parametrami .....	61
5.1 Vytvorené geometrie .....	61
5.2 Okrajové podmienky .....	64
5.3 Výsledky .....	65
5.3.1 Odporový koeficient .....	66
5.3.2 Geometria A .....	67
5.3.3 Geometria C .....	71
5.3.4 Geometria E .....	77
Záver .....	83
Zoznam použitých zdrojov .....	85

## Úvod

Použitie povrchových modifikácií pre redukciu separácie prúdenia resp. tlakovej zložky odporovej sily je už dobre známe na príklade golfovej loptičky, kde je pomocou povrchových modifikácií dosiahnutý rýchlejší prechod z laminárnej medznej vrstvy na turbulentnú, čo má za následok neskoršiu separáciu prúdenia. Inšpiráciou pre vznik rôznych geometrických variant povrchových modifikácií bola aj príroda, konkrétne napr. žraločia koža, kde na povrchu kože sa nachádzajú malé výstupky, ktoré pomáhajú zlepšiť prúdenie. Nový pohľad na túto problematiku predstavuje použitie týchto povrchových modifikácií ako prostriedkov pre redukciu trecej zložky odporovej sily, kde ešte však neexistuje všeobecná zhoda na ich pozitívnom vplyve. Existuje niekoľko teórií, ktorými bola snaha popísať mechanizmy redukcie tejto zložky odporovej sily, ale sú viac komplexnejšie a neexistuje všeobecná zhoda na ich pravdivosti.

Pre návrh povrchovej modifikácie s cieľom optimalizovať odporový koeficient alebo potlačenie separácie prúdenia je nutné poznať ako tieto javy fungujú a vznikajú. Z tohto dôvodu je začiatok diplomovej práce venovaný teoretickému popisu odporovej sily, príčinám vzniku separácie prúdenia a popisu medznej vrstvy. Následne je vykonaná rešerš už existujúcich povrchových modifikácií, pričom táto diplomová práca sa zameriava na návrh najnovšej z nich – tzv. jamiek (angl. dimple). Ide o konkávne útvary rôznych tvarov (kruhový, eliptický), ktoré sa nachádzajú na povrchu profilu v pravidelnom rozložení. Ako podklad pre návrh boli použité geometrické odporúčania povrchových modifikácií, ktoré boli experimentálne alebo numericky testované. Odporúčania popisujú voľbu tvaru jamiek (kruhový, elipsový, diamantový), optimálnu hĺbku jamiek a ich rozloženie na povrchu. Dôležité je poznamenať, že väčšina týchto otestovaných variant prebehla na rovnej doske, ale nie na zakrivenom hydraulickom profile. Preto je otázka, ako tieto geometrické odporúčania budú fungovať na hydraulickom profile, konkrétne NACA 2412.

Praktická časť práce sa bude priamo venovať CFD výpočtom profilu NACA 2412 s povrchovými modifikáciami, ale bude spočítaná aj varianta hladkého profilu pre porovnanie. Ako prvá bude spočítaná povrchová modifikácia, ktorá bola prebraná od firmy VVÚ Sigma s.r.o (ktorej primárny účel nebol redukovať odporový koeficient). Následne bude vytvorených viacero geometrických variant týchto povrchových modifikácií s optimalizovanými parametrami, tak aby rešpektovali odporúčania uvedené v rešeršnej časti. Testovanie bude prebiehať pre 2 stavy – optimálny a mimooptimálny. Tieto stavy budú simulované pomocou rozdielneho uhla nábehu  $\alpha$ , kde pre optimálny stav bude zvolený  $\alpha = 8^\circ$  a pre mimooptimálny stav  $\alpha = 12^\circ$ . Tieto uhly boli zvolené pomocou experimentálne nameraných dát pre NACA profily.

## 1 Prúdenie okolo hydraulického profilu

Na komplexné pochopenie vplyvu povrchových makronerovností, ako sú tzv. jamky (angl. dimples), na charakter prúdenia okolo hydraulického profilu a na následnú optimalizáciu týchto povrchových štruktúr je potrebné najprv analyzovať základné vlastnosti prúdenia okolo profilu s hladkým povrchom bez akýchkoľvek úprav. Kľúčovými aspektmi tejto analýzy sú mechanizmy vzniku odporových a vztlakových síl, definícia a charakteristiky medznej vrstvy, proces jej odtrhnutia na profile a dôsledky, ktoré tento jav prináša.

Teleso alebo profil ponorený do pohybujúcej sa kvapaliny napr. pri testovaní v kavitačnom tuneli alebo pre vzduch vo veternom tuneli je vystavený výslednej hydrodynamickej alebo aerodynamickej sile, ktorá vzniká v dôsledku komplexnej interakcie medzi povrchom telesa a dynamickými vlastnosťami kvapaliny alebo plynu v jeho okolí. Táto sila je dôsledkom kombinácie tlakových rozdielov na povrchu telesa a viskózných účinkov spôsobených šmykovým napätím vo vrstve tekutiny nazývanej medzná vrstva, ktorá obteká profil.[1]

Charakter prúdenia a zložitosť, s akou môže byť popísané a analyzované, závisí v značnej miere od tvaru telesa, ktoré je prúdením obtekané. Môže ísť o dvojrozmerné objekty (s konštantným prierezom v treťom rozmere), osovo symetrické alebo všeobecné trojrozmerné telesá, ktoré môžu, ale nemusia vykazovať určitú rovinnú alebo osovú symetriu. Dôležitý vplyv na charakter prúdenia má tiež miera aerodynamického tvarovania telesa – prúdnicové telesá, ako napríklad profily krídiel, vykazujú podstatne odlišné prúdenie oproti tupým telesám (tzv. zle obtekanými, ang. bluff bodies ), akými sú napríklad valce alebo kvádre [1].

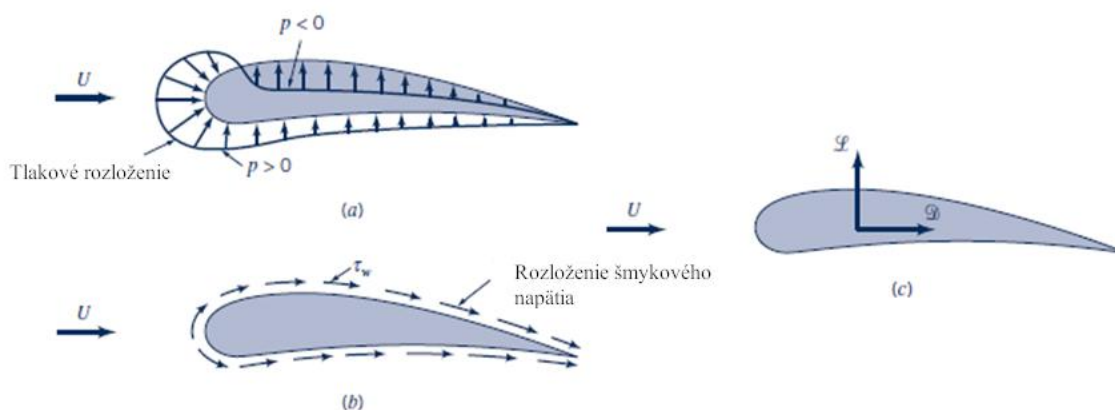
Teoretické, teda analytické metódy, poskytujú cenné informácie o takýchto prúdeniach, no vzhľadom na zložitosť nelineárnych rovníc popisujúcich prúdenie (napríklad Navier-Stokesova rovnica) a komplexnosť geometrie obtekaných telies je množstvo informácií získaných týmito metódami často obmedzené. Preto väčšina podrobných údajov o vonkajšom prúdení pochádza z experimentálnych štúdií, ktoré sa vykonávajú na zmenšených alebo reálnych modeloch v zariadeniach, ako sú kavitačné alebo veterné tunely. Tieto experimenty umožňujú presné meranie dôležitých parametrov, ako sú rozloženie tlaku, odpor, vztlak či vizualizovať turbulentné štruktúry [1].

S rozvojom numerických metód, konkrétne výpočtovej dynamiky tekutín (CFD), sa značná časť experimentov presúva do virtuálneho prostredia. CFD umožňuje simulovať prúdenie okolo telies s vysokou mierou presnosti a s nižšími nákladmi v porovnaní s fyzickými experimentmi. Napriek tomu experimentálne merania zostávajú neoddeliteľnou súčasťou výskumu a návrhu, pretože slúžia na validáciu a verifikáciu výsledkov numerických simulácií, čím zabezpečujú ich spoľahlivosť a presnosť. Táto kombinácia teoretických, experimentálnych a numerických metód predstavuje základný prístup k riešeniu zložitých problémov v oblasti hydrodynamiky a aerodynamiky [1].

Táto práca sa zameriava na návrh povrchových štruktúr pre prúdnicové teleso NACA 2412. Ide o zložitejšiu geometriu, ktorá bola zvolená s cieľom dosiahnuť výsledky čo najbližšie k reálnemu využitiu v praxi. V nasledujúcich podkapitolách budú podrobnejšie analyzované fenomény, ktoré boli spomenuté skôr, pričom tieto javy budú ilustrované na modeli NACA profilu. Týmto spôsobom sa vytvorí teoretický základ, ktorý posluží ako východisko pre ďalší návrh povrchových štruktúr na hydraulických profiloch.

## 1.1 Sily pôsobiace na profil

Ak je teleso obtekané prúdiacou kvapalinou, dochádza k interakcii medzi telesom a kvapalinou, ktorú môžeme popísať pomocou síl, resp. napätí. Stenové šmykové napätie je spôsobené viskóznymi účinkami prúdenia, zatiaľ čo normálové napätie je výsledkom tlakového poľa. Typické rozloženie týchto napätí, vztlaková sila  $L$  a odporová sila  $D$  je znázornené na Obrázok 1 [1]. Poznanie detailnej distribúcie týchto napätí na povrchu telesa môže byť užitočné, avšak častejšie sa zameriavame na výsledné sily, a to v smere prúdenia, ktoré predstavujú odporovú silu  $D$ , a na silu kolmo na prúdenie  $L$ , ktorá sa označuje ako vztlaková sila. Tieto výsledné sily je možné získať integráciou rozdelenia napätí po povrchu telesa [2]. Tieto distribúcie sa zvyčajne určujú pomocou metód výpočtovej dynamiky tekutín (CFD) alebo experimentálnymi postupmi. Rozloženie tlaku možno získať umiestnením tlakových senzorov na povrch profilu alebo modernejšou metódou farbou citlivou na tlak (PSP), zatiaľ čo určenie stenových šmykových napätí môže byť pomerne náročnejšie [1].



Obrázok 1 Rozloženie napätí na hydraulickom profile [1]

### 1.1.1 Odporová sila

Pri prúdení okolo profilu pôsobí na teleso odporová sila orientovaná v smere hlavného prúdenia. Táto sila vzniká ako výslednica tlakových síl a tangenciálnych (šmykových) síl pôsobiacich na povrch telesa. Odporová sila sa dá rozdeliť na 2 zložky, a to trecia (viskózna) časť a tlaková (tvarová) časť. Zvyčajne sa vyjadruje prostredníctvom bezrozmerného odporového koeficientu  $C_D$ , ktorý je definovaný ako: [1].

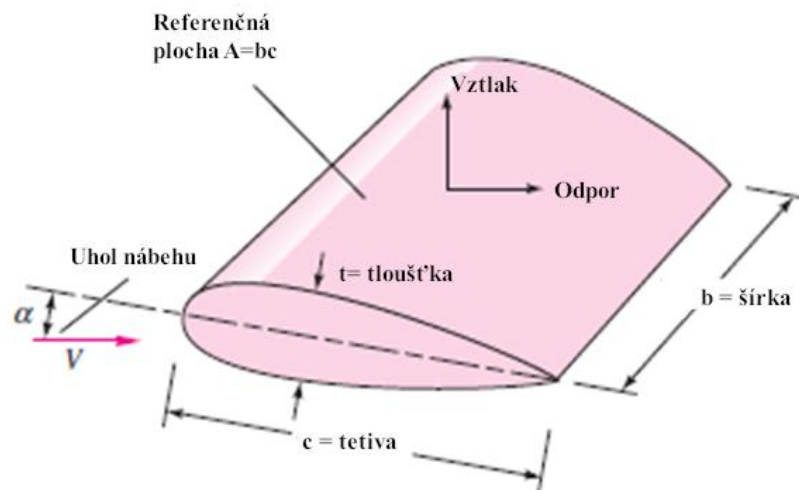
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (1)$$

,kde  $D$  je odporová sila pôsobiaca na profil,  $\rho$  je hustota prúdiaceho média a  $v$  je rýchlosť. V prípade NACA profilov je referenčná plocha  $A$  zvyčajne určená ako súčin dĺžky tetivy  $c$  a šírky profilu  $b$ .

Hodnota odporového koeficientu  $C_D$  je výrazne ovplyvnená geometrickým tvarom obtekaného telesa a typom prúdenia, ktorý je charakterizovaný Reynoldsovým číslom (laminárne a turbulентné prúdenie). Tvar profilu určuje rozloženie tlaku a šmykových napätí na jeho povrchu, zatiaľ čo Reynoldsovo číslo ovplyvňuje správanie hraničnej vrstvy a prechod medzi laminárnym a turbulентným prúdením [2].

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (2)$$

,kde toto číslo je podobnostné číslo, ktoré udáva pomer medzi zotrvačnými a viskóznymi silami v prúdovom poli. Vystupuje tu rýchlosť prúdenia  $v$ , kinematická viskozita prúdiaceho média  $\nu$  a charakteristický rozmer  $L$ , ktorý pri NACA profiloch býva obvykle dĺžka tetivy  $c$ . Pri zachovaní podobnosti úlohy a pri porovnaní výsledkov z iných výpočtov a meraní je nutné toto podobnostné číslo zachovať [2].



Obrázok 2 Základné geometrické parametre profilov typu NACA [2]

Viskózná zložka odporovej sily je priamo ovplyvnená šmykovým napätím na stenách profilu ( $\tau_w$ ) a závisí nielen od veľkosti týchto napätí, ale aj od geometrie povrchu, na ktorom pôsobí. To znamená, že veľkosť viskózneho odporu sa bude líšiť v závislosti od tvaru povrchu – inak bude pôsobiť na rovinnú dosku a inak na zakrivený profil, akým je NACA profil. Tvar povrchu ovplyvňuje rozloženie medznej vrstvy a charakter šmykového napätia, čo vedie k rozdielnym hodnotám viskózneho odporu [1]. Viskózná zložka odporu je taktiež výrazne ovplyvnená charakterom medznej vrstvy, konkrétne tým, či ide o laminárnu alebo turbulентnú medznú vrstvu. Pri laminárnej medznej vrstve, ktorá sa vyznačuje usporiadaným prúdením bez intenzívneho miešania tekutiny, sú hodnoty šmykového napätia a následne aj odporu nižšie. Naopak, turbulентná medzná vrstva, charakteristická výrazným zmiešavaním a vyšším prenášaním hybnosti (aj v smere priečnom na hlavný smer prúdenia), generuje vyššie šmykové napätie, čo vedie k zvýšeniu viskózneho odporu [2].

Tlaková zložka odporovej sily úzko súvisí s rozdielom tlakov na prednej a zadnej strane profilu, pričom sa často označuje ako tvarový odpor vďaka svojej výraznej závislosti od geometrie obtekaného telesa. Táto zložka odporu je priamo ovplyvnená fenoménom odtrhnutia medznej vrstvy, ku ktorému dochádza v dôsledku nepriaznivého tlakového gradientu, najmä pri vyšších uhloch nábehu. Nepriaznivý tlakový gradient môže spôsobiť stratu kinetickej energie prúdenia v medznej vrstve, čo vedie k jej odtrhnutiu od povrchu profilu. Tento jav následne vytvára oblasť s nízkym tlakom (vírovú oblasť) za profilom, kde vytvorenie takejto oblasti priamo prispieva k nárastu tlakovej zložky odporu úmernej rozdielu tlakov medzi prednou a zadnou stranou profilu [1].

### 1.1.2 Vztlaková sila

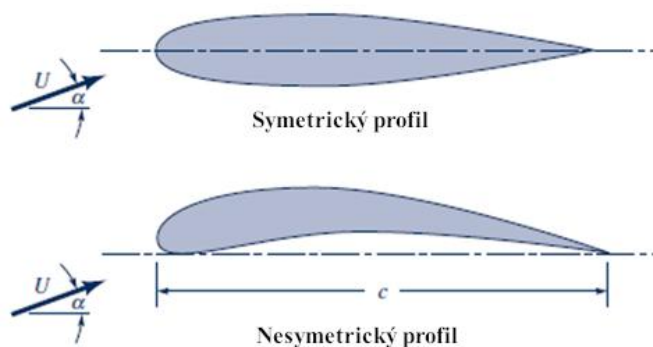
Táto sila kolmá na smer prúdenia vzniká podobne ako odporová sila, ktorá sa dá zistiť z tlakovej distribúcie po povrchu a býva často vyjadrená formou bezrozmerného koeficient  $C_L$ . Obdobne ako odporová sila aj táto zložka sily je silno závislá na tvare obtekaného profilu a Reynoldsovom čísle [2].

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (3)$$

,kde  $L$  je vztlaková sila,  $\rho$  hustota kvapaliny,  $v$  rýchlosť prúdiaceho média a  $A$  je referenčná plocha tak isto určená ako pri vysvetlení bezrozmerného odporového koeficientu.

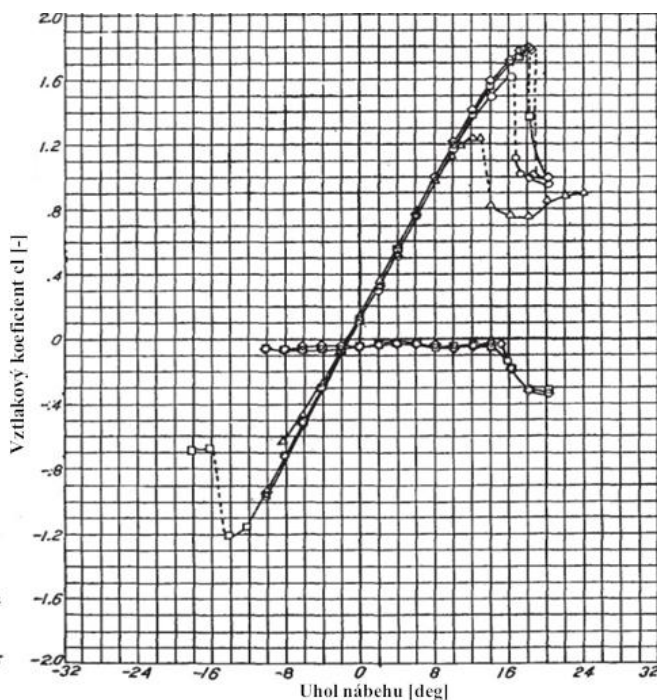
Väčšina profilov generujúcich vztlak, ako napríklad profil NACA 2412, operuje v rozsahu vysokých Reynoldsových čísel, kde môžu viskózne sily ovplyvniť výslednú vztlakovú silu. Dominantný príspevok k výslednej vztlakovej sile však vyplýva z tlakového rozdielu medzi hornou a dolnou stranou profilu. Tento tlakový rozdiel vzniká v dôsledku rozdielnych rýchlostí prúdenia na jednotlivých stranách profilu, pričom sa riadi Bernoulliho rovnicou. Oblasti s vyššou rýchlosťou prúdenia sú charakteristické nižším tlakom, zatiaľ čo oblasti s nižšou rýchlosťou prúdenia vykazujú vyšší tlak. Tento rozdiel v tlaku je hlavným faktorom generujúcim vztlak [1].

Ako bolo uvedené vyššie, významný vplyv na generovanie vztlakovej sily má tvar profilu, pričom zásadnú úlohu zohráva, či ide o symetrický alebo nesymetrický NACA profil (Obrázok 3). Pri symetrických profiloch je na generovanie vztlakovej sily potrebný kladný uhol nábehu, pretože pri nulovom uhle nábehu nedochádza k tvorbe vztlakovej sily. Naopak, pri nesymetrických profiloch, ako je napríklad skúmaný profil NACA 2412, sa vztlaková sila generuje už pri nulovom uhle nábehu  $\alpha$  vďaka asymetrickému rozloženiu tlakov medzi hornou a dolnou stranou profilu [3].



Obrázok 3 Symetrický a nesymetrický NACA profil [1]

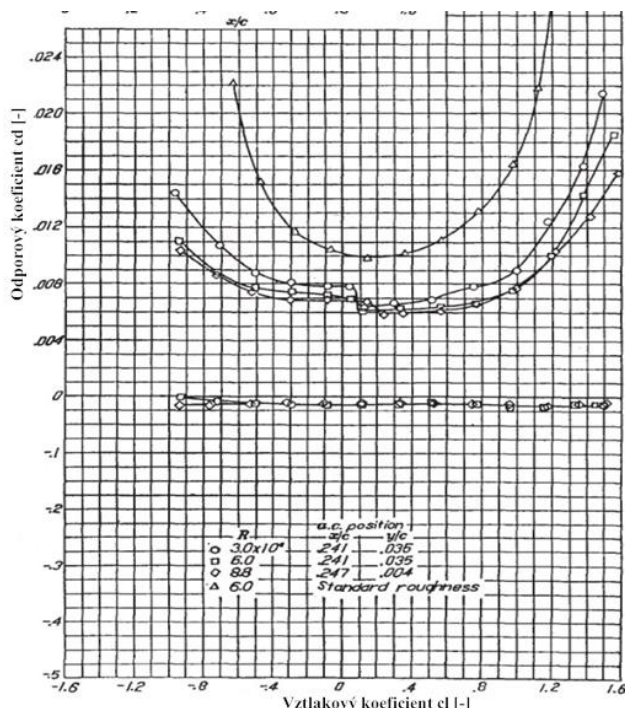
Pre prehľad a ako vysvetlenie ako sa tieto profily typicky správajú v závislosti od uhlu nábehu alebo pri zmene Reynoldsoveho čísla sú tieto závislosti vykreslené z experimentálne namera-  
ných dát na Obrázok 4 a Obrázok 5.



Obrázok 4 Typická závislosť vztlakového koeficientu na uhle nábehu [3]

Na Obrázok 4 je zrejmé, že so zvyšujúcim sa uhlom nábehu dochádza k nárastu súčiniteľa vztlaku  $C_L$  až do bodu odtrhnutia medznej vrstvy (stall efekt), ktorý bude podrobnejšie analyzovaný v nasledujúcich častiach. Zároveň je možné pozorovať, že s rastúcim Reynoldsovým číslom sa zvyšuje maximálne dosiahnuteľný vztlak, pričom dochádza aj k miernemu posunu kritického uhla nábehu, pri ktorom nastáva odtrhnutie prúdenia.

Obrázok 5 vykresľuje typické charakteristiky odporového súčiniteľa  $c_d$  v závislosti od vztlakového súčiniteľa  $c_l$  pre rôzne Reynoldsové čísla. Je tu vidieť optimálna oblasť, kde sú hodnoty odporového koeficientu nízke. Prudké navýšenie odporového koeficientu nastáva v prípade, že dosiahnem vysokú hodnotu vztlakového súčiniteľa (kladnú alebo aj zápornú). Tomuto javu odpovedajú prípady, kedy je uhol nábehu  $\alpha$  nevhodne vysoký (v kladnom alebo aj zápornom smere natočenia).



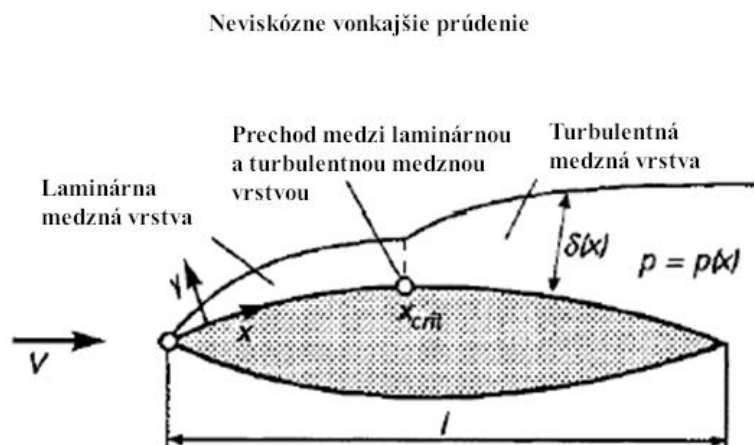
Obrázok 5 Typická závislosť odporového koeficientu v závislosti na vztlakovom koeficiente (polára aerodynamického profilu) [3]

## 1.2 Koncept medznej vrstvy

Prípady s vysokým Reynoldsovým číslom sú často analyzované na základe predpokladu neviskózne tekutiny, čo však predstavuje isté obmedzenia. Aj keď tento prístup môže poskytnúť základný odhad riešenia, nezohľadňuje dôležitú podmienku ulpievania. Táto podmienka stanovuje, že rýchlosť tekutiny na pevnom povrchu, napríklad na stenách NACA profilu v hydraulickom tuneli, musí byť nulová. Aby bola podmienka ulpievania splnená, je nevyhnutné brať do úvahy viskozitu prúdiaceho média [1].

Pre zjednodušenie riešenia je výhodné rozdeliť prúdenie na dve odlišné oblasti. Prvou oblasťou je hlavný prúd, kde je možné viskózne efekty zanedbať hlavne z dôvodu, že sa tam nevyskytujú žiadne väčšie rýchlostné gradienty a prúdenie sa správa ako keby bolo neviskózne. Druhou oblasťou je úzky priestor v blízkosti povrchu profilu, kde sú trecie sily spôsobené viskozitou dominantné. Táto oblasť sa označuje ako medzná vrstva (angl. boundary layer) a je zodpovedná za plynulý prechod rýchlostného profilu od rýchlosti hlavného prúdu na nulovú rýchlosť na povrchu profilu, čím zabezpečuje splnenie podmienky ulpievania [4].

Medzná vrstva (Obrázok 6) sa pri prúdení pozdĺž povrchu profilu postupne zväčšuje (veľkosť medznej vrstvy označená ako  $\delta(x)$ ), pričom jej charakter sa mení v závislosti od fyzikálnych vlastností prúdenia. Na základe charakteru prúdenia ju možno rozdeliť na dva základné režimy – laminárnu a turbulentnú medznú vrstvu. Laminárna medzná vrstva je typická pre počiatkové úseky medznej vrstvy, kde je prúdenie usporiadané. V tejto fáze sa jednotlivé vrstvy tekutiny pohybujú paralelne bez významného miešania, pričom rýchlostný profil má hladký a predvídateľný priebeh [4].



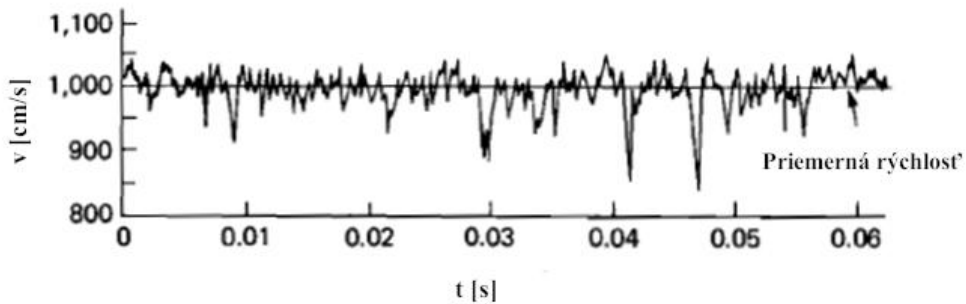
Obrázok 6 Medzná vrstva hydraulického profilu [4]

Laminárna medzná vrstva má tiež nižší trecí odpor, čo je výhodné z hľadiska hydrodynamického alebo aerodynamického výkonu. Avšak, jej stabilita je limitovaná a je náchylnejšia k odtrhávaniu medznej vrstvy ako turbulentná. S rastúcou vzdialenosťou od nábežnej hrany profilu alebo pri zvyšovaní Reynoldsovoho čísla sa v medznej vrstve začínajú objavovať poruchy. Tieto poruchy môžu byť spôsobené povrchovou drsnosťou, vonkajšími vibráciami alebo nepriaznivými tlakovými gradientmi po povrchu. Ak tieto poruchy prekročia určitú hranicu stability, laminárna medzná vrstva prechádza do turbulentného režimu [4].

Turbulentná medzná vrstva je charakteristická chaotickým a intenzívne miešaným prúdením. Na rozdiel od laminárneho režimu, v turbulentnej vrstve dochádza k výmene hybnosti, tepla a látok medzi vrstvami vďaka turbulentným vírom. Tento jav vedie k výrazne vyššiemu treciemu odporu v porovnaní s laminárnou medznou vrstvou. Avšak turbulentná medzná vrstva je oveľa odolnejšia voči separácii prúdenia, čo je zásadné v situáciách s nepriaznivým tlakovým gradientom, napríklad pri veľkých uhloch nábehu na profile [4].

Na popis prúdenia v turbulentnej medznej vrstve môže byť rýchlosť rozdelená do dvoch zložiek. Do priemernej rýchlosti  $\bar{u}$  a do flukтуаčnej zložky  $u'$ . Rýchlosť turbulentného prúdenia  $v$  vykresleného v čase  $t$  možno vidieť na Obrázok 7 [5].

$$u = \bar{u} + u' \quad (4)$$



Obrázok 7 Meranie rýchlosti [5]

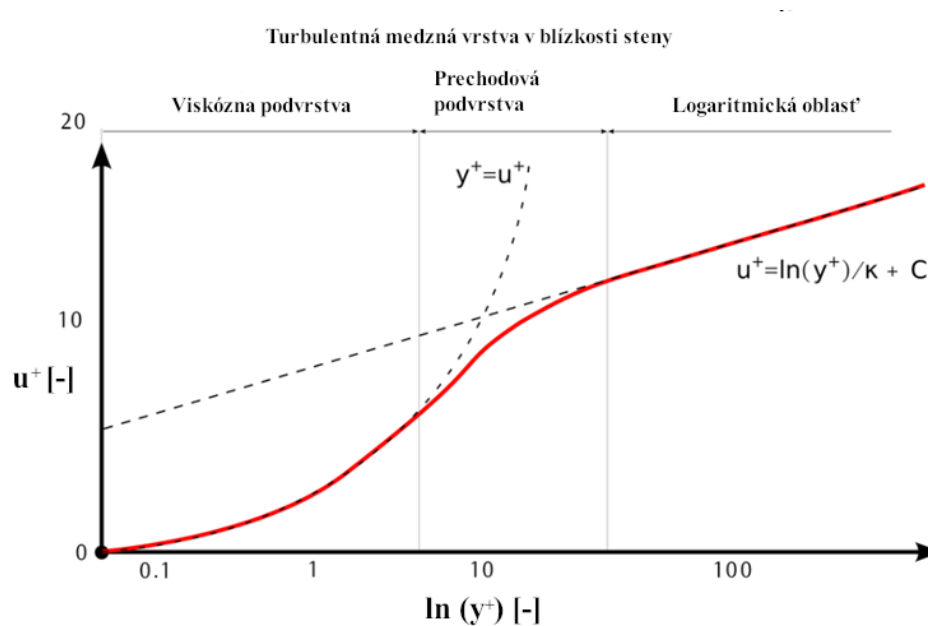
Ďalej táto turbulentná medzná vrstva je možno rozdeliť do 3 podkategórií, ktoré sú charakterizované pomocou bezrozmernej vzdialenosti  $y^+$  a bezrozmernej rýchlosti  $u^+$ , ktoré sú popísané pomocou rovníc 5) a 6) [5].

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u^*} \quad u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (5)$$

$$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu} \quad (6)$$

Najbližšia oblasť steny profilu sa nazýva viskózná podvrstva. Táto oblasť je dominovaná viskóznymi silami a tu platí, že  $u^+ = y^+$ . Ďalšia vrstva sa nazýva prechodová podvrstva (buffer layer) a v tejto vrstve sa objavujú ako viskózne tak aj turbulentné efekty. Posledná najväčšia vrstva je logaritmická oblasť, v ktorej prevládajú turbulentné efekty a platí tu logaritmický zákon (Rovnica 7)). Vykreslenie týchto všetkých 3 oblastí medznej vrstvy možno vidieť na Obrázok 8. Tieto bezrozmerné vzdialenosti od steny profilu budú podstatné pri následných CFD simuláciách, kde pre dobré zachytenie efektov súvisiacich s medznou vrstvou (odporový koeficient, separácia prúdenia) je potrebné mať prvú bunku výpočetnej siete v oblasti viskóznej podvrstvy t.j. veľkosť parametra  $y^+$  približne 1 [5] [6].

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln y^+ + B \quad (7)$$



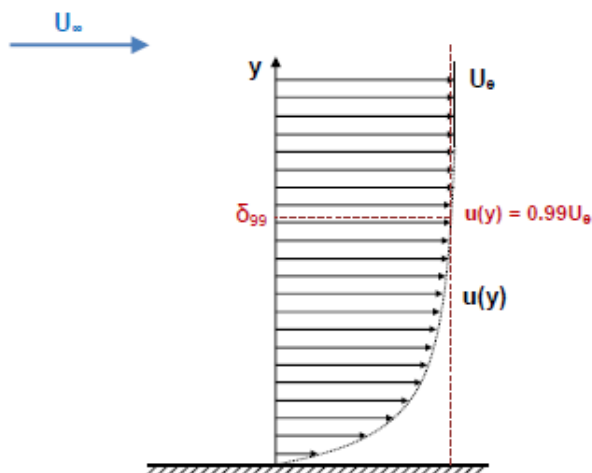
Obrázok 8 Štruktúra medznej vrstvy [6]

Prechod medzi laminárnou a turbulentnou medznou vrstvou, známy ako prechodová oblasť, je dynamický proces, ktorého dĺžka a poloha závisia od Reynoldsovoho čísla, kvality povrchu profilu a ďalších faktorov, ako sú vibrácie alebo miera turbulencie prúdiaceho média. Laminárna fáza je preferovaná v aplikáciách, kde je potrebné minimalizovať odpor, zatiaľ čo turbulentná vrstva je nevyhnutná tam, kde je potrebná lepšia stabilita prúdenia a vyšší prenos energie, prípadne oddialenie odtrhnutia medznej vrstvy [4].

Správne pochopenie správania medznej vrstvy má zásadný význam pre analýzu hydrodynamických a aerodynamických vlastností profilov, ako aj pre presnú predikciu javov, akými sú odporová sila, separácia prúdenia alebo vznik kavitácie. Okrem toho zohráva kľúčovú úlohu pri návrhu povrchových úprav a optimalizácii geometrie profilov, ktoré sa nachádzajú v prúdení s vysokým Reynoldsovým číslom. Preto v tejto práci bude rozobraný vplyv povrchových nerovností na prúdenie okolo profilu, aký to má efekt na medznú vrstvu a následne dopad na odporovú silu alebo separáciu prúdenia pri rôznych uhloch nábehoch.

### 1.2.1 Definovanie veľkosti medznej vrstvy a iných parametrov

Stanovenie hrúbky medznej vrstvy analytickými metódami môže byť problematické, a preto sa táto hrúbka často definuje zmluvne na základe dohody. Presnejšie, za hranicu medznej vrstvy sa považuje miesto, kde lokálna rýchlosť dosiahne určitú časť rýchlosti hlavného prúdu. Zvyčajne sa táto hranica stanovuje ako bod, v ktorom rýchlosť dosiahne 99 % lokálnej hodnoty rýchlosti hlavného prúdu (Obrázok 9) Tento prístup umožňuje praktické určenie veľkosti medznej vrstvy [4].



Obrázok 9 Veľkosť medznej vrstvy [7]

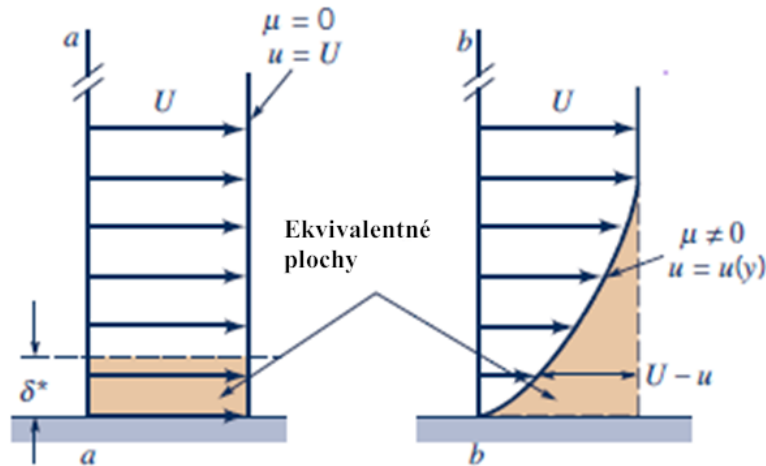
Na analýzu medzných vrstiev sa používajú aj ďalšie charakteristické parametre, ako napríklad hrúbka vytlačenia ( $\delta^*$ ). Tento parameter vyjadruje, o akú vzdialenosť by bolo potrebné posunúť povrch, aby sa dosiahlo ekvivalentné riešenie pre neviskóznú tekutinu. Hrúbka vytlačenia je funkciou iba pozdĺžnej súradnice  $x$ , ktorá zodpovedá smeru prúdenia tekutiny, a je priamo závislá na rýchlostnom profile v medznej vrstve [5].

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u(y)}{U_{\infty}}\right) dy \quad (8)$$

Rýchlostný profil v medznej vrstve  $u(y)$  je funkciou vzdialenosti  $y$  od povrchu, pričom  $U_{\infty}$  predstavuje lokálnu rýchlosť hlavného prúdu. Tento profil je možné jednoducho získať z výsledkov CFD simulácie, ktorá poskytuje rýchlostný profil ako funkciu pozície  $y$  v rámci medznej vrstvy. Dôležitou poznámkou je, že pri analýze medznej vrstvy na zakrivených profiloch, ako je napríklad NACA 2412, sa teória medznej vrstvy opiera o rýchlosti, ktoré sú tangenciálne k povrchu v danom bode. Preto ak sú dostupné rýchlosti v globálnom súradnicovom systéme  $x$  a  $y$ , je potrebné tieto rýchlosti transformovať do smeru normály k povrchu v danom bode. Táto transformácia sa vykonáva pomocou vektorových operácií, ktoré umožňujú správne zohľadniť orientáciu povrchu a presne určiť rýchlosti v smere normály.

Pre lepšie pochopenie tohto parametra si môžeme predstaviť situáciu, ako je znázornená na Obrázok 10. Na obrázku sú zobrazené dva rýchlostné profily: a) rovnomerný rýchlostný profil, ktorý zodpovedá riešeniu pre neviskóznú kvapalinu, a b) rýchlostný profil, ktorý zohľadňuje viskozitu, resp. medznú vrstvu a podmienku ulpievania. V dôsledku deficitu rýchlosti  $U - u$  v

rámci medznej vrstvy by bol prietok menší než v prípade a), avšak ak by sa povrch posunul o hodnotu  $\delta^*$ , prietoky by sa stali rovnakými. Tento parameter teda vyjadruje túto korekciu, ktorá kompenzuje vplyv viskozity a umožňuje dosiahnuť rovnaký prietok ako v prípade neviskózne kvapaliny [4].

