



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Optimalizace aerodynamických prvků vozu
Formula Student s využitím nástroje Adjoint
solver

Optimization of Aerodynamic Components of
the Formula Student Using Adjoint Solver
Tools

DIPLOMOVÁ PRÁCE
2022

Otakar VOLEK

Studijní program: DOPRAVNÍ A TRANSPORTNÍ TECHNIKA

Studijní obor: MOTOROVÁ VOZIDLA

Vedoucí práce: Ing. Petr Hatschbach, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Volek** Jméno: **Otakar** Osobní číslo: **461818**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Motorová vozidla**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace aerodynamických prvků vozu Formula Student s využitím nástroje Adjoint solver

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of Aerodynamic Components of the Formula Student using Adjoint Solver tools

Pokyny pro vypracování:

Ověření možností použití nástroje Adjoint solver pro optimalizaci aerodynamiky monopostu Formula Student. Vývoj konkrétních součástí monopostu s využitím Adjoint solveru. Testování různě velkých oblastí na voze a různě velké výpočetní sítě s cílem zakomponovat Adjoint solver do standardní týmové metodiky návrhu vozu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Hatschbach, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

Datum zadání diplomové práce: **29.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Petr Hatschbach, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Otakar Volek

Název práce: Optimalizace aerodynamických prvků vozu Formula Student s využitím nástroje Adjoint solver

Anglický název: Optimization of Aerodynamic Components of the Formula Student Using Adjoint Solver Tools

Rozsah práce:

68 stran

66 obrázků, z toho

14 grafů

5 tabulek

Akademický rok: 2021/2022

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Dopravní a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Petr Hatschbach, CSc.

Klíčová slova: Formula Student, Adjoint solver, CFD, Aerodynamika, Optimalizace

Key words: Formula Student, Adjoint solver, CFD, Aerodynamics Optimization



Abstrakt

Tato práce pojednává o možnostech využití adjoint solveru pro vývoj vozu Formula Student. V úvodu jsou uvedeny základní rovnice pro CFD modelování a následně je vysvětlen princip adjoint solveru. Dále se práce věnuje praktickým ukázkám aplikaci adjoint solveru na jednoduchý model pomocí softwaru Simcenter STAR-CCM+. Na tomto modelu je ověřena správná funkce nástroje. Poté jsou provedeny první výpočty na celém monopostu. V poslední fázi práce jsou potom zkoumány jednotlivé díly ve zjednodušených a oproti simulacím s celým vozem výpočetně méně náročných úlohách.

Abstract

This thesis discusses the possibilities of using adjoint solver for a Formula Student car development. At first, the basic equations of CFD modelling are presented, followed by explanation of the adjoint solver principle. Afterwards, the thesis proceeds to practical demonstrations using the Simcenter STAR-CCM+ software. Initial computations with a simple model are shown where the correct functioning of the adjoint solver is verified, before moving on to the actual simulations with the whole Formula Student vehicle. In the last chapter of the thesis, only certain parts of the car are investigated, meaning a lot less computational power is required for such simulations.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “ Optimalizace aerodynamických prvků vozu Formula Student s využitím nástroje Adjoint solver” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 5. 1. 2022

.....

Otakar Volek



Poděkování

Poděkovat bych chtěl svému vedoucímu, Ing. Petru Hatschbachovi, CSc. za cenné rady a připomínky jak k práci samotné, tak postupu při praktické části. Dále také celému týmu studentské formule CTU CarTech, který po dobu mého studia tvořil významnou část mého života, hlavně pak Ing. Martinu Ševčíkovi a Ing. Lukáši Pacoňovi, na které jsem se mohl během celého svého působení v týmu s čímkoliv obrátit.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni, že pro mě vždy měli pochopení a vždy mě plně podporovali ve studiu.



Obsah	
1 Úvod	8
1.1 Formula Student	8
1.2 Cíl práce.....	9
2 CFD	10
2.1 Základní princip CFD.....	10
2.2 Adjoint solver	11
2.2.1 Adjoint analýzy řešení	12
2.2.2 Adjoint fyzikálního řešení	13
2.2.3 Adjoint deformace sítě	16
2.2.4 Shrnutí cyklu adjoint solveru.....	18
3 Využití adjoint solveru	20
4 První výpočty na jednoduchém modelu	26
4.1 Optimalizace primárního řešiče.....	27
4.2 Aplikace adjoint solveru na jednoduchý model	29
4.2.1 Vliv faktoru deformace.....	30
4.2.2 Vliv počtu cyklů adjoint solveru	31
5 Výpočty s celým vozem	35
5.1 Deformace monokoku	35
5.2 Deformace bočnic.....	37
5.2.1 Boční kryt	37
5.2.2 Deformace boční desky (endplatu).....	39
5.2.3 Další simulační cykly	43
6 Simulace jednotlivých dílů	48
6.1 Přední křídlo	48
6.2 Simulace zadního křídla	52
6.2.1 Hrubší síť pouze ve volném prostoru	54
6.2.2 Hrubší síť i v okolí dílů	58
7 Další práce se zdeformovanými díly	61
8 Závěr.....	62
8.1 Číselné zhodnocení výsledků	62
9 Seznam obrázků.....	64
10 Seznam tabulek.....	67
11 Použitá literatura.....	68



1 Úvod

V úplném začátku práce bych se chtěl věnovat základnímu představení soutěže Formula Student a dále pak stručně uvést cíle této práce.

1.1 Formula Student

Formula Student je studentská soutěž, která vznikla v osmdesátých letech 20. století v USA pod názvem Formula SAE. Jejím účelem je doplnit teoretické znalosti studentů nejen technických oborů o praktické zkušenosti. Hlavním úkolem soutěže je v rámci ročního cyklu navrhnout a zkonstruovat závodní vůz, se kterým studenti soutěží proti ostatním univerzitám z celého světa, a to jak v dynamických disciplínách, kde se přímo hodnotí rychlost vozu na různě definovaných tratích, tak v disciplínách statických, kde jde hlavně o znalosti studentů jednak v oblasti návrhu vozu, tak i v oblasti práce s financemi.