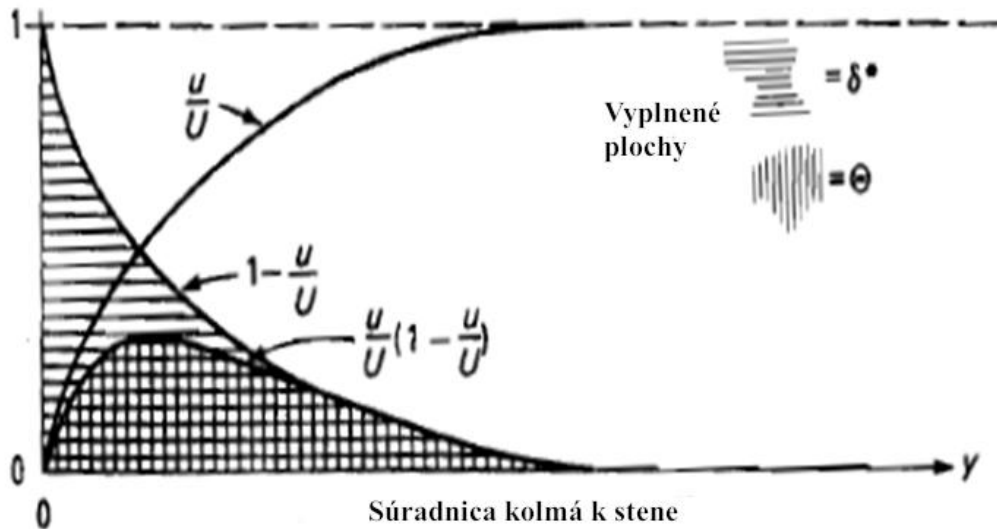


Obrázok 10 Odtlačacia hrúbka medznej vrstvy [1]

Hybnosťná hrúbka medznej vrstvy ( $\theta$ ) predstavuje ďalší dôležitý parameter používaný na charakterizáciu vplyvu viskózneho prúdenia v medznej vrstve. Podobne ako odtlačovacia hrúbka ( $\delta^*$ ) aj hybnosťná hrúbka vyjadruje rozdiel medzi viskóznym a neviskóznym prúdením, avšak tentoraz sa sústreďuje na zachovanie hybnosti v prúde. Táto hodnota vyjadruje zmeny hybnosti spôsobené prítomnosťou medznej vrstvy a predstavuje hrúbku teoretickej vrstvy neviskózneho prúdenia, ktorá by spôsobila rovnakú stratu hybnosti ako skutočné viskózne prúdenie. Podobne ako odtlačovacia hrúbka, aj hybnosťná hrúbka je funkciou pozdĺžnej súradnice  $x$ , rýchlosti hlavného prúdu  $U_\infty$  a rozloženia rýchlostného poľa  $u(y)$  v medznej vrstve. V prípade zakrivených profilov je dôležité, aby bol rýchlostný profil odvodený v smere kolmom na povrch profilu v danom bode, pretože ako bolo spomenuté teória medznej vrstvy pracuje s týmito rýchlosťami resp. rýchlostnými profilmi [4].

$$\theta = \int_0^\infty \frac{u(y)}{U_\infty} \cdot \left(1 - \frac{u(y)}{U_\infty}\right) dy \quad (9)$$

Hybnosťná hrúbka priamo súvisí so stratami hybnosti, ktoré sú zdrojom hydrodynamického alebo aerodynamického odporu. Tento parameter je kľúčový pri štúdiu prúdenia okolo profilov, predpovedi separácie prúdenia a analýze vlastností medznej vrstvy v inžinierskych aplikáciách. Rozšírením analýzy hybnostnej hrúbky spolu s ďalšími parametrami, ako je odtlačovacia hrúbka a celková hrúbka medznej vrstvy, je možné detailnejšie popísať interakciu medzi viskóznym a neviskóznym prúdením, čo je nevyhnutné pri optimalizácii tvarov telesa alebo zlepšovaní aerodynamických vlastností [5].



Obrázok 11 Grafická interpretácia odťahovacej a hybnostnej hrúbke medznej vrstvy [5]

Z Obrázok 11 je vidieť, že odťahovacia hrúbka medznej vrstvy z matematického hľadiska bude vždy väčšia ako hybnostná hrúbka medznej vrstvy.

Veličina, ktorá uvádza do pomeru odťahovaciu hrúbku ( $\delta^*$ ) a hybnostnú hrúbku ( $\theta$ ), sa nazýva tvarový faktor ( $H$ ). Tento parameter poskytuje informáciu o "plnosti" rýchlostného profilu v medznej vrstve a hrá kľúčovú úlohu pri charakterizácii jej vlastností. Tvarový faktor je definovaný ako: [8]

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad (10)$$

Tvarový faktor  $H$  odráža rozloženie rýchlostného profilu v medznej vrstve. Vyššia hodnota  $H$  naznačuje výraznejší rýchlostný deficit, čo signalizuje redší profil rýchlosti a väčšiu náchylnosť medznej vrstvy na separáciu prúdenia. Naopak, nižšia hodnota  $H$  je charakteristická pre plnší rýchlostný profil, ktorý lepšie odoláva separácii a vykazuje väčšiu stabilitu voči nepriaznivým tlakovým gradientom [5].

Laminárne medzné vrstvy majú tvarový faktor typicky okolo hodnoty 2,5, čo naznačuje, že ich rýchlostný profil má pomerne veľký deficit v porovnaní s turbulentnými medznými vrstvami. Turbulentné medzné vrstvy, vďaka zmiešavacím efektom spôsobeným turbulenciou, majú tvarový faktor približne polovičný, teda blízko hodnoty 1,3 až 1,6. Toto podporuje, čo bolo spomenuté na začiatku, že laminárna medzná vrstva je zo svojej podstaty horšie odolná voči separácii prúdenia [8].

Tvarový faktor  $H$  je dôležitým ukazovateľom stability medznej vrstvy. Vyššie hodnoty  $H$ , typické pre laminárne medzné vrstvy, naznačujú vyššiu náchylnosť na separáciu prúdenia. Turbulentné medzné vrstvy, naopak, majú nižšie hodnoty  $H$ , čo odráža ich schopnosť lepšie prilnúť k povrchu, a tým oneskoriť separáciu. Táto vlastnosť je dôsledkom intenzívnejšieho zmiešavania hybnosti v turbulentnej vrstve, ktoré znižuje rýchlostný deficit [8].

Súčiniteľ trenia povrchu ( $C_f$ ) je bezrozmerný parameter, podobne ako koeficient odporovej alebo tlakovej sily. Tento parameter závisí od šmykového napätia na povrchu profilu ( $\tau_w$ ), hustoty prúdiaceho média ( $\rho$ ) a rýchlosti voľného prúdu ( $U_\infty$ ). S rastúcou hrúbkou medznej vrstvy dochádza k postupnému znižovaniu hodnoty súčiniteľa trenia povrchu, až kým sa v separačnom bode nestane nulovým [4].

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2} \quad (11)$$

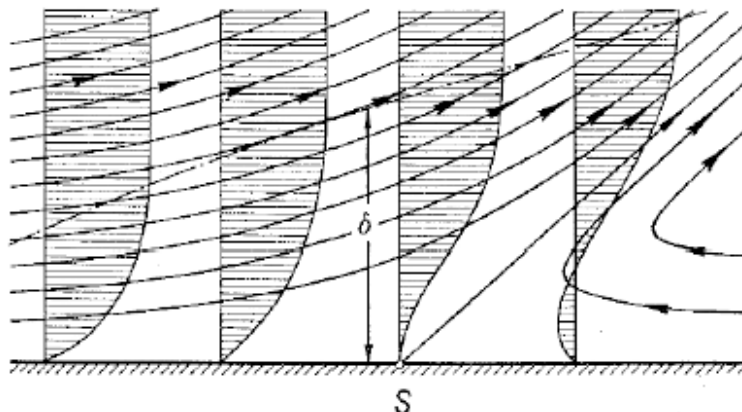
### 1.3 Separácia prúdenia

Pri obtekaní telies, ako sú valce alebo profily typu NACA, ktoré majú zakrivený tvar, často dochádza k separácii prúdenia. Tento jav je spôsobený výskytom nepriaznivého tlakového gradientu, ktorý vzniká v dôsledku zmeny tlaku pozdĺž povrchu telesa v smere prúdenia. Nepriaznivý tlakový gradient znamená, že tlak v smere osi  $x$  narastá, čo spôsobuje spomalenie prúdenia v medznej vrstve. Ak sa kinetická energia častíc prúdiacej tekutiny stane nedostatočnou na prekonanie nepriaznivého tlakového gradientu, prúdenie sa môže odtrhnúť od povrchu telesa, čo vedie k separácii [9].

Separáčny bod, teda miesto, kde dochádza k začiatku separácie prúdenia, a následná veľkosť úplavu za telesom, závisia od viacerých parametrov. Medzi kľúčové faktory patrí charakter medznej vrstvy, konkrétne, či je laminárna alebo turbulentná, a v prípade NACA profilov aj uhol nábehu a Reynoldsovo číslo. Turbulentná medzná vrstva má vyššiu kinetickú energiu, čo môže oneskoriť separáciu v porovnaní s laminárnou vrstvou [9]. Separácia prúdenia spôsobuje vznik oblastí nízkeho tlaku, čo má významný vplyv na hydrodynamické alebo aerodynamické charakteristiky telesa, najmä na tvarový odpor. Tento efekt je obzvlášť výrazný pri vysokých uhloch nábehov, kde dochádza k rozsiahlejšej separácii, čo môže viesť k výraznému poklesu vztlakovej sily a zvýšeniu odporovej sily pôsobiacej na obtekaný profil. Okrem hydrodynamických aspektov je separácia prúdenia dôležitá aj z hľadiska stability a dynamických síl pôsobiacich na teleso [2].

Riziko separácie prúdenia je vždy prítomné v oblastiach s nepriaznivým tlakovým gradientom, pričom jeho pravdepodobnosť narastá s intenzitou tohto gradientu. Pre aerodynamické telesá, ako sú NACA profily, je kľúčové minimalizovať riziko separácie, aby sa dosiahla optimálna efektívnosť. Ideálnym riešením je navrhnuť profil tak, aby k separácii dochádzalo len pri vysokých uhloch nábehov, kedy s týmto javom počítame [4].

Minimalizácia separácie je dosiahnutá optimalizáciou geometrie profilu, ktorá zabezpečuje priaznivejšie rozloženie tlakového poľa a umožňuje medznej vrstve udržať dostatočnú kinetickú energiu na prekonanie nepriaznivého tlakového gradientu. Tento prístup znižuje straty spôsobené separáciou, ako aj súvisiace zvýšenie odporu a zníženie vztlakovej sily [4].

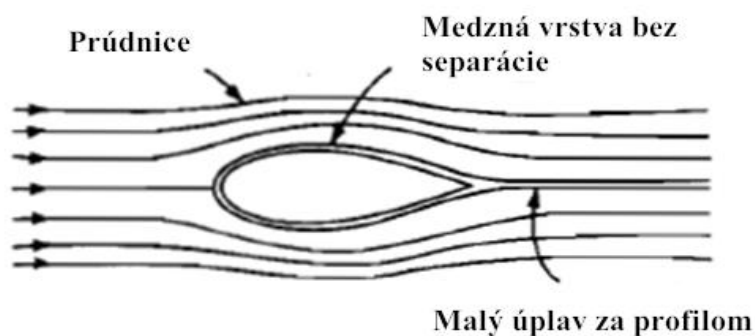


Obrázok 12 Ukážka separácie prúdenia v medznej vrstve [4]

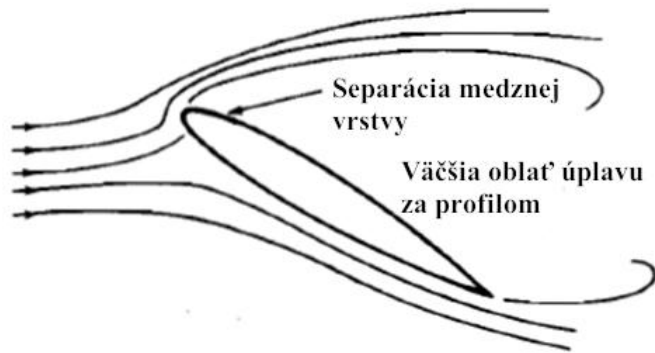
Na Obrázok 12 je znázornené na rýchlostnom profile v medznej vrstve ako to môže vyzerat'. Bodom S je znázornený začiatok separácie prúdenia a začína sa tu otáčať rýchlosť v smere prúdenia. Iný pohľad na túto problematiku a ako nájsť oblasť separácie či už experimentálne alebo pomocou CFD tak je, že táto oblasť je typická tým, že :[4].

$$\tau_w = 0 \quad (12)$$

Obrázok 13 a Obrázok 14 znázorňuje prúdenie okolo NACA profilu a porovnanie separácie prúdenia resp. medznej vrstvy a výsledný úplav pre nulový uhol nábehu a pre nevhodne veľký uhol nábehu. V prípade nulového uhlu nábehu nedochádza k žiadnej separácii (alebo veľmi minimálnej) a v opačnom prípade s nevhodne veľkým uhlom nábehu  $\alpha$  dochádza k veľmi rozsiahlej separácii prúdenia.[5]



Obrázok 13 Obtekanie profilu pre nulový uhol nábehu  $\alpha$  [5]



Obrázok 14 Obtekanie profilu pre príliš veľký uhol nábehu  $\alpha$  [5]

Separácia medznej vrstvy predstavuje vo všeobecnosti nežiaduci jav, ktorému je možné predchádzať rôznymi spôsobmi. Jednou z najjednoduchších, avšak technicky náročných možností je eliminácia rýchlostného profilu v medznej vrstve prostredníctvom zabezpečenia nenulovej rýchlosti pri stene. Tento prístup by vyžadoval pohyb steny určitou rýchlosťou, čo však predstavuje významné technické výzvy, najmä z pohľadu implementácie a energetických nákladov [4].

Ďalšou, sofistikovanejšou metódou je aktívne riadenie medznej vrstvy, ktoré zahŕňa jej odsávanie alebo tečné fúkanie. Odsávaním sa odstraňujú nízkoenergetické vrstvy, čím sa predchádza separácii. Naopak, tečné fúkanie dodáva kinetickú energiu medznej vrstve, čím sa zlepšujú jej dynamické vlastnosti a oddŕaľuje sa miesto separácie. Tieto metódy nachádzajú využitie najmä v aerodynamike a hydrodynamike, kde zlepšujú prúdenie okolo profilov a znižujú aerodynamický odpor alebo straty na povrchoch [4].

Implementácia uvedených techník si vyžaduje pokročilé technologické riešenia a často aj zvýšené energetické náklady, či už na samotnú prevádzku, alebo údržbu. Z tohto dôvodu sa táto práca zameriava na alternatívny prístup k riadeniu medznej vrstvy, konkrétne na pasívne riadenie využitím povrchových nerovností (jamky, angl. dimples).

Hoci v súčasnosti neexistuje jednoznačný konsenzus o efektívnosti týchto metód, existujú experimentálne overené prípady, ktoré preukázali zlepšenie aerodynamických a hydrodynamických vlastností profilov s uvedenými povrchovými úpravami. Táto práca sa bude sústreďovať na optimalizáciu tvaru týchto nerovností, pričom pozornosť bude venovaná ich geometrickým parametrom, ako je počet, rozstup a ďalšie charakteristiky.

Cieľom bude analyzovať, aký vplyv majú tieto modifikácie na jednotlivé javy opísané v predchádzajúcich podkapitolách, s dôrazom na zlepšenie stability medznej vrstvy, minimalizáciu separácie prúdenia a zníženie odporu. Výsledky tejto analýzy by mohli prispieť k efektívnejšiemu návrhu profilov s povrchovými nerovnosťami, ktoré by nachádzali uplatnenie v rôznych technických a priemyselných aplikáciách.

## 2 Vplyv povrchových štruktúr na prúdenie okolo profilu

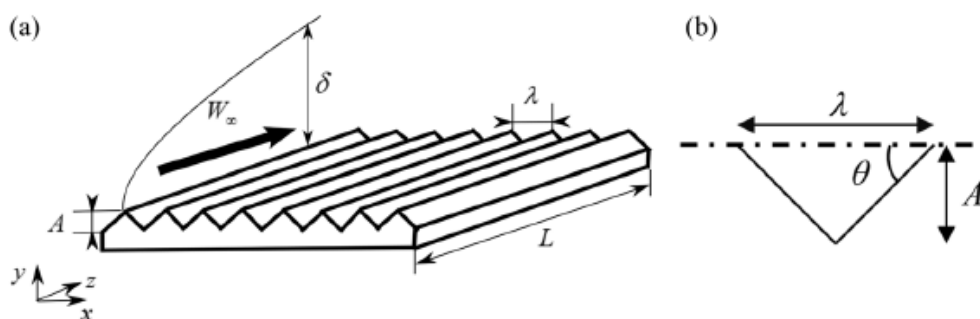
V tejto kapitole budú analyzované pasívne metódy modifikácie medznej vrstvy prostredníctvom povrchových nerovností. Osobitná pozornosť bude venovaná prehľadu typov povrchových štruktúr a stanovení optimálnych geometrických parametrov, ktoré budú aplikované na modifikáciu povrchu profilu NACA 2412. Upravený hydraulický profil bude následne podrobený numerickej simulácii pomocou CFD.

### 2.1 História a inšpirácia v prírode a budúcnosť pasívnych povrchových štruktúr

Redukcia odporu generovaného prúdením kvapaliny vo vzájomnom pohybe voči pevnej štruktúre predstavuje kľúčový krok k hlbšiemu pochopeniu priaznivej interakcie s turbulentnými javmi a zároveň významnú technologickú výzvu s rozsiahlym potenciálom v rôznych oblastiach inžinierskej praxe. Rastúci záujem o metódy riadenia turbulentného prúdenia je motivovaný primárne kvôli ekonomickej a environmentálnej situácii [10].

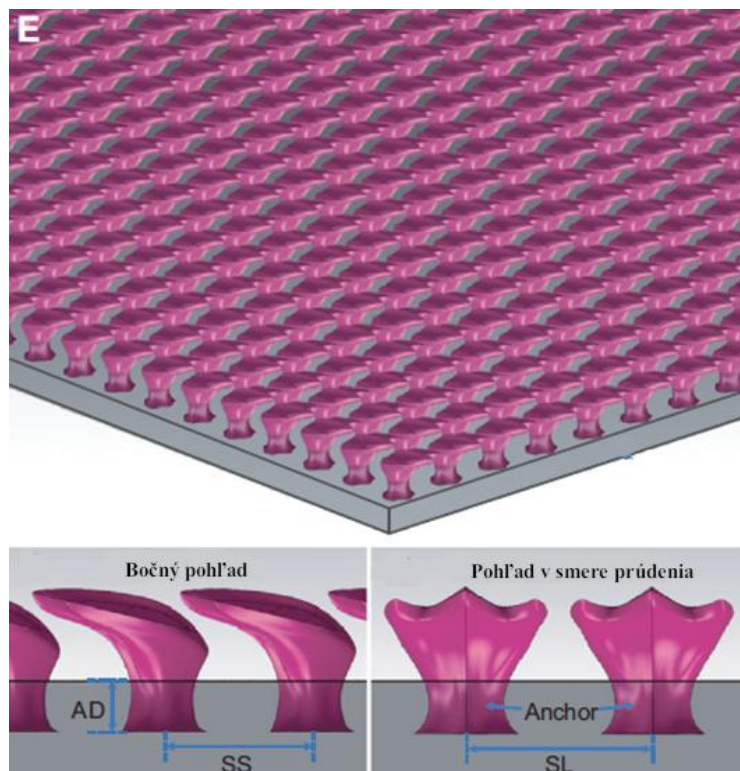
Vo všeobecnosti existuje viacero typov pasívnych metód na redukcii odporu, ktoré sa odlišujú svojou zložitou a účinnosťou. Pasívne metódy sú často preferované pred aktívnymi, predovšetkým vďaka ich nižšej technologickej náročnosti a absencii potreby dodatočnej energie na ich prevádzku. Napriek tomu ide o oblasť, ktorá je stále nedostatočne preskúmaná a vyžaduje si ďalší výskum [11].

Prvým pasívnym spôsobom riadenia odporu, ktorý bol skúmaný, bol vplyv tzv. ribletiek (angl. riblets), pričom intenzívny výskum prebiehal v 80. rokoch 20. storočia. Laboratórne experimenty na zmenšených modeloch potvrdili ich pozitívny účinok na redukcii odporu. Avšak testy na modeloch v skutočnej mierke poukázali na viaceré praktické problémy, ktoré obmedzili ich širšie uplatnenie v praxi, najmä na rýchle opotrebovanie týchto ryhovaných štruktúr [12]. Táto technika spočíva v aplikácii ryhovaných štruktúr alebo drážok orientovaných v smere prúdenia. Medzi rôznymi možnými geometrickými konfiguráciami sa ako najpoužívanejšia javí trojuholníková varianta. Napriek sľubným výsledkom laboratórných štúdií bola efektívnosť tejto metódy v reálnych podmienkach obmedzená predovšetkým v dôsledku rýchleho opotrebovania, pričom k tejto degradácii významne prispievali ostré hrany štruktúr. Schematická ukážka tejto povrchovej modifikácie je možno vidieť na Obrázok 15 [10].



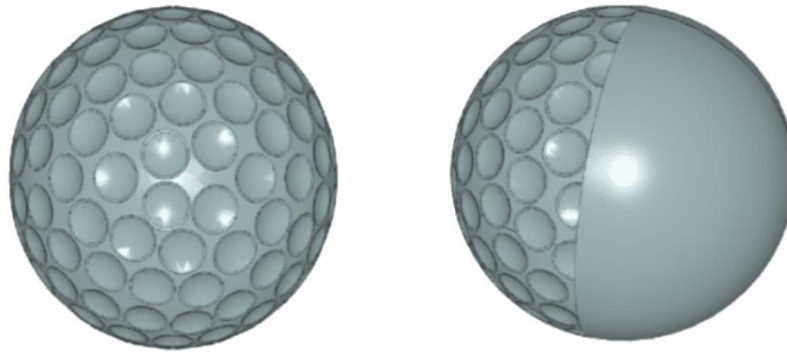
Obrázok 15 Geometria ribletiek [13]

Pozoruhodným faktom je, že táto metóda bola do značnej miery inšpirovaná prírodou, konkrétne textúrou kože žraloka, ktorá sa považuje za jednu z najvýznamnejších inšpirácií pre výskum pasívnych povrchových štruktúr. Tento prírodný povrch je navrhnutý tak, aby modifikoval prúdenie okolo tela žraloka a ovplyvňoval súvisiace javy a fenomény, ktoré boli detailne rozpracované v kapitole 1. Na základe tejto biologickej inšpirácie sa začal výskum rôznych geometrických konfigurácií ryhovaných štruktúr, pričom medzi najčastejšie skúmané patrili trojuholníkové a obdĺžnikové profily. [14]



Obrázok 16 Ukážka vyrobenej povrchovej štruktúry inšpirovanou žraločou kožou [14]

Jednou z novších alternatív k tejto metóde, ktorá je jednoduchšia na výrobu a eliminuje problémy s opotrebovaním spôsobené ostrými hranami, sú tzv. jamky (angl. dimples), čo sú malé konkávne útvary na povrchu telesa. Tieto útvary sú známe najmä v aplikáciách, kde dochádza k výraznému odtrhnutiu prúdenia, pričom najznámejším príkladom ich využitia je golfová loptička. Jamky na povrchu slúžia na umelé vytvorenie turbulencie v medznej vrstve, čo vedie k rýchlejšiemu prechodu do turbulentnej medznej vrstvy. Tento efekt zlepšuje udržanie medznej vrstvy a znižuje pravdepodobnosť separácie prúdenia, ktorá by nastala skôr v prípade hladkého povrchu bez týchto štruktúr.[10]



*Obrázok 17 Jamky na golfovej loptičke [15]*

Existujú aj štúdie, ktoré sa zaoberajú využitím týchto štruktúr na rovnom povrchu dosky. Na rozdiel od aplikácie na golfovej loptičke, kde sa hlavne skúmala separácia prúdenia a tlakový odpor, v tomto prípade bol predmetom výskumu vplyv na trecí odpor. Mechanizmy, ktoré vedú k redukcii tohto odporu, sú pomerne zložité a budú podrobnejšie vysvetlené v ďalšom texte.[12]

Z tohto dôvodu by bolo zaujímavé skúmať efekt týchto štruktúr na prúdenie okolo NACA profilu a testovať rôzne geometrické varianty, pričom by sa sledoval vplyv na prúdenie okolo tohto profilu v rôznych podmienkach. Pri prúdení okolo NACA profilu ide o kombináciu viacerých faktorov, ktoré ovplyvňujú prúdenie, ako je tlakový odpor, separácia prúdenia a trecí odpor. Každý z týchto faktorov sa prejavuje rôzne v závislosti od tvaru a geometrie povrchu, ktorý sa prúdením ovplyvňuje. Na základe doterajšej literatúry predpokladám, že pri testovaní pri väčších uhloch nábehu, okolo 12 stupňov a viac, by mal byť efekt jamiek na NACA profile podobný tomu, ako pri golfovej loptičke. V tomto prípade by sme mali očakávať redukcii separácie prúdenia, čo by malo viesť k zníženiu tlakových strát a zlepšeniu účinnosti profilu.

Naopak, pri testovaní pri nižších uhloch nábehu, kde separácia prúdenia nie je tak výrazná, by sa mechanizmy redukcie odporu mohli podobáť tým, ktoré sa vyskytujú pri obtekaní rovnej dosky. V tomto prípade by jamky mohli pôsobiť na zlepšenie trecieho odporu, čo by mohlo prispieť k zníženiu stratového odporu pri obtekaní povrchu.

Je však dôležité poznamenať, že tieto predpoklady sú stále predmetom výskumu a skutočné správanie týchto povrchových štruktúr v praxi môže byť veľmi rozdielne. Mechanizmy, ktoré vedú k zlepšeniu aerodynamických alebo hydrodynamických vlastností, sú veľmi komplexné a často závisia od kombinácie viacerých faktorov. Tieto faktory zahŕňajú nielen geometrické parametre jamiek, ako je hĺbka, šírka a rozmiestnenie na povrchu profilu, ale aj dynamiku prúdenia, okrajové podmienky a turbulentné štruktúry, ktoré sa vytvárajú v rôznych oblastiach prúdenia.

Vzhľadom na to, že pasívne metódy, ako sú jamky, sú stále relatívne málo preskúmané, v súčasnosti neexistuje jednotný konsenzus ohľadom ich všeobecného efektu na zníženie odporu. V literatúre sa stále diskutuje o ich aplikovateľnosti a optimálnych parametroch. Hoci nie je jednoznačné, aký bude ich vplyv v širšom kontexte, existuje jasný potenciál pre ďalší výskum v tejto oblasti, ktorý by mohol odhaliť nové možnosti v optimalizácii aerodynamických alebo hydrodynamických systémov, čo by mohlo viesť k zlepšeniu efektivity v rôznych inžinierskych aplikáciách.

## 2.2 Jamky

Zistenie, že povrchové modifikácie vo forme plytkých sférických jamiek pozitívne ovplyvňujú odporovú silu, bolo identifikované v 80. rokoch 20. storočia ruskými vedcami. Počas experimentov zameraných na zlepšenie prenosu tepla v jadrových elektrárnach (Kurchatov Institute of Atomic Energy) sa náhodou zistilo, že takto upravená teplosmerná plocha nielen zvyšuje účinnosť prenosu tepla, ale zároveň znižuje odpor prúdenia. Nazvali tento fenomén ako tornádový efekt (angl. Tornado-Like Technology) pretože verili, že v týchto jamkách sa vytváral silný vír, ktorý bol zodpovedný za redukovanie odporovej sily. [12] Schopnosť povrchových modifikácií znižovať odporovú silu je podstatne menej intuitívni ako ich vplyv na zlepšenie prenosu tepla. Rovnaká skupina vedcov vykonala štúdie, ktoré uvádzajú maximálne zníženie odporu až o 15 %. V posledných desaťročiach sa mnoho vedcov usilovalo pochopiť mechanizmus tohto fenoménu a identifikovať optimálny tvar a geometrické parametre modifikácií. Napriek tomu sa doposiaľ nepodarilo dosiahnuť všeobecnú zhodu na mechanizme znižovania odporu ani nájsť univerzálne riešenie [10].

Mechanizmus znižovania tvarového odporu prostredníctvom potlačenia separácie prúdenia, založený na urýchlenom prechode z laminárnej medznej vrstvy na turbulentnú, je dobre známy. V odborných článkoch sa však pozornosť sústreďuje na redukciiu trecieho odporu pri turbulentnom prúdení v jednoduchých geometrických konfiguráciách, ako sú rovinné dosky, potrubia alebo kanály rôznych tvarov. V týchto prípadoch, kde sa separácia prúdenia neočakáva, majú povrchové modifikácie vplyv výhradne na treciu zložku odporu. Otázkou zostáva, aký účinok budú mať tieto povrchové úpravy na prúdenie okolo telies, kde sú významné obidve zložky odporu – trecia aj tvarová – a kde môže dochádzať k odtrhávaniu prúdenia. Táto problematika bude skúmaná prostredníctvom CFD výpočtov, pri ktorých budú testované najperspektívnejšie geometrické parametre povrchových modifikácií.

Jedným z hlavných dôvodov, prečo nebola dosiahnutá všeobecná zhoda v tejto oblasti, môže byť výrazná citlivosť prúdenia okolo telies s povrchovými modifikáciami na ich geometrické parametre. Kľúčovými faktormi sú predovšetkým hĺbka a priemer jamiek, ich počet v rade, počet radov, ako aj vzdialenosť medzi jednotlivými radami. Okrem toho zohrávajú významnú úlohu aj okrajové podmienky, ako je Reynoldsovo číslo a intenzita turbulencie na vstupe. [16]

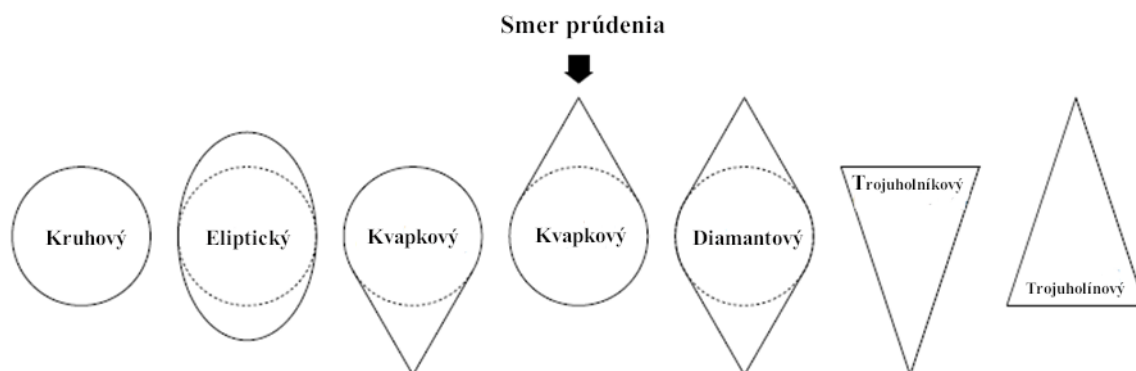
V porovnaní so štúdiami, ktoré sa zaoberajú vplyvom týchto povrchových úprav na zlepšenie prenosu tepla, je ich účinok na redukciiu odporu menej preskúmaný a iba obmedzený počet štúdií identifikoval geometrické konfigurácie s pozitívnym efektom. Napriek tomu existujú všeobecné odporúčania týkajúce sa geometrických konfigurácií, ktoré vykazujú lepšie výsledky v optimalizácii hydrodynamických alebo aerodynamických vlastností [16].

Nájsť optimálnu geometrickú konfiguráciu na zlepšenie aerodynamických vlastností, predovšetkým na redukcii odporovej sily, predstavuje náročnú úlohu, či už experimentálnym prístupom alebo numerickými metódami prostredníctvom CFD simulácií. Dôvodom je obrovský počet možných geometrických konfigurácií, ktoré je potrebné otestovať v situácii, keď neexistuje všeobecná zhoda na najvhodnejších tvaroch a rozmeroch [10].

Napriek tejto zložitosti by však preukázanie pozitívneho efektu takýchto povrchových modifikácií mohlo otvoriť nové možnosti na zníženie odporovej sily prostredníctvom jednoduchej úpravy povrchu, a to bez potreby akejkoľvek externej energie. Tento prístup by mohol predstavovať efektívne a energeticky nenáročné riešenie v optimalizácii prúdenia.[10]

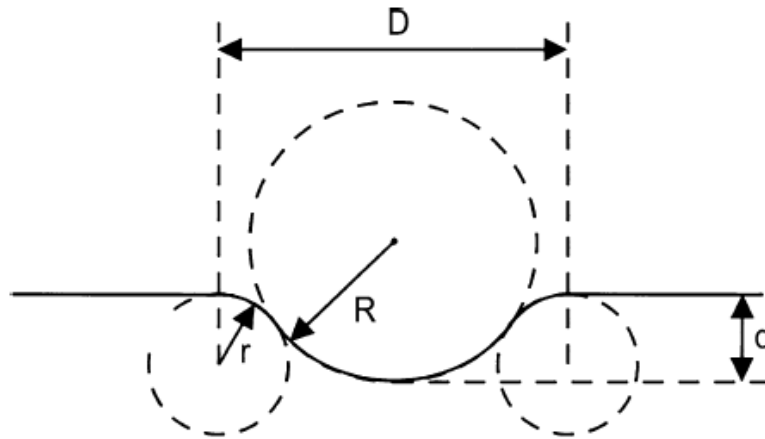
### 2.2.1 Základné geometrické parametre

Cieľom návrhu povrchu je dosiahnuť takú geometrickú konfiguráciu, ktorá minimalizuje celkový odpor. Toho je možné dosiahnuť výrazným znížením trecieho odporu, čím sa kompenzuje tvarový odpor spôsobený tvarom jamiek, čo vedie k celkovému pozitívnemu efektu na prúdenie. Medzi dostupnými geometriami jamiek je najviac rozpracovaný kruhový prierez, ktorému sa bude primárne venovať analýza v tejto diplomovej práci. Tento výber je motivovaný jednoduchosťou geometrie a dostupnosťou najväčšieho množstva geometrických odporúčaní pre jeho návrh [11]. Hoci je kruhový prierez najrozšírenejším a najviac skúmaným tvarom, v posledných rokoch sa intenzívne testovali aj alternatívne geometrie jamiek, ako napríklad eliptické, kvapkovité či trojuholníkové tvary. Zároveň sa skúmali aj rôzne orientácie týchto jamôk voči smeru prúdenia, s cieľom optimalizovať ich aerodynamické alebo hydrodynamické vlastnosti [10].



Obrázok 18 Populárne tvary jamiek [10]

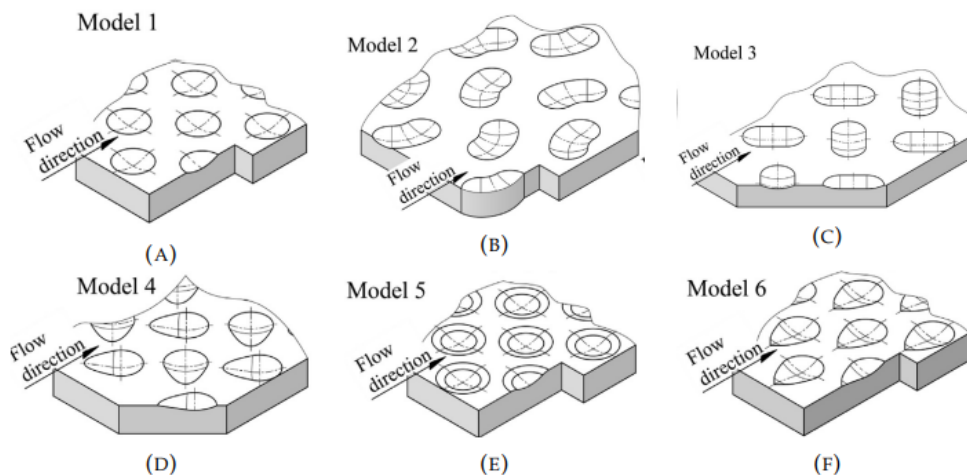
Ako vyzerajú tieto povrchové modifikácie na povrchu v 3D je možno vidieť na Obrázok 20. Sú tu ukážky kruhových tvarov či už bez zaoblenia (Model 1) alebo so zaoblením (Model 5). Práve tejto variante bude venovaná väčšina pozornosti pri optimalizácii geometrických parametrov. Dôvodom je ich relatívne jednoduchá tvorba a parametrizácia na povrchu hydraulického profilu. Ďalšia varianta, ktorá ešte bude vyskúšaná bude odvodená práve od tejto kruhovej varianty. Touto geometrickou variantou bude eliptický tvar týchto povrchových modifikácií.



Obrázok 19 Základné geometrické parametre jamky [12]

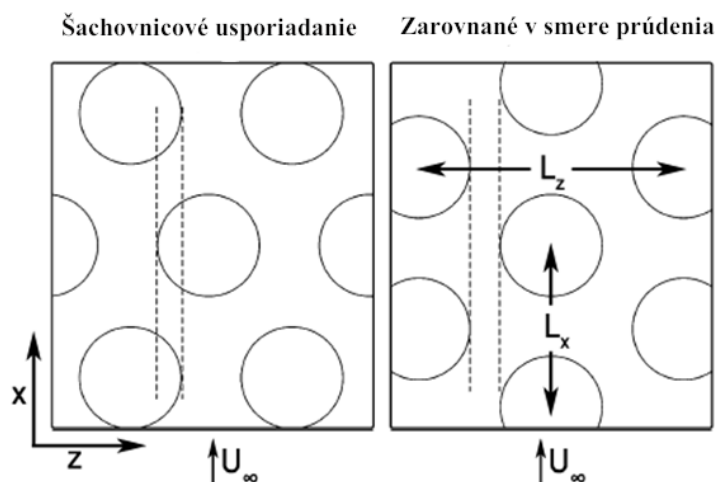
Základné geometrické charakteristiky kruhového prierezu potrebné na úplný popis jeho geometrie zahŕňajú: priemer  $D$ , hĺbku  $d$ , rádius  $r$  (ak je prítomný), polomer zaoblenia samotnej jamky  $R$  a vzdialenosti medzi jednotlivými prvkami v osiach  $x$  a  $y$ , označené ako  $L_x$  a  $L_y$ . Pre návrh sa tieto veličiny udávajú v bezrozmerných veličinách vzťahnuté väčšinou k priemeru  $D$ . Základné geometrické charakteristiky možno vidieť na Obrázok 19. Pri návrhu rozmerov jednej jamky sú potrebné iba prvé 4 parametre ( $D, r, d, R$ ). Tieto parametre ale nie sú na sebe nezávislé ale spája ich analytický vzorec : [12],[10]

$$\frac{D}{2} = \sqrt{d \cdot (2R + 2r - d)} \quad (13)$$



Obrázok 20 Ukážka vytvorených povrchových modifikácií na povrchu [7]

Ďalším významným geometrickým parametrom je rozloženie povrchových modifikácií na povrchu, konkrétne ich orientácia voči smeru prúdenia. Tieto modifikácie môžu byť usporiadané v šachovnicovom vzore alebo zarovnané v smere prúdenia (Obrázok 21). Na základe analýzy dostupnej literatúry sa ukazuje, že šachovnicové usporiadanie poskytuje výhodnejšie aerodynamické alebo hydrodynamické vlastnosti v porovnaní so zarovnaným usporiadaním, a preto bude uprednostnené pri ďalšom návrhu. Ďalším dôležitým parametrom je hustota rozloženia modifikácií na povrchu. V tejto oblasti však neexistuje jednoznačný konsenzus, či je výhodnejšie hustejšie alebo redšie rozloženie, čo si vyžaduje ďalšie skúmanie. [12]



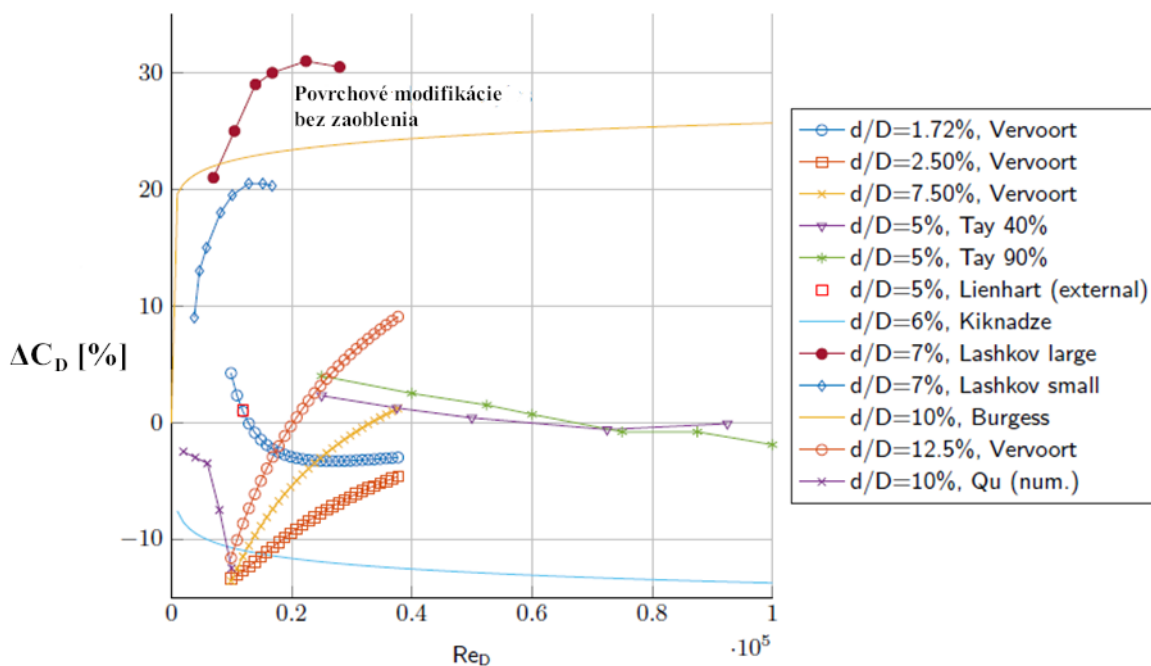
Obrázok 21 Rozloženie povrchových modifikácií na povrchu profilu [12]

## 2.2.2 Geometrický návrh a odporúčania

Systematické štúdie, ktoré sa zameriavajú na návrh a vplyv geometrických parametrov, sú obmedzené, a preto doposiaľ neexistuje jednoznačne identifikovaná optimálna geometrická konfigurácia, ktorá by mala pozitívny vplyv na charakter prúdenia okolo hydraulického profilu. V tejto podkapitole budú podrobne analyzované základné geometrické odporúčania týkajúce sa návrhu týchto povrchových úprav.