Mezi statické disciplíny patří Engineering Design Event, Cost and Manufacturing Event a Business Plan Presentation. V první jmenované disciplíně, jak už název napovídá, jde o to obhájit si svůj postup při návrhu a konstrukci vozu před odbornými porotci z oboru, nezávadka ze špičkových automobilek či přímo z Formule 1. V druhé disciplíně, Cost and Manufacturing Event, je cílem prokázat znalosti související s odhadem ceny jednotlivých částí vozu, od výpočtu cen jednotlivých součástek podle detailního popisu pracovního procesu, až po správné sestavení kusovníků požadovaných sestav. Poslední statická disciplína, prezentace byznys plánu, se samotného vozu týká ze všech nejméně. Jejím smyslem je představit podnikatelský záměr, který zaujme porotu – potenciální investory, a zpracovat jeho realistický finanční plán.

V dynamických disciplínách již záleží pouze na čase, v jakém vůz dokáže danou trať zdolat. První dvě „menší“ dynamické disciplíny, které mají na všech soutěžích stejnou, pravidly přesně definovanou, trať, jsou Acceleration a Skid Pad. První jmenovaná je velmi jednoduchá, jedná se o rovnou trať v délce 75 metrů s pevným startem. Skid Pad je potom trať postavená do osmičky a ukazují se na ní schopnosti vozu v zatáčce s konstantním poloměrem. Poslední dvě dynamické disciplíny mají sice v pravidlech určitá omezení týkající se trati, nicméně její výsledný tvar je pro každý závod jiný. První z nich je Autocross, kde je cílem zajet co nejrychlejší čas na jedno kolo na přibližně 1 kilometr dlouhé, technické trati. Poslední den soutěží bývá vyhrazen závěrečné disciplíně Endurance, tedy závodu na 22 kilometrů na trati podobné té z Autocrossu. V této disciplíně se rozhoduje o úspěchu a neúspěchu týmu v celé soutěži.



Každá disciplína má své bodové ohodnocení a součet bodů ze všech statických i dynamických disciplín poté určí celkové pořadí soutěže. Na Obr. 1 je pro ukázkou uveden vůz týmu CTU CarTech FS.13 ze sezóny 2021.



Obr. 1: Studentská formule FS.13 týmu CTU CarTech na MSV v Brně [1]

1.2 Cíl práce

Úkolem této práce je vyzkoušení nástroje „Adjoint solver“ a ověření jeho funkce při návrhu vozu pro soutěž Formula Student. Znamená to tedy provést první jednoduché výpočty s metodikou používanou právě pro návrh monopostu zmiňované soutěže a dále se posunout přímo k výpočtům s celým vozem, potažmo s jeho konkrétními částmi za účelem prozkoumání potenciálu nástroje.



2 CFD

K soutěži Formula Student již několik let neodmyslitelně patří také vývoj aerodynamických prvků, a to zejména pomocí CFD výpočtů. Kromě toho, že oproti zkoušení fyzických dílů se z principu jedná o metodu levnější, dostávají týmy navíc většinou tento software zdarma v rámci sponzorství od firmy, která jej vyvíjí.

2.1 Základní princip CFD

CFD, tedy počítačová mechanika tekutin, je proces matematického modelování fyzikálních jevů zahrnujících proudění tekutiny pomocí numerického řešení. Jedná se tedy o systém rovnic využívající šest základních rovnic mechaniky tekutin. Tento systém je získán diskretizací zkoumaného média, a to nejčastěji metodou konečných objemů. Tyto základní rovnice dynamiky tekutin jsou rovnice kontinuity, pro stlačitelné či nestlačitelné médium, pohybová rovnice, rovnice energetická a rovnice stavová. Všechny kromě poslední jmenované vycházejí z obecné bilanční rovnice (1). Tato rovnice je zde uvedena v integrálním tvaru a říká nám, že rychlost akumulace veličiny P ve sledovaném kontrolním objemu V (levá strana) se musí rovnat součtu rychlosti konvektivního převodu povrchem S (první člen pravé strany), rychlosti nekonvektivního převodu povrchem S (druhý člen pravé strany) a rychlosti vzniku veličiny v objemu V (třetí člen pravé strany). Pokud místo veličiny P dosadíme hustotu hmoty ρ v homogenní tekutině a rovnici upravíme s použitím Gaussovy věty, dostaneme rovnici kontinuity v diferenciálním tvaru, a to buď ve tvaru pro stlačitelné médium (2), nebo pro médium nestlačitelné (3). Obdobně potom postupujeme při bilancování hybnosti, kde však na místo obecné veličiny P dosazujeme součin $\rho\vec{v}$. Výsledkem je rovnice (4). Energetická rovnice (5) vznikne rovněž analogicky, tentokrát dosazením ρE . Poslední zbývající rovnice je rovnice stavová, která spojuje tlak p , hustotu ρ a teplotu T . Zde je uvedena její varianta pro ideální plyn (6).

$$\frac{d}{dt} \int_V P dV = - \int_S \vec{n} \cdot \vec{v} P dS - \int_S \vec{n} \cdot \Pi dS + \int_V \dot{p}^{(g)} dV \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\rho = 0 \rightarrow \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho\vec{g} \quad (4)$$



$$\rho \left[\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (E\vec{v}) \right] = - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (k\nabla T) + \phi \quad (5)$$