Ako bolo spomenuté skôr, pre návrh a odporúčanie pre geometrickú konfiguráciu sa používajú bezrozmerné charakteristiky udávané v percentách. Literatúra najčastejšie uvádza tieto 3 nezávislé geometrické bezrozmerné kritéria :  $\frac{d}{D}$  ,  $\frac{r}{D}$  ,  $\frac{R}{D}$  ( Obrázok 19) [10].

Prvým geometrickým kritériom je vplyv hĺbky jamky vzťahujúcej sa k jeho priemeru ( $d/D$ ). Podľa mnohých literárnych zdrojov tento geometrický parameter zohráva kľúčovú úlohu v určovaní charakteru prúdenia, avšak nie je jediným faktorom, ktorý naň vplyva. Pre optimalizáciu prestupu tepla bolo identifikované optimálne hodnoty pomeru  $d/D$  v intervale 20–50%, čo vedie k najväčšiemu zlepšeniu prenosu tepla. Na druhej strane, pre minimalizáciu odporovej sily sa ukázalo, že tento pomer by mal byť výrazne menší, aby sa predišlo generovaniu príliš veľkej tlakovej časti odporovej sily. Ideálny interval pre pomer  $d/D$  sa pohybuje medzi 2,5% a 15%, pričom zlepšenia boli zaznamenané aj pri hodnotách až do 20% [10][17]. Pre optimalizáciu geometrického tvaru týchto povrchových nerovností budú testované iba varianty, ktoré rešpektujú tento interval, a maximálna hodnota bude zvolená  $d/D = 10\%$ .



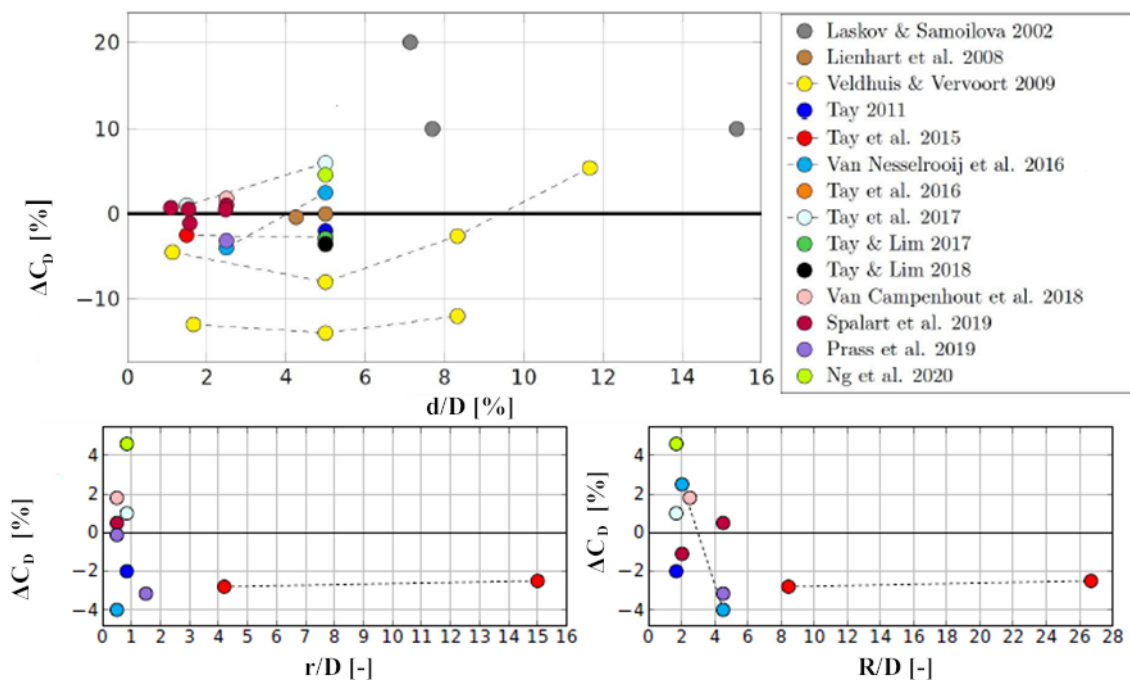
Obrázok 22 Porovnanie vykonaných experimentov pre rôzne geometrické varianty z literatúry [11]

Niekoľko relevantných experimentov bolo vykonaných, ako je znázornené na Obrázok 22 alebo Obrázok 23. Najspoľahlivejšie merania boli realizované v [18]. V rámci experimentu pri pomere  $d/D = 5\%$  bolo dosiahnuté zníženie odporovej sily, pričom s rastúcim Reynoldsovým číslom sa tento pokles zvyšoval. Avšak vzhľadom na rôzne nastavenia meraní a okrajových podmienok nie je možné úplne jednoznačne porovnávať výsledky medzi sebou, avšak môžu slúžiť ako orientačný nástroj pre približné hodnotenie. Ďalšia vec, ktorú je nutné si uvedomiť je, že tieto merania a odporúčania, ktoré sú uvádzané z literatúry vychádzajú z obtekania okolo rovnej dosky. Pri aplikovaní týchto povrchových modifikácií na hydraulický profil sa to môže správať inak, ale ako začiatok optimalizácie geometrie to môže byť dobrý začiatok.

Ďalším geometrickým parametrom je zaoblenie okraja povrchových modifikácií, vyjadrené ako  $r$ , resp. bezrozmerný geometrický parameter  $r/D$ . Tento rádius prispieva k redukcii indukovaného tvarového odporu a separácie prúdenia v porovnaní s prípadom, keď je prítomná ostrá hrana. V experimentoch sa takmer vždy pozoroval nárast odporovej sily pri ostrých hranách. Tento jav je možné vidieť aj na Obrázok 22, kde použitie týchto povrchových modifikácií bez zaoblenia hrany viedlo k výraznému nárastu odporovej sily. Okrem toho, pri výrobe týchto povrchových nerovností, napríklad pomocou 3D tlač, môže byť náročnejšie vytvoriť povrchové modifikácie s ostrými hranami. Ideálny pomer  $r/D$  sa pohybuje v intervale 50 až 150%, pričom literatúra odporúča uprednostniť hodnoty bližšie k dolnej hranici tohto rozsahu [10].

Čo sa týka polomeru zaoblenia dna jamiek povrchových modifikácií (označeného ako  $R$ ), tento parameter bude zvolený tak, aby spĺňal požiadavky ideálnych intervalov uvedených vyššie. Hodnota  $R$  bude vypočítaná na základe rovnice (13).

Ohľadom rozloženia týchto povrchových modifikácií, pre všetky optimalizované varianty bude zvolený šachovnicový vzor (Obrázok 21). Rozmery  $L_x$  a  $L_z$  budú nastavené tak, aby hustota týchto povrchových modifikácií v porovnaní s povrchom bez modifikácií ležala v intervale 40 až 90%, čo je interval uvedený v literatúre, v ktorom boli zaznamenané zlepšenia. Všeobecne sa odporúča voliť hodnoty bližšie k vyššej hranici tohto intervalu.[10]



Obrázok 23 Ďalšia ukážka porovnania rôznych geometrických variant povrchových modifikácií z literatúry [10]

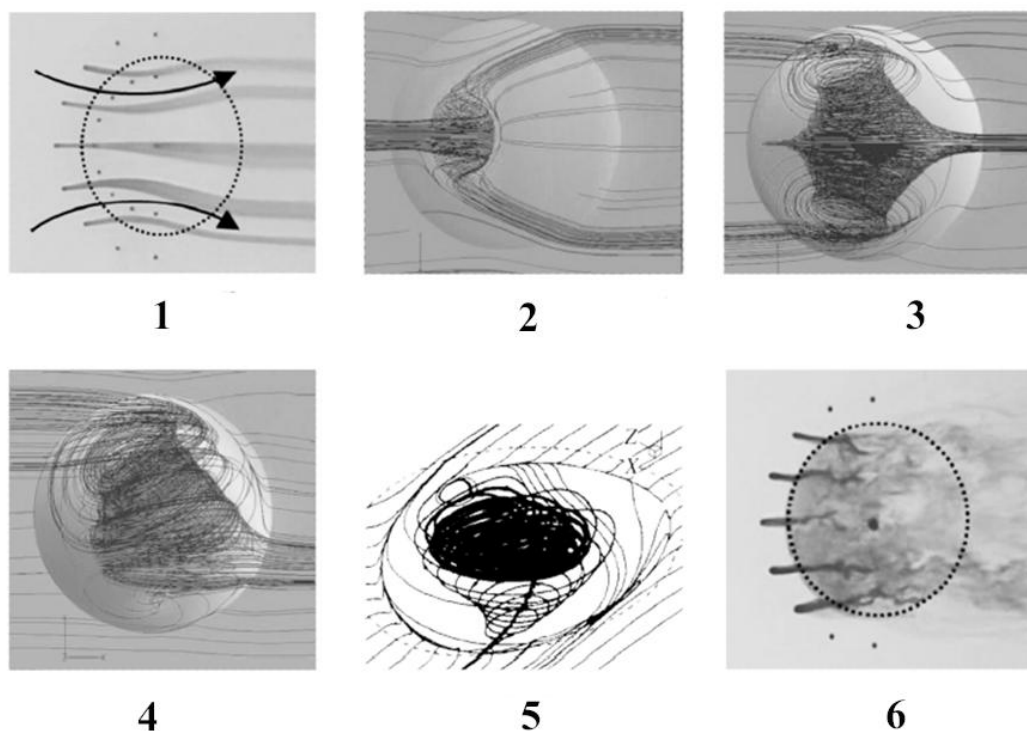
### 2.2.3 Predpokladané mechanizmy redukcie odporu

Prvý mechanizmus redukcie odporu, ktorý bol uvedený skôr, je inšpirovaný povrchovými úpravami používanými pri golfovej loptičke. Tento mechanizmus spočíva v tom, že povrch s týmito modifikáciami spôsobí, že k odtrhnutiu prúdenia dochádza neskôr ako v prípade hladkého povrchu. Dôvodom je, že povrchové modifikácie energizujú medznú vrstvu a tým urýchľujú prechod na turbulentný režim medznej vrstvy. Ako bolo spomenuté, turbulentná medzná vrstva je priaznivejšia pre separáciu prúdenia, čo vedie k zníženiu odporu. Tento mechanizmus zníženia odporu je pomerne známy a mal by byť dominantný pri prúdení v prípadoch s podstatnou separáciou prúdenia t.j. obtekanie okolo valcového tvaru alebo pri obtekaní profilov pri väčších uhloch nábehov. [15]

Na druhej strane, pri redukcii odporu, kde dominantnou zložkou odporu je trecí odpor, ako napríklad pri obtekaní plochých dosiek, sú mechanizmy tohto javu podstatne zložitejšie a existuje viacero teoretických vysvetlení, pričom dosiaľ nie je jednoznačná zhoda o tom, ktorý z týchto mechanizmov je správny. V závislosti od geometrických parametrov a hodnoty Reynoldsovho čísla boli experimentálne pozorované rôzne typy prúdenia v prípade povrchových modifikácií, čo naznačuje komplexnosť tohto javu a závislosť na okrajových podmienkach. [10]

Pôvodné vysvetlenie tohto javu spočívalo v tom, že v rámci týchto povrchových modifikácií vznikajú víry podobné tornádu (angl. Tornado-like jets), ktoré generujú silu pôsobiacu proti odporovej sile, čím dochádza k celkovej redukcii hydrodynamického odporu. Podľa tejto teórie tieto víry znižujú stenové tečné napätie v prvej polovici jamky (angl. dimple) a spôsobujú len mierny nárast tlakovej zložky odporu v druhej polovici jamky, čo vedie k zníženiu celkového odporu.[7]

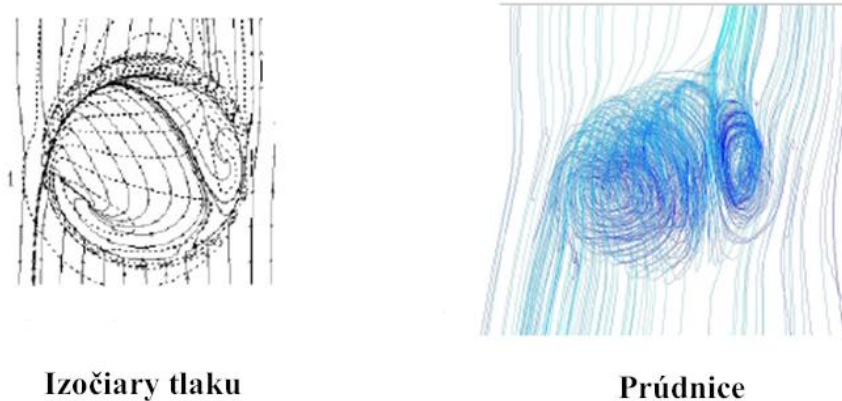
Novšia teória predpokladá, že prúdenie, ktoré vstupuje do jamky sa v prvej polovici snaží smerovať k stredu jamky, pričom v druhej polovici sa usiluje opustiť stred a vytvára konvergujúco-divergujúci vzorec (Obrázok 24-1) Tento jav vedie k rôznemu rozdeleniu rýchlosti pozdĺž dĺžky jamky, čo následne spôsobuje variabilitu vírivosti pozdĺž jamky. [10]



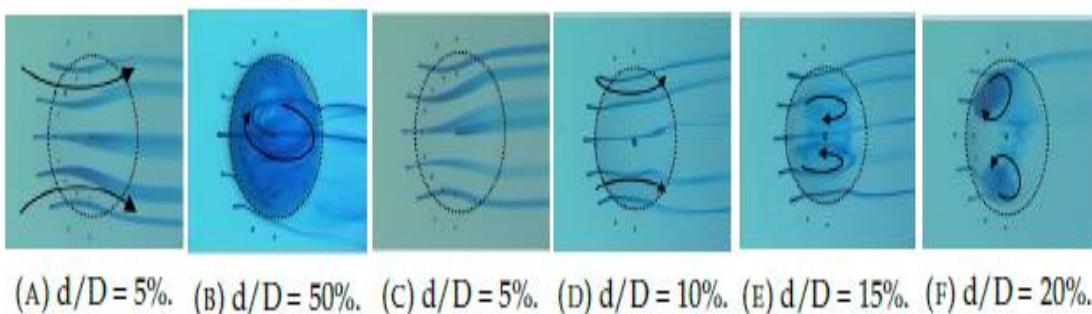
Obrázok 24 Možné charaktery prúdenia zachytených v povrchových modifikáciách [12]

Existuje veľa typov prúdenia resp. ako sa kvapalina správa pri prechode týmito povrchovými modifikáciami. Samozrejme o aký charakter prúdenia sa jedná, tak veľmi ovplyvňuje hlavne geometria samotnej jamky povrchovej modifikácie. Porovnanie týchto typov prúdenia je možné vidieť na Obrázok 24 1-6, alebo na Obrázok 26. Typ prúdenia odpovedajúci pre nevhodne zvolenú geometriu t.j. veľká hodnota geometrického parametra  $d/D$  popisuje Obrázok 24 4-6 a Obrázok 26 B),E),F). Z týchto obrázkov je možné vidieť, že prúdenie v jamke povrchovej modifikácie sa správa chaoticky a pravdepodobne sa bude jednať o oblasť separácie prúdenia.[12][10]

S postupným znižovaním tohto geometrického parametru a približovaním sa k jeho optimálnej hodnote, sa prúdenie správa menej chaoticky a začína kopírovať plochu jamky. Tento jav je možno vidieť Obrázok 24-3 a Obrázok 26 D). Tento prípad by mal odpovedať hornej hranici odporúčanej hodnoty geometrického parametra  $d/D$ , a to hodnote 10%. Prúdenie už začína kopírovať profil jamky povrchovej modifikácie, ale na jeho okraji stále vzniká zavírenie. Toto zavírenie zmizlo pri ešte ďalšom znižovaní tohto geometrického parametru a to na optimálnu uvádzanú hodnotu z literatúry 5%. Tento charakter prúdenia je možné vidieť na Obrázok 24 1-2 a Obrázok 26 A),C). Prúdenie sa javí, že docela dobre kopíruje profil a prípadne sa môže vyskytnúť malá oblasť separácie prúdenia na vstupe do tejto povrchovej modifikácie. Zaujímavosťou je, že prúdenie v prvej polovici smeruje k stredu jamky a naopak od druhej polovice smeruje od stredu. Tento mechanizmus už ale bol spomenutý skôr, a môže to byť spôsob redukcie odporu. Celkovo je tu teda vidieť trend zlepšovania charakteru prúdenia pomocou optimalizácie geometrie povrchovej modifikácie profilu. Bude snaha zachytiť tento trend pomocou následných CFD simulácií v ďalších kapitolách a porovnanie s týmito charaktermi prúdení z rešerše s využitím optimalizovania geometrie popísanej skôr.[10] [11][12]



Obrázok 25 Charakter prúdenia zachytený pomocou CFD [7]



Obrázok 26 Experimentálne zistené typy prúdenia v povrchových modifikáciách v závislosti od geometrie [17]

Tieto mechanizmy boli primárne skúmané na rovných povrchoch alebo pri obtekaní objektmi ako je golfová loptička. Existuje len obmedzené množstvo literatúry, ktorá sa zaoberá týmito javmi na zakrivených profiloch alebo v prípade komplexnejšieho prúdenia. Preto je otázne, ako sa tieto mechanizmy prejavia pri obtekaní NACA profilu, kde sú rozhodujúce ako tlaková, tak aj trecia zložka odporu. Predpokladám, že môže dôjsť k interakcii týchto mechanizmov, pričom ich dominantnosť závisí od vstupných okrajových podmienok, uhla nábehu a geometrie povrchových modifikácií. V prípade veľkého uhla nábehu, ktorý spôsobí výraznú separáciu prúdenia, by mohol prevládať mechanizmus rýchlejšieho prechodu na turbulentnú medznú vrstvu. Naopak, pri menších uhloch nábehu by mohli dominovať mechanizmy znižovania trecej zložky odporu.

Ako to bude fungovať v praxi, je však stále nejasné, a preto v nasledujúcich kapitolách budú prezentované CFD simulácie, ktoré som vypracoval. Konkrétne sa budú analyzovať simulácie prúdenia okolo hladkého povrchu NACA 2412, ako aj s povrchovými modifikáciami rôznych geometrických parametrov. Tieto parametre budú optimalizované na základe popisu návrhu, ktorý bol predtým podrobne vysvetlený. V rámci simulácií bude sledovaná nielen redukcia odporu, ale aj charakteristika medznej vrstvy t.j. separácia prúdenia a ich porovnanie s pôvodným hladkým povrchom. Najslubnejšia geometrická varianta bude následne vyrobená a podrobená testovaniu v hydraulickom tuneli.

### 3 Numerická simulácia profilu NACA 2412 bez povrchových modifikácií

CFD je nástroj relatívny, to znamená, že pre porovnanie rôznych geometrických variant profilu s povrchovými modifikáciami je nutné ich porovnávať k tzv. referenčnej geometrii s rovnakými okrajovými podmienkami, na podobnej výpočtovej doméne, podobnej výpočtovej sieti a rovnakom fyzikálnom modeli. V tomto prípade bude zvolená referenčná geometria ako profil NACA 2412 s hladkým povrchom t.j. bez povrchových modifikácií. Tento hladký NACA profil bude spočítaný pre 2 rôzne uhly nábehu  $\alpha = 8^\circ$  pre  $\alpha = 12^\circ$  a pre Reynoldsovo číslo  $Re = 656\,000$ . Keďže v tejto práci sa nevenujem kavitácii, tak analyzované boli integrálne charakteristiky ako spomínaný odporový koeficient  $C_D$  ale aj charakteristiky medznej vrstvy. Konkrétne poloha odtrhovej čiary prúdenia t.j. moment kedy nastáva separácia prúdenia a zistenie o akú veľkú separáciu prúdenia sa jedná.

#### 3.1 Okrajové podmienky

Ako bolo spomenuté, pre všetky testované varianty pre korektné porovnanie medzi sebou musia byť rovnaké okrajové podmienky simulácie. Ideálne je, ak referenčnú geometriu si potvrdím nejakým už vykonaným experimentom.

V tejto práci boli nastavené okrajové podmienky tak, aby som výsledky hladkého profilu mohol validovať experimentami, ktoré boli vykonané na NACA profiloch v [19].

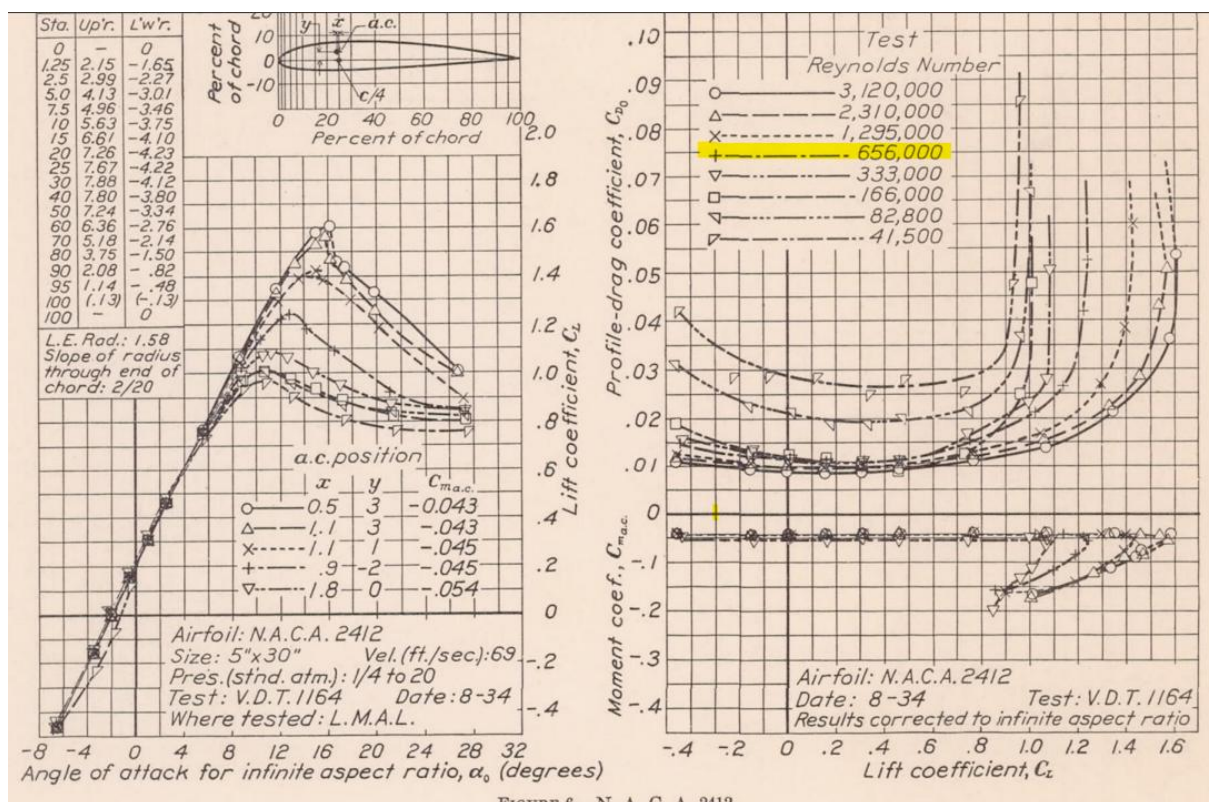


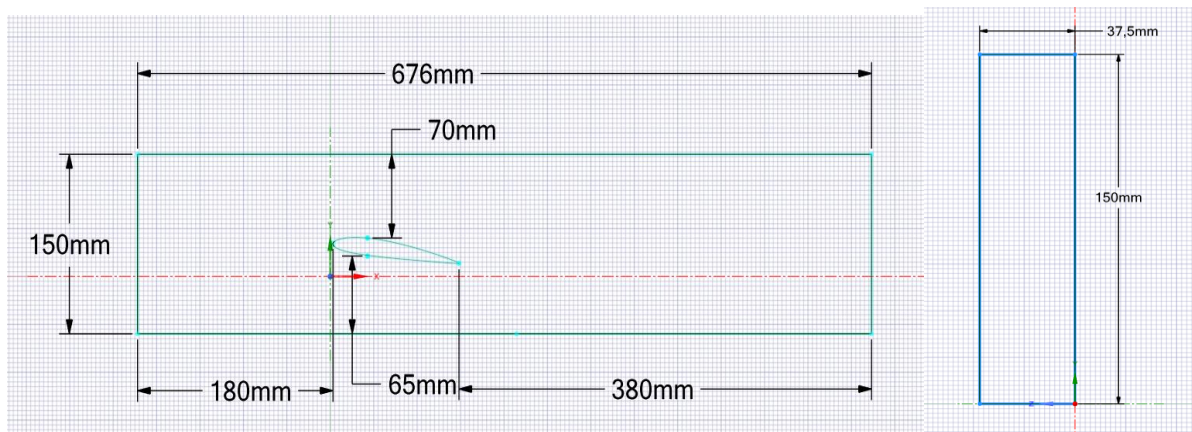
FIGURE 6.—N. A. C. A. 2412.

Obrázok 27 Závislosť odporového a vztlakového koeficientu na uhle nábehu pre NACA 2412 upravené z [19]

Tabuľka 1 Experimentálne hodnoty pre  $Re=656\ 000$

Uhol nábehu $\alpha$	$C_D$ [-]	$C_L$ [-]
$\alpha = 8^\circ$	0.02	1
$\alpha = 12^\circ$	0.035	1.2

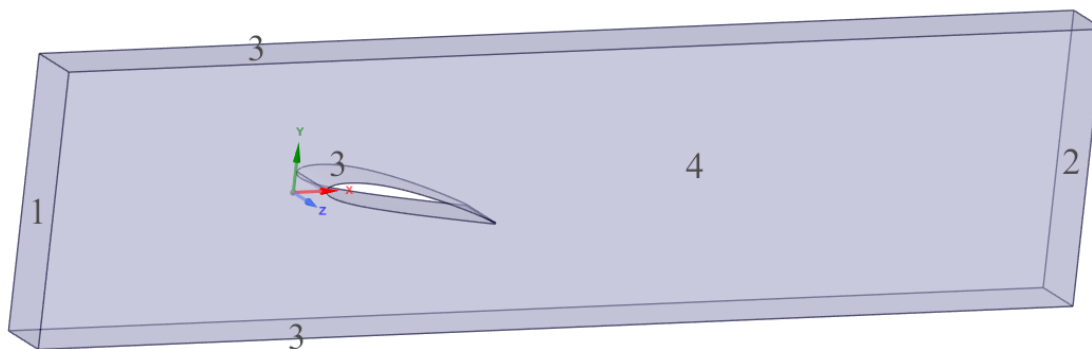
Vytvorená výpočetná doména (Obrázok 28) bola vytvorená v programe Ansys Spaceclaim, a to tak aby odpovedala hydraulickému tunelu, ktorý bude použitý pre experimentálne overenie naj-sľubnejšej varianty. Pre problémy s veľkým počtom výpočtových prvkov bola táto doména zredukovaná na štvrtinu pôvodnej hodnoty rozmerov v smere osi  $z$ . A to zo  $150\text{ mm}$  na  $37,5\text{ mm}$ .



Obrázok 28 Rozmery výpočetnej domény - vľavo pohľad v rovine  $xy$  a vpravo v rovine  $yz$

Ako bolo spomenuté, rozmer domény v smere osi  $z$  (kolmo na prúdenie) bol zmenšený. Z toho dôvodu na ľavú a pravú stenu domény boli aplikované translačné periodické okrajové podmienky, aby blízkosť stien domény k modelu profilu neovplyvňoval výsledok. Na hornú a spodnú stenu domény a na samotný skúmaný profil bola nastavená okrajová podmienka wall, ktorá zaručuje podmienku ulpievania t.j. rýchlosť na stene  $v = 0$ . Ako vstup bola zadaná rýchlosť na vstupe do domény, tak aby odpovedala požadovanému Reynoldsovému číslu. Ako charakteristický rozmer  $L$  bola zvolená tetiva profilu  $L = 0,12\text{ m}$ . Intenzita turbulencie bola zvolená  $I_T = 2\%$  a hydraulický priemer bol zvolený ako najmenší rozmer za ktorým vznikajú víry t.j. výška profilu  $15\text{ mm}$ .

$$v = \frac{Re \cdot \nu}{L} = \frac{656\ 000 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{0,12} = 5,5\text{ m/s} \quad (14)$$



Obrázok 29 Vytvorená výpočetná doména s naznačenými okrajovými podmienkami (OP)

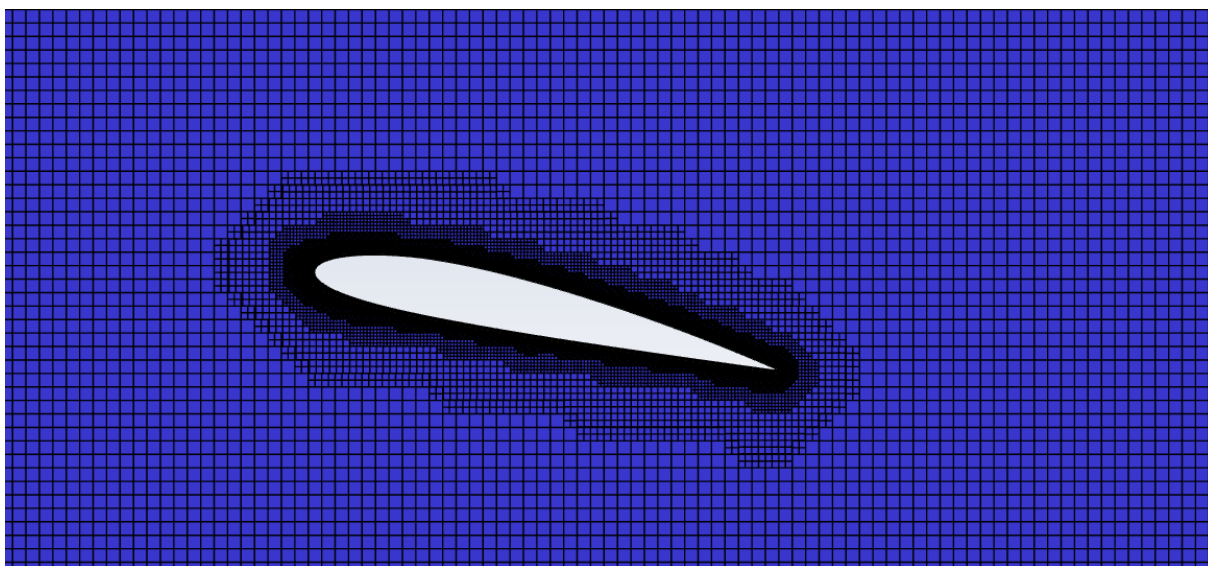
Tabuľka 2 Okrajové podmienky

Číslo OP	Popis OP
1	<b>Velocity inlet</b> $v = 5,5 \text{ m/s}$ $I_T = 2\%$ $D_h = 15 \text{ mm}$
2	<b>Pressure Outlet</b> Gauge pressure $p = 0$
3	<b>Wall</b> No Slip
4	<b>Translational periodic</b>

### 3.2 Výpočetná sieť a nastavenie simulácie

Po vytvorení výpočtovej domény pre CFD simuláciu nasledovala tvorba výpočtovej siete. Existuje množstvo spôsobov a programov, ktoré umožňujú tvorbu siete s rôznymi výpočtovými prvkami. Vytvorenie kvalitnej výpočtovej siete je kritická časť pri CFD simuláciách a je z jedným hlavných faktorov, ktoré ovplyvňujú správnosť a spoľahlivosť výsledkov. Ako prvý odhad môže slúžiť vytvorenie siete pozostávajúcej z neštruktúrovanej siete z tetrahedrálnych prvkov (trojuholníkové). Tieto prvky sú vhodné ak sa jedná o zložitú geometriu ale zo všetkých prvkov sú najmenej presné. Jedna z najlepších možností pri sieťovaní je vytvorenie štruktúrovanej hexahedrálnej siete (obdĺžniky). Nevýhodou tejto siete je jej zložitnosť na vytvorenie a pri zložitejších geometriách ako napr. pri analyzovaní povrchových modifikácií na profile môže byť problematické. Na druhej strane jej obrovská výhoda je presnosť a výpočtová náročnosť oproti neštruktúrovaným sieťam. Posledná možnosť je zobrať výhody z oboch metód tvorenia siete a skombinovať ich. Takáto sieť sa nazýva hybridná sieť a kombinuje geometrickú flexibilitu tvorením tetrahedrálmi alebo polygonálnymi prvkami na povrchoch zložitých geometrií a v jadre prúdu použije štruktúrovanú hexahedrálnu sieť. [20]

V tejto práci pri simuláciách bola využitá takáto hybridná sieť, konkrétne polyhexcore sieť. Takáto sieť tvorila polygonálne prvky na povrchoch stien a v jadre prúdu použije hexahedrálne sieť (Obrázok 30). Polygonálne prvky boli zvolené namiesto tetrahedrálnych prvkov z dôvodu nutnosti ich menšieho počtu potrebných na pokrytie siete rovnakých rozmerov a lepšej presnosti. Vo všeobecnosti tento typ siete je kompromis medzi presnosťou a výpočtovou náročnosťou. Voľba tohto typu siete bola zvolená hlavne kvôli geometrickej komplexnosti skúmaných povrchových štruktúr. Pri simulácií hladkého profilu by mohla byť vytvorená štruktúrovaná hexahedrálne sieť, ale pre korektné porovnanie medzi hladkým profilom a profilom s povrchovými modifikáciami je ideálne počítať na rovnakom type siete. Na vytvorenie takejto siete bol využitý program Ansys Fluent Meshing.



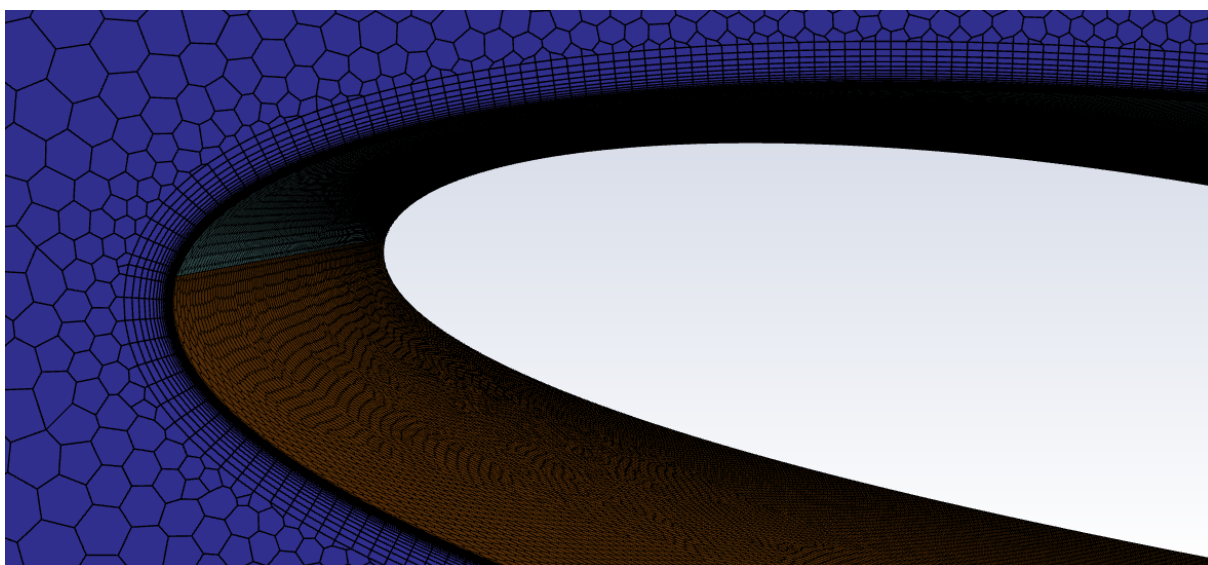
Obrázok 30 Vytvorená polyhexcore sieť

Na zachytenie prúdenia v medznej vrstve a dosiahnutia parametra  $y^+ < 1$  pre korektné použitie modelu turbulencie  $SST\ k - \omega$  resp. SBES boli vytvorené tenké vrstvy na stenách (angl. inflation layer). Do parametra  $y^+$  zasahuje hlavne prvá výška týchto vrstiev od povrchu steny. Ďalšie parametre popisajúce tieto tenké vrstvy je tzv. growth rate, čiže parameter o koľkokrát bude nasledujúca vrstva väčšia ako predchádzajúca a počet týchto vrstiev.

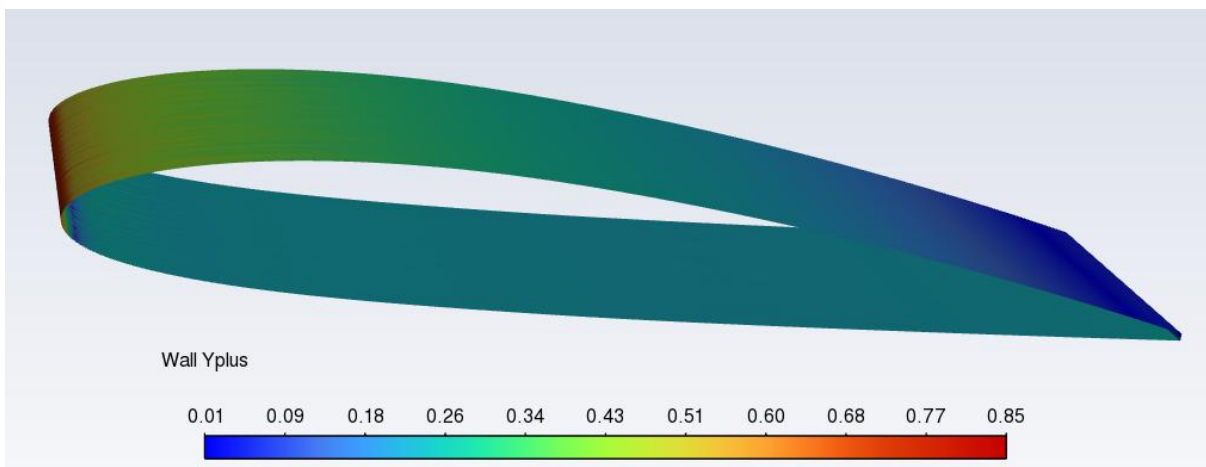
Tabuľka 3 Parametre výpočetnej siete hladkého profilu

Parameter siete	Hodnota
Počet prvkov	5 783 353
Počet tenkých vrstiev	20
Growth rate	1.2
Prvá výška bunky	$2 \cdot 10^{-6}$ m
Skewness	Maximálna 0.76 Priemerná 0.00042
Ortogonalna kvalita	Minimálna 0.2 Priemerná 0.978

V Tabuľka 3 sú uvedené základné parametre vytvorenej siete pre simuláciu hladkého profilu. Z parametrov v danej tabuľke je vidieť, že už pri simulácii prúdenia okolo obyčajného hladkého profilu bola vytvorená pomerne veľká výpočetná sieť, ktorá ešte podstatne narastie pridaním povrchových modifikácií na profile. V týchto miestach bude nutné ešte podstatnejšie lokálne zjemnenie siete pre dobré zachytenie javov prebiehajúcich v nich. Kvalitu vytvorenej siete udávajú parametre ako skosenie elementov (angl. skewness) a ich ortogonálna kvalita. Je udávané, že maximálna hodnota skosenia elementov by mala byť pod hodnotou 0.9 a minimálna ortogonálna kvalita by mala byť nad hodnotou 0.1. Tieto kritéria sú dosiahnuté, a prvky na ktorých sú tieto hodnoty najhoršie je iba minimum. Ďalší parameter na kontrolu je parameter  $y^+$ , a pre korektné použitie turbulentných modelov ako je *SST  $k - \omega$*  resp. model SBES je nutné splňovať podmienku  $y^+ < 1$ . Tento parameter získam až po prevedenom výpočte a ako je vidieť z Obrázok 32, tak táto podmienka je splnená.



Obrázok 31 Detail na tenké vrstvy na profile



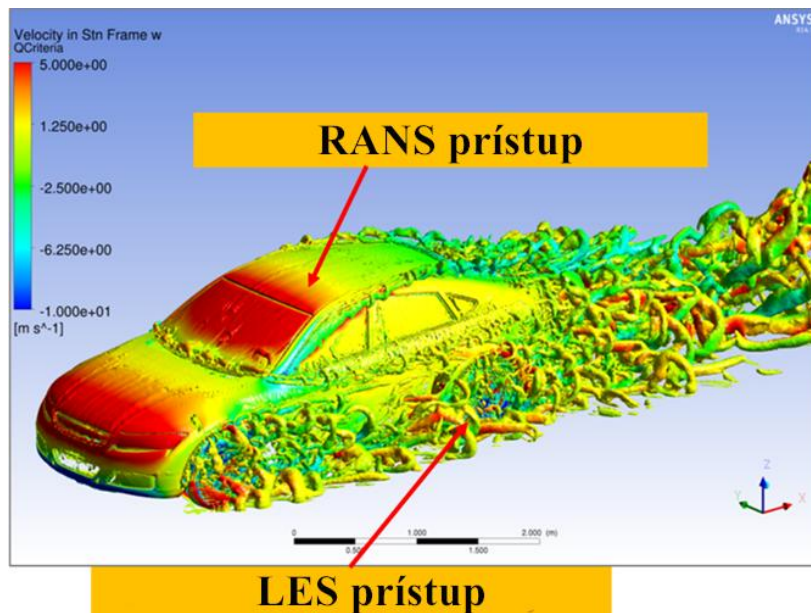
Obrázok 32 Parameter  $y^+$  na hladkom profile

Po vytvorení výpočetnej siete bolo na rade nastaviť samotnú simuláciu. Zvoliť typ simulácie, či sa bude jednať o stacionárny alebo nestacionárny výpočet, zvoliť model turbulencie a nastaviť numerické schémata. Výpočet bol realizovaný nestacionárnou simuláciou hlavne z dôvodu, že stacionárny výpočet by nemusel dobre zachytiť prúdenie okolo povrchových štruktúr a opäť na korektné porovnanie je nutné mať spočítané všetky varianty rovnakou metódou. Všetky výpočty prebiehali v programe ANSYS FLUENT.

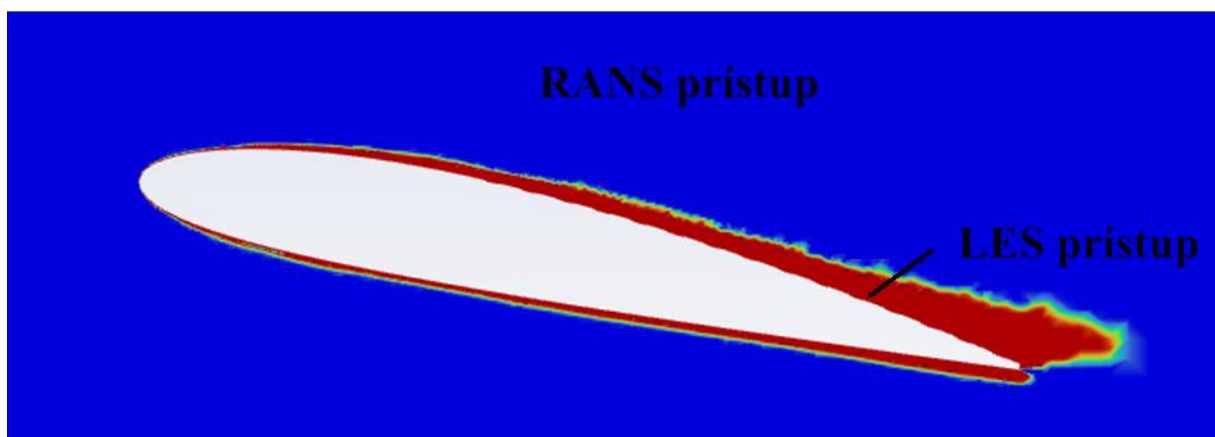
Keďže v tejto práci bude analyzovaný aj charakter prúdenia v následne vytvorených povrchových modifikáciách profilu a porovnávaný so zisteniami z rešerše (Obrázok 24 a Obrázok 26), kde je prúdenie výrazne komplexnejšie než pri obtekaní jednoduchého hladkého profilu, je potrebné tomu prispôbiť aj výpočtový prístup. Z tohto dôvodu je nutné zvoliť aj zložitejší model turbulencie, ktorý dokáže tieto zložité prúdenia adekvátne zachytiť. Táto voľba zložitejšieho modelu turbulencie zvýši výpočtovú náročnosť, ale na druhej strane zvýši fyzikálnu vernosť, presnosť výpočtu a zlepši zachytenie vznikajúcich vírových štruktúr a komplexnejšieho prúdenia vznikajúcich v jamkách povrchových modifikácií. Táto voľba turbulentného modelu bude aplikovaná pre všetky mnou vytvorené varianty povrchových modifikácií, aj pre pôvodný hladký profil, a to z dôvodu korektného porovnania medzi jednotlivými variantami.

Pre lepšie zachytenie vírových štruktúr ako pri modeli  $SST\ k - \omega$  bol použitý model turbulencie SBES (Stress-Blended Eddy Simulation). Jedná sa o hybridný model, ktorý kombinuje RANS prístup (angl. Reynolds Averaged Navier Stokes ) a LES prístup (angl. Large Eddy Simulation) a v závislosti od charakteru prúdenia dokáže prepínať medzi týmito 2 prístupmi k modelovaniu turbulencie. V praxi to znamená, že v miestach, kde medzná vrstva nie je odtrhnutá, tak bude použitý RANS prístup k modelovaniu turbulencie. Pre druhý prípad, ak dôjde na profile k odtrhnutiu prúdenia, tak v tejto oblasti bude použitý LES prístup k modelovaniu turbulencie. Vďaka tomuto faktoru je možné lepšie zachytenie charakter prúdenia a prípadných vznikajúcich vírových štruktúr v jamkách povrchových modifikácií avšak za cenu väčšej výpočetnej náročnosti. Pomocou voľby tohto turbulentného modelu predpokladám však iba turbulentnú medznú vrstvu. Pri nestacionárnych simuláciách je tiež veľmi dôležité nastavenie časového kroku [21] [22].

Obrázok 33 znázorňuje bližšie princíp hybridného modelu turbulencie SBES. Konkrétne je znázornená oblasť, kde z pohľadu prúdenia nedochádza k zaujímavým javom t.j. nedochádza k výraznej separácii prúdenia a k zavíreniu. V tejto oblasti bol využitý RANS prístup a naopak v oblastiach, kde už dochádza k väčšej separácii prúdenia bol použitý LES prístup pre numerický výpočet. Podobné znázornenie oblasti, v ktorých boli použité jednotlivé prístupy turbulentných modelov je ukázané na Obrázok 34. Toto znázornenie bolo vykreslené v programe ANSYS FLUENT. V oblasti označenej modrou farbou je použitý vyššie spomínaný RANS prístup k modelovaniu turbulencie a v červenej oblasti je použitý LES prístup. Je vidieť, že tento turbulentný model je použitý presne iba v oblasti, kde by som očakával oblasť separácie prúdenia resp. oblasti s väčším zavírením, ktoré by RANS prístup nemusel zachytiť najlepšie.



Obrázok 33 SBES turbulentný model [22]



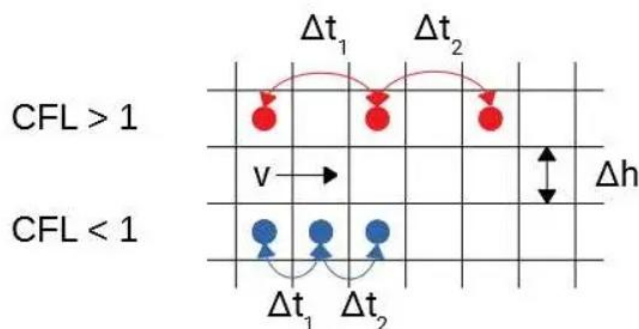
Obrázok 34 Ukážka oblasti použitia turbulentného modelu z CFD výpočtov

Pri počítačnom testovaní na hladkom profile a aj pri testovaní na profile s povrchovými modifikáciami bol zo začiatku odhadnutý tento časový krok na  $\Delta t = 0.001$  s. Tento časový krok sa ukázal ako príliš veľký, a to z dôvodu, že simulácia nedosahovala dostatočnú konvergenciu. Táto konvergencia sa vyhodnocovala 2 spôsobmi. Prvý spôsob zahŕňal sledovanie residualov veličín simulácie v čase a druhý spôsob spočíval v sledovaní vývoja odporového koeficientu v čase. Pri voľbe takto relatívne stále veľkého časového kroku nedochádzalo k ustáleniu tohto odporového koeficientu v čase. Z toho dôvodu bolo nutné tento časový krok znížiť.

Ako podklad pre ďalšiu voľbu bolo použité Courantove číslo. Toto bezrozmerné číslo pomáha určiť potrebný časový krok aby bola nestacionárna simulácia stabilná a v princípe zabezpečuje aby pri prúdení kvapalina nepreskakovala susedné bunky výpočetnej siete. Vizualizácia tohto bezrozmerného čísla možno vidieť na Obrázok 35 a je definované podľa rovnice: [23]

$$CFL = \sum_i \frac{v_i \cdot \Delta t}{\Delta h_i} \quad (15)$$

Rovnica 15) indikuje, že tento parameter nie je konštantný po celej doméne, ale logicky sa mení, pretože rýchlosť prúdenia  $v_i$  a aj veľkosť bunky  $\Delta h_i$  sa menia vo výpočetnej doméne. Výsledné Courantove číslo resp. časový krok musel spĺňovať miesto, kde bola rýchlosť prúdenia najväčšia a veľkosť bunky najmenšia. Vďaka tomuto bolo zaručené vo všetkých miestach výpočetnej domény veľkosť tohto parametru menej ako 1. Po viacerých testovaniach bol tento časový krok zvolený ako  $\Delta t = 1 \cdot 10^{-5}$  s



Obrázok 35 Ukážka princípu Courantovho čísla [23]

Tabuľka 4 Nastavenie simulácie a diskretizačné schémata pre simuláciu hladkého profilu

<b>Model turbulencie</b>	SBES
<b>Spojenie tlak a rýchlosť</b>	Coupled
<b>Gradient</b>	Least Squares Cell Based
<b>Tlak</b>	Second Order
<b>Hybnosť</b>	Bounded Central Differencing
<b>Turbulentná kinetická energia</b>	Second Order Upwind
<b>Časový krok <math>\Delta t</math></b>	$1 \cdot 10^{-5}$
<b>Počet iterácií na časový krok</b>	20

### 3.3 Výsledky

Analýza výsledkov simulácií hladkého profilu bude v prebiehať v 2 krokoch. V prvom kroku bude analyzovaný odporový koeficient  $C_D$  a bude porovnaný s meraniami pre NACA profily pre dané Reynoldsove číslo (Obrázok 27) pre obidva uhly nábehu  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\alpha = 12^\circ$ . Následne v ďalšej podkapitole bude detailne ukázaný charakter prúdenia okolo tohto profilu. Konkrétne budú vykreslené vektory rýchlosti, tlakové pole a oblasť separácie prúdenia. Všetky výsledky odporového koeficientu  $C_D$  a vykreslených veličín z CFD výpočtov v tejto aj v nasledujúcich kapitolách boli počítané pre hybridný model turbulencie SBES.

#### 3.3.1 Odporový koeficient

Ako prvé budú analyzované výsledky odporového koeficientu dopočítané z rovnice 1). Z CFD výpočtov bola zistená odporová sila  $F_D$  a plocha profilu bola spočítaná pomocou tetivy profilu  $c$  a šírky profilu  $b$ . Z Tabuľka 5 je možno vidieť porovnanie dát ako pre uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  tak aj pre  $\alpha = 12^\circ$ . Odporová sila resp. odporový koeficient z CFD výpočtov docela presne odpovedá meraniam pre NACA experimenty pre uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$ . Pri vyššom už mimo optimálnom uhle nábehu  $\alpha = 12^\circ$  sa výsledky z CFD líšia o niečo viac, ale stále docela blízko experimentálnym dátam. Tento fakt môže byť spôsobený aj tým, že pri uhle nábehu  $\alpha = 12^\circ$  dochádza už k masívnejšej separácii prúdenia ako v prípade optimálneho uhlu nábehu a tento jav vie CFD zachytiť o niečo horšie.

$$A = c \cdot b = 0.12 \cdot 0.0375 = 0.0045 \text{ m}^2 \quad (16)$$

$$C_D(\alpha = 8^\circ) = \frac{F_D(\alpha = 8^\circ)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} = \frac{1.33}{\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 5.5^2 \cdot 0.0045} = 0.0196 \quad (17)$$

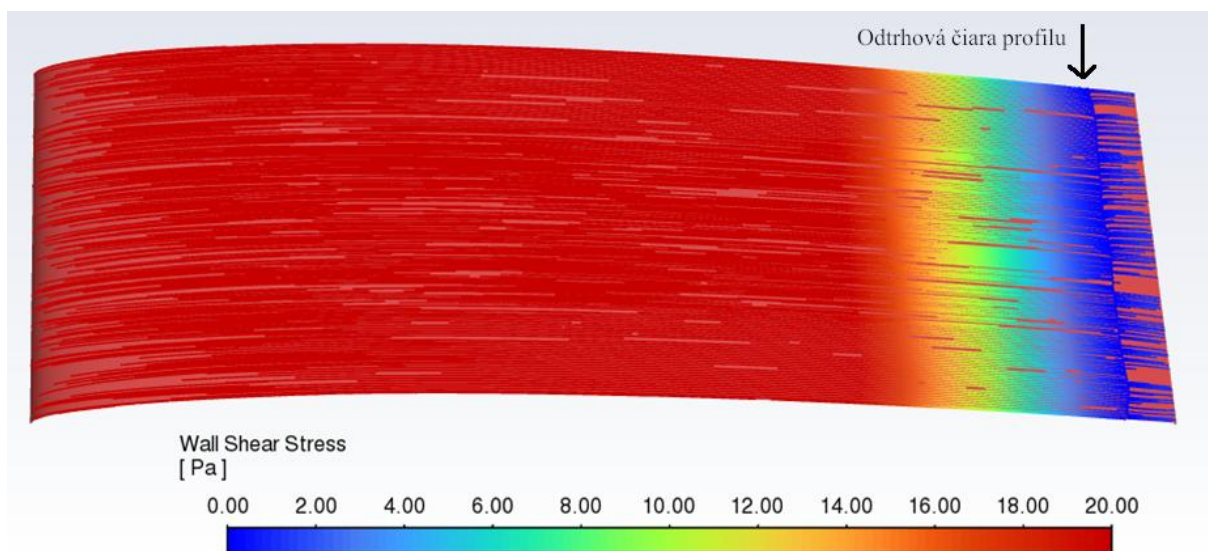
$$C_D(\alpha = 12^\circ) = \frac{F_D(\alpha = 12^\circ)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} = \frac{2.27}{\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 5.5^2 \cdot 0.0045} = 0.0333 \quad (18)$$

Tabuľka 5 Porovnanie experimentálnych a vypočítaných dát pomocou hybridného modelu turbulencie SBES

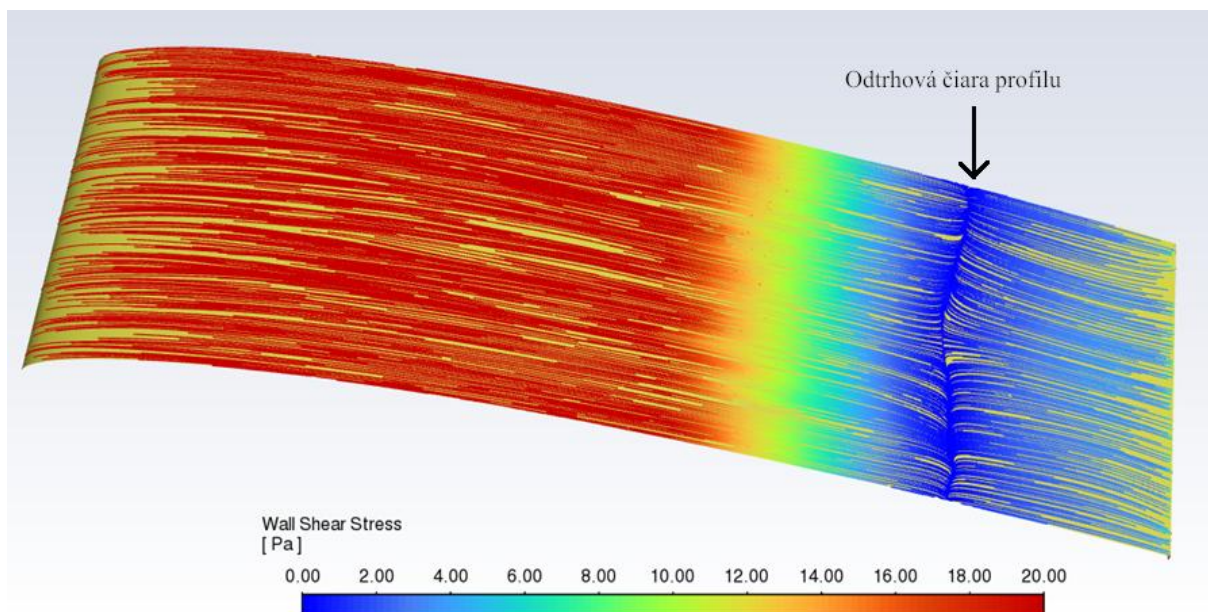
	$C_D - CFD [-]$	$C_D - experiment [-]$
$\alpha = 8^\circ$	0.0196	0.02
$\alpha = 12^\circ$	0.0333	0.035

### 3.3.2 Ukážka charakteru prúdenia

Ďalším bodom v analýze bude nájsť bod, v ktorom prúd vody prestáva kopírovať profil a nastáva odtrhnutie prúdenia t.j. nájdenie odtrhovej čiary profilu a o aké veľké odtrhnutie prúdu sa jedná. Na Obrázok 36 a Obrázok 37 je vykreslené stenové šmykové napätie  $\tau_w$  a podľa princípu podrobne vysvetlenom v kapitole 1.3, tam kde tento parameter dosiahne hodnotu 0, tak by sa mal jednať o začiatok separácie prúdenia. Z týchto obrázkov vykreslených z CFD výpočtov je vidieť, že separácia prúdenia nastáva oveľa skôr pre väčší uhol nábehu. Pri menšom uhle nábehu táto separácia začína až blízko odtokovej hrany. Preto aj odporový koeficient pre menší uhol nábehu je nižší, lebo má menšiu oblasť separácie prúdenia.



Obrázok 36 Odrhová čiara profilu pre 8 stupňov

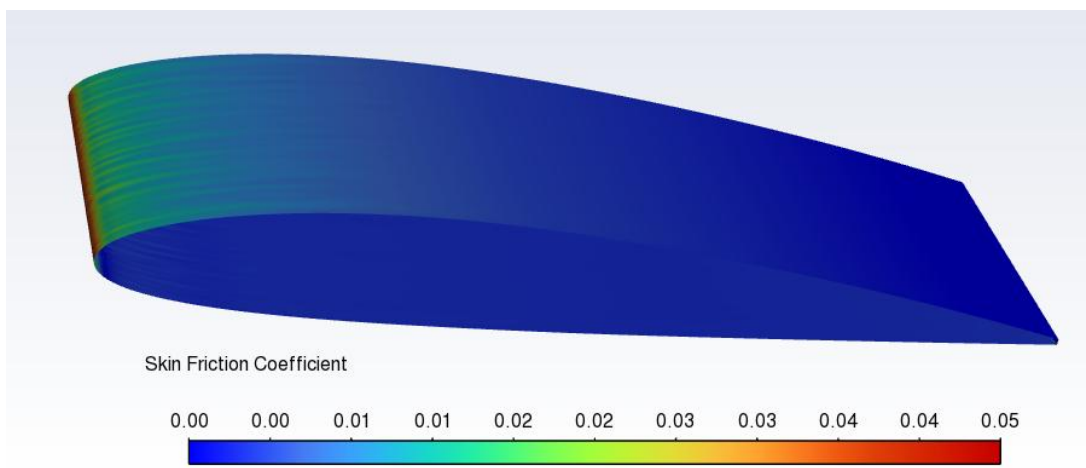


Obrázok 37 Odrhová čiara profilu pre 12stupňov

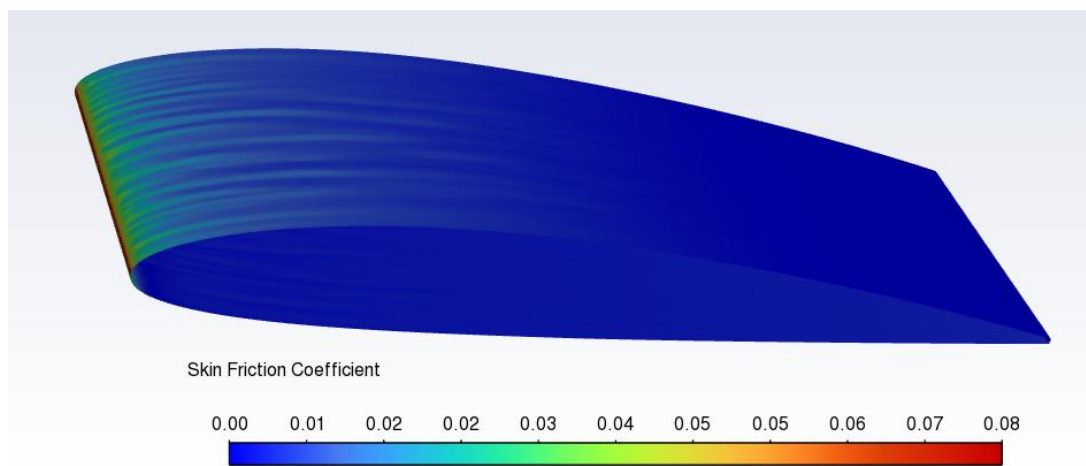
Pre zistenie , či naozaj dochádza k redukcii trecej časti odporovej zložky pomocou následne študovaných povrchových modifikácií je v Tabuľka 6 uvedená dopočítaná tvarová (tlaková) a trecia časť odporovej sily profilu bez povrchových modifikácií a následne ukázaný súčiniteľ trenia na povrchu hladkého profilu  $C_f$  definovaný podľa rovnice 11). Z tejto tabuľky je tiež vidieť, že pre mimo optimálny uhol nábehu 12 stupňov dochádza k oveľa väčšej separácii prúdenia, a to konkrétne na zväčšení tlakovej zložky odporovej sily, ktorá súvisí so separáciou prúdenia.

Tabuľka 6 Tlaková a trecia časť hladkého profilu dopočítaná pomocou hybridného modelu turbulencie SBES

Uhol nábehu $\alpha$ [°]	Tlaková zložka odporovej sily [N]	Trecia zložka od- porovej sily [N]
$\alpha = 8^\circ$	0.7122	0.6180
$\alpha = 12^\circ$	1.7107	0.5658



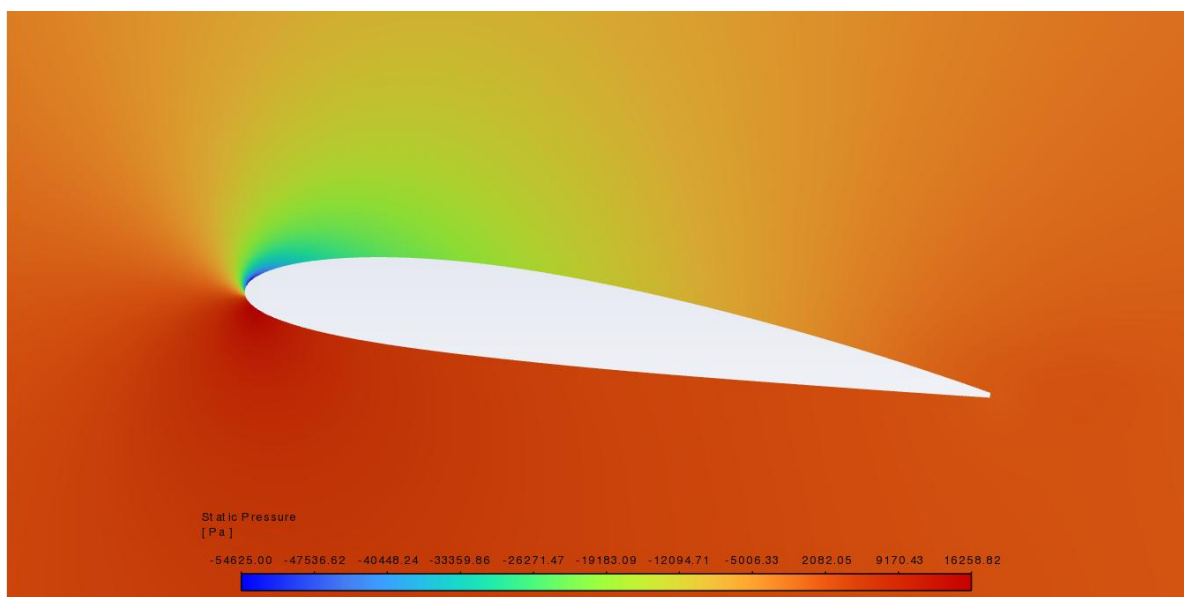
Obrázok 38 Trecí súčiniteľ  $c_f$  pre uhol nábehu 8 stupňov



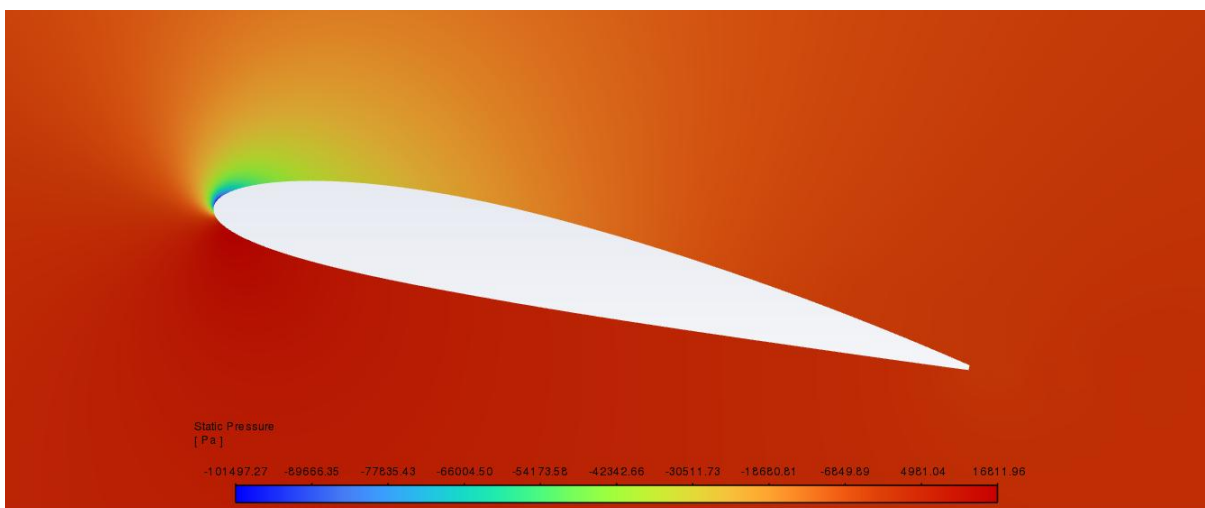
Obrázok 39 Trecí súčiniteľ  $C_f$  pre uhol nábehu 12 stupňov

Na lepšiu predstavu ako vyzerá prúdenie okolo hladkého profilu je na Obrázok 40 a Obrázok 41 vykreslený statický tlak. Keďže prúdenie okolo hladkého profilu sa v smere osi z výrazne nemení, tak tento statický tlak bol vykreslený v jednej rovine. Na druhej strane prípad s povrchovými modifikáciami, kde prúdenie bude oveľa komplikovanejšie a zaujímavejšie, tak už nebude stačiť vykreslenie iba v jednej rovine pretože v smere osi z je prúdenie ovplyvnené mnou vytvorenými povrchovými modifikáciami.

Je vidieť, že na nábežnej hrane je najnižší tlak, čo je spôsobené tým, že tam je zároveň najvyššia lokálna rýchlosť prúdenia. Následne po dĺžke profilu sa rýchlosť prúdenia znižuje a tlak sa musí zvyšovať. Preto ak by sa skúmali kavitáčne vlastnosti tohto profilu, tak najnáchylnejšie miesto na kavitáciu by bolo v oblasti najnižšieho tlaku t.j. v blízkosti nábežnej hrany.

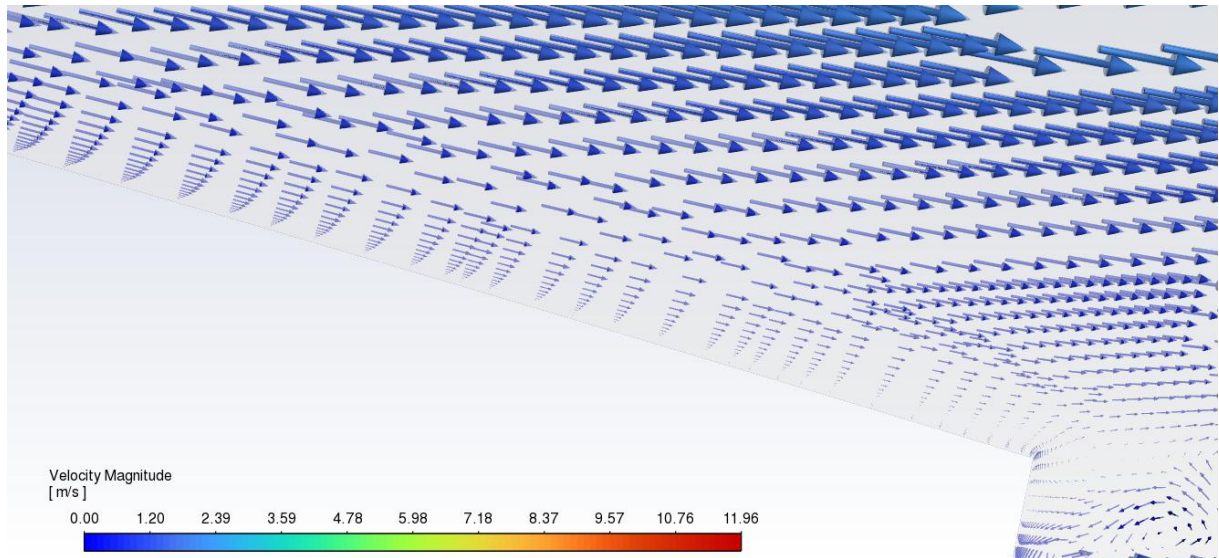


*Obrázok 40 Statický tlak hladkého profilu pre uhol nábehu 8 stupňov*

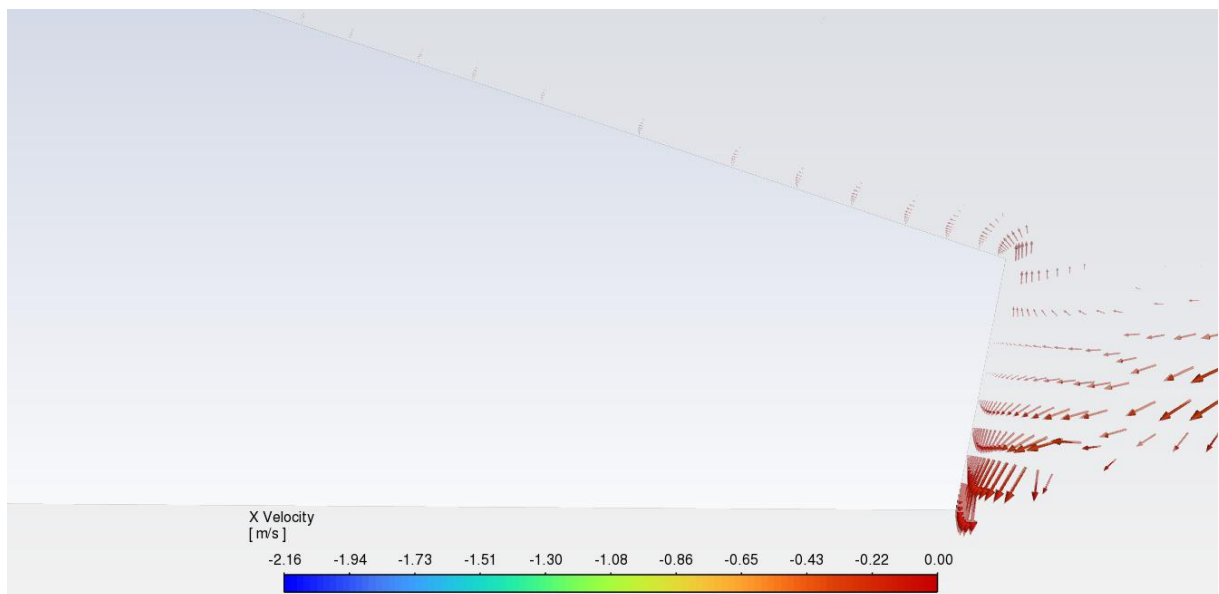


*Obrázok 41 Statický tlak hladkého profilu pre uhol nábehu 12 stupňov*

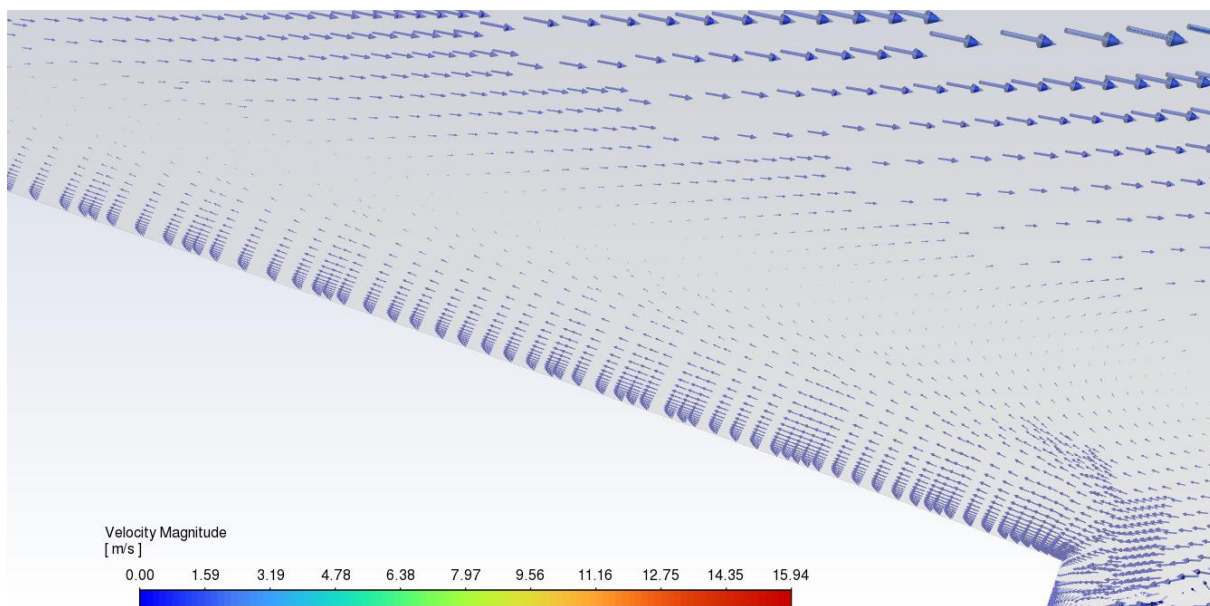
Ďalší dobrý spôsob ako zistiť o akú veľkú oblasť separáciu prúdenia sa jedná, je vykreslenie vektorov rýchlosti v jednej rovine. Najzaujímavejšie miesto pre skúmanie pomocou vektorov rýchlosti bude v oblasti blízkosti odtokovej hrany, kde pravdepodobne bude dochádzať k separácii prúdenia (Obrázok 42 a Obrázok 44). Pre lepšiu ilustráciu boli vykreslené ešte aj záporné rýchlosti v smere osi  $x$ , čo by malo odpovedať presne oblasti, kde je prúdenie odtrhnuté a nastáva spätné prúdenie (Obrázok 43 a Obrázok 45)



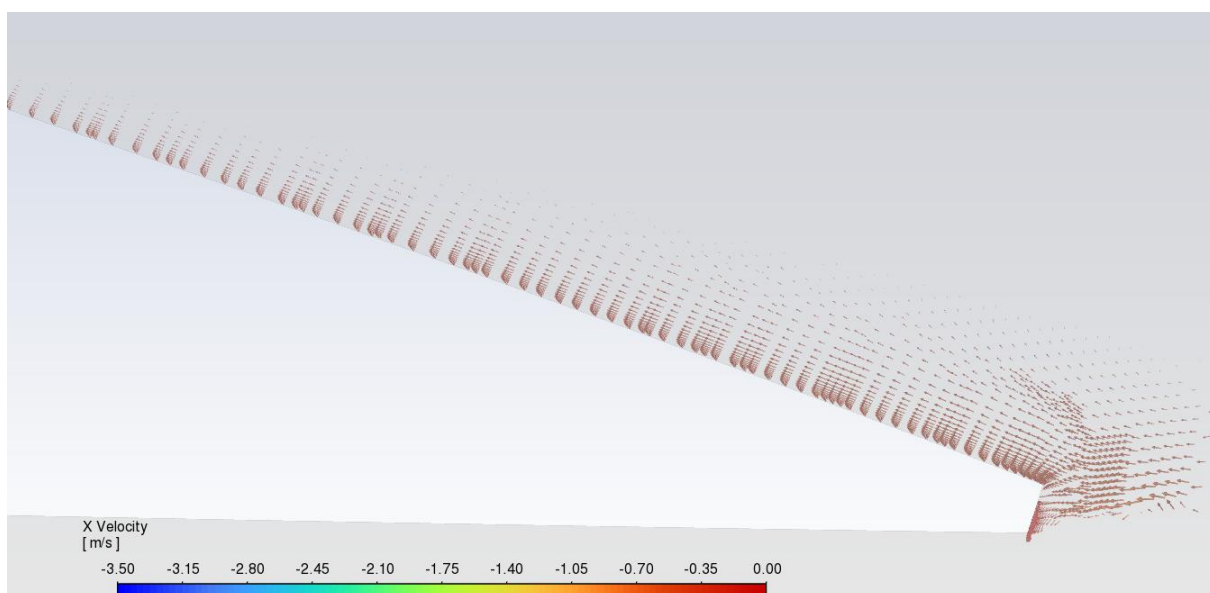
Obrázok 42 Vektory rýchlosti pre uhol nábehu 8 stupňov



Obrázok 43 Vektory zápornej rýchlosti v smere  $x$  pre uhol nábehu 8 stupňov

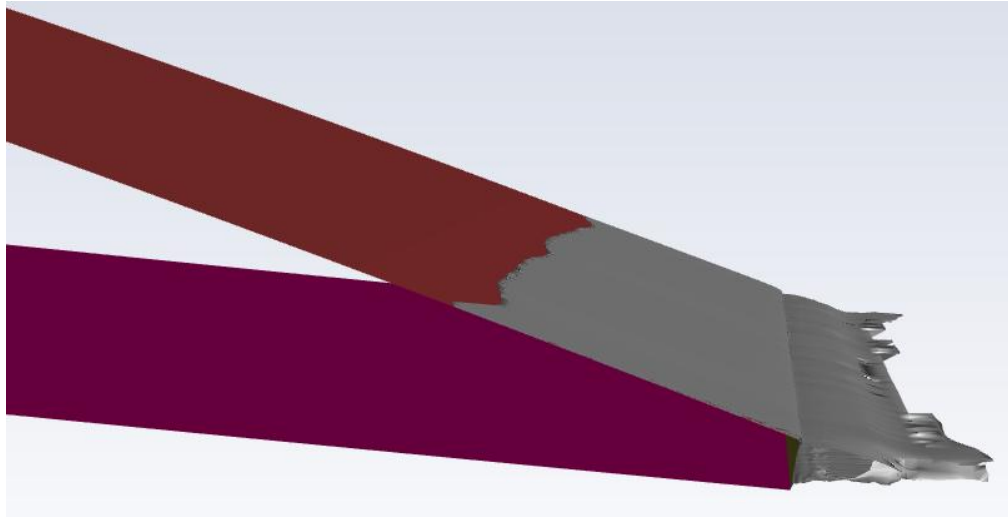


*Obrázok 44 Vektory rýchlosti pre uhol nábehu 12 stupňov*

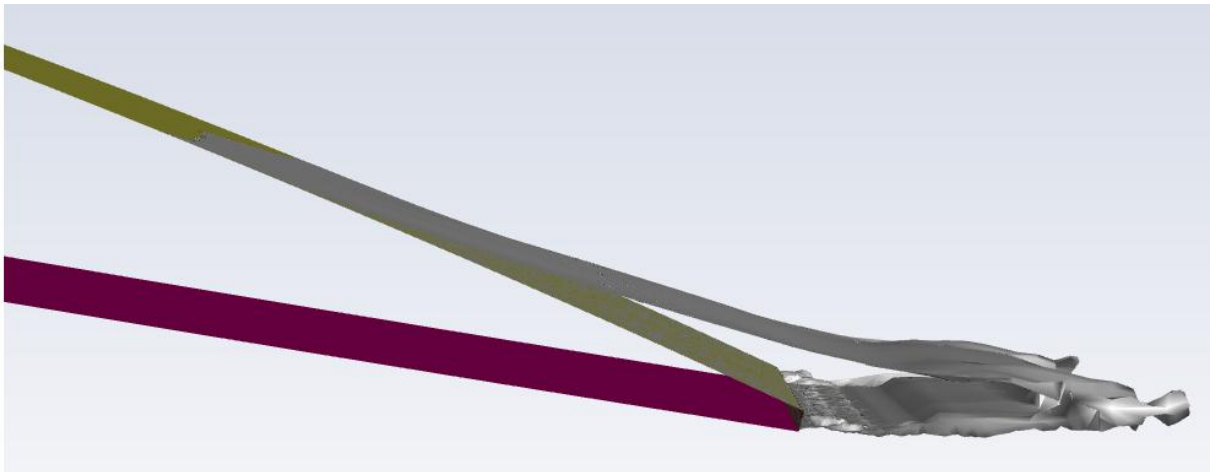


*Obrázok 45 Vektory zápornej rýchlosti v smere x pre uhol nábehu 12 stupňov*

Ďalší spôsob ako znázorniť veľkosť separácie prúdenia a teraz už v 3D, je vytvorenie si izoplochy (oblasť, kde je jeden zvolený parameter konštantný) veľmi malej zápornej rýchlosti, ktorá by mala znázorňovať začiatok separácie prúdenia. Vo vnútri objemu, ktorý je ohraničený touto izoplochou a samotným profilom by mala byť separácia prúdenia. Tento spôsob môže lepšie pomôcť pri vizualizácii separácie prúdenia pretože sa jedná o 3D pohľad na profil (Obrázok 46 a Obrázok 47). Izoplocha na týchto obrázkoch je vyznačená šedou farbou a je vidieť, že pre optimálny uhol nábehu 8 stupňov je táto oblasť úplne minimálna tesne nad povrchom a už pre mimo optimálny uhol nábehu 12 stupňov je výrazne väčšia. Tento fakt bol potvrdený už aj pri vykreslení vektorov rýchlosti v blízkosti odtokovej hrany.