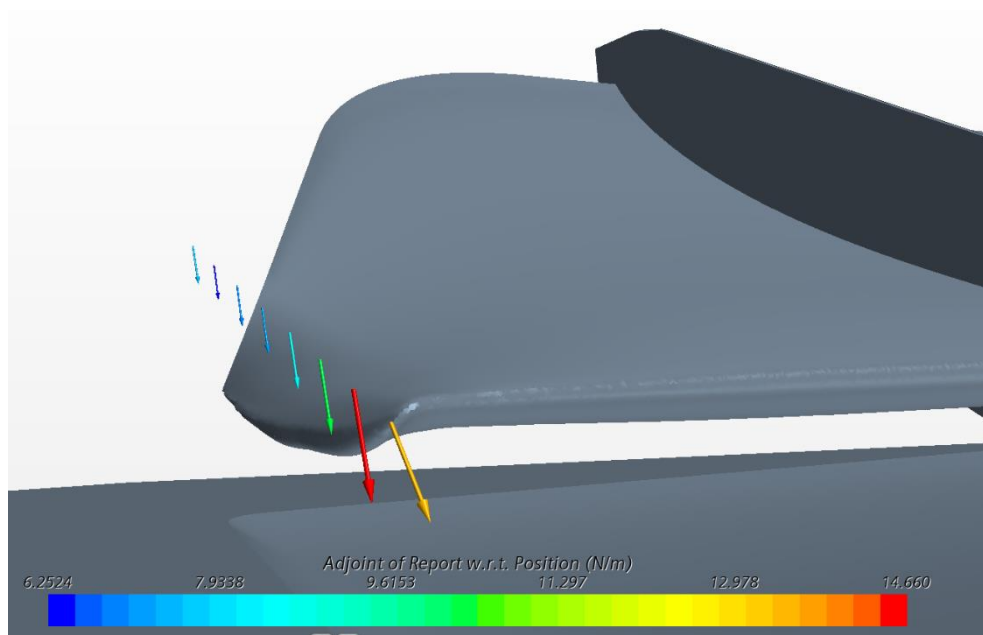
$$\frac{p}{\rho} = r \cdot T \quad (6)$$

Výsledkem je soustava 6 rovnic o 6 neznámých, kdy máme rovnici kontinuity, tři pohybové rovnice ve směrech x, y a z, rovnici energetickou a stavovou.

2.2 Adjoint solver

Adjoint Solver je nástroj, který umožňuje z již spočtené simulace zpětně zjistit citlivost jakékoliv sledované veličiny, a to jak na parametry okrajových podmínek, tak na parametry zkoumané geometrie. V této práci se budu věnovat pouze variantě druhé. Máme tedy geometrické parametry D , z toho získanou výpočetní síť $X(D)$, na této výpočetní síti spočítané řešení $Q(X)$, z toho určíme hodnotu zkoumané veličiny $L(Q, X)$ a chceme zjistit výslednou citlivost. Pro lepší názornost je dobré si pod tímto rovnou představit, že sledujeme například hodnotu přitlaku v závislosti na tvaru aerodynamického profilu. Na Obr. 2 je zobrazena vektorová funkce této citlivosti v bodech vytvořených na úsečce vedoucí v blízkosti krajní hrany vnitřního profilu křídla. Toto vyhodnocení znamená, že pro získání přitlaku je potřeba zahnout tuto hranu klapky více dolů. Zajímá nás tedy hodnota $\frac{dL}{dD}$. K ní se dostaneme přes následující vztah (7). [2]

$$\frac{dL}{dD} = \left[\frac{\partial L}{\partial X} + \frac{\partial L}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial X} \right] \cdot \frac{dX}{dD} \quad (7)$$



Obr. 2: Příklad zobrazení citlivosti na přitlak v blízkosti aerodynamického profilu



Vzhledem k velké výpočetní náročnosti s rostoucím počtem designových proměnných D provede software určitá zjednodušení. Místo celé objemné matice $\frac{dX}{dD}$ ($= J_x$) pracuje pouze se sloupci této matice ve formě ukázané v rovnici (8). [2]

$$\frac{dL}{dD_i} = \left[\frac{\partial L}{\partial X} + \frac{\partial L}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial X} \right] \frac{dX}{dD_i} \quad (8)$$

Protože však i v tomto případě roste výpočetní náročnost lineárně s počtem proměnných D , kterých bývá zpravidla velké množství, je také výrazně výhodnější pracovat s transponovaným systémem podle rovnice (9). [2]

$$\frac{dL_j^T}{dD} = \frac{dX^T}{dD} \left[\frac{\partial L_j^T}{\partial X} + \frac{\partial Q^T}{\partial X} \frac{\partial L_j^T}{\partial Q} \right] \quad (9)$$

Po krocích si tedy postup adjoint solveru můžeme rozdělit na adjoint analýzy řešení $\left[\frac{\partial L}{\partial Q} \right]^T$, adjoint fyzikálního řešení $\left[\frac{\partial L}{\partial X} \right]^T$ a adjoint deformace geometrie $\left[\frac{\partial L}{\partial D} \right]^T$. [2]

2.2.1 Adjoint analýzy řešení

Výpočet citlivosti sledované veličiny vzhledem k její závislým proměnným $\left[\frac{\partial L}{\partial Q} \right]^T$ je vstupem do adjointu řídicího fyzikálního řešiče. Z posledního kroku primárního řešiče se stane první krok adjoint solveru. V kapitole popisující teorii adjoint solveru v rámci softwaru STAR-CCM+ je uveden příklad, kdy sledovaná funkce L je povrchový integrál rychlostního pole tečné rychlosti v_t na výstupu z trubky. Potom L lze určit dle rovnice (10), kde v_t je definováno dle vztahu (11), ve kterém n je směr normály stěny. [2]

$$L = \int_A v_t dA \approx \sum_f v_{tf} A_f \quad (10)$$

$$v_t = \|v - (v \cdot n)n\| \quad (11)$$

Při zápisu sledované veličiny ve tvaru $L(Q, X)$, kde v_t je součástí Q , a X je považováno za shodné s A , bude její vyhodnocení provedeno ve dvou krocích. Nejprve software spočítá rychlostní pole v_t a následně vyhodnotí jeho povrchový integrál přes všechny uživatelem zadané části. Veličinu lze tedy zapsat jako $L(v_t(Q, X)X)$. Z toho tedy plynou vztahy (12) a (13). [2]

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = \frac{\partial L}{\partial v_t} \frac{\partial v_t}{\partial Q} \quad (12)$$



$$\frac{\partial L}{\partial X} = \frac{\partial L}{\partial v_t} \frac{\partial v_t}{\partial X} + \frac{\partial L}{\partial X} \quad (13)$$