Obrázok 46 Izoplocha zápornej rýchlosti v smere  $x$  pre uhol nábehu 8 stupňov



Obrázok 47 Izoplocha zápornej rýchlosti v smere  $x$  pre uhol nábehu 12 stupňov

### 3.3.3 Zhodnotenie

Z obrázkov vektorov rýchlosti a aj povrchových napätí na povrchu profilu je vidieť, že obtekanie profilu pri uhle nábehu 8 stupňov, dochádza k veľmi minimálnej separácii a jedná sa stále o optimálny stav. Tento fakt potvrdzuje aj NACA report (Obrázok 27) a kritický uhol nábehu, pre ktoré obtekanie už nie je optimálne a začne dochádzať k tzv. stall efektu (strate vztlaku) by mal byť okolo simulovanej hodnoty uhla nábehu 12 stupňov. Tento mimo optimálny stav je dobre vidieť na popísaných obrázkoch vyššie, kde už separácia prúdenia je docela výrazná a tomu odpovedá aj nárast odporového súčiniteľa  $C_D$ . Porovnanie tohto koeficientu pre výpočty CFD a experimentálne namerané je možno vidieť v Tabuľka 5. Simulácia hladkého profilu dobre odpovedá meraniam vykonaným v NACA reportoch a môže slúžiť ako referenčná geometria pre zistenie efektu povrchových modifikácií na prúdenie okolo hydraulického profilu. Týmto simuláciám sa budú venovať nasledujúce kapitoly.

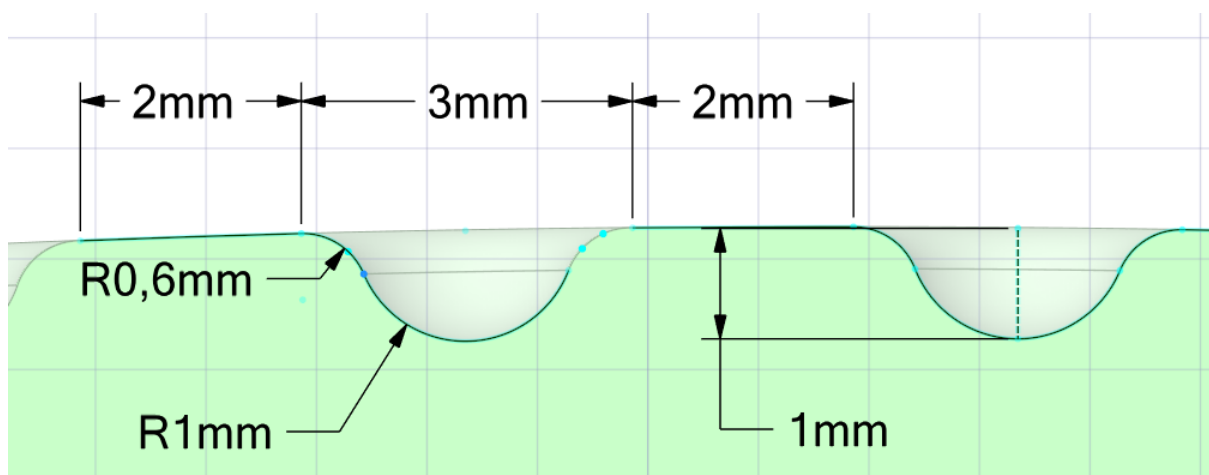
## 4 Numerická simulácia s povrchovými modifikáciami – návrh Sigma

Prvou povrchovou modifikáciou, ktorá bude predmetom skúmania, je geometrická varianta, ktorú som prebral od firmy VVÚ SIGMA s.r.o. Keďže sa jedná o geometriu kde veľkosť jamiek resp. bezrozmerného parametra  $d/D$  je väčšia ako odporúčaná hodnota z rešerše, tak bude simulácia vykonaná iba pre 1 uhol nábehu. Konkrétne pre ešte optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$ , a to z toho dôvodu, že nepredpokladám, že táto varianta povrchovej modifikácie bude mať pozitívny efekt, ale naopak dôjde k docela veľkému zhoršeniu oproti hladkému profilu.

Dôležité je spomenúť, že tento typ geometrie nebol prvotne určený pre redukovanie odporovej sily, alebo pre ovplyvnenie separácie prúdenia. Pomocou tejto geometrie sa skúmal vplyv týchto povrchových modifikácií primárne na vznik a chovanie kavitácie. Z toho dôvodu môže pri tejto geometrickej variante vyjsť výrazne horší odporový koeficient ako v prípade hladkého profilu. Simulácia tejto geometrie bude slúžiť hlavne ako referencia pre porovnanie pri výpočtoch už mnou optimalizovaných geometrických variant, a na overenie, že naozaj táto geometria nemá pozitívny efekt pre zníženie odporového koeficientu.

### 4.1 Geometria

Geometria povrchovej štruktúry bude popísaná pomocou parametrov uvedených v kapitole 2.2.1. Návrh geometrie sa dá rozdeliť do tvorby lokálnej a globálnej geometrie. Lokálna geometria sa venuje geometrickým rozmerom jednej jamky (Obrázok 19). V globálnej geometrii sa volia parametre pre všetky jamky t.j. ich tvar (Obrázok 18) a ich rozloženie na povrchu (Obrázok 21). Táto geometrická varianta používa kruhový tvar jamiek so šachovnicovým usporiadaním na povrchu profilu. Konkrétne geometrické rozmery tejto povrchovej varianty možno vidieť na Obrázok 48.



Obrázok 48 Lokálne geometrické rozmery jamky

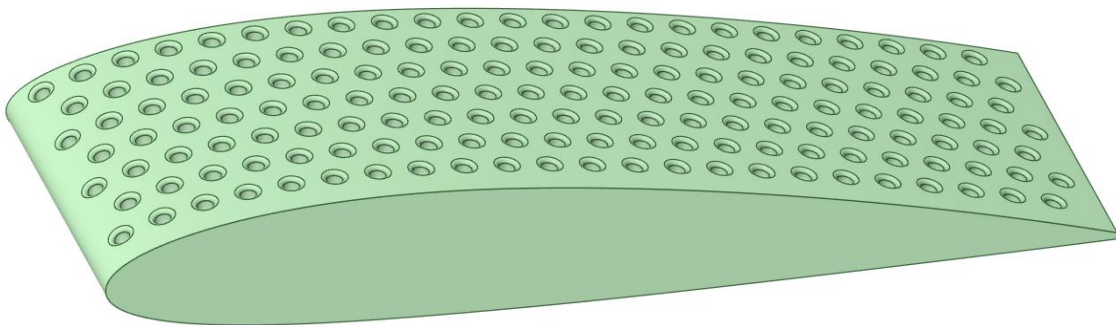
Tabuľka 7 Lokálne geometrické parametre

	d [mm]	D [mm]	r [mm]	R [mm]
Kruhový tvar - návrh Sigma	1	3	0.6	1

Tabuľka 8 Globálne geometrické parametre

	$\frac{d}{D}$ [%]	$L_x$ [mm]	$L_z$ [mm]
Kruhový tvar - návrh Sigma	33	5	10

Tabuľka 7 a Tabuľka 8 uvádzajú geometrické hodnoty použité pri tvorbe tejto varianty povrchovej modifikácie. Bezrozmerný parameter  $d/D$ , ktorý súvisí s hĺbkou jamiek je väčší ako odporúčaná hodnota, a pri tvorbe optimalizovanej geometrie bude znížený tak, aby bol menší ako odporúčaná veľkosť z rešerše 10%. Parametre  $L_x$  a  $L_z$  súvisia s hustotou rozloženia na povrchu, konkrétne sa jedná o vzdialenosť stredov jak v smere  $x$  tak v smere  $z$  (Obrázok 21). Tieto hodnoty rešpektujú odporúčania, a preto budú zachované aj pri tvorbe ďalšej geometrie. Teda parametre, ktoré sa budú meniť je hĺbka jamiek a ich tvar z kruhového na iný tvar (elipsový). Finálnu vytvorenú geometriu je možno vidieť na Obrázok 49.

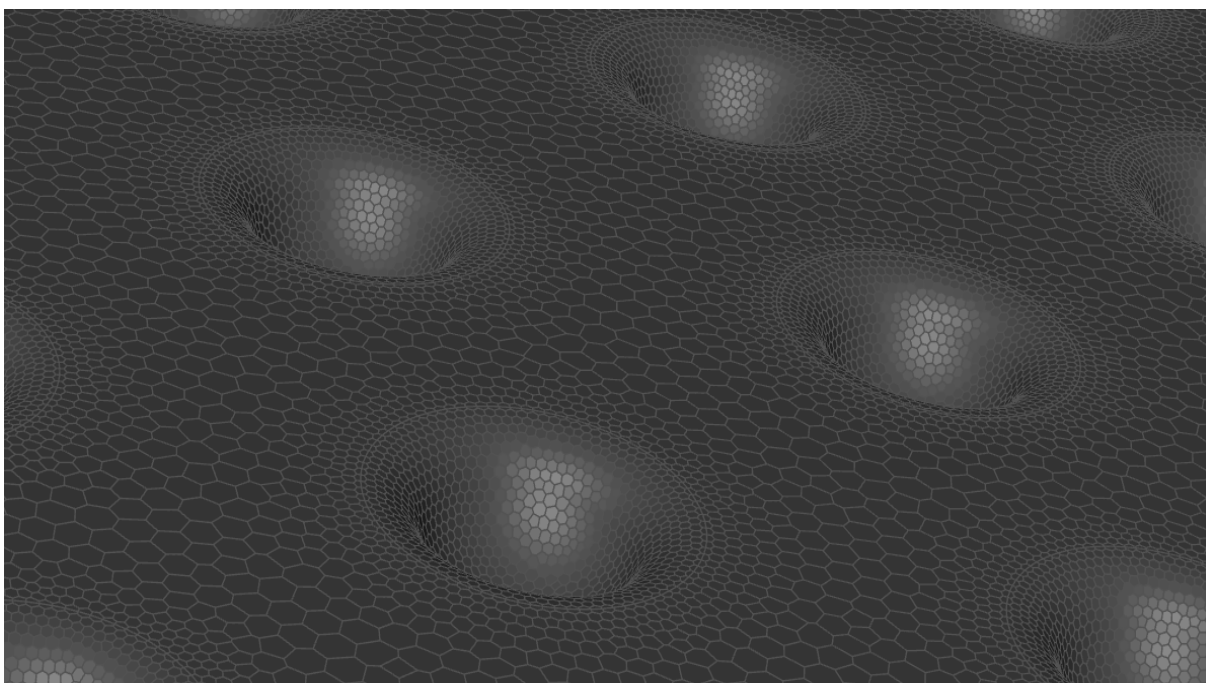


Obrázok 49 Finálna vytvorená geometria- návrh Sigma

## 4.2 Okrajové podmienky

Okrajové podmienky pre skúmanie komplexnejšieho prúdenia pre prípad povrchovej modifikácie ostávajú zachované a nebudú tu podrobne rozobraté. Podrobne rozobraté okrajové podmienky a tvorba výpočetnej domény resp. tvorba výpočetnej siete sa nachádza v kapitolách 3.1 resp. 3.2. Pre korektné porovnanie rôznych variant, či už hladkého profilu alebo profilu s povrchovými modifikáciami je nutné mať podobné okrajové podmienky a výpočetnú sieť. Nastavenie voľby numerických schém a modelu turbulenciu je možno vidieť v Tabuľka 4.

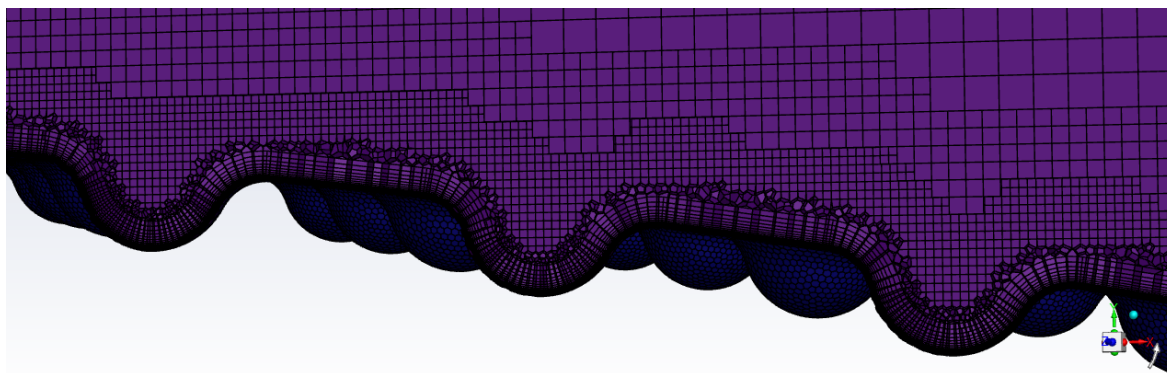
Jediný rozdiel oproti simulácií hladkého profilu bude iba veľkosť siete. Toto je z dôvodu komplexného prúdenia v samotných vytvorených jamkách povrchovej modifikácie. Toto komplexnejšie prúdenie bude lepšie zachytené pomocou CFD simulácií, ak v tejto oblasti dôjde k výraznému zjemneniu výpočetnej siete v týchto oblastiach. Toto výrazne zjemnenie výpočetnej siete bude mať výrazný efekt na veľkosť siete a tým pádom aj na výpočetný čas. Ukážka tohto zjemnenia siete možno vidieť na Obrázok 50 a výsledné parametre výpočetnej siete v Tabuľka 9.



Obrázok 50 Povrchová sieť povrchovej modifikácie - Sigma

Tabuľka 9 Parametre siete pre numerickú simuláciu povrchovej modifikácie - návrh Sigma

Parameter siete	Hodnota
Počet prvkov	12 193 824
Počet tenkých vrstiev	20
Growth rate	1.2
Prvá výška bunky	$2 \cdot 10^{-6}$ m
Skewness	Maximálna 0.72 Priemerná 0.0008
Ortogonalna kvalita	Minimálna 0.2 Priemerná 0.974



Obrázok 51 Ukážka vytvorenej siete v blízkosti jamiek

### 4.3 Výsledky

Ako bolo spomenuté skôr táto simulácia prebiehala iba pre jeden uhol nábehu. Dôvod bol ten, že pomocou tejto geometrickej varianty nepredpokladám, že dôjde k zlepšeniu. Následný výpočtový čas bol venovaný pre skúmanie už optimalizovaných geometrických variant podľa rešerše pre obidva uhly nábehu  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\alpha = 12^\circ$ . Táto simulácia slúžila hlavne na overenie predpokladu, že táto varianta nie je prospešná pre charakteristiky prúdenia. Zároveň bola akási referenčná geometria pre zistenie trendu vývoja charakteristík prúdenia so zmenšovaním bezrozmerného parametra  $d/D$  resp. zistenia vplyvu aplikovania doporučených geometrických parametrov popísaných v rešerši.

#### 4.3.1 Odporový koeficient

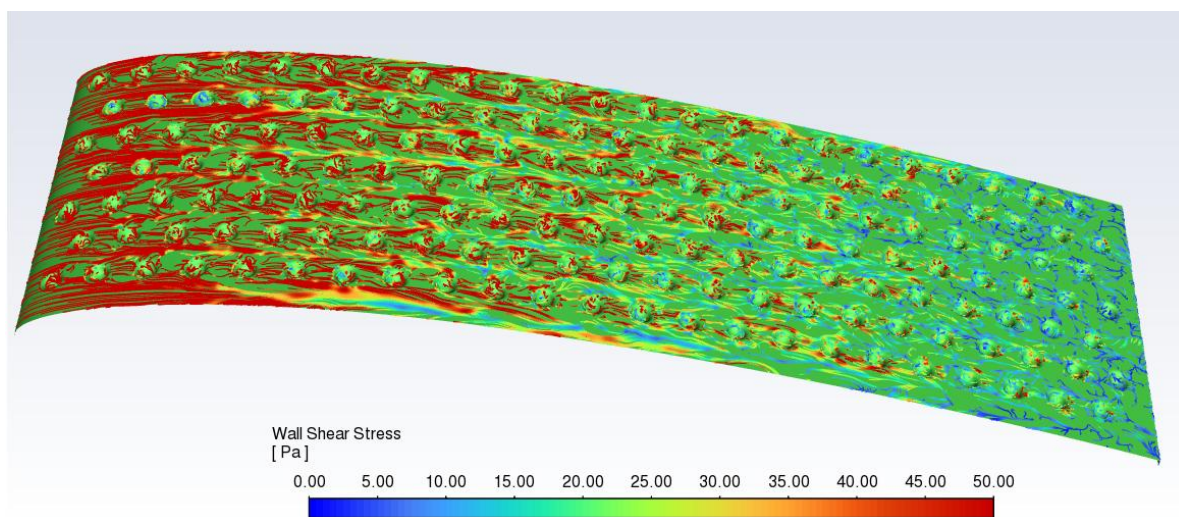
Tabuľka 10 uvádza výsledné hodnoty odporového koeficientu resp. odporovej sily z CFD výpočtov. Postup stanovovania odporového koeficientu  $C_D$  a aj hodnoty vstupujúce do tohto parametru sú rovnaké ako pri stanovovaní v prípade hladkého profilu v kapitole 3.3.1 resp. rovnice (16),(17),(18). Z výsledkov je evidentné, že počiatočný predpoklad bol správny. Dochádza tu k veľkému nárastu odporového koeficientu. Konkrétne nárast tlakovej zložky odporu indikuje, že tu dochádza k oveľa intenzívnejšej separácii prúdenia ako v prípade hladkého profilu. Táto separácia nastáva hlavne v oblasti jamiek povrchovej modifikácie, ktoré sú v tejto geometrickej variante nevhodné, kvôli vysokej hodnote geometrického parametra  $d/D$  oproti odporúčaniam z rešerše. Zaujímavosťou ale je, že došlo k poklesu tretej časti odporovej sily. Tento fakt by mohol indikovať, že tieto povrchové modifikácie môžu fungovať ako redukčný mechanizmus tretej zložky odporovej sily. Nutné je iba nájsť geometrickú variantu, ktorej nárast tlakovej zložky odporu spôsobený týmito povrchovými modifikáciami nebude príliš veľký.

Tabuľka 10 Vypočítaný odporový koeficient resp. odporová sila pre uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  a hybridný model turbulencie SBES

	$C_D$ [-]	$\Delta C_D$ [%]	Tlaková zložka odporovej sily [N]	Trecia zložka odporovej sily [N]
<b>Geometria – návrh Sigma</b>	0.031	+62.4	1.663	0.504

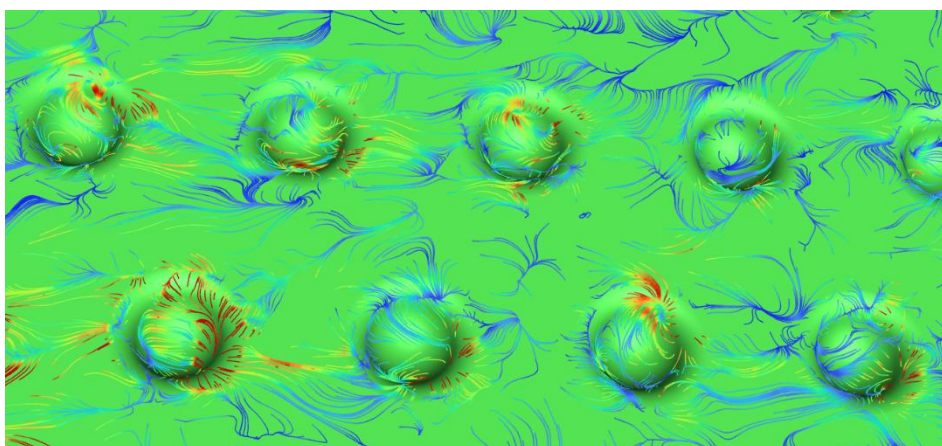
### 4.3.2 Ukážka charakteru prúdenia

V tejto podkapitole budú analyzované podobné charakteristiky prúdenia okolo profilu s povrchovými modifikáciami ako v prípade hladkého profilu. Presnejšie pôjde o analýzu, ako sa chová prúdenie v blízkosti povrchových modifikácií, a či sa zhoduje so zistenými typmi prúdenia, ktoré boli nájdené pomocou CFD alebo experimentálne (Obrázok 24, Obrázok 25, Obrázok 26). Ďalší krok bude vizualizovať oblasť separácie prúdenia, či nastáva iba v oblasti povrchových modifikácií, alebo nastáva aj v blízkosti odtokovej hrany profilu ako v prípade hladkej varianty profilu.

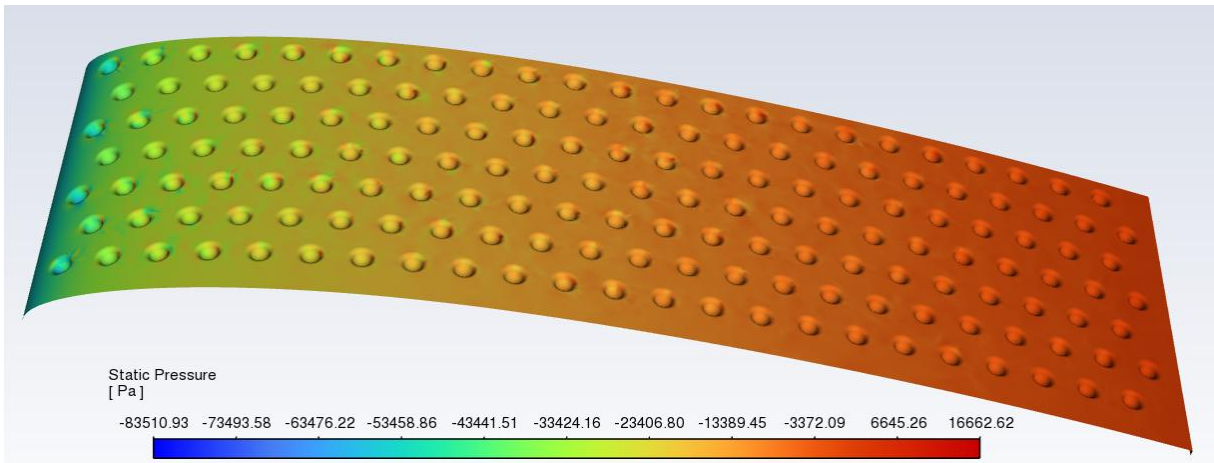


Obrázok 52 Stenové šmykové napätie  $\tau_w$  - geometrická varianta Sigma

V prípade obtekania s povrchovou modifikáciou nie je na Obrázok 52, kde je vykreslené stenové tečné napätie  $\tau_w$  jasne viditeľná odtrhová čiara profilu ako v prípade varianty hladkého profilu. Detail v blízkosti odtokovej hrany profilu je možno vidieť na Obrázok 53. Z vykreslenia tohto parametra nie je jasné vidieť, kde začína resp. o akú veľkú oblasť separáciu prúdenia sa jedná. Pre lepšiu predstavu o oblasti separácií prúdenia by malo pomôcť vykreslenie vektorov rýchlosti a izoplochy zápornej zložky rýchlosti.

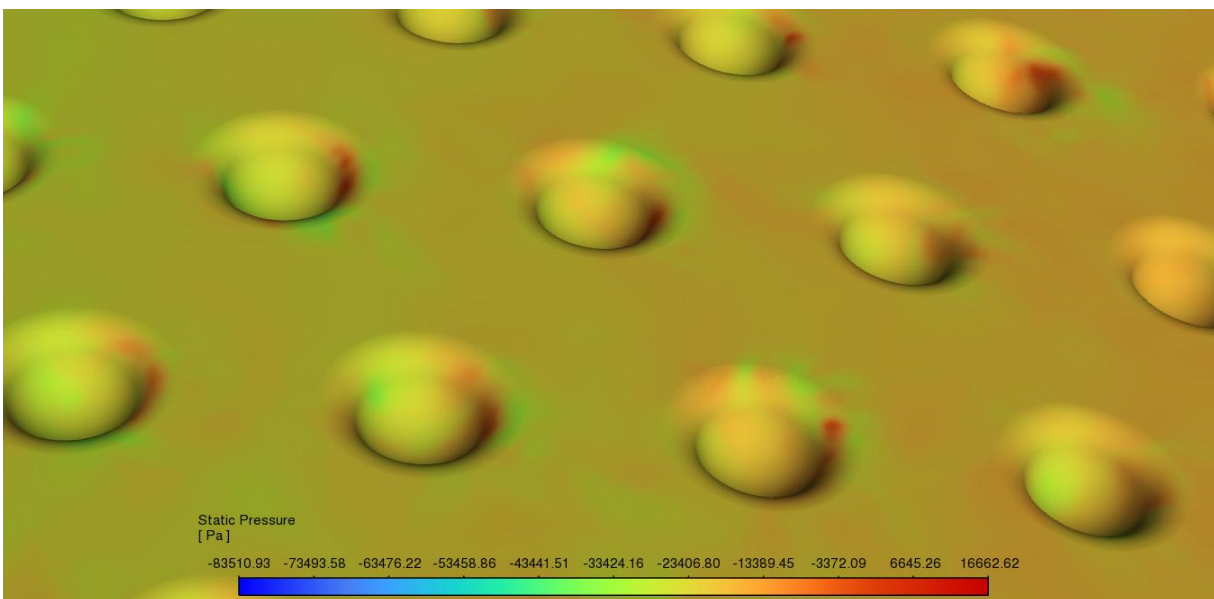


Obrázok 53 Detail šmykového napätia  $\tau_w$

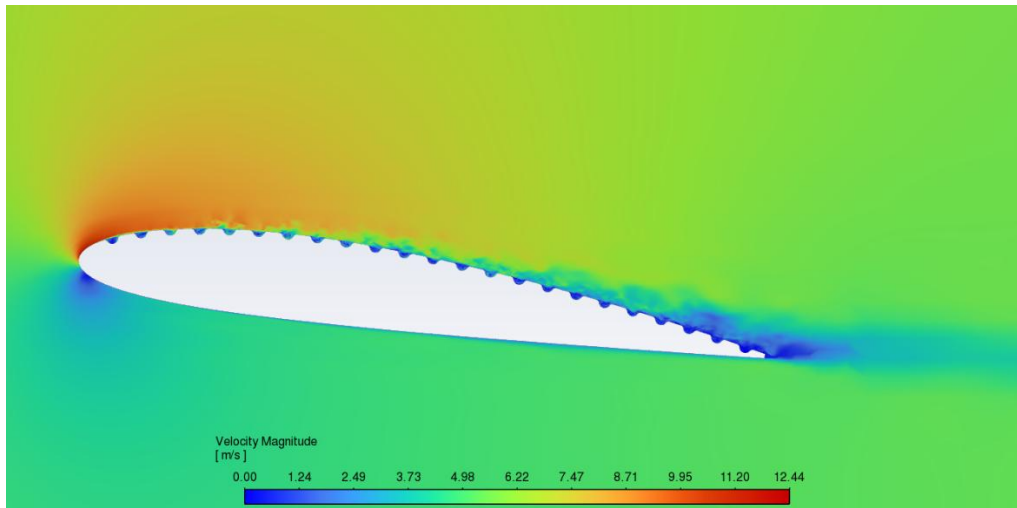


*Obrázok 54 Statický tlak na povrchu profilu – geometrická varianta Sigma*

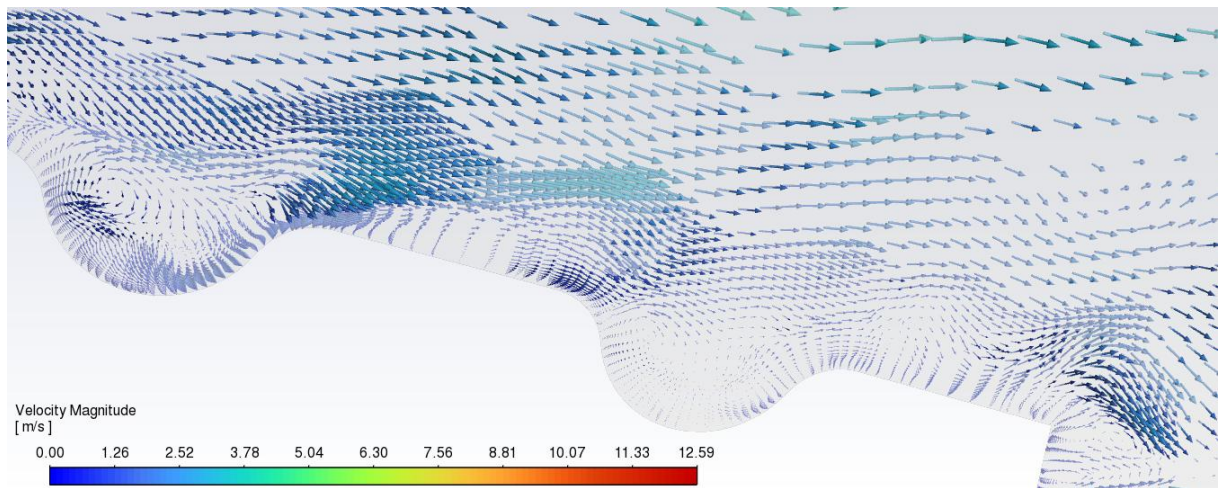
Rozloženie statického tlaku na povrchu profilu (Obrázok 54) je veľmi podobné ako v prípade varianty hladkého profilu. To znamená, že tlak od nábežnej hrany, kde je tento tlak najmenší, tak narastá smerom k odtokovej hrane. Tento jav je rovnaký ako v prípade varianty hladkého profilu. Zaujímavosťou v prípade tejto varianty povrchovej modifikácie je, že tlak nevyzerá byť konštantný po celej jamke povrchovej modifikácie. Javí sa, že tlak na výstupe z jamky postupne narastá až po koniec, kde tento tlak je lokálne najvyšší (Obrázok 55).



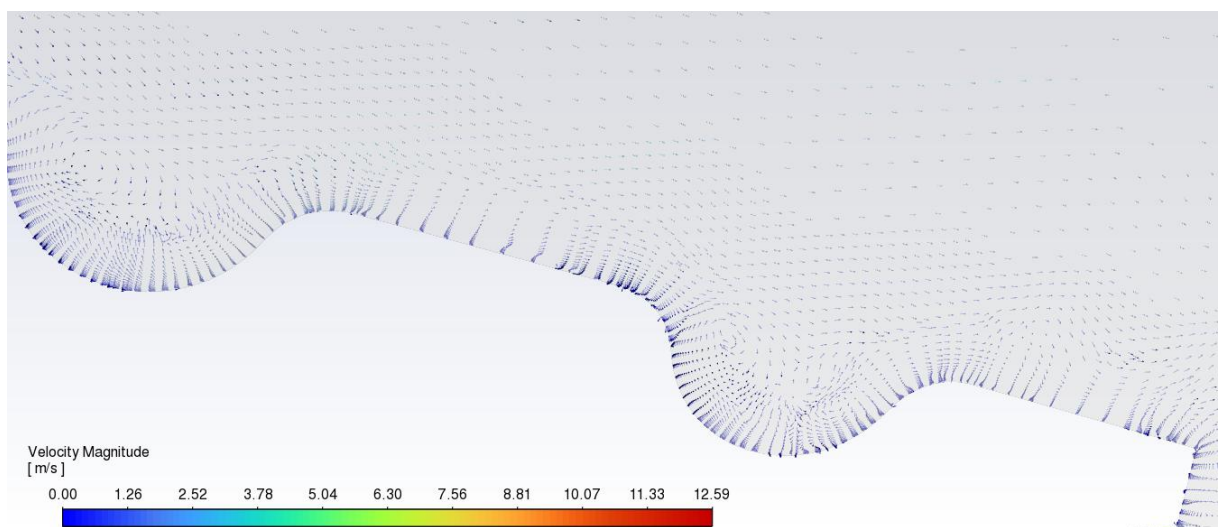
*Obrázok 55 Detail rozloženia tlaku v jamke*



Obrázok 56 Absolútna zložka rýchlosti vykreslená v rovine prechádzajúcej stredom jamky



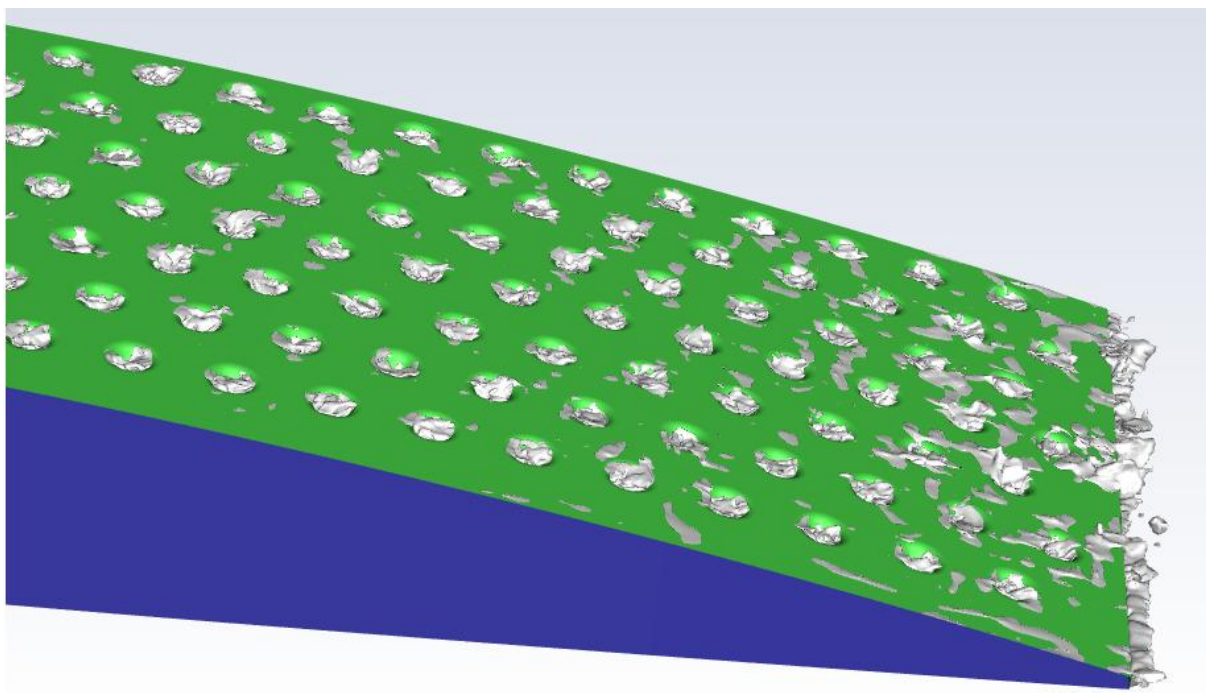
Obrázok 57 Vektory rýchlosti v blízkosti odtokovej hrany profilu



Obrázok 58 Normalizované vektory rýchlosti v blízkosti odtokovej hrany profilu

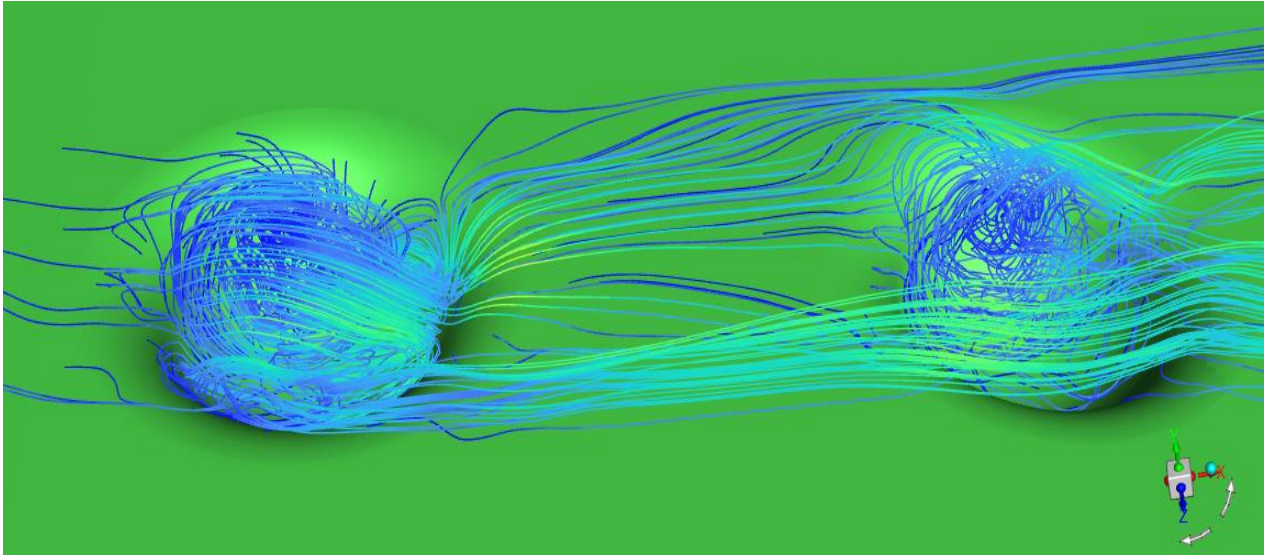
Pre detailnejší popis správania prúdenia v jamkách a zistenie, či naozaj dochádza k separácií prúdenia slúžia Obrázok 56, Obrázok 57 a Obrázok 58. Už z vykreslenia absolútnej zložky rýchlosti v rovine prechádzajúcej stredom jamky sa dá predpokladať, že prúdenie v takto nevhodne geometricky navrhnutej jamke je úplne separované. Tento fakt podporujú aj vektory rýchlosti vykreslené v tej istej rovine. Vektory rýchlosti sú vykreslené aj ako normalizované t.j. sú podelené svojou veľkosťou a plnia úlohu akéhosi jednotkového vektoru, ktorý znázorňuje iba smer, nie veľkosť. Dôvod bol ten, že pri vykreslení klasických vektorov rýchlosti, kde je uvažovaná aj ich veľkosť, nie iba smer, tak tam nie je taká prehľadnosť ako vo variante normalizovaných vektorov. Na druhej strane je tam možno lepšie vidieť prítomný rýchlostný profil v blízkosti steny, ktorý v prípade normalizovaných vektorov nie je skoro vôbec vidieť.