V závislosti na složitosti sledované veličiny mohou být vzorce o něco jednodušší, neboť nemusí nutně existovat přímá závislost mezi sledovanou veličinou a tvarem sítě. Pokud rovnice (12) a (13) transponujeme, získáme potřebné vztahy k prvnímu kroku adjoint solveru dle vztahů (14) a (15). [2]

$$\frac{\partial L^T}{\partial Q} = \frac{\partial v_t^T}{\partial Q} \frac{\partial L^T}{\partial v_t} \quad (14)$$

$$\frac{\partial L^T}{\partial X} = \frac{\partial v_t^T}{\partial X} \frac{\partial L^T}{\partial v_t} + \frac{\partial L^T}{\partial X} \quad (15)$$

2.2.2 Adjoint fyzikálního řešení

Hlavním úkolem adjoint solveru je, jak bylo již zmíněno, výpočet citlivosti zkoumané veličiny na tvar výpočetní sítě $\frac{dL^T}{dX}$. Tato citlivost, jež je součinem dvou pravých členů ve vztahu (9), je vypočtena dle rovnice (16). [2]

$$\frac{dL^T}{dX} = \frac{\partial L^T}{\partial X} + \frac{\partial Q^T}{\partial X} \frac{\partial L^T}{\partial Q} \quad (16)$$

Výpočet citlivosti je proveden ve dvou krocích. Prvním je řešení adjointu iterační metodou, čímž dostaneme citlivost naší veličiny vzhledem k reziduím řídicích rovnic, tedy $\frac{dL^T}{dR}$. Druhým krokem je výpočet citlivosti residuů na výpočetní síti $\frac{dR^T}{dX}$ a její přičtení k přímé závislosti sledované veličiny na výpočetní síti, tedy $\frac{\partial L^T}{\partial X}$. Tento druhý krok je proveden jednorázově až po zkonvergování řešení adjointu. [2]

K provedení těchto kroků je nutné derivovat rovnice primárního řešení, tedy rovnice proudění, energetické a případně i rovnice turbulence. Například v řešení modelu „coupled flow“ plní roli řídicí rovnice rovnice Navier-Stokesova ve formě (17). [2]

$$\Gamma \frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \oint [F - G] \cdot da = \int_V H dV \quad (17)$$

Γ je v tomto případě transformační matice, F reprezentuje nevazký tok, G vazký tok a H jsou vnější síly. [2]

Problém vypadá tak, že máme N odlišných iteračních řešičů a každý z nich se snaží vyřešit své neznáme podle řídicích rovnic. Pro případ turbulentního proudění by se v tomto



případě jednalo například o „coupled implicit solver“, „turbulent solver“ a „turbulent viscosity solver“. Pro každý z těchto řešičů existuje jeho sada neznámých Q_i a odpovídající řídicí rovnice mohou být vyjádřeny ve formě reziduí R_i . Řešení pomocí „coupled flow“ znamená, že tato rezidua mohou být funkcí všech ostatních proměnných, které se vyskytují ve výpočtu, což je znázorněno v následujících vztazích (18). (Opakem by bylo „segregated flow“, kde by platilo $R_i(Q_i, X) = 0$) [2]

$$\begin{aligned} R_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_N, X) &= 0 \\ R_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_N, X) &= 0 \\ &\vdots \\ R_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_N, X) &= 0 \\ &\vdots \\ R_N(Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_N, X) &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Pro ustálené proudění se jedná o nelineární Gauss-Seidlovu metodu, kde každý řešič vypočítává svá rezidua na základě posledních hodnot proměnných a nové hodnoty proměnných potom podle hodnoty členu $[P_i]$. Nové hodnoty reziduí a proměnných pro iteraci k řešiče i jsou poté vypočítány dle vztahů (19) a (20). Zmiňovaný člen $[P]$ je potom výsledkem linearizace řídicích (Navier-Stokesových) rovnic vzhledem k proměnným hodnotám proudění dle rovnice (21). [2]

$$R_i^K = R_i(Q_1^{k+1}, Q_2^{k+1}, \dots, Q_i^k, \dots, Q_N^k) \quad (19)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k - [P_i]^{-1} R_i^k \quad (20)$$

$$[P] = \frac{V}{\delta t} \Gamma + \sum_j^{N_f} \left(\frac{\partial F_j}{\partial Q} - \frac{\partial G_j}{\partial Q} \right) A_j \quad (21)$$

Na derivaci řešení adjointu ustáleného proudění je potřeba tyto vzájemně propojené (coupled) rovnice diferenciovat a transponovat. Vztahy vzhledem k tvaru výpočetní sítě X vyplynou ze soustavy rovnic (22). [2]

$$\begin{aligned} \frac{dR_1}{dX} + \frac{\partial R_1}{\partial Q_1} \frac{\partial Q_1}{\partial X} + \frac{\partial R_1}{\partial Q_2} \frac{\partial Q_2}{\partial X} + \dots + \frac{\partial R_1}{\partial Q_i} \frac{\partial Q_i}{\partial X} + \dots + \frac{\partial R_1}{\partial Q_N} \frac{\partial Q_N}{\partial X} &= 0 \\ \frac{dR_2}{dX} + \frac{\partial R_2}{\partial Q_1} \frac{\partial Q_1}{\partial X} + \frac{\partial R_2}{\partial Q_2} \frac{\partial Q_2}{\partial X} + \dots + \frac{\partial R_2}{\partial Q_i} \frac{\partial Q_i}{\partial X} + \dots + \frac{\partial R_2}{\partial Q_N} \frac{\partial Q_N}{\partial X} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{dR_i}{dX} + \frac{\partial R_i}{\partial Q_1} \frac{\partial Q_1}{\partial X} + \frac{\partial R_i}{\partial Q_2} \frac{\partial Q_2}{\partial X} + \dots + \frac{\partial R_i}{\partial Q_i} \frac{\partial Q_i}{\partial X} + \dots + \frac{\partial R_i}{\partial Q_N} \frac{\partial Q_N}{\partial X} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{dR_N}{dX} + \frac{\partial R_N}{\partial Q_1} \frac{\partial Q_1}{\partial X} + \frac{\partial R_N}{\partial Q_2} \frac{\partial Q_2}{\partial X} + \dots + \frac{\partial R_N}{\partial Q_i} \frac{\partial Q_i}{\partial X} + \dots + \frac{\partial R_N}{\partial Q_N} \frac{\partial Q_N}{\partial X} &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$



Výsledkem rovnic je tedy objemný, lineární systém úplně „propojený“ (coupled) mezi všemi řešiči dle rovnice (23). [2]

$$\left[\frac{\partial R}{\partial Q} \right] \frac{\partial Q}{\partial X} = - \frac{\partial R}{\partial X} \quad (23)$$

Tento vztah lze transpozicí upravit na tvar (24). [2]

$$\frac{\partial Q^T}{\partial X} = - \frac{\partial R^T}{\partial X} \left[\frac{\partial R}{\partial Q} \right]^{-T} \quad (24)$$

Vzhledem k tomu, že kalkulace členu $\left[\frac{\partial R}{\partial Q} \right]^{-T}$ by byla velmi výpočetně náročná, je rovnice (23) vynásobena výsledkem $\frac{\partial L^T}{\partial Q}$ z adjointu analýzy řešením, čímž dostaneme rovnici (25), kde $\frac{\partial R^T}{\partial X}$ známe, neboť známe hodnotu R . [2]

$$\frac{dL^T}{dX} = \frac{\partial L^T}{\partial X} - \frac{\partial R^T}{\partial X} \left[\frac{\partial R}{\partial Q} \right]^{-T} \frac{\partial L^T}{\partial Q} \quad (25)$$

Poslední dva členy této rovnice představují neznámou adjoint solveru Λ_Q . Tedy platí (26). [2]

$$\Lambda_Q = \left[\frac{\partial R}{\partial Q} \right]^{-T} \frac{\partial L^T}{\partial Q} \quad (26)$$

Neznámou Λ_Q lze tedy interpretovat jako $\frac{\partial L^T}{\partial R}$. Aby nebylo nutné počítat objemnou a složitou matici, adjoint využívá algoritmy, které pracují jen se součiny těchto matic. Jsou to takzvané „Restarted GMRES“ a „Defect correction“. Druhý jmenovaný lze zapsat dle vztahu (27). [2]

$$[P]^T \delta \Lambda_Q = \frac{\partial L}{\partial Q} - \left[\frac{\partial R}{\partial Q} \right] \Lambda_Q = R_{\Lambda_Q} (\Lambda_{bfQ}) \quad (27)$$

Pro GMRES platí, že je řešen přímo a rovnice (27) slouží pro transformaci. Při použití řešiče „korekcí vad“ (Defect correction) přes vícero řešičů dojde k obrácené aplikaci primárního řešiče, a každý adjoint řešič poté operuje na jednom sloupci celkové matice. Pro každou iteraci poté solver vypočítá rezidua adjoint solveru a určí nové hodnoty proměnných pomocí transpozice transformačního členu. Rozdíl oproti primárnímu řešení je ten, že adjoint postupuje podle Jacobiho principu, tj. pro nové hodnoty reziduí vždy používá řešení



z předchozí iterace. Tím dochází k významné úspoře paměti. Výsledkem je kompletní proces řešení adjointu dle rovnic (28) a (29). [2]

$$R_{\Lambda_{Q,i}}^k = \frac{\partial R_1}{\partial Q_i} \Lambda_{Q,1}^k + \frac{\partial R_2}{\partial Q_i} \Lambda_{Q,2}^k + \dots + \frac{\partial R_i}{\partial Q_i} \Lambda_{Q,i}^k + \dots + \frac{\partial R_N}{\partial Q_i} \Lambda_{Q,N}^k \quad (28)$$

$$\Lambda_{Q,i}^{k+1} = \Lambda_{Q,i}^k - [P_i]^{-T} R_{\Lambda_{Q,i}}^k \quad (29)$$

Přímo v teorii z návodu k softwaru STAR-CCM+ je uveden příklad modelu turbulence. Pokud během primárního simulace používáme model turbulence Spalart-Allmaras, pak rovnice výše budou platit pro použití modelu „Adjoint Spalart-Allmaras“ při výpočtu adjoint solveru. Jako alternativa existuje možnost „frozen turbulence“, kde se řádek reziduí a sloupec proměnných tohoto solveru odeberou ze systému. [2]

Obecně vzato tedy můžeme solver „zmrazit“, snížit tak potřebný výpočetní výkon a zvýšit stabilitu. Samozřejmě ovšem za cenu přesnosti. [2]

2.2.3 Adjoint deformace sítě

Hodnota citlivosti $\frac{dL}{dD}$ je hlavním bodem zájmu při využití adjoint solveru, chceme-li řešit tvarovou optimalizaci. Jak už bylo dříve uvedeno, máme designové parametry D a z nich vyplývající výpočetní síť $X(D)$. Počáteční výpočetní síť si označíme jako X^0 . Výpočetní síť se pochopitelně odvíjí od počátečního stavu, proto platí $X(X^0, D)$. Algoritmus morfování sítě v softwaru STAR-CCM+ pracuje s rovnicí (30), kde člen $\frac{dL^T}{dX}$ je finální citlivost veličiny na tvar výpočetní sítě. [2]

$$\frac{dL^T}{dD} = \frac{dX^T}{dD} \frac{dL^T}{dX} \quad (30)$$

V procesu tvarové optimalizace je citlivost z rovnice (30) základem pro výpočet nových tvarových parametrů. [2]

Algoritmus deformace sítě je řízen „funkcemi na radiální bázi“ (radial basis function“). Interpolovaná pozice x vzhledem k výchozí hodnotě x^0 je dána vztahem (31). Hodnota r_j z tohoto vztahu je potom vyjádřena z rovnice (32). [2]

$$x(x^0) = \alpha + \sum_{j=1}^N \beta_j \phi_j(r_1(x^0)) \quad (31)$$

$$r_1(x^0) = \|x^0 - x_j^0\| \quad (32)$$

Funkce $\phi(r)$ je určena vztahem (33), kde $c_j = 0$ pro všechna j . [2]



$$\phi(r_j) = \sqrt{r_j^2 + c_j^2} \quad (33)$$

Pro konečný počet referenčních pozic N v doméně mohou být interpolační pozice M vyhodnoceny podle vztahu (34). [2]