Síce na Obrázok 57 a Obrázok 58 sú detailnejšie znázornené jamky iba v oblasti blízkosti odtokovej hrany, ale tento trend charakteru prúdenia vyzerá, že platí pre všetky jamky nachádzajúce sa na povrchu. Priamo v jamke je prúdenie kompletne separované a v priestore na povrchu medzi jamkami sa prúdenie javí z veľkej časti, že kopíruje povrch profilu. Tento fakt podporuje aj Obrázok 59, kde je znázornená izoplocha (znázornená šedou farbou) veľmi malej zápornej rýchlosti v smere osi  $x$  t.j. proti smeru prúdenia. Táto plocha by mala pomôcť vizualizovať začiatok separácie prúdenia a v priestore medzi touto izoplochou a samotným profilom by sa malo jednať o separáciu prúdenia.



Obrázok 59 Izoplocha zápornej rýchlosti v smere  $x$  - geometrická varianta Sigma

Pre porovnanie už spomínaného charakteru prúdenia v jamkách s údajmi popísaných v rešerši boli vykreslené prúdnice v jamkách (Obrázok 60). Tieto vykreslené prúdnice z CFD výpočtu docela dobre odpovedajú charakteru prúdenia, ktorý by sa tam mal vyskytovať v prípade príliš veľkého parametra  $d/D$ . Konkrétne na Obrázok 26 B), kde je znázornené experimentálne získaný charakter prúdenia pre prípad  $d/D = 50\%$ .



Obrázok 60 Prúdnice vykreslené v jamkách geometrickej varianty - Sigma

### 4.3.3 Zhodnotenie

Kapitola 4.3 iba potvrdila predpoklad, že táto geometrická varianta nebude vhodná na zlepšovanie charakteristík prúdenia okolo profilu bez kavitácie. Konkrétne lokálna geometria ( $d/D$ ) jednej jamky povrchovej modifikácie je nevhodne navrhnutá s ohľadom na odporúčania zistené z rešerše. Na druhej strane globálna geometria ( $L_x, L_z$ ) t.j. rozloženie jamiek na povrchu spadá do odporúčaného intervalu hustoty rozloženia na povrchu. Preto v nasledujúcej kapitole bude upravený iba geometrický parameter  $d/D$  a bude sledovaná závislosť odporového koeficienta na tomto parametre, ktorý podľa rešerše by mal byť najpodstatnejší. Bude sledovaný trend vplyvu tohto parametru na odporový koeficient, tak aj na vplyv na separáciu prúdenia pri jeho znižovaní.

Táto geometrická varianta povrchovej modifikácie profilu docela výrazne zvyšuje odporový koeficient. Z detailnejšej analýzy bolo vidieť, že hlavný podiel na tomto náraste má nevhodná geometria samotných jamiek, v ktorých dochádza ku výraznej oblasti separácie prúdenia. Zaujímavosťou ale je, že táto geometrická varianta nemala žiadny výrazný negatívny efekt na oblasť separácie prúdenia pri odtokovej hrane. Z vykreslených prúdnic z CFD výpočtov bol zachytený veľmi podobný charakter prúdenia ako pri experimentálnom či numerickom skúmaní dolíkov pri veľmi vysokej hodnote geometrického parametra  $d/D$ . Vďaka tejto zhode bolo predpokladané, že zvolené okrajové podmienky, model turbulencie a výpočetná sieť boli vhodne stanovené a budú zachované aj pre výpočet optimalizovanej geometrie povrchovej modifikácie profilu v nasledujúcej kapitole.

## 5 Numerická simulácia povrchových modifikácií s optimalizovanými geometrickými parametrami

Ako bolo spomenuté skôr, parametre ktoré budú optimalizované sú bezrozmerný geometrický parameter  $d/D$ , kde tento rozmer bude znížený na hodnoty menšie ako 10 % aby boli rešpektované geometrické odporúčania z rešerše z kapitoly 2.2.2. Ako ďalší optimalizovaný parameter bude samotný tvar jamiek, kde okrem kruhového tvaru bude vytvorená komplexnejšia geometria jamky vybraná z Obrázok 18. Ďalší parameter, ktorý budem meniť je hustota rozloženia na povrchu. Konkrétne bude skúmané aký efekt budú mať tieto povrchové modifikácie v prípade, že by sa nenachádzali na celom povrchu profilu. Bude vytvorená varianta, kde tieto povrchové modifikácie budú začínat' až od určitého momentu od začiatku profilu t.j. začiatok profilu bude hladký a opačná varianta, kde tieto povrchové modifikácie nebudú pokračovať až k odtokovej hrane. Samozrejme aby bol zistený iba vplyv tohto rozloženia na povrchu, tak to bude realizované pre rovnakú veľkosť bezrozmerného parametra  $d/D$ .

### 5.1 Vytvorené geometrie

Podľa geometrických odporúčaní vysvetlených vyššie boli vytvorené rôzne geometrie. Konkrétne dve geometrie povrchovej modifikácie s kruhovým tvarom a rôznym pomerom  $d/D$  (ďalej označované ako geometria A a geometria B), a jedna geometria s elipsovým tvarom a opäť rôznym pomerom  $d/D$  (ďalej označená ako geometria E). Vplyv bezrozmerného parametra  $d/D$  bol skúmaný na 4 rôznych geometriách. Konkrétne pôvodná prebratá geometria od firmy VVÚ SIGMA s.r.o, geometria A,B,E, kde pri variante E bol ale zmenený aj tvar z kruhového na elipsový. Na skúmanie vyššie uvedeného vplyvu rozloženia povrchových modifikácií na profile bola použitá varianta B. Z tejto geometrie bola vytvorená varianta, kde povrchové modifikácie začínajú až od prvej tretiny profilu a začiatok je hladký (geometria C) a varianta, kde tieto povrchové modifikácie nepokračujú až k odtokovej hrane a koniec profilu je hladký (geometria D).

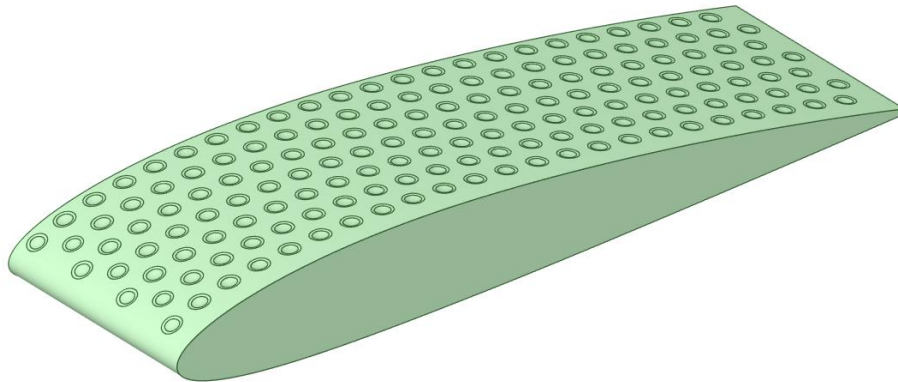
Popis geometrie kruhovej varianty už bol vysvetlený v kapitole 4.1, a preto pri týchto dvoch variantách budú zapísané iba hlavne geometrické rozmery do Tabuľka 11 a Tabuľka 12.

Tabuľka 11 Lokálne geometrické parametre

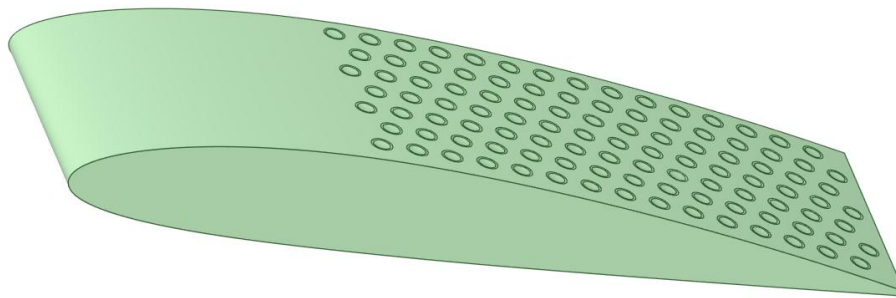
	d [mm]	D [mm]	r [mm]	R [mm]
Geometria A	0.3	3	1	2.9
Geometria B	0.15	3	1.5	6
Geometria C	0.15	3	1.5	6
Geometria D	0.15	3	1.5	6

Tabuľka 12 Globálne geometrické parametre

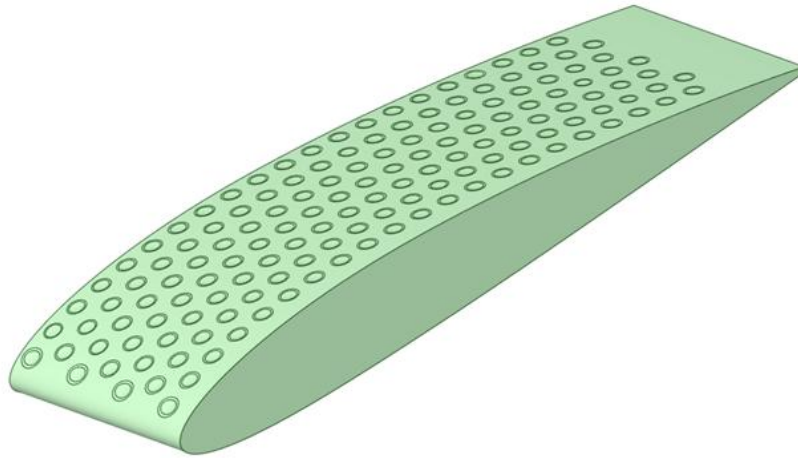
	$\frac{d}{D}$ [%]	$L_x$ [mm]	$L_z$ [mm]
Geometria A	10	5	10
Geometria B	5	5	10
Geometria C	5	5	10
Geometria D	5	5	10



Obrázok 61 Geometria A



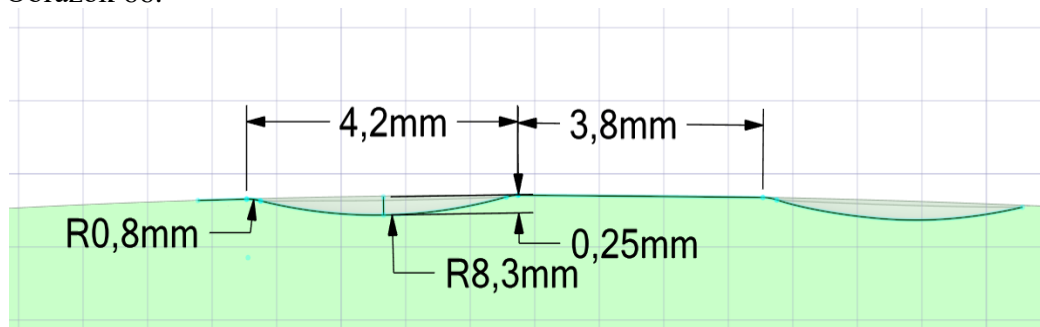
Obrázok 62 Geometria C



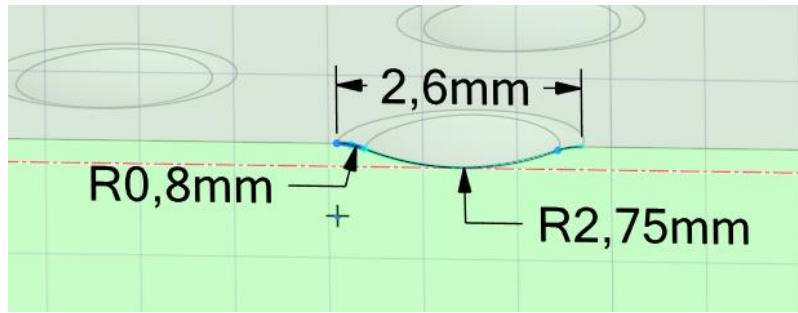
Obrázok 63 Geometria D

Popis a tvorenie geometrie povrchovej modifikácie, ktorá nemá kruhový tvar bola o niečo náročnejšia. Pre geometrický popis jamiek s eliptickým tvarom budú popísané geometrické parametre v 2 rovinách. V rovine , kde je vidieť rozmer hlavnej osi elipsy  $a$  (Obrázok 64) , a v rovine na nej kolmú, kde je vidieť rozmer vedľajšej osi  $b$  (Obrázok 65). Pri tvorbe tejto geometrickej varianty boli okrem zmeny tvaru jamky na elipsový aj výraznejšie zmenené rozmery medzi jamkami  $L_x$  a  $L_z$ .

Keďže oproti kruhovej geometrii sa tu nenachádza jednotný priemer  $D$ , tak pre spočítanie bezrozmerného geometrického parametra  $d/D$ , bude použitá vzdialenosť hlavnej osi  $a$ , potom dostanem tento geometrický parameter ako  $d/a$ , ktorý bol zvolený tiež tak, aby bol menší ako 10%. Ďalej boli upravené vzdialenosti stredov jamiek  $L_x$  a  $L_z$  tak, aby som sledoval ako sa bude prúdenie správať ak budú tieto vzdialenosti približne rovnaké. Výsledná tabuľka geometrických parametrov je možno vidieť v Tabuľka 13 a Tabuľka 14, a výsledná vytvorená geometria na Obrázok 66.



Obrázok 64 Geometrické rozmery hlavnej osi  $a$



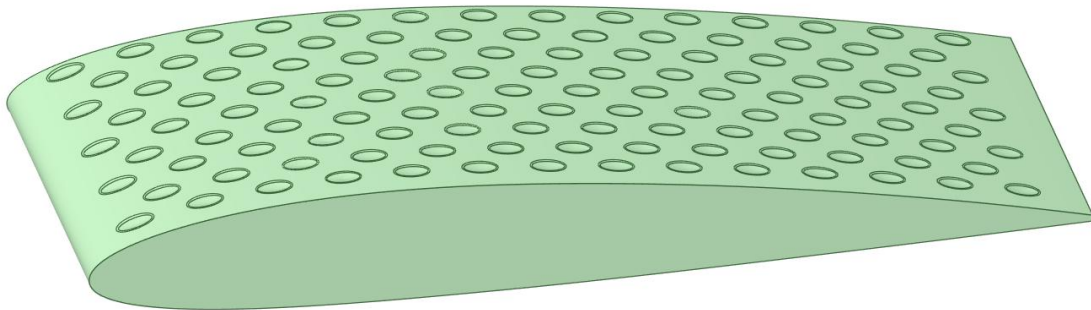
Obrázok 65 Geometrické rozmery vedľajšej osi b

Tabuľka 13 Lokálna geometria elipsovej varianty dolíkov

	d [mm]	a [mm]	b [mm]	r [mm]
Geometria D	0.25	4.2	2.6	0.8

Tabuľka 14 Globálne geometrické parametre elipsovej varianty dolíkov

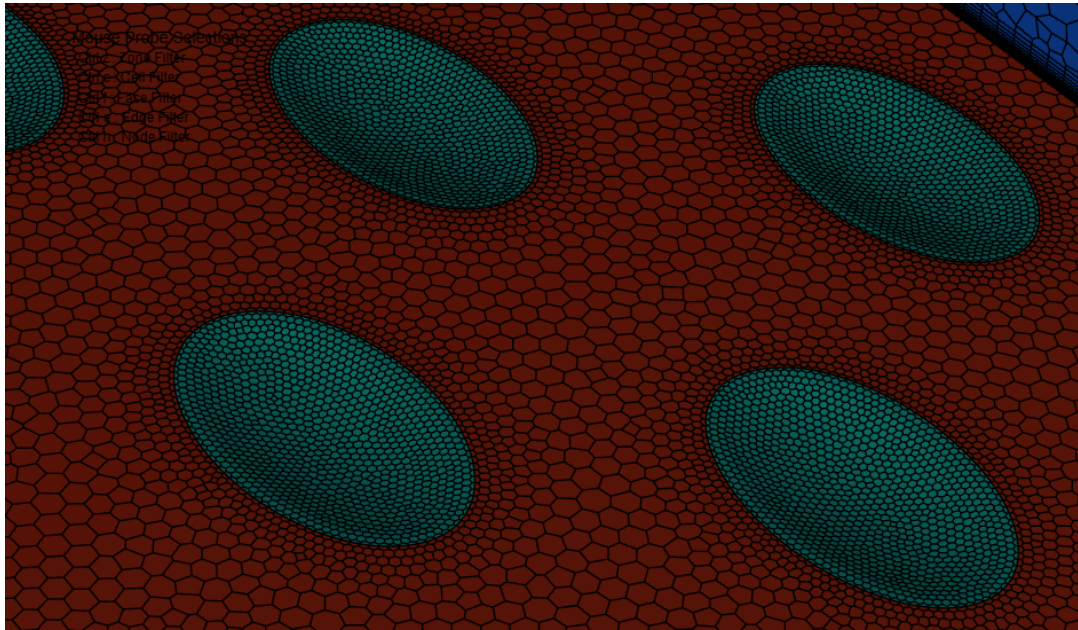
	$\frac{d}{a}$ [%]	$L_x$ [mm]	$L_z$ [mm]
Geometria D	6	8	8.5



Obrázok 66 Geometria E

## 5.2 Okrajové podmienky

Podobne ako v prípade popisu okrajových podmienok pri výpočte povrchovej modifikácie v kapitole 4, okrajové podmienky budú nastavené tak, aby rešpektovali nastavenie v prípade výpočtu hladkého profilu. Podrobné vysvetlenie nastavenia okrajových podmienok možno vidieť v kapitole 3.1 a 3.2. Podobne ako pri vytváraní výpočtovej siete pre prípad povrchovej modifikácie v kapitole 4, bude tu výrazne zjemnená sieť v oblasti jamiek, a to tak aby výsledný počet elementov výpočtovej siete približne odpovedal počtu prvkov v Tabuľka 9. Keďže výsledná výpočtová sieť všetkých variant povrchových modifikácií (A,B,C,D) je podobná tak bude ukázaná iba jedna varianta, a to eliptická varianta (geometrická varianta E).



Obrázok 67 Povrchová sieť geometrickej varianty E

Tabuľka 15 Parametre siete geometrickej varianty E

Parameter siete	Hodnota
Počet prvkov	11 914 567
Počet tenkých vrstiev	20
Growth rate	1.2
Prvá výška bunky	$2 \cdot 10^{-6}$ m
Skewness	Maximálna 0.71 Priemerná 0.0008
Ortogonalná kvalita	Minimálna 0.25 Priemerná 0.974

### 5.3 Výsledky

V nasledujúcich podkapitolách bude analyzovaný vplyv rôznych geometrických variant na obtekanie hydraulického profilu, ktoré boli mnou optimalizované podľa odporúčaní z literatúr. Numerické simulácie prebiehali najprv pre optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$ . Následne po zhodnotení všetkých geometrických variant boli vybrané iba najsľubnejšie pre analýzu aj pre mimo-optimálny uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$

### 5.3.1 Odporový koeficient

Podobne ako pri analyzovaní v prípade hladkého profilu alebo pre geometrickú variantu – Sigma, tak ako prvý bude rozobraný efekt týchto povrchových modifikácií na výsledný odporový koeficient. Rovnice a údaje vstupujúce do rovníc výpočtu pre odporový koeficient sú rovnaké ako v kapitolách 3.3.1 a 4.3.1. Tabuľka 16 uvádza výsledné hodnoty z CFD simulácií pre optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$ . Nárast odporového koeficientu už nie je taký výrazný, a najslubnejšia varianta sa javí ako Geometria C. Táto geometria odpovedá geometrickému parametru  $d/D = 5\%$  a začiatok profilu je ponechaný hladký. Pre takúto geometrickú variantu bol dopočítaný skoro rovnaký odporový koeficient ako pri profile s hladkým povrchom.

Po dopočítaní všetkých 5 geometrických variant boli vybrané pre ďalšie skúmanie pri uhle nábehu  $\alpha = 12^\circ$  iba 3 geometrické varianty. Konkrétne sa jednalo o varianty Geometria C, Geometria D a Geometria E, kde prvé 2 spomínané varianty vychádzali najlepšie a elipsová varianta bola zvolená z dôvodu porovnania aký veľký efekt nastáva pri zmene geometrického tvaru jamky. Ostávajúce geometrické varianty neboli počítané pre tento mimo optimálny uhol nábehu z časového dôvodu. Ako najlepšia geometrická varianta z pohľadu odporového koeficientu vyšla Geometria C, rovnako ako pri uhle nábehu  $\alpha = 8$ . Konkrétne sa tu jednalo o skoro 7% zníženie odporového koeficientu. Výsledky ostatných geometrických variant možno vidieť v Tabuľka 17.

Tabuľka 16 Výsledky odporového koeficientu resp. odporovej sily pre optimalizované geometrické varianty pre uhol nábehu  $\alpha = 8$  stupňov a hybridný model turbulencie SBES

	$C_D$ [–]	$\Delta C_D$ [%]	Tlaková zložka odporovej sily [N]	Trecia zložka odporovej sily [N]
Geometria – A	0.022	+12	0.9247	0.5658
Geometria – B	0.020	+3.60	0.7854	0.5923
Geometria – C	0.0199	+1.45	0.7450	0.6010
Geometria – D	0.020	+3.55	0.7910	0.5830
Geometria – E	0.020	+3.58	0.7760	0.6020

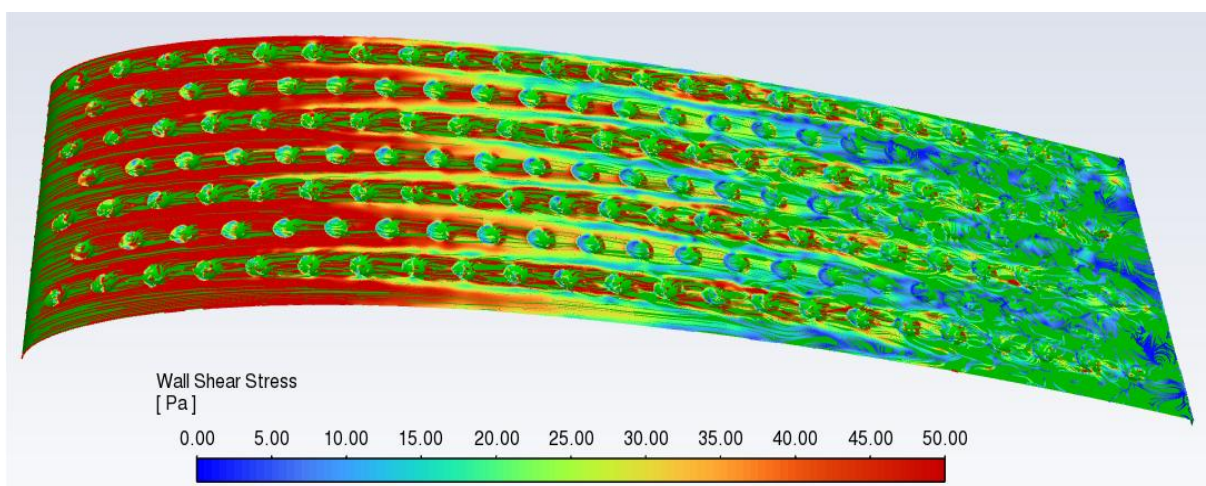
Tabuľka 17 Výsledky odporového koeficientu resp. odporovej sily pre optimalizované geometrické varianty pre uhol nábehu  $\alpha = 12$  stupňov a hybridný model turbulencie SBES

	$C_D$ [–]	$\Delta C_D$ [%]	Tlaková zložka odporovej sily [N]	Trecia zložka odporovej sily [N]
Geometria – C	0.0306	-6.9	1.536	0.54
Geometria – D	0.0320	-2.15	1.671	0.51
Geometria – E	0.0313	-4.48	1.605	0.53

V Ďalších 3 podkapitolách budú podrobnejšie rozobrané 3 geometrické varianty (Geometria A, Geometria C, Geometria E) . Geometria A bude podrobnejšie rozobraná aj keď táto varianta vyšla z pohľadu odporového koeficientu najhoršie. Dôvod bol ten, že táto geometrická varianta má parameter  $d/D$  na hranici odporúčanych hodnôt rešerše (10%), a zámer bol mať porovnanie charakteru prúdenia aj pre túto hodnotu. Samozrejme potom bude podrobnejšie analyzovaná aj geometrická varianta, ktorá vyšla z CFD simulácií najlepšie t.j. Geometria C a na záver bude rozobraná varianta so zmenou geometrie tvaru jamky z kruhového na elipsový tvar t.j. Geometria E.

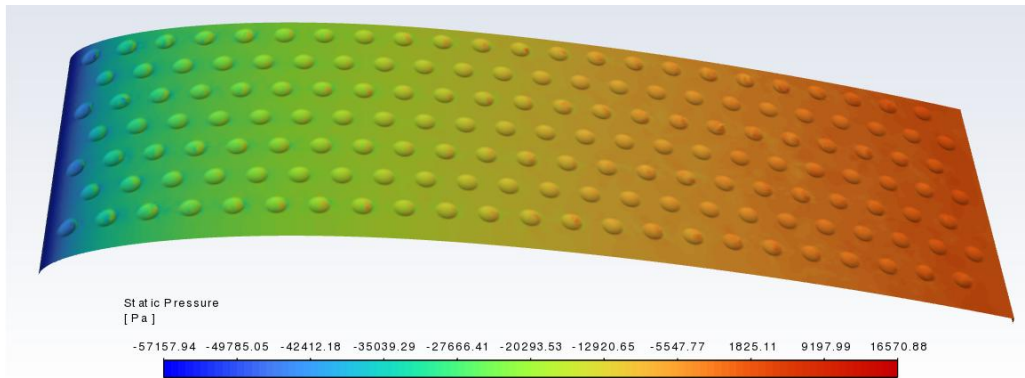
### 5.3.2 Geometria A

Ako bolo uvedené skôr táto geometrická varianta bude popísaná hlavne z dôvodu vizualizácie charakteru prúdenia v jamkách aj pre túto hodnotu parametra  $d/D = 10\%$  a porovnanie zmien, ktoré nastanú oproti optimálnejšej hodnote  $d/D = 5\%$ . Inak táto geometrická varianta bola testovaná ako úplne na začiatku pre iba optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  a vyšla zo všetkých testovaných variant najhoršie. Odporový koeficient v prípade tejto geometrickej varianty vyšiel o približne 12% väčší oproti prípadu s hladkým profilom.



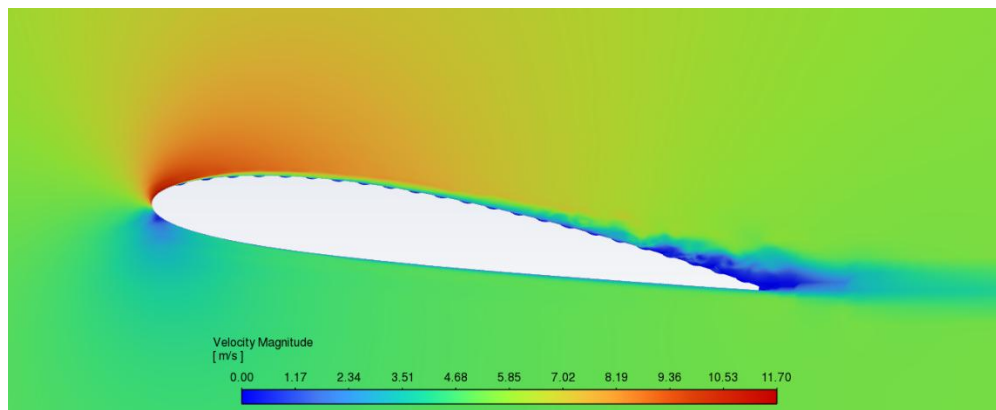
Obrázok 68 Stenové šmykové napätie  $\tau_w$  pre uhol nábehu 8 stupňov - Geometria A

Obrázok 68 znázorňuje stenové šmykové napätie  $\tau_w$  na povrchu profilu. Podobne ako v prípade geometrickej varianty Sigma (Obrázok 52) tak tu je vidieť, že povrchová modifikácia ovplyvňuje prúdenie v blízkosti profilu. Avšak v tomto prípade sa javí, že na začiatku profilu toto ovplyvnenie nie až také zásadné. Prúdenie sa začína chovať chaoticky až v oblastiach na konci tohto profilu. Síce to stále nie je ideálne, tak už iba z tohto obrázka je vidno zlepšenie iba znížením parametra  $d/D$  a priblížením k optimálnej hodnote.

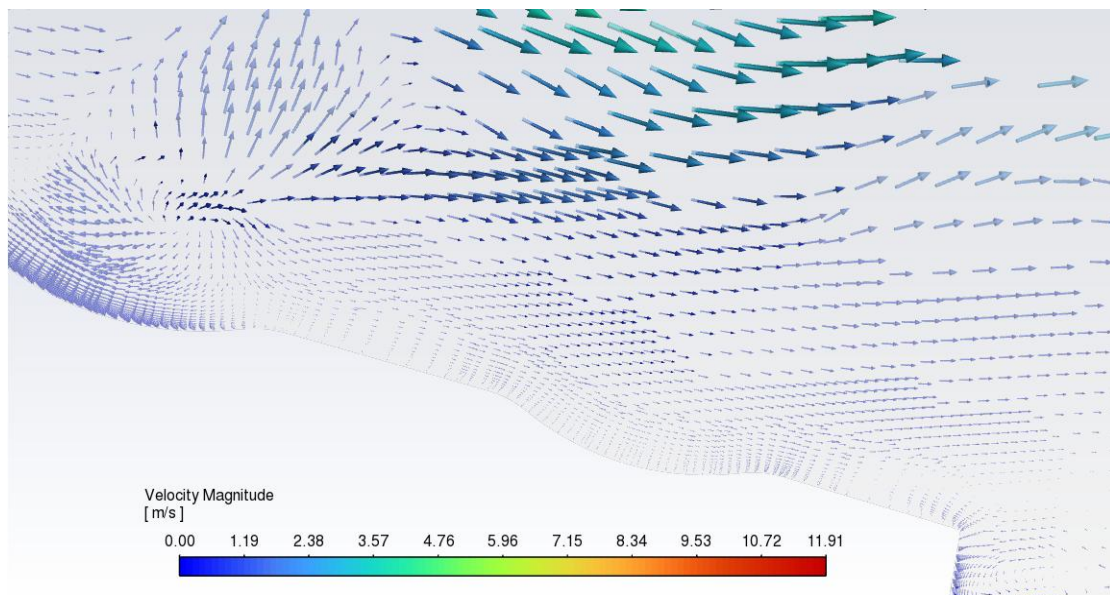


Obrázok 69 Statický tlak na povrchu profilu - geometria A

Statický tlak (Obrázok 69) na povrchu profilu pre túto geometrickú variantu sa chová podobne ako v prípade už skúmanej geometrickej varianty - Sigma. Stále tu je vidieť lokálny nárast tlaku pri konci jamky povrchovej modifikácie.



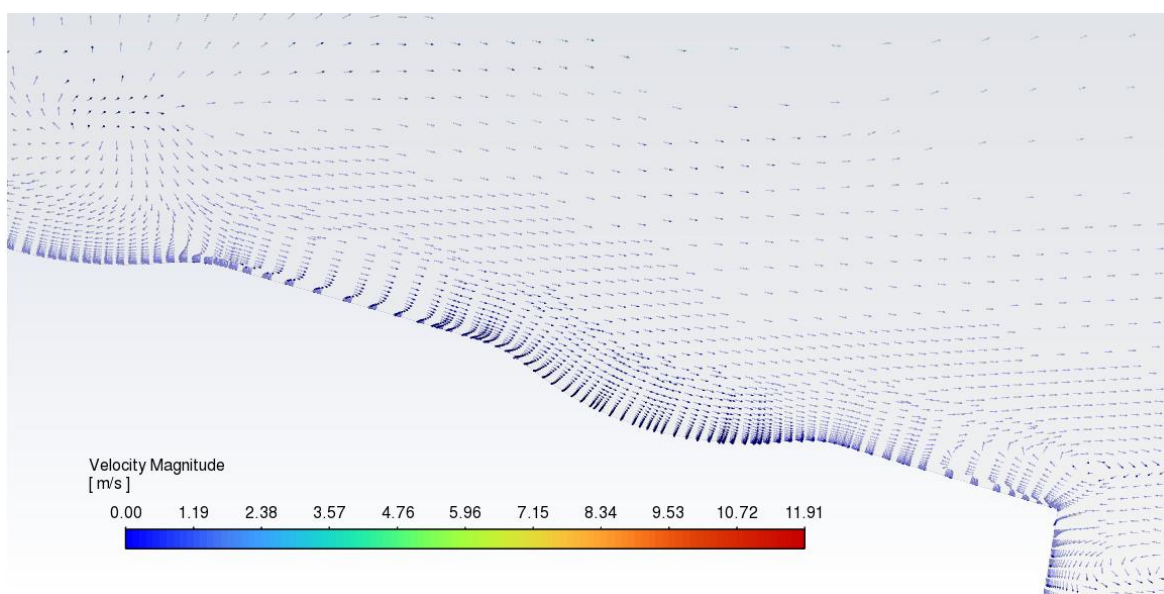
Obrázok 70 Absolútna zložka rýchlosti - Geometria A



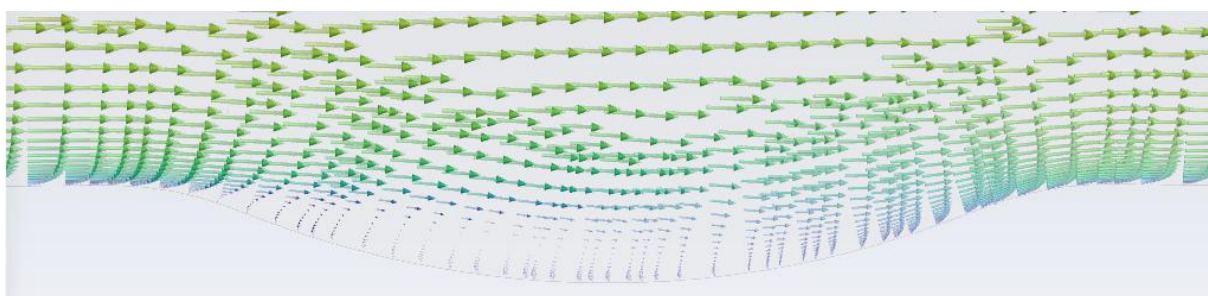
Obrázok 71 Vektory rýchlosti v oblasti odtokovej hrany profilu – Geometria A

Pre lepšie pochopenie prúdenia v oblasti jamiek povrchových modifikácií boli vykreslené vektory rýchlosti (Obrázok 71 a Obrázok 72) a aj absolútna zložka rýchlosti (Obrázok 70) vykreslené v rovine prechádzajúcej stredom jamky. Absolútne zložky rýchlosti indikujú velice malé zmenšenie oblasti separácie prúdenia oproti geometrickej variante Sigma. Vektory rýchlosti boli vykreslené opäť iba v blízkosti odtokovej hrany. Tu je vidieť, že v oblasti predposlednej jamky je prúdenie odtrhnuté a výraznom spôsobom narušuje aj prúdenie tesne nad profilom, kde tento jav nebol až taký výrazný ako v prípade geometrickej varianty Sigma.

Na druhej strane v takto geometricky navrhnutých jamkách je výrazne zlepšenie charakteru prúdenia mimo oblasti odtokovej hrany. Prúdenie v takto tvarovaných jamkách už nie je kompletne separované, ale separácia prúdenia nastáva iba prvej polovici jamky (Obrázok 73). Tento fakt je možno potvrdiť aj výrazne nižšou hodnotou tlakovej zložky odporovej sily (Tabuľka 16), ktorá priamo súvisí s veľkosťou oblasti separovaného prúdenia.



Obrázok 72 Normalizované vektory rýchlosti v oblasti odtokovej hrany profilu - Geometria A

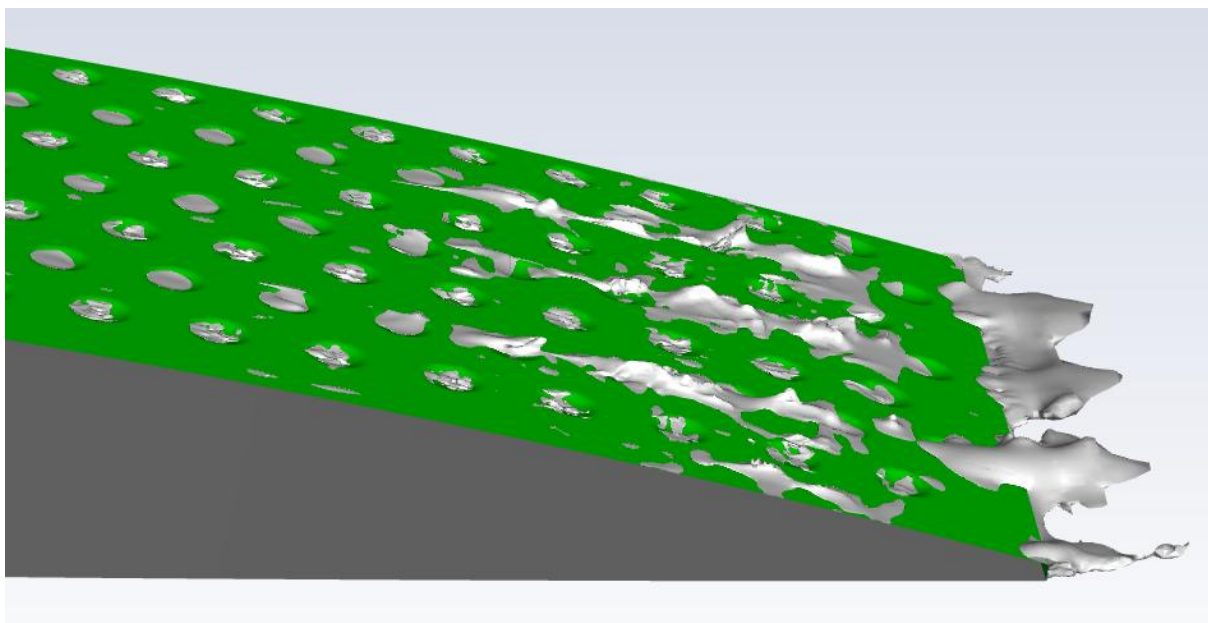


Obrázok 73 Detail vektorov rýchlosti v oblasti mimo odtokovej hrany profilu - Geometria A

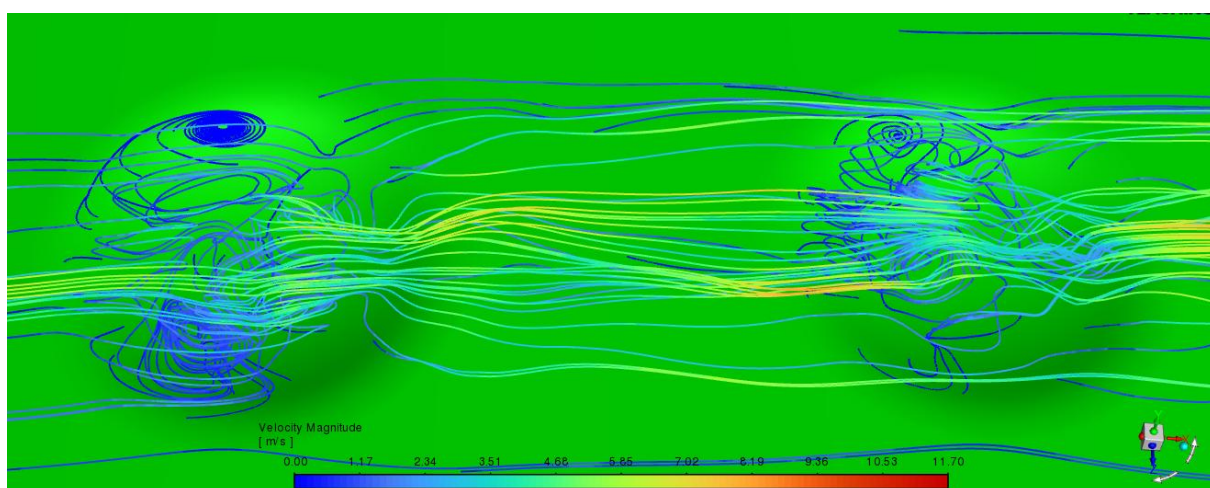
Na ďalšie overenie tohto faktu bola opäť vytvorená aj izoplocha veľmi malej zápornej rýchlosti, ktorá by mala indikovať hranicu oblasti, v ktorej sa jedná o separované prúdenie (Obrázok 74). Z tohto obrázku je vidieť, že v oblasti predposlednej jamky dochádza k výraznejšej tvorbe oblasti separovaného prúdenia, ako bolo naznačené už vytvorenými vektormi rýchlosti. Zaujímavé je, že za touto oblasťou prúdenie takmer dokonale kopíruje poslednú vytvorenú jamku povrchovej modifikácie a prúdenie sa odtrháva až v úplnej blízkosti odtokovej hrany profilu.