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1_1 \\ \vdots \\ 1_M \end{bmatrix} \alpha + \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{M,1} & \cdots & \phi_{M,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix} \quad (34)$$

Složky matice $N \times M$ mohou být vypočteny z funkce (35). [2]

$$\phi_{i,j} = \phi_j(r_j(x_i^0)) \quad (35)$$

Koeficienty α a β_1, \dots, β_N jsou určeny N známými interpolačními pozicemi nebo designovými parametry $D = d_1, \dots, d_N$ a okrajovou podmínkou z rovnice (36). [2]

$$\sum_{j=1}^N \beta_j = 0 \quad (36)$$

Z rovnice (31) a (36) je potom zkonstruován systém rovnic pro výpočet koeficientů, tedy systém (37). [2]

$$\begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,N} & 1_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \phi_{N,1} & \cdots & \phi_{N,N} & 1_N \\ 1_1 & \cdots & 1_N & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_N \\ 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Z funkčního hlediska máme tedy nezávislou proměnnou $D = d_1, \dots, d_N$ a její závislou proměnná X , v diskrétní formě jako $X = x_1, \dots, x_M$. Vztah pro výsledný člen J_x je (38). [2]

$$J_x = \frac{dX}{dD} \quad (38)$$

Jeho tečná složka je následně odvozena úpravou rovnice (37). Výsledkem je tedy vztah (39). [2]

$$\frac{\partial X}{\partial d_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial d_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial x_M}{\partial d_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1_1 \\ \vdots \\ 1_M \end{bmatrix} \frac{\partial \alpha}{\partial d_j} + \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{M,1} & \cdots & \phi_{M,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_i}{\partial d_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial \beta_N}{\partial d_j} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Derivace koeficientů vzhledem k parametrům d_j jsou tedy vzaty ze systému (40). [2]



$$\begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,N} & 1_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \phi_{N,1} & \cdots & \phi_{N,N} & 1_N \\ 1_1 & \cdots & 1_N & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_1}{\partial d_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial \beta_N}{\partial d_j} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial d_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial d_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial d_N}{\partial d_j} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Aby mohl být tedy adjoint deformace sítě vyhodnocen, je nutné vyřešit rovnice (34) a (35) pro konkrétní specifické vstupní hodnoty a následně vypočítat rovnici (30). Druhý člen na pravé straně této rovnice je již znám z předchozí podkapitoly. Adjoint solver spočítá levou stranu této rovnice $\frac{dL^T}{dD}$. Ta je odvozena úpravou rovnice (34), jak ukazují vztahy (41) a (42). [2]

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = \begin{bmatrix} 1_1 \\ \vdots \\ 1_M \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial x_M} \end{bmatrix} \quad (41)$$

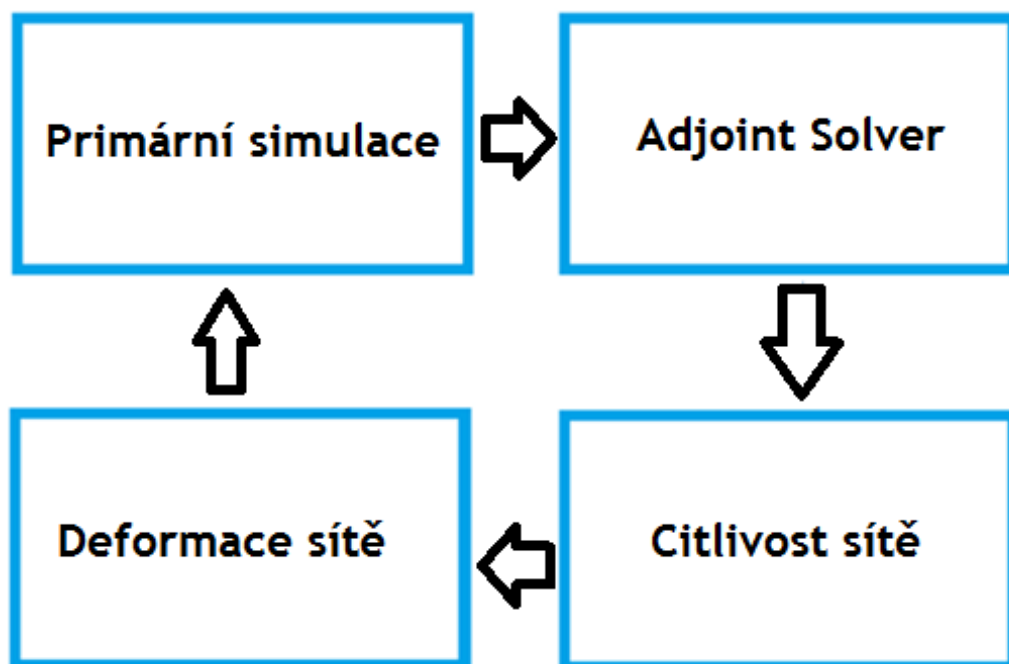
$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \beta_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial \beta_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{M,1} & \cdots & \phi_{M,N} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial x_M} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Po vyhodnocení výše uvedených vztahů je výsledný adjoint určen řešením systému (43). [2]

$$\begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,N} & 1_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \phi_{N,1} & \cdots & \phi_{N,N} & 1_N \\ 1_1 & \cdots & 1_N & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial d_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial d_N} \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \beta_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial \beta_N} \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \quad (43)$$

2.2.4 Shrnutí cyklu adjoint solveru

V praxi tedy probíhá výpočet tak, že proběhne standardní výpočet CFD simulace. Poté se určí sledované veličiny a proběhne výpočet příslušných adjointů. Z těch získáme citlivost veličiny na změnu výpočetní sítě a dle této citlivosti výpočetní síť kontrolovaně zdeformujeme. Cyklus dále pokračuje opětovným „přepočtem“ původní CFD simulace. Schéma zjednodušeně ukazuje Obr. 3. [2]



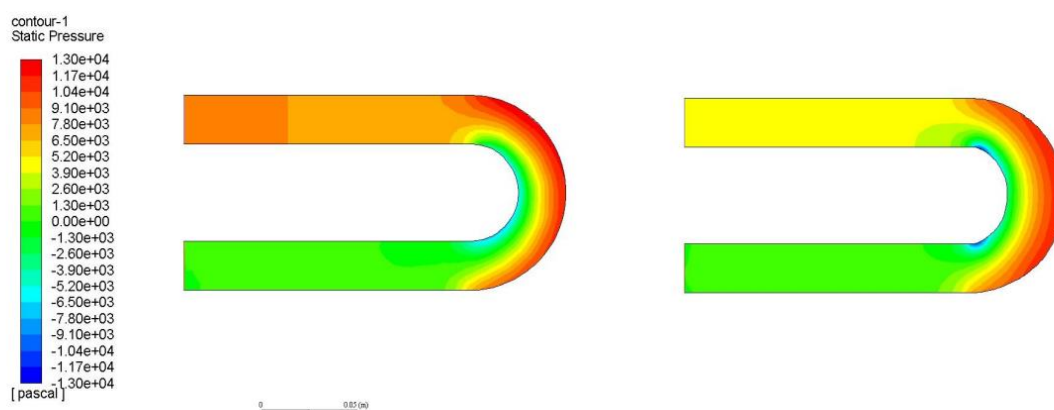
Obr. 3: Cyklus adjoint solveru



3 Využití adjoint solveru

Adjoint solver je stále poměrně nový a nepříliš zavedený nástroj. Častěji, než ke skutečným praktickým využitím je stále využíván více k experimentům ve snaze správně pochopit, kde spočívá jeho největší potenciál. Ostatně sám jsem měl možnost zeptat se dvou lidí z odvětví, jaké mají zkušenosti s jeho praktickým využitím. Jeden z nich byl šéfem CFD oddělení výpočetní firmy, druhý pak aerodynamik přímo v týmu Formule 1. Oba si dokázali vybavit jeden příklad, kdy se s úspěšným využitím adjoint solveru setkali, což jen potvrzuje fakt, že k jeho plnému rutinnímu nasazení je ještě daleko. Zmínil bych zde tedy alespoň několik prací, které se využití adjoint solveru věnují.

Jako první bych rád uvedl bakalářskou práci Ing. Pavla Heinze z VUT v Brně s příznačným názvem Adjoint solver. Ing. Heinz se ve své práci věnuje více počátečnímu nastavení simulace. Věnuje se více teorii, která bude v mé práci popsána pouze stroze, aby zbylo více prostoru pro praktické ukázky. V práci Ing. Heinze je uvedena jedna úloha s použitím adjoint solveru, ve které je jeho cílem snížit tlakovou ztrátu kolene při proudění v trubce. Na tomto výpočtu demonstruje různá nastavení deformace, rozmístění kontrolních bodů a také různá nastavení výpočetní sítě. Nutno podotknout, že celý výpočet je ve 2D a všechny výpočty v práci zmíněné jsou provedeny výhradně v programu Ansys Fluent, což může znamenat odlišnosti v možnostech nastavení solveru, například pozicování kontrolních bodů, potažmo celého výpočtu. V jeho práci se mu podařilo snížit tlakovou ztrátu kolene o 8,35 %. Na Obr. 4 je vidět průběh tlaku na původní a nové geometrii. [3]

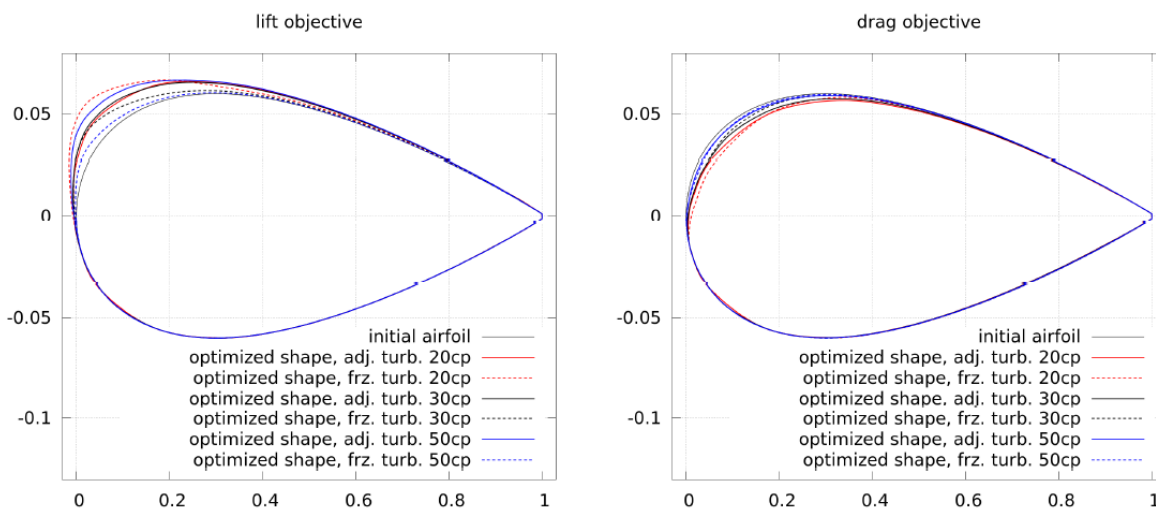


Obr. 4: Původní (vlevo) a výsledná geometrie úlohy z bakalářské práce Ing. Pavla Heinze [3]