Ďalej toto vykreslenie izoplochy potvrdzuje aj fakt, že v prípade takto geometricky tvarovaných jamiek dochádza k separácii prúdenia iba približne v prvej polovici.

Ako posledný krok bude porovnanie charakteru prúdenia v jamke s predpokladanými typmi prúdenia z rešeršnej časti práce (Obrázok 24 a Obrázok 26) pomocou vykreslenia prúdnic (Obrázok 75). Z tohto obrázku je vidieť, že charakter prúdenia sa už približuje k optimálnemu obtekaniu jamiek, ale stále sa tvorí lokálne zavírenie hlavne po okrajoch jamiek a na začiatku, kde sa stále jedná ešte o separované prúdenie. Toto približne odpovedá vykresleným charakterom prúdenia na Obrázok 24 – 3, kde po okrajoch doliku dochádzalo k lokálnemu zavíreniu, alebo pre vyšší geometrický parameter  $d/D$  (Obrázok 26 E,F)



Obrázok 74 Izoplocha záprnej rýchlosti v smere  $x$  - Geometria A

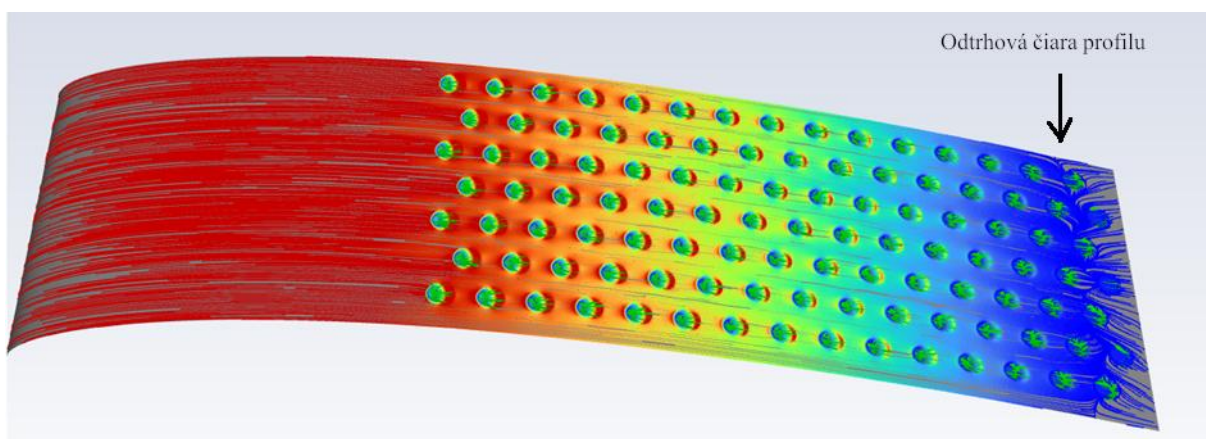


Obrázok 75 Vykreslené prúdnice v oblasti jamiek - Geometria A

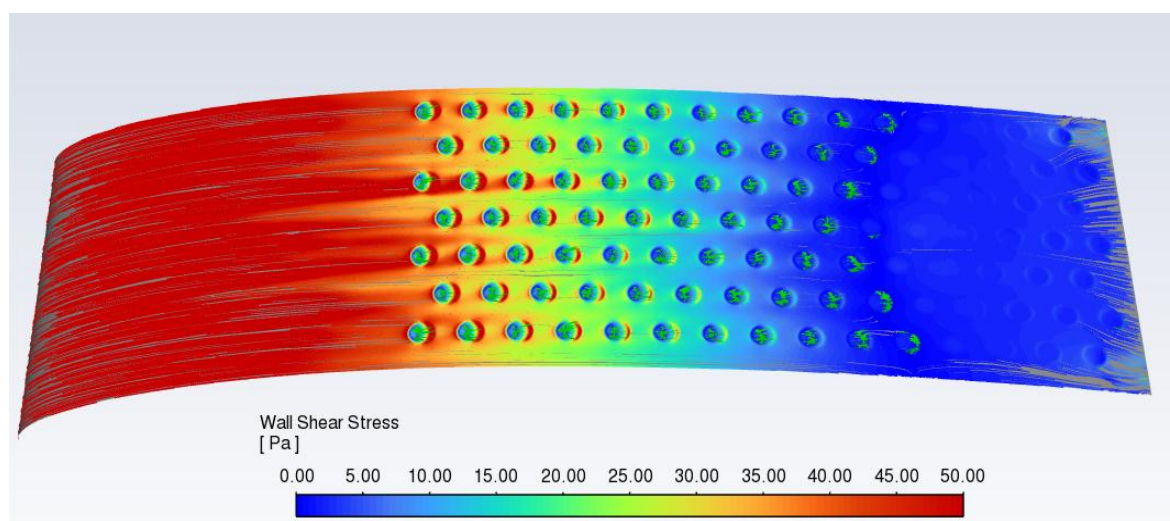
Celkovo táto geometrická varianta nie je ešte úplne optimálna, ale je tu vidieť zlepšenie charakteru prúdenia pomocou zmeny iba jedného geometrického parametru ( $d/D$ ) na hranicu optimálnej odporúčanej hodnoty a pri zachovaní všetkých ostatných geometrických rozmerov ako v prípade geometrie - Sigma. Preto v ďalšej podkapitole bude tento geometrický parameter ešte znížený na optimálnu hodnotu a analyzované o akú zmenu sa bude jednať.

### 5.3.3 Geometria C

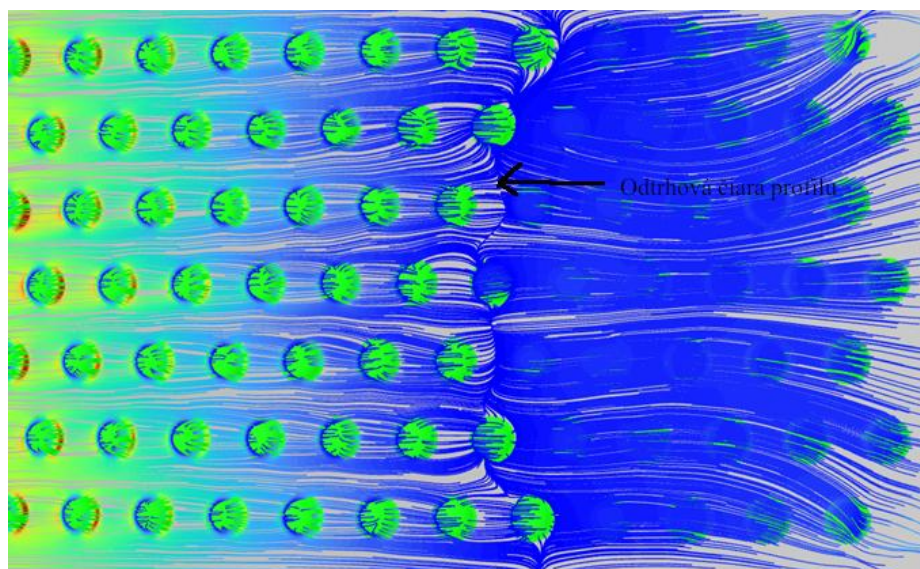
V tejto podkapitole bude podrobnejšie rozobraná geometrická varianta, ktorá z pohľadu výsledného odporového koeficientu vyšla zo všetkých najlepšie. Jednalo sa o geometriu, kde začiatok profilu bol hladký bez žiadnych povrchových modifikácií a geometrický parameter  $d/D = 5\%$ . Táto varianta bola testovaná pre optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$ , tak aj pre mimooptimálny uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$ . Pre optimálny uhol nábehu takto geometricky navrhnutá varianta stále nedokázala znížiť odporový koeficient oproti hladkému profilu, ale zo všetkých variant tento nárast bol najmenší, konkrétne  $\Delta C_D = +1.45\%$  (Tabuľka 16). Na druhej strane pre testovanie pri mimooptimálnom uhle nábehu došlo k docela veľkému zníženiu odporového koeficientu  $\Delta C_D = -6.9\%$  (Tabuľka 17)



Obrázok 76 Odrhová čiara profilu pre optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria C



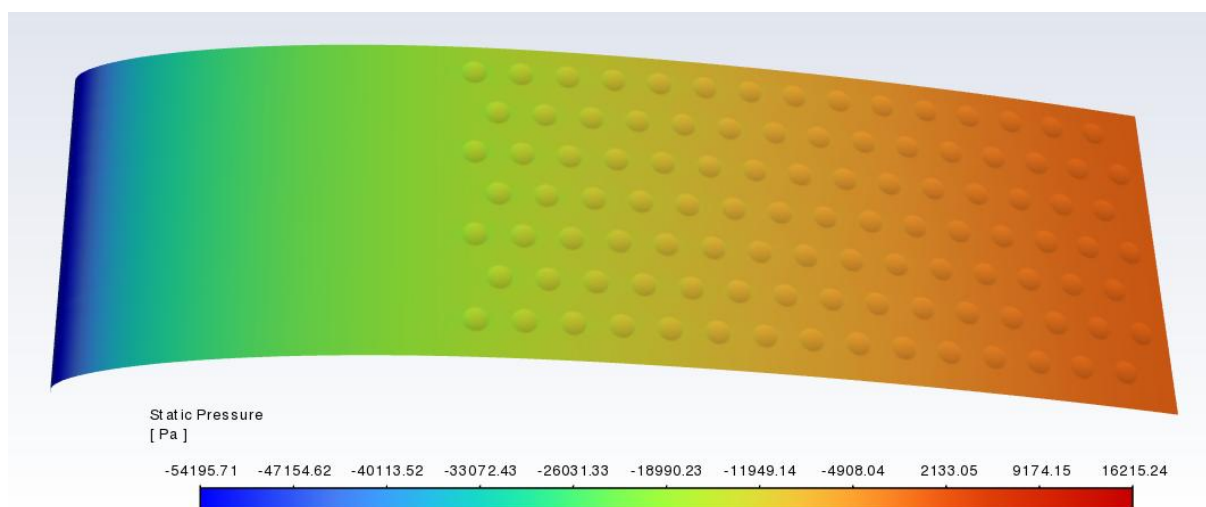
Obrázok 77 Odrhová čiara profilu pre mimooptimálny uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria C



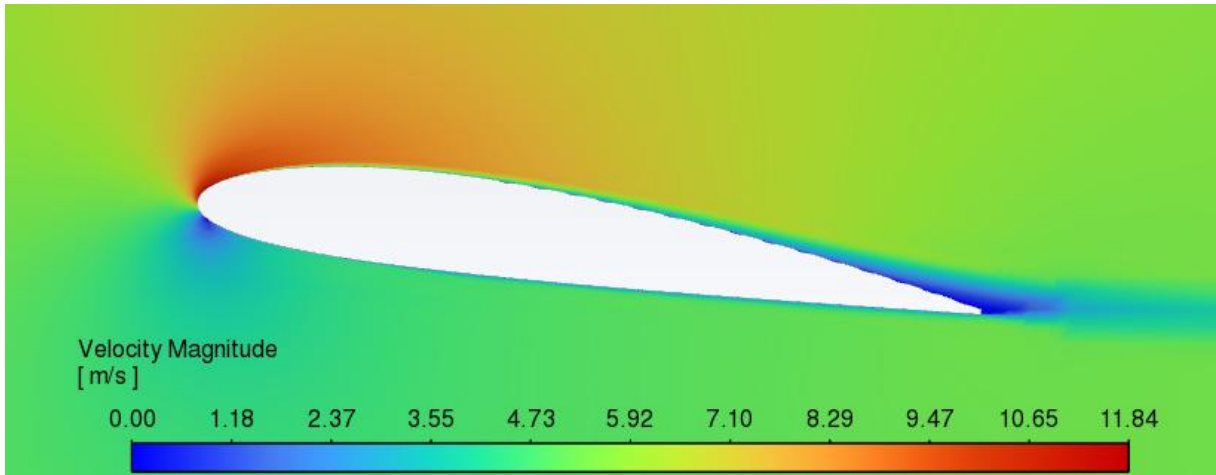
Obrázok 78 Detail odtrhovej čiary profilu pre mimooptimálny uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria C

Obrázok 76 a Obrázok 77 znázorňujú vykreslené stenové šmykové napätie  $\tau_w$  na povrchu profilu. Už z týchto obrázkov je vidieť, že povrchová modifikácie v tomto prípade zásadnejšie narušujú prúdenie okolo profilu. Pre uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  je vidieť docela dobre odtrhovú čiaru profilu t.j. miesto, kde  $\tau_w = 0$ . Táto oblasť sa nachádza až v blízkosti odtokovej hrany, približne v oblasti poslednej jamky povrchovej modifikácie. Naopak pre uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$ , nie je dobre vidieť táto oblasť, preto bol pre vizualizáciu tejto oblasti vykreslený detailný pohľad (Obrázok 78). Z tohto detailu je vidieť, že odtrhovú čiaru profilu vzniká oveľa skôr pre väčší uhol nábehu.

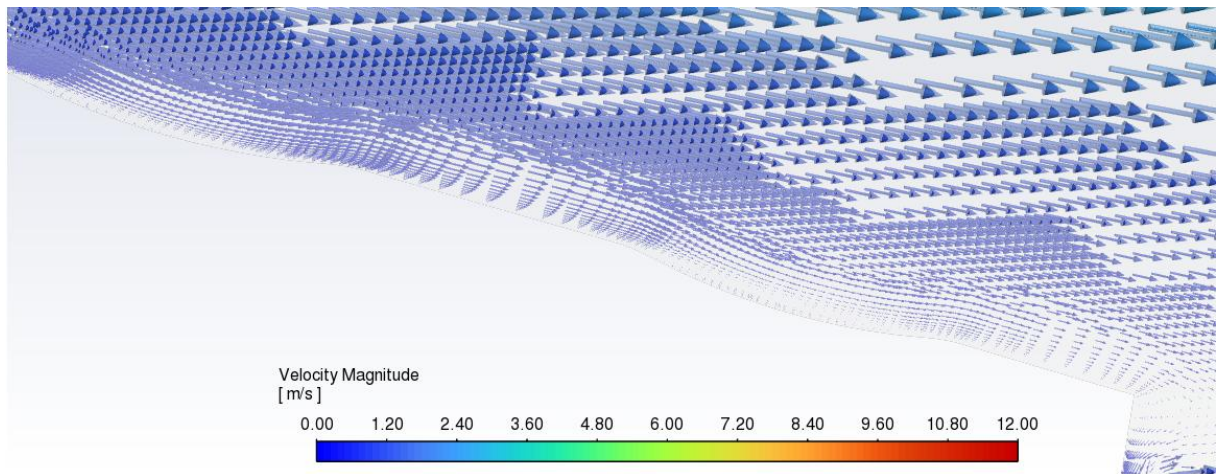
Keďže vykreslenie statického tlaku na povrchu profilu je skoro rovnaké, tak bude vykreslené iba pre prípad optimálneho uhlu nábehu  $\alpha = 8^\circ$  (Obrázok 79). Principiálne správanie statického tlaku je rovnaké ako pre ostatné geometrické varianty. Jediný rozdiel, ktorý tu možno nájsť je, že pozorovaný lokálny nárast tlaku na konci jamiek v prípade už rozoberaných geometrických variant vyzerá, že sa tu nevyskytuje.



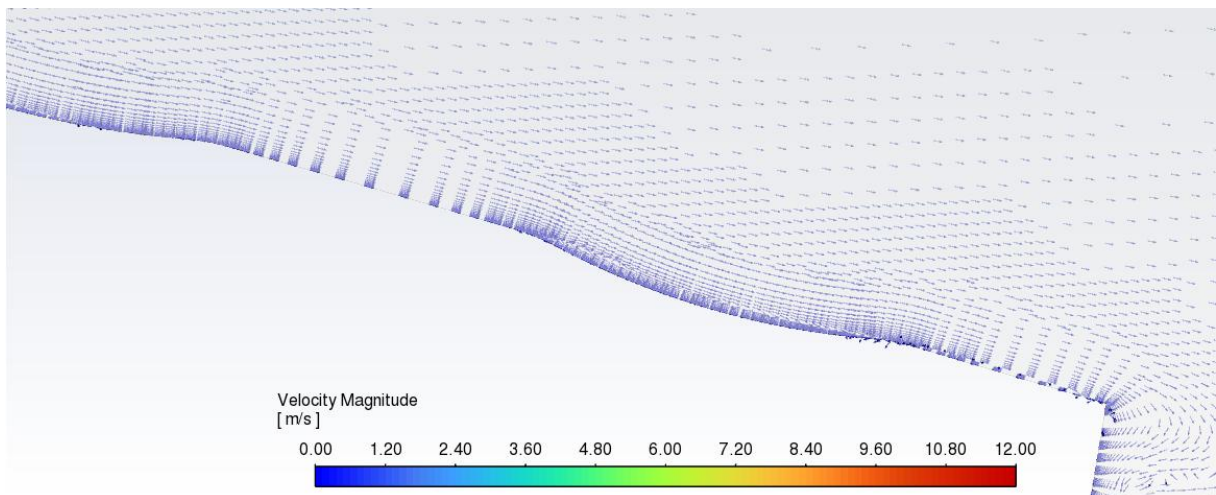
Obrázok 79 Statický tlak na povrchu profilu pre optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$



Obrázok 80 Absolútna zložka rýchlosti vykreslená v rovine pre  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria C

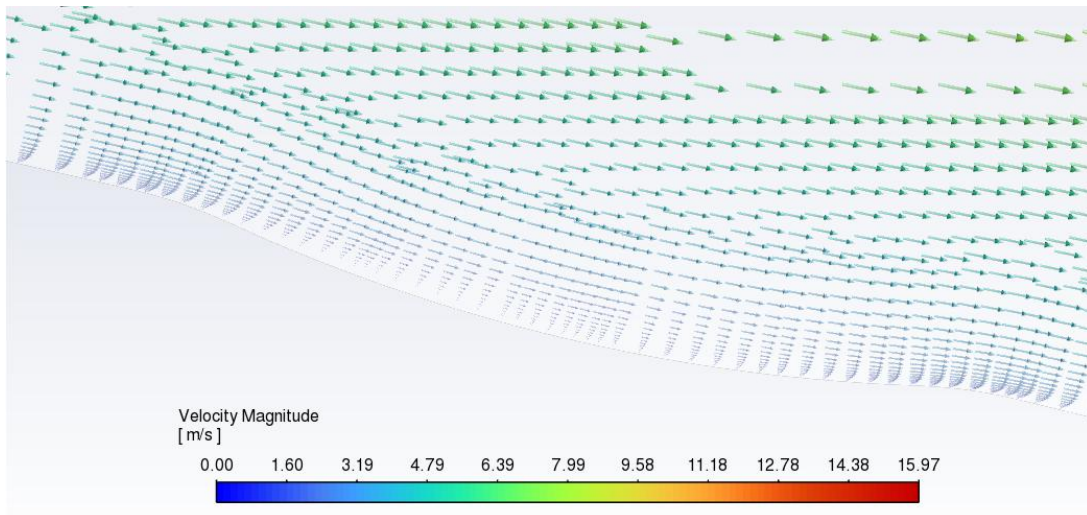


Obrázok 81 Vektory rýchlosti vykreslené v oblasti odtokovej hrany v rovine pre  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria C



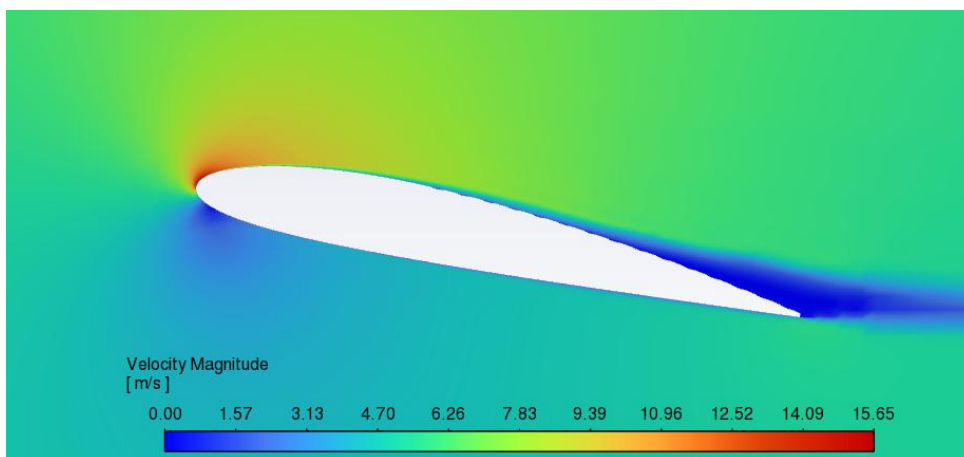
Obrázok 82 Normalizované vektory rýchlosti v oblasti odtokovej hrany vykreslené v rovine pre  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria C

Pre lepšie pochopenie prúdenia v jamkách povrchových modifikáciách boli opäť vykreslené vektory rýchlosti v blízkosti odtokovej hrany v rovine (Obrázok 81 a Obrázok 82) a absolútna zložka rýchlosti (Obrázok 80). Potvrdzujú už predpoklad s vykreslenia stenových šmykových napätí na povrchu profilu, že separácia prúdenia pre optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  nastáva až v blízkosti poslednej jamky. V tejto poslednej jamke už dochádza k väčšej separácii prúdenia a separácia na povrchu medzi jamkami nastáva až za poslednou jamkou. Prúdenie v jamkách mimo oblasti odtokovej hrany (Obrázok 83) už docela dobre kopíruje tvar jamky a vzniká minimálna oblasť separácie prúdenia na začiatku jamky. Táto oblasť sa samozrejme postupne zväčšuje smerom k odtokovej hrane. Toto správanie je rovnaké pre uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$ , tak aj pre uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$ .

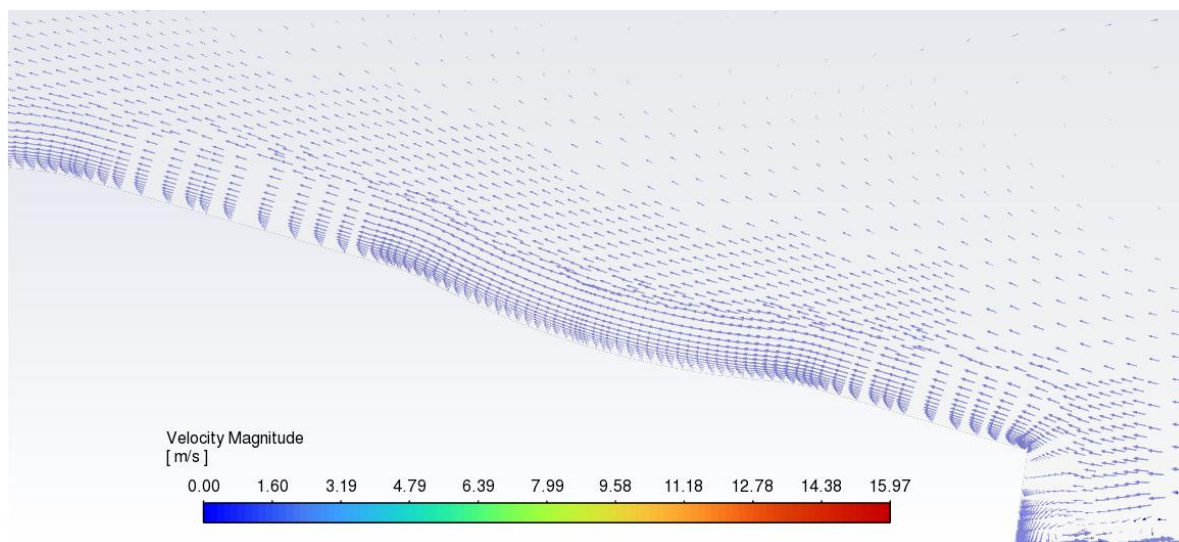


Obrázok 83 Obtekanie doliku povrchovej modifikácie v oblasti mimo odtokovej hrany – Geometria C

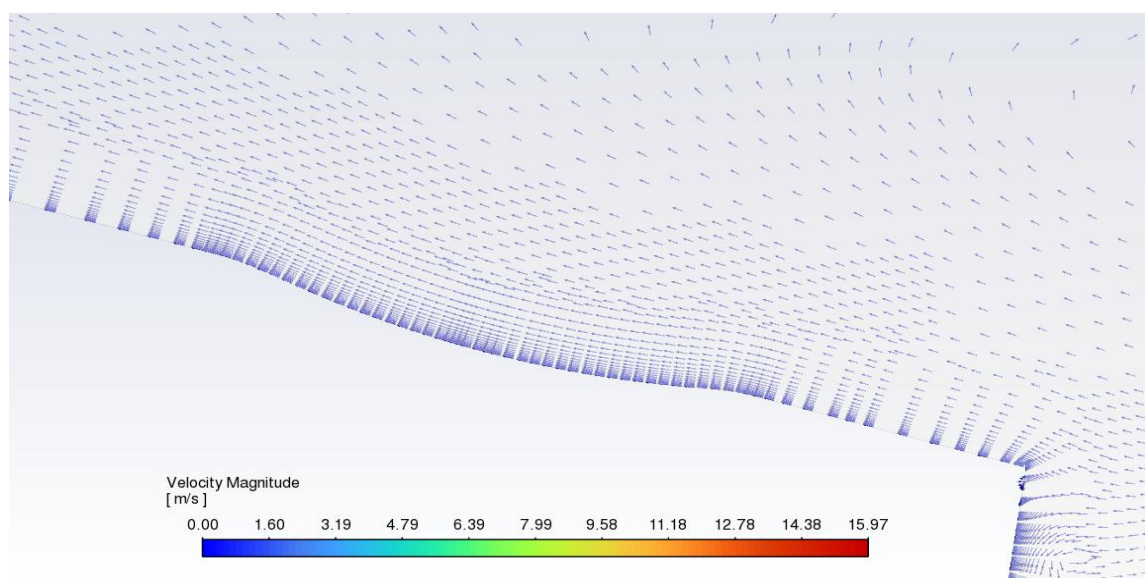
Vektory rýchlosti v oblasti odtokovej hrany a absolútna zložka rýchlosti v tej istej rovine pre už uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$  možno vidieť na Obrázok 84, Obrázok 85 a Obrázok 86. Tieto obrázky potvrdzujú, že pre tento mimooptimálny uhol nábehu nastáva separácia prúdenia oveľa skôr a v jamkách, ktoré sa nachádzajú v blízkosti odtokovej hrany profilu sa jedná o kompletne separované prúdenie. Charakter prúdenia v jamkách ale mimo tejto oblasti je rovnaký ako pre uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  t.j. prúdenie docela dobre kopíruje tvar doliku (Obrázok 83).



Obrázok 84 Absolútna zložka rýchlosti vykreslená v rovine pre  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria C

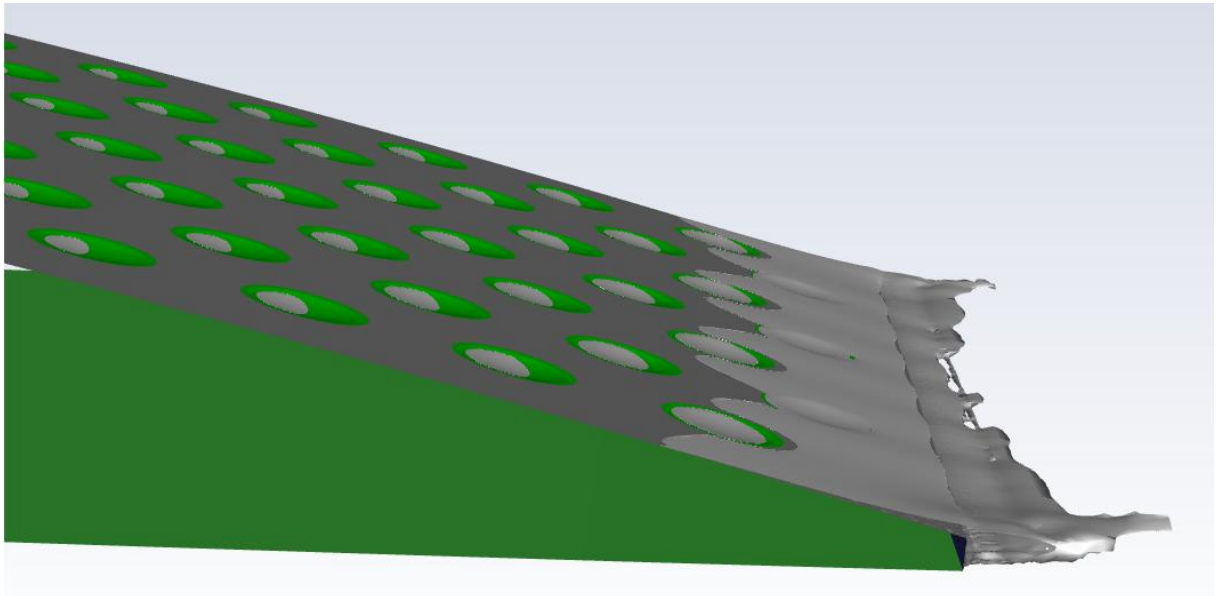


Obrázok 85 Vektory rýchlosti vykreslené v oblasti odtokovej hrany v rovine pre  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria C

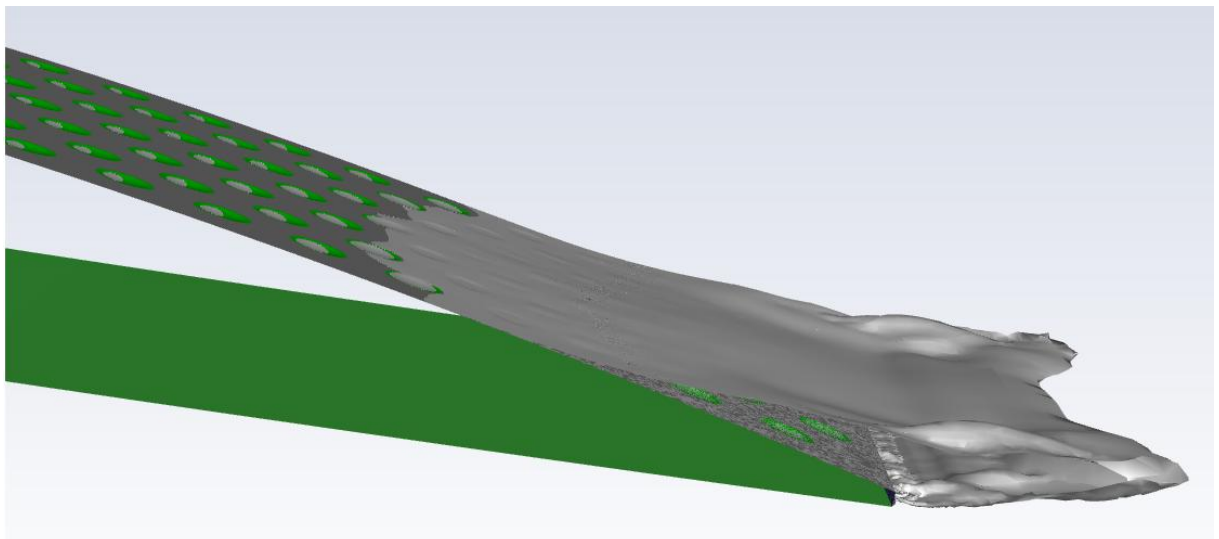


Obrázok 86 Normalizované vektory rýchlosti v oblasti odtokovej hrany vykreslené v rovine pre  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria C

Tieto oblasti separovaného prúdenia budú naznačené v 3D vytvorením izoplochy veľmi malej zápornej rýchlosti v smere  $x$ , kde táto izoplocha bude indikovať začiatok separácie prúdenia a oblasť medzi touto plochou a samotným profilom by mala byť oblasť separácie prúdenia. Pre optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  toto naznačenie pomocou izoplochy (šedá farba) potvrdzuje, že separácia začína až v miestach, kde sa nachádza posledná jamka (Obrázok 87). Je tu dobre vidieť aj spomenutý fakt, že separácia prúdenia v jamkách sa zvyšuje čím bližšie sa nachádzajú k odtokovej hrane profilu. Pre mimooptimálny uhol nábehu je tu jasne vidieť, že oblasť separácie prúdenia začína skôr a je výraznejšia (Obrázok 88). Stále je tu ale vidieť postupný nárast separácie prúdenia v jamkách smerom k odtokovej hrane.

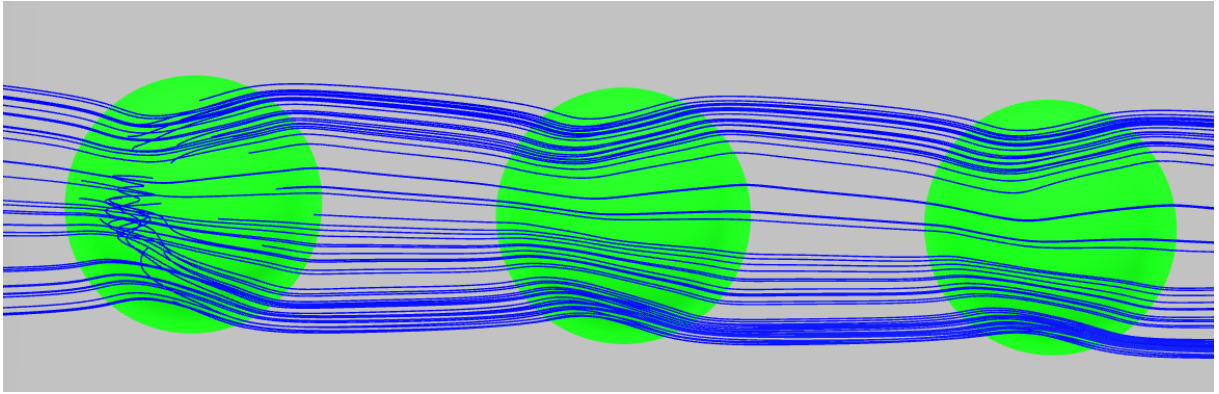


Obrázok 87 Izoplocha zápornej rýchlosti v smere  $x$  pre  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria C



Obrázok 88 Izoplocha zápornej rýchlosti v smere  $x$  pre  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria C

Ako posledný krok budú vykreslené prúdnice v jamkách (Obrázok 89) pre porovnanie charakteru prúdenia s literatúrou. Prúdenia sa chová pre takto geometricky tvarované jamky ( $d/D = 5\%$ ), že na vstupe do jamiek sa blíži k stredu a približne od polovice jamky sa od tohto stredu oddiaľuje. Nie je tu vidieť žiadne zavírenie po okrajoch jamiek ako v prípade Geometria A. Nachádza sa tu iba jemné zavírenie na vstupe do jamky, čo môže odpovedať lokálnej separácii prúdenia. Celkovo prúdenie docela dobre kopíruje takto geometricky tvarované jamky a dokonca odpovedá charakteru prúdeniu z literatúry pre  $d/D = 5\%$  (Obrázok 24- 1 a Obrázok 26 A),C) )

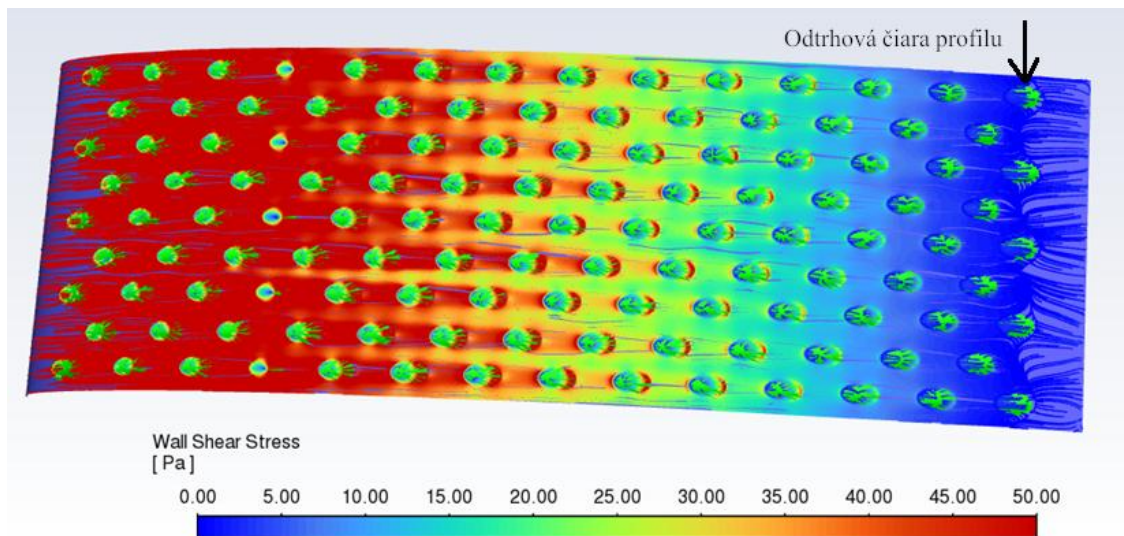


Obrázok 89 Charakter prúdenia v jamkách znázornený pomocou prúdnic – Geometria C

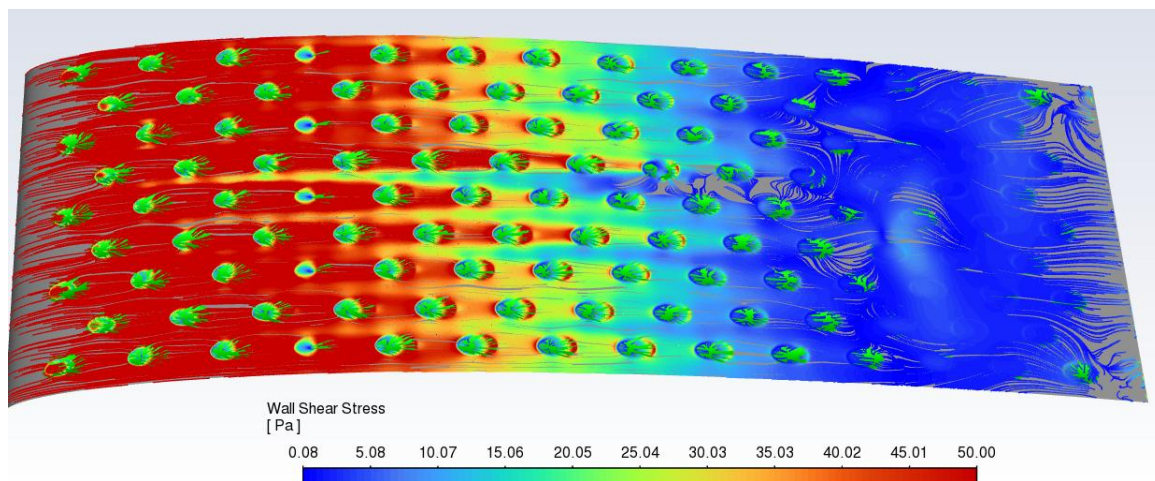
Táto geometrická varianta či už z pohľadu odporového koeficientu alebo charakteru prúdenia sa javí ako najlepšia spomedzi testovaných geometrických variant. Pre optimálny uhol nábehu síce pomocou takejto povrchovej modifikácie nedošlo k redukcii odporového koeficientu, ale iba k docela nízkemu nárastu 1.45 %. To mohlo byť spôsobené aj tým, že sa jednalo o optimálny stav a negatívne javy ako separácia prúdenia neboli výrazné, tým pádom nemohlo dôjsť k výraznejšie ovplyvneniu týchto negatívnych javov. Na druhej strane pre mimooptimálny uhol nábehu došlo k výraznému zlepšeniu odporového koeficientu, konkrétne zníženie o približne 6.9 %. Došlo k zníženiu jak trecej zložky odporovej sily, tak aj tvarovej zložky odporovej sily, ktorá súvisí s oblasťou separácie prúdenia. Z tohto dôvodu môže byť takáto geometrická varianta povrchovej modifikácie zaujímavá možnosť ako redukovať odporový koeficient pri mimooptimálnych uhloch nábehov pri minimálnom náraste odporovej koeficientu pri optimálnom uhle nábehu.

### 5.3.4 Geometria E

Posledná povrchová modifikácia, ktorá bude podrobnejšie analyzovaná je varianta so zmenou tvaru jamky z kruhového na elipsový tvar. Táto varianta bola testovaná pre optimálny uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$ , tak aj pre mimooptimálny uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$ . Z pohľadu výsledného odporového koeficientu táto varianta vyšla o čosi horšie pre obidva uhly nábehu (Tabuľka 16, Tabuľka 17) ako predchádzajúca analyzovaná Geometria C, ale pre mimooptimálny uhol nábehu bolo opäť dosiahnuté zníženie odporového koeficientu  $C_D$ .

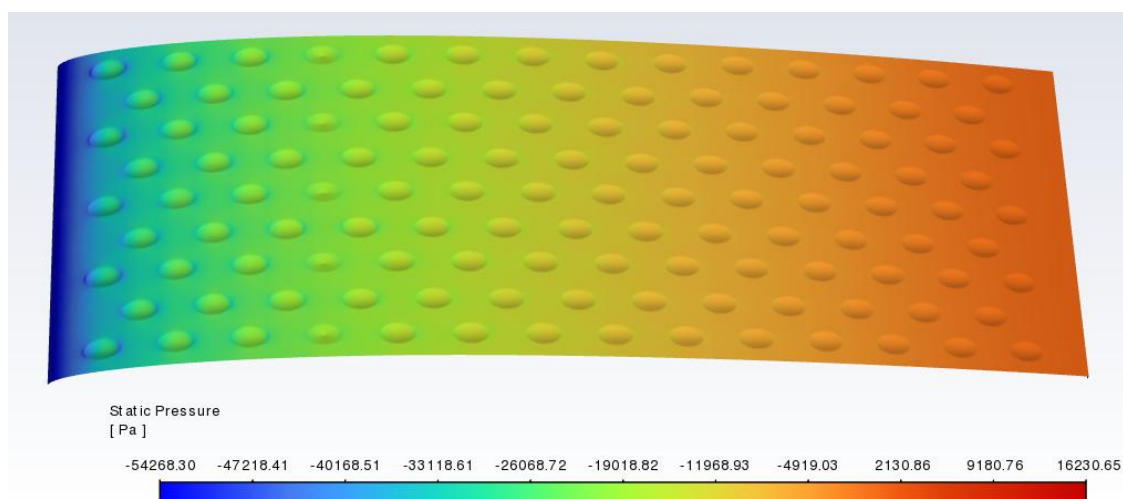


Obrázok 90 Stenové šmykové napätie  $\tau_w$  pre uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria E



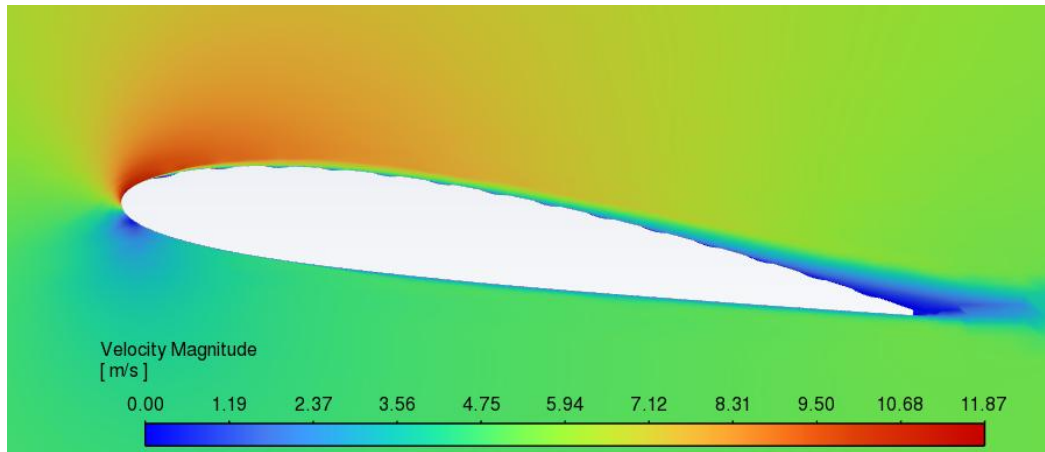
Obrázok 91 Stenové šmykové napätie  $\tau_w$  pre uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria E

Táto varianta povrchovej modifikácie bude analyzovaná podobne ako v predchádzajúcich 2 podkapitolách. Odtrhová čiara profilu t.j. miesto kde  $\tau_w = 0$ , je vykreslená pre obidva uhly nábehu (Obrázok 90 Obrázok 91). Pre  $\alpha = 8^\circ$  je opäť vidieť, že táto odtrhová čiara začína až v mieste, kde sa nachádza posledná jamka povrchovej modifikácie. Naopak pre  $\alpha = 12^\circ$  tento jav začína oveľa skôr a nie je to možné presne odčítať z vykreslenia stenového šmykového napätia na profile  $\tau_w$ . Podobne ako v predchádzajúcej geometrickej variante, tak vývoj statického tlaku na profile je približne rovnaký pre obidva uhly nábehu a bude vykreslený iba pre optimálny uhol nábehu (Obrázok 92).

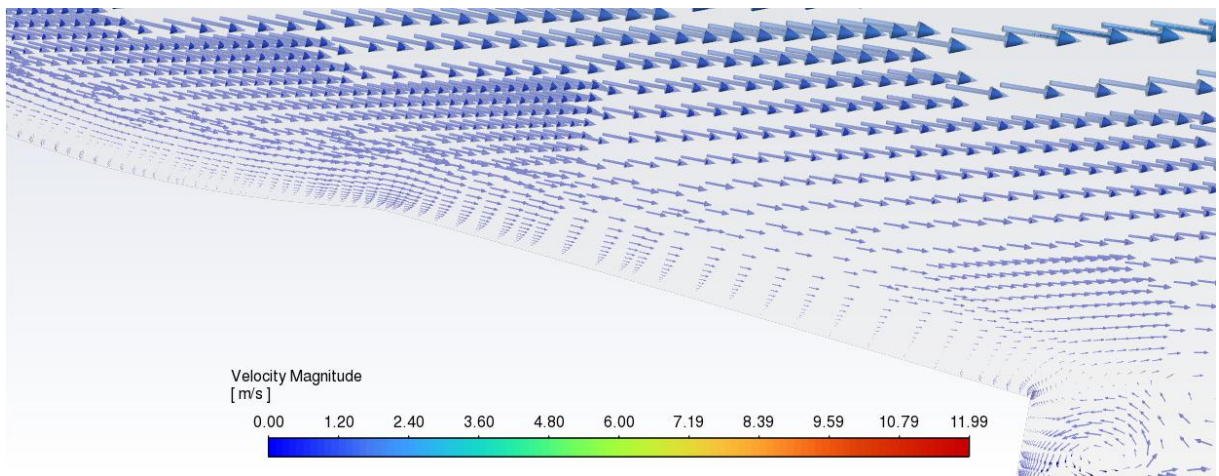


Obrázok 92 Statický tlak  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria E

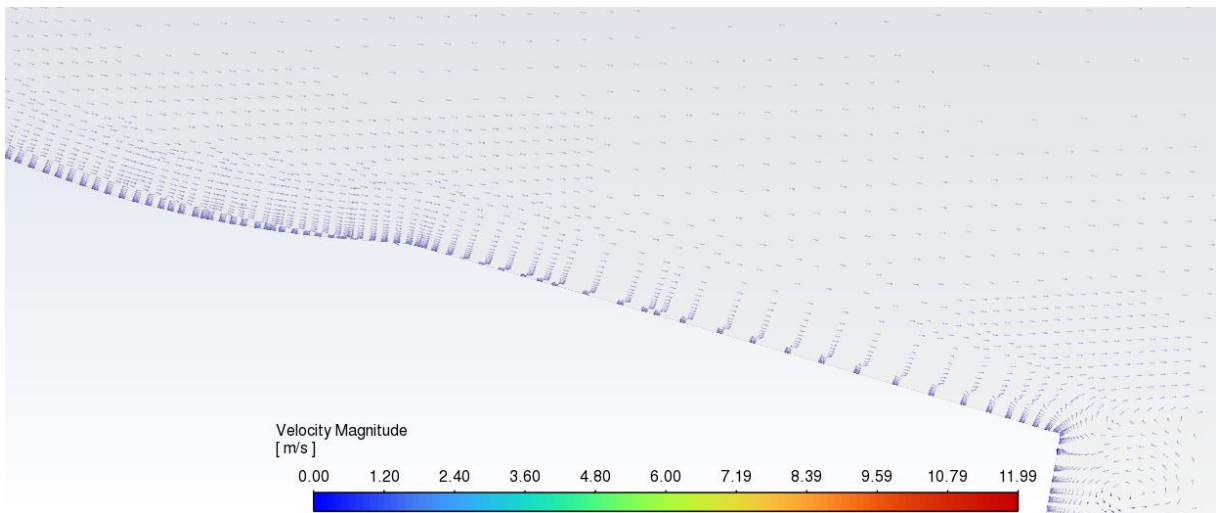
Vykreslením týchto parametrov z numerických simulácií nie je vytvorená dostatočná predstava o prúdení. Na podrobnejšiu predstavu o prúdení budú vykreslené vektory rýchlosti v rovine, izoplochy a pre zachyteniu charakteru prúdenia v jamke vykreslené prúdnice.



Obrázok 93 Absolútna zložka rýchlosti vykreslená v rovine pre  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria E

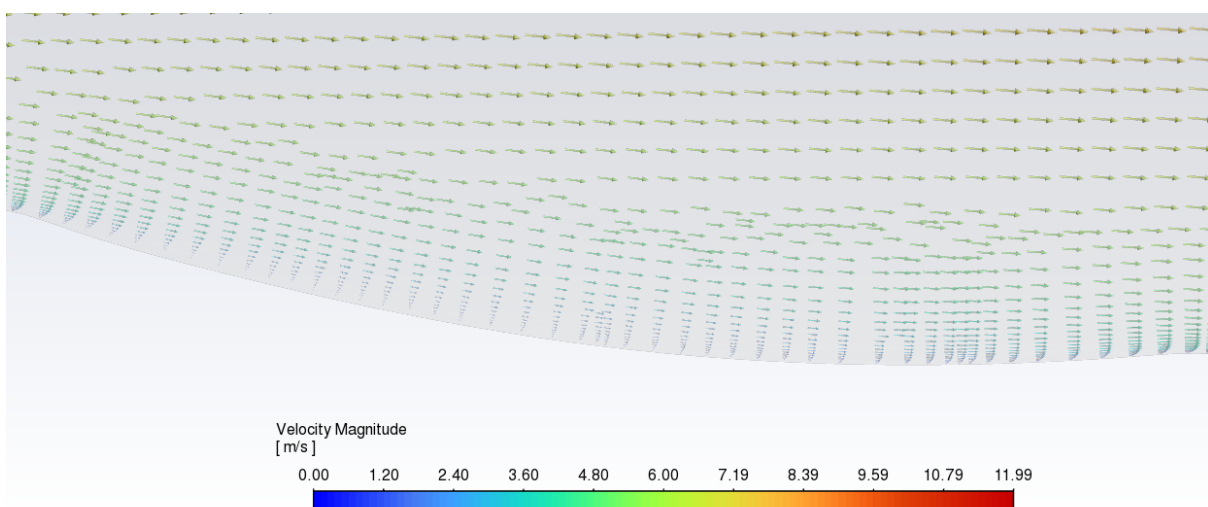


Obrázok 94 Vektory rýchlosti v oblasti odtokovej hrany profilu pre  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria E

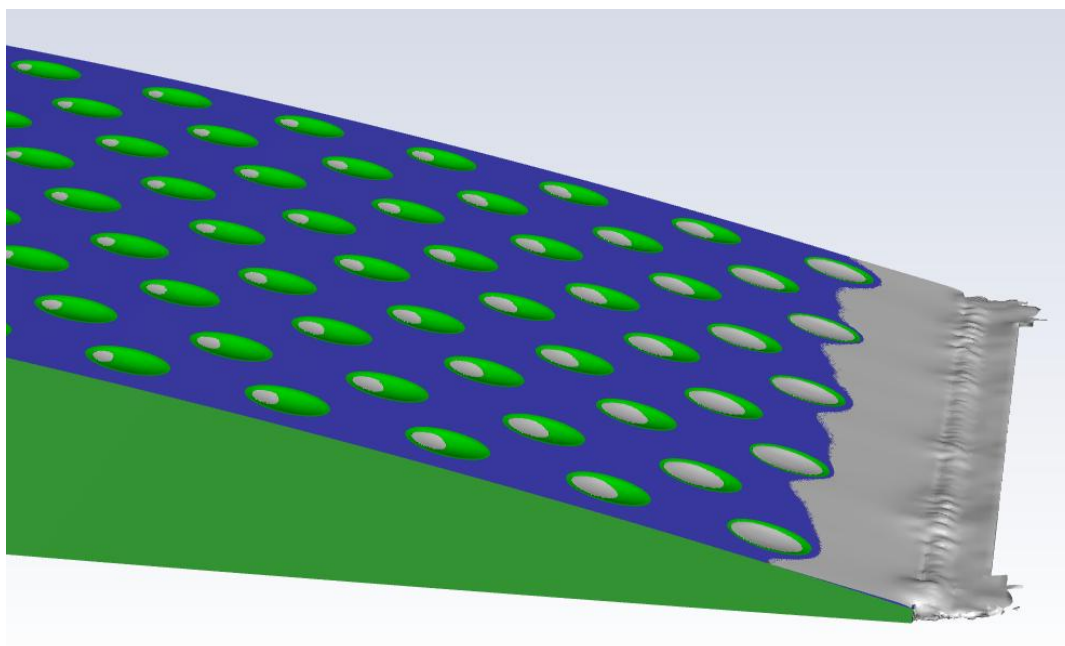


Obrázok 95 Normalizované vektory rýchlosti v oblasti odtokovej hrany profilu pre  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria E

Vektory rýchlosti v rovine (Obrázok 94 a Obrázok 95) a aj absolútna rýchlosť (Obrázok 93) potvrdzujú predpoklad už z skôr vykresleného stenového šmykového napätia  $\tau_w$ , že separácia prúdenia začína až v blízkosti poslednej jamky povrchovej modifikácie profilu. Táto oblasť separácie prúdenia začína v poslednej jamke a pokračuje až k odtokovej hrane profilu. Nejedná sa však o veľkú oblasť separácie prúdenia. Tieto vektory rýchlosti boli vykreslené až v oblasti odtokovej hrany profilu aby bola vidieť táto oblasť separácie prúdenia. Pre ukážku, ako prúdenie kopíruje tento geometrický tvar jamky boli vykreslené aj vektory rýchlosti v oblasti mimo odtokovej hrany profilu. Podobne ako v prípade 5.3.3, tak takto geometricky tvarovanú povrchovú modifikáciu prúdenie kopíruje docela dobre (Obrázok 96), iba na začiatku jamky vzniká malá oblasť separácie prúdenia, ktorá sa zvyšuje čím bližšie je k odtokovej hrane profilu. Tento jav je dobre vidieť aj z vykreslenia izoplochy veľmi malej zápornej rýchlosti v smere x (Obrázok 97), ktorá by mala indikovať začiatok separácie prúdenia.

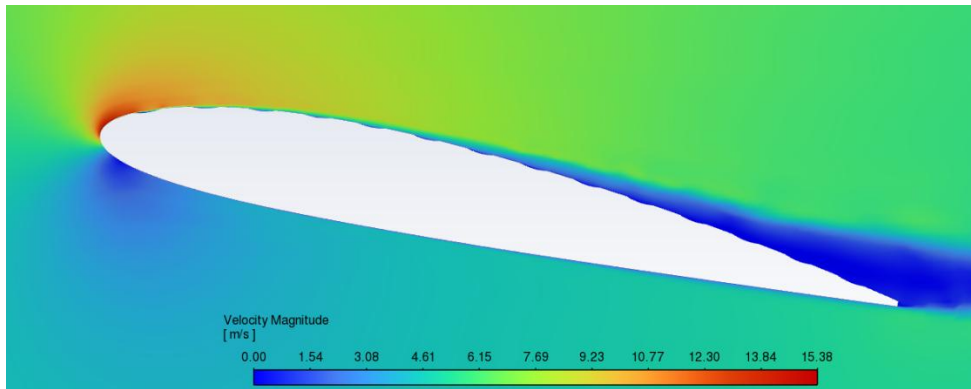


Obrázok 96 Detail prúdenia mimo odtokovej hrany profilu  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria E

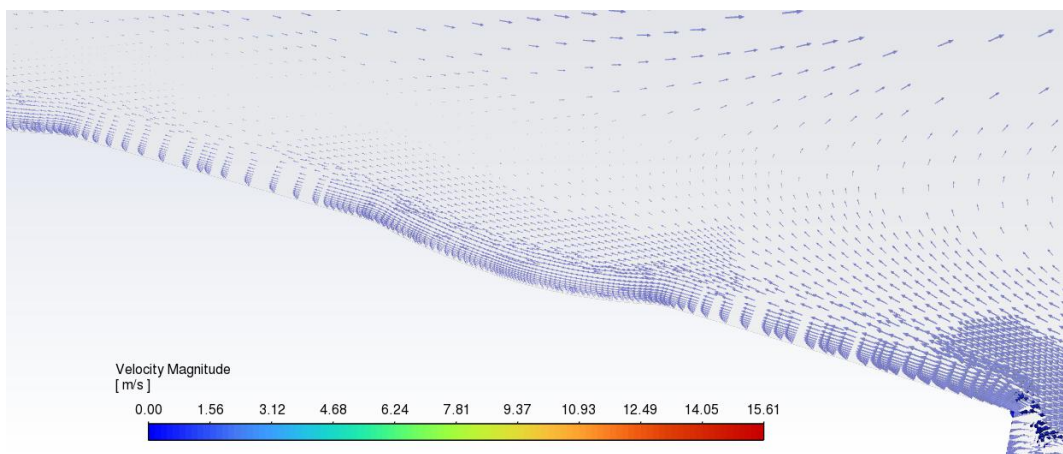


Obrázok 97 Izoplocha zápornej rýchlosti  $\alpha = 8^\circ$  - Geometria E

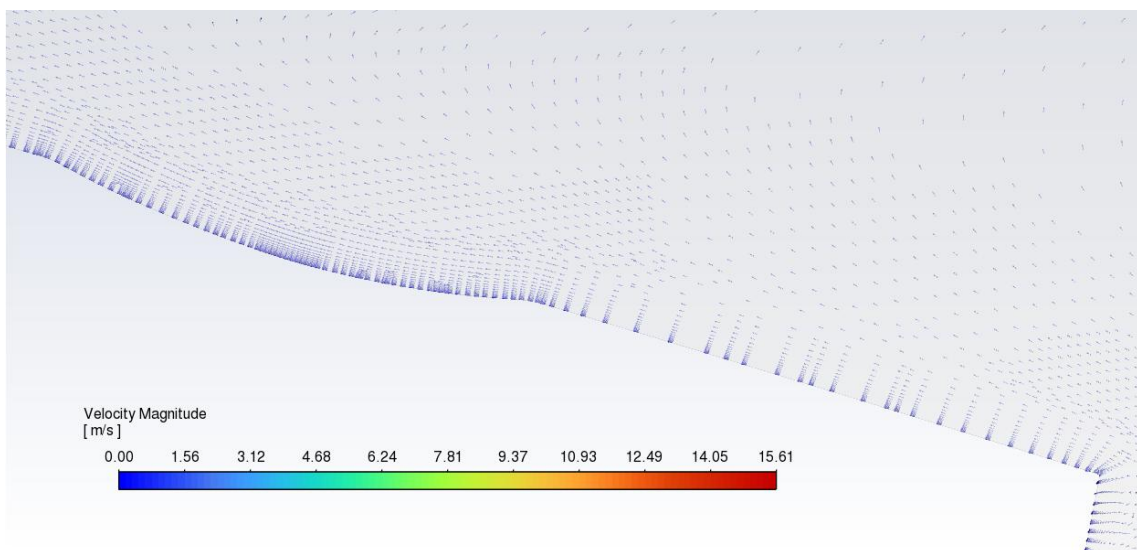
Rovnaký postup analyzovania prúdenia bol aplikovaný aj pre mimooptimálny uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$ . Opäť bol potvrdený fakt z vykreslenia stenového šmykového napätia na profile  $\tau_w$ , že oblasť separácie prúdenia nastáva oveľa skôr ako v prípade optimálneho uhlu nábehu. Vektory rýchlosti (Obrázok 99 a Obrázok 100) ukazujú, že v oblasti odtokovej hrany profilu je prúdenie separované jak oblasti povrchu medzi jamkami, tak aj v samotných jamkách povrchovej modifikácie. Obtekanie jamky mimo odtokovej hrany rovnako dobre kopíruje tvar dolíku ako v prípade pre optimálny uhol nábehu (Obrázok 96).



Obrázok 98 Absolútna rýchlosť vykreslená v rovine pre  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria E

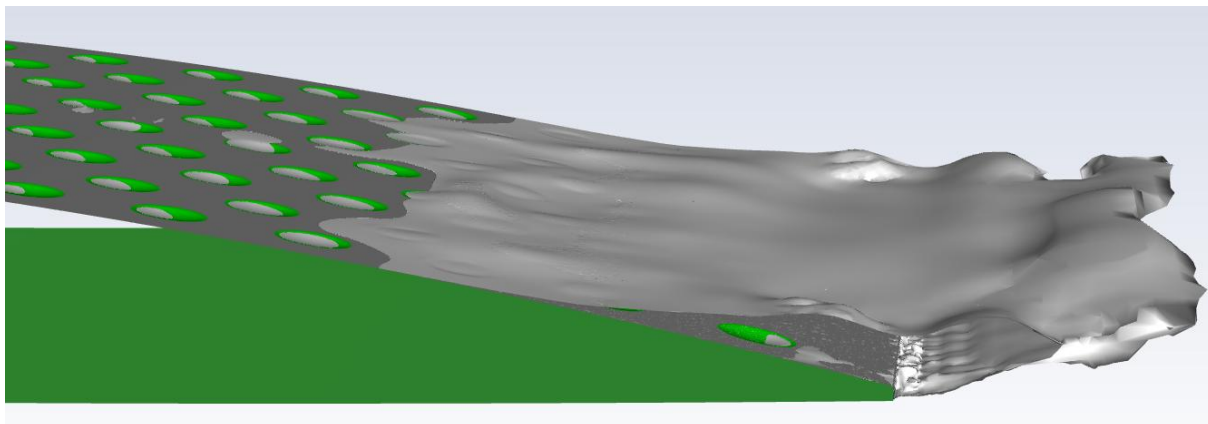


Obrázok 99 Vektory rýchlosti vykreslené v rovine pre  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria E



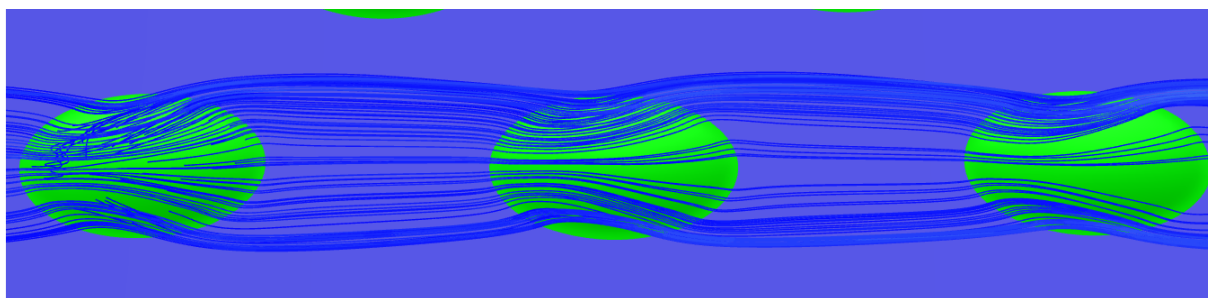
Obrázok 100 Normalizované vektory rýchlosti vykreslené v rovine pre  $\alpha = 12^\circ$  - Geometria E

Na podrobnejšiu identifikáciu začiatku oblasti separácie prúdenia v 3D , bude opäť slúžiť izoplocha veľmi malej zápornej rýchlosti v smere  $x$  (Obrázok 101). Z tohto obrázku je dobre vidieť, že separácia prúdenia nastáva oveľa skôr než v oblasti poslednej jamky povrchovej modifikácie, a aj oblasť separácie prúdenia je výrazne väčšia. Opäť je tu vidieť zväčšovanie oblasti separácie prúdenia na vstupe do jamky s približovaním sa k odtokovej hrane profilu.



*Obrázok 101 Izoplocha zápornej rýchlosti v smere  $x$*

Ako posledný krok analýzy prúdenia pre túto geometrickú variantu povrchovej modifikácie bude vykreslenie prúdnic v jamke (Obrázok 102) a porovnanie s charakterom prúdenia z rešerše pre daný geometrický parameter  $d/D$ . Pre túto geometrickú variantu  $d/D = 6\%$  je tu znova pozorovaný jav, kde prúdenia na vstupe do jamky sa približuje k stredu jamky a následne od druhej polovice jamky sa odďaľuje od stredu. Tento charakter prúdenia opäť dobre odpovedá typom prúdenia popísaných v rešeršnej časti (Obrázok 24 -1 a Obrázok 26 A),C ).



*Obrázok 102 Charakter prúdenia v jamkách znázornený pomocou prúdnic - Geometria E*

Táto geometrická varianta povrchovej modifikácie vyšla z pohľadu odporového koeficientu o niečo horšie ako Geometria C, ale stále z CFD simulácií vyšlo zníženie odporového koeficientu  $C_D$  pre mimooptimálny uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$ . Preto táto varianta môže slúžiť ako zaujímavá možnosť zníženia odporového koeficientu pri mimooptimálnych uhloch nábehov za cenu nízkeho nárastu odporového koeficientu pri optimálnych uhloch nábehov. Výsledné odporové koeficienty z CFD simulácií je možno vidieť v Tabuľka 16 a Tabuľka 17.

## Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vykonanie analýzy vplyvu povrchových modifikácií na hydraulickom profile. Táto analýza prebiehala v rešeršnej časti a následne hlavne pomocou CFD výpočtov. Vplyv povrchových modifikácií na prúdenie okolo hydraulického profilu bol analyzovaný prostredníctvom ich účinku na odporový koeficient  $C_D$  resp. odporovú silu a rozsah oblasti separácie prúdenia. Pomocou CFD výpočtov bol simulovaný optimálny stav obtekania profilu, tak aj mimooptimálny stav a bol sledovaný efekt povrchových modifikácií pri týchto 2 situáciách. Nastavenie týchto 2 situácií bolo vykonané pomocou rôznych uhlov nábehu  $\alpha$ . Konkrétne pre simuláciu optimálneho stavu obtekania profilu bol zvolený uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  a pre simulovanie mimooptimálneho stavu bol zvolený uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$ . Tieto hodnoty boli zvolené z experimentálnych dát pre NACA profily pre dané Reynoldsové číslo a ako hydraulický profil pre analýzu vplyvu povrchových modifikácií bol zvolený profil NACA 2412.

CFD výpočty prebiehali v niekoľkých krokoch. V prvom kroku bol analyzovaný iba hladký profil t.j. bez povrchových modifikácií pre obidva uhly nábehu  $\alpha$ , z dôvodu vytvorenia referenčnej geometrie pre následne porovnávanie variant profilov s povrchovými modifikáciami. Výsledné odporové koeficienty boli pre overenie správnosti numerickej simulácie porovnávané s experimentálnymi dátami pre NACA profily. V druhom kroku bola analyzovaná prvá geometrická varianta povrchovej modifikácie. Jednalo sa o geometriu, ktorá nebola vytvorená mnou, ale bola prebratá od firmy VVÚ Sigma s.r.o. Pri tejto geometrickej variante je dôležité poznamenať, že nebola vytvorená primárne s cieľom redukovať odporový koeficient alebo ovplyvniť separáciu prúdenia, ale ovplyvniť kavitáciu, čomu som sa v tejto práci nevenoval. Z tohto dôvodu táto geometrická varianta nevyšla úplne najlepšie z pohľadu vplyvu na výsledný odporový koeficient. Táto varianta môže však slúžiť ako referenčná geometria pri analyzovaní mnou vytvorených optimalizovaných geometrických variant. V poslednej fáze CFD výpočtov prebiehala samotná analýza mnou vytvorených optimalizovaných povrchových modifikácií. Optimalizácia prebiehala s ohľadom na už vytvorené a skúšané povrchové modifikácie. Pri týchto vytvorených geometriách existujú odporúčania, ktorými som sa pri optimalizovaní riadil a optimalizované parametre boli primárne tvar (kruhový, elipsový), veľkosť ( $d/D$ ) a rozloženie na povrchu profilu ( $L_x, L_z$ ). Dôležité je poznamenať, že väčšina týchto odporúčaní resp. vytvorených geometrických variant bolo v rešeršovanej literatúre skúmaná na rovnej doske a nie pre zakrivený hydraulický profil ako je NACA 2412.

Bolo vytvorených 5 nových optimalizovaných geometrických variant, ktoré sa od seba líšili, či už tvarom alebo geometrickými rozmermi. Všetky tieto vytvorené varianty boli testované pre optimálny stav t.j. uhol nábehu  $\alpha = 8^\circ$  a iba varianty, ktoré vychádzali najsľubnejšie boli otestované aj pre mimooptimálny stav t.j.  $\alpha = 12^\circ$ . Hlavným dôvodom bola vysoká časová náročnosť výpočtu, spôsobená použitím rozsiahlej výpočtovej siete a pokročilého modelu turbulencie SBES. Tento pokročilejší model turbulencie bolo nutné voliť kvôli predpokladaným mechanizmom redukcie tretej časti odporovej sily pomocou jamiek. V rešeršnej časti boli popísané dva možné spôsoby, a to vytvorenie víru v jamke povrchovej modifikácie, ktorý generuje silu pôsobiacu proti odporovej sile (angl. Tornado-like jets). Druhý spôsob bolo vytvorenie konvergujúco-divergujúceho vzorca prúdenia v jamke povrchovej modifikácie, ktorý má vplyv na výslednú odporovú silu. Tieto mechanizmy redukcie odporu sú veľmi komplexné, a preto bol zvolený pokročilejší model turbulencie SBES.

Z výsledkov je jasný trend znižovania odporového koeficientu  $C_D$  so znižujúcim sa geometrickým parametrom  $d/D$ . Napriek optimalizovaniu tohto parametra, ani jedna geometrická varianta neposkytla redukcii odporového koeficientu  $C_D$  oproti referenčnej geometrii hladkého profilu v prípade optimálneho stavu, a naopak všetky testované varianty pre mimooptimálny stav dosiahli redukcii odporového koeficientu  $C_D$ .

Najslubnejšia varianta pre optimálny stav vyšla Geometria C ( $d/D = 5\%$ ), kde pri tejto geometrickej variante sa povrchová modifikácia nenachádzala na začiatku profilu, ale začínala až od tretiny profilu a bol použitý kruhový tvar. Pri tomto type povrchovej modifikácie bol nárast odporového koeficientu  $\Delta C_D = +1.45\%$ . Pre porovnanie, geometria povrchovej modifikácie, ktorú som prebral na začiatku (Geometria – Sigma) bol nárast odporového koeficientu oveľa väčší  $\Delta C_D = +62.4\%$ , ale opäť táto geometrická varianta nebola optimalizovaná na redukcii tohto parametra. Naopak najhoršie vyšla Geometria A ( $d/D = 10\%$ ), kde tento nárast odporového koeficientu dosiahol až  $\Delta C_D = +12\%$ . Tento vysoký nárast bol spôsobený tým, že geometrický parameter  $d/D$  bol vysoký a bol na hranici odporovaných hodnôt.

Pre mimooptimálny stav bol vplyv povrchovej modifikácie výraznejší ako v prípade optimálneho stavu. Pre všetky geometrické varianty bolo dosiahnuté zníženie odporového koeficientu  $C_D$ . Najlepšie vyšla z pohľadu tohto parametra opäť Geometria C rovnako ako pri simulovaní pri optimálnom stave. Konkrétne pomocou takto geometricky tvarovanej povrchovej modifikácie bolo dosiahnuté zníženie odporového koeficientu  $\Delta C_D = -6.9\%$ . Geometria C teda vyšla najlepšie aj pri simulovaní optimálneho, tak aj pri simulovaní mimooptimálneho stavu. Síce táto geometrická varianta a ani ostatné varianty nedosiahli zlepšenie pri optimálnom stave, ale došlo k zlepšeniu pri mimooptimálnom stave. Všetky geometrické varianty dosiahli zníženie tretej zložky odporovej sily pri uhle nábehu  $\alpha = 8^\circ$  aj  $\alpha = 12^\circ$ . Naopak tlaková zložka odporovej sily bola znížená iba pre vhodne geometricky tvarované jamky ( $d/D = 5\%$ ), a to iba pre uhol nábehu  $\alpha = 12^\circ$ . Veľký nárast tejto zložky odporovej sily pre nevhodne geometricky tvarované jamky ( $d/D \geq 10\%$ ) bol spôsobený rozsiahlejšou separáciou prúdenia v týchto jamkách, ktorá viedla k nárastu tlakovej zložky odporovej sily. Celý princíp návrhu teda spočíval v nájdení geometrickej varianty, kde redukcii tretej zložky odporovej sily prevýšila nárast (pri mimooptimálnom stave  $\alpha = 12^\circ$  dokonca zníženie) tlakovej zložky odporovej sily, ktorá sa indukovala v týchto povrchových modifikáciách.

Preto takýto typ povrchovej modifikácie môže byť zaujímavým riešením obtekania pri vysokých uhloch nábehov resp. všeobecne pri mimooptimálnych stavoch, za cenu mierneho zvýšenia odporového koeficientu  $C_D$  pri optimálnych stavoch. Je treba však mať na zreteli, že toto sú výsledky iba z CFD výpočtov a na potvrdenie tejto teórie je nutné ešte experimentálne overenie.

## Zoznam použitých zdrojov

- [1] MUNSON, Bruce R.; ROTHMAYER, Alric P.; OKIISHI, Theodore H. a HUEBSCH, Wade W. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 7th Edition. Wiley, 2012. ISBN 1118116135.
- [2] WHITE, Frank. *Fluid Mechanics*. 7th Edition. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2010. ISBN 0073529346.
- [3] LEISHMAN, Gordon. Aerodynamics of Airfoils. Online. In: *Introduction to Aerospace Flight Vehicles*. Embry-Riddle Aeronautical University, 2022. ISBN 9798985261400. Dostupné z: <https://doi.org/10.15394/eaglepub.2022.1066.n23>. [cit. 2024-12-21].
- [4] SCHLICHTING, Hermann a GERSTEN, Klaus. *Boundary-Layer Theory*. Online. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-662-52917-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>. [cit. 2024-12-13].
- [5] WHITE, Frank M. *Viscous Fluid Flow*. 3rd Edition. McGraw-Hill, 2005. ISBN 0072402318.
- [6] *Node342*. Online. CFD SUPPORT. Dostupné z: <https://www.cfdsupport.com/openfoam-training-by-cfd-support/node342.html>. [cit. 2024-12-25].
- [7] VAN WEERSCH, Yorin. *On the turbulent drag reduction of a dimpled surface under a pressure gradient*. Online. TU Delft Repository. Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:cf0b3ec3-f018-4e39-9fd7-587eb75a6c47>. [cit. 2024-12-20].
- [8] POPE, S. B. *Turbulent flows*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0521598869.
- [9] TRITTON, D.J. *Physical Fluid Dynamics*. 2 ed. Oxford: Clarendon Press, 1988. ISBN ISBN:9780198544937.
- [10] GATTERE, Federica; CHIARINI, Alessandro a QUADRIO, Maurizio. Dimples for Skin-Friction Drag Reduction: Status and Perspectives. Online. *Fluids*. 2022, roč. 7, č. 7. ISSN 2311-5521. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/fluids7070240>. [cit. 2024-12-20].
- [11] VAN NESSELROOIJ, Michiel. *On the drag reduction of dimpled surfaces in turbulent boundary layers*. Online. TU Delft Repository. Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:dee8edc0-fd9a-4398-b35a-a1b6f7a45315>. [cit. 2024-12-20].
- [12] VAN NESSELROOIJ, M.; VELDHUIS, L. L. M.; VAN OUDHEUSDEN, B. W. a SCHRIJER, F. F. J. Drag reduction by means of dimpled surfaces in turbulent boundary layers. Online. *Experiments in Fluids*. 2016, roč. 57, č. 9. ISSN 0723-4864. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2230-9>. [cit. 2024-12-20].
- [13] RAYYAI-ARDAKANI, Shabnam a MCKINLEY, Gareth H. Geometric optimization of riblet-textured surfaces for drag reduction in laminar boundary layer flows. Online. *Physics of Fluids*. 2019, roč. 31, č. 5. ISSN 1070-6631. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.5090881>. [cit. 2024-12-20].
- [14] WEN, Li; WEAVER, James C. a LAUDER, George V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. Online. *Journal of Experimental Biology*. 2014, roč. 217, č. 10, s. 1656-1666. ISSN 1477-9145. Dostupné z: <https://doi.org/10.1242/jeb.097097>. [cit. 2024-12-20].

- [15] PRABHU, Sam. *How Dimples on a Golf Ball Affect Its Flight and Aerodynamics*. Online. SimScale. Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/how-dimples-affect-golf-ball/>. [cit. 2025-01-02].
- [16] TAY, C. M. J.; KHOO, B. C. a CHEW, Y. T. Mechanics of drag reduction by shallow dimples in channel flow. Online. *Physics of Fluids*. 2015, roč. 27, č. 3. ISSN 1070-6631. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.4915069>. [cit. 2024-12-20].
- [17] TAY, C.M.; CHEW, Y.T.; KHOO, B.C. a ZHAO, J.B. Development of flow structures over dimples. Online. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014, roč. 52, s. 278-287. ISSN 08941777. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.exthermflusci.2013.10.001>. [cit. 2025-01-07].
- [18] TAY, C. Determining the Effect of Dimples on Drag in a Turbulent Channel Flow. Online. In: *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011, -. ISBN 978-1-60086-950-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2011-682>. [cit. 2025-01-07].
- [19] JACOBS, Eastman a SHERMAN, Albert. *Airfoil Section Characteristics as Affected by Variations of the Reynolds Number*. Online. NASA Technical Reports Server (NTRS). 1937. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930091662>. [cit. 2025-03-14].
- [20] *Mesh Types In CFD: A Comprehensive Guide*. Online. Vydavateľ nenájdený. Dostupné z: <https://cfdland.com/mesh-types-in-cfd-a-comprehensive-guide/>. [cit. 2025-03-15].
- [21] ANSYS, INC. ANSYS. *Fluent User's Guide Release 2023 R2, 2023*.
- [22] *Guest Blog by Prof. David Fletcher: Importance of following Best Practices for Scale Resolving Turbulence Modelling*. Online. LEAP Australia Blog. Dostupné z: <https://www.leapaust.com.au/blog/cfd/guest-blog-best-practices-scale-resolving-turbulence-modelling-webinar/>. [cit. 2025-04-29].
- [23] GESTIONÉ. *Courant number*. Online. IdealSimulations. Dostupné z: <https://www.idealsimulations.com/resources/courant-number-cfd/>. [cit. 2025-04-22].