Jako další příklad bych rád uvedl článek Matthiase Schramma, Bernarda Stoevesandta a Joachima Peinke „Optimization of Airfoils Using the Adjoint Approach and the Influence of Adjoint Turbulent Viscosity“. Cílem jejich práce, provedené v rámci softwaru Open Foam je jednak použití adjoint solveru na optimalizaci leteckých profilů, tedy úpravy jejich vztlaku a odporu, ale také porovnávají dva přístupy k modelování turbulence. Jedním z nich je



přístup zvaný „frozen turbulence“, u kterého je během adjointu počítáno se stejnou turbulentní viskozitou, jaká byla výsledkem primárního řešení. Druhá varianta je počítat s modelem turbulence i během výpočtů adjoint solveru. V článku je využit model turbulence Spalart-Allmaras, a bohužel je to také jediný model turbulence, který lze pro adjoint výpočty použít v softwaru STAR-CCM+. Na Obr. 5 jsou vidět výsledné tvary, jakými adjoint dosáhl zadaných hodnot veličin při různých přístupech k turbulenci a různém počtu kontrolních bodů křivek profilu. [4]



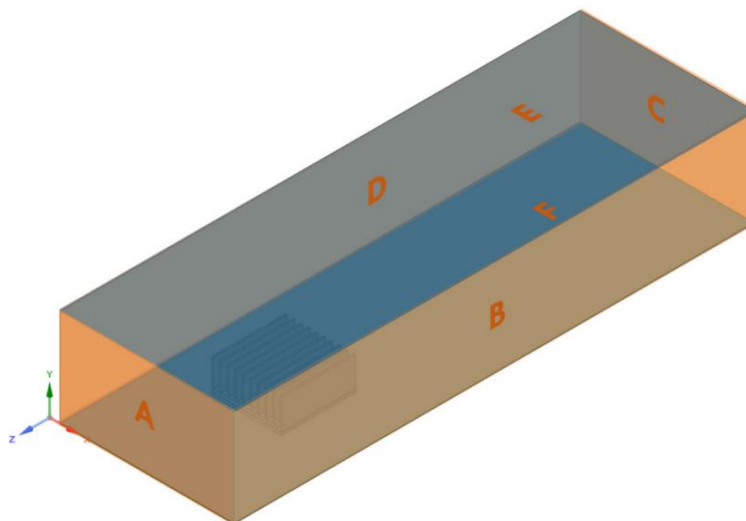
Obr. 5: Původní a výsledné tvary na základě zvyšování vztlačku (vlevo) či snižování odporu (vpravo) pro různý počet kontrolních bodů (cp) s dvěma různými přístupy k turbulenci v softwaru Open Foam [4]

Autoři článku upozorňují na fakt, že zatímco s použitím modelu turbulence jsou tvary velmi podobné nezávisle na počtu kontrolních bodů, tvary získané pomocí „zamrzlé“ turbulence jsou naopak velmi odlišné. Obecně vzato v závěru doporučují použití modelu turbulence oproti přístupu frozen turbulence, ačkoliv uznávají, že to nelze říci jednoznačně pro všechny případy. Také se tím, vzhledem k přidání další parciální diferenciální rovnice, výrazně prodlouží výpočetní čas. [4]

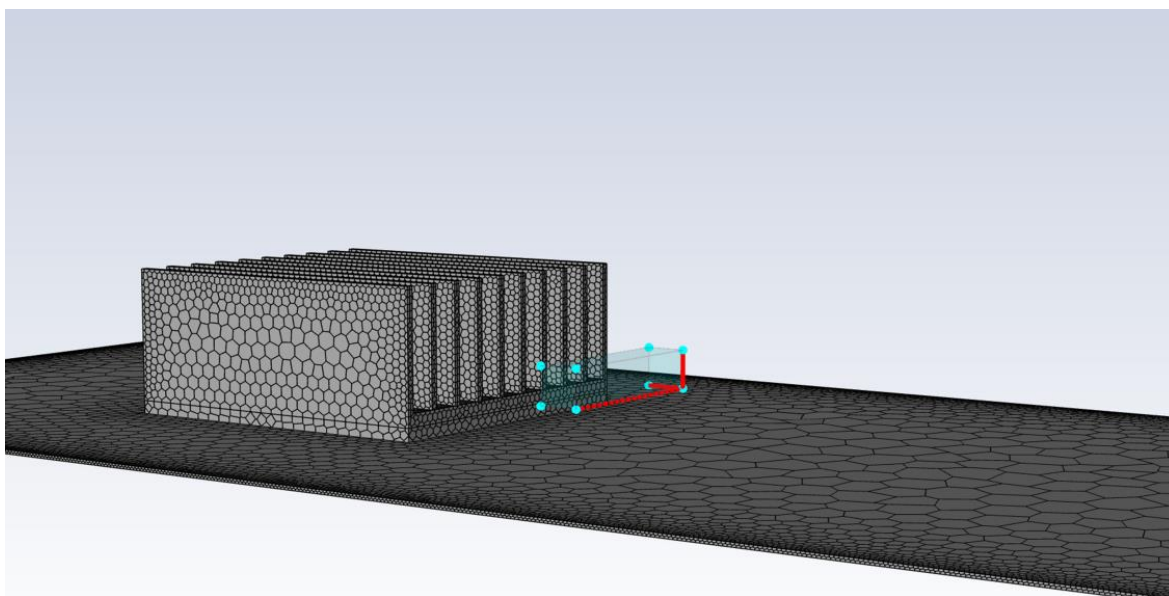
Ještě bych se rád zmínil o studii Optimization of Air Cooling Systems Using Adjoint Solver Technique od Grzegorza Czerwińskiego a Jerzyho Wołoszyna. Důvodů, proč si myslím, že právě tento článek stojí za zmínku je více. Hlavně se jedná o jednu z mála publikací referujících o použití adjoint solveru v trojrozměrném prostoru. Jejich cílem bylo snížit teplotu za vzdušným chladičem pomocí tvarování žeber chladiče s užitím adjoint solveru. Na Obr. 6 je vyobrazen výpočetní prostor experimentu, kdy plochy A a C mají zavedenou okrajovou podmínku atmosférického tlaku, aby se jednalo o volnou konvekci. Plochy A, B, C a D jsou nastaveny jako stěna v režimu „no-slip“, tedy $v = 0$, a na Obr. 7 je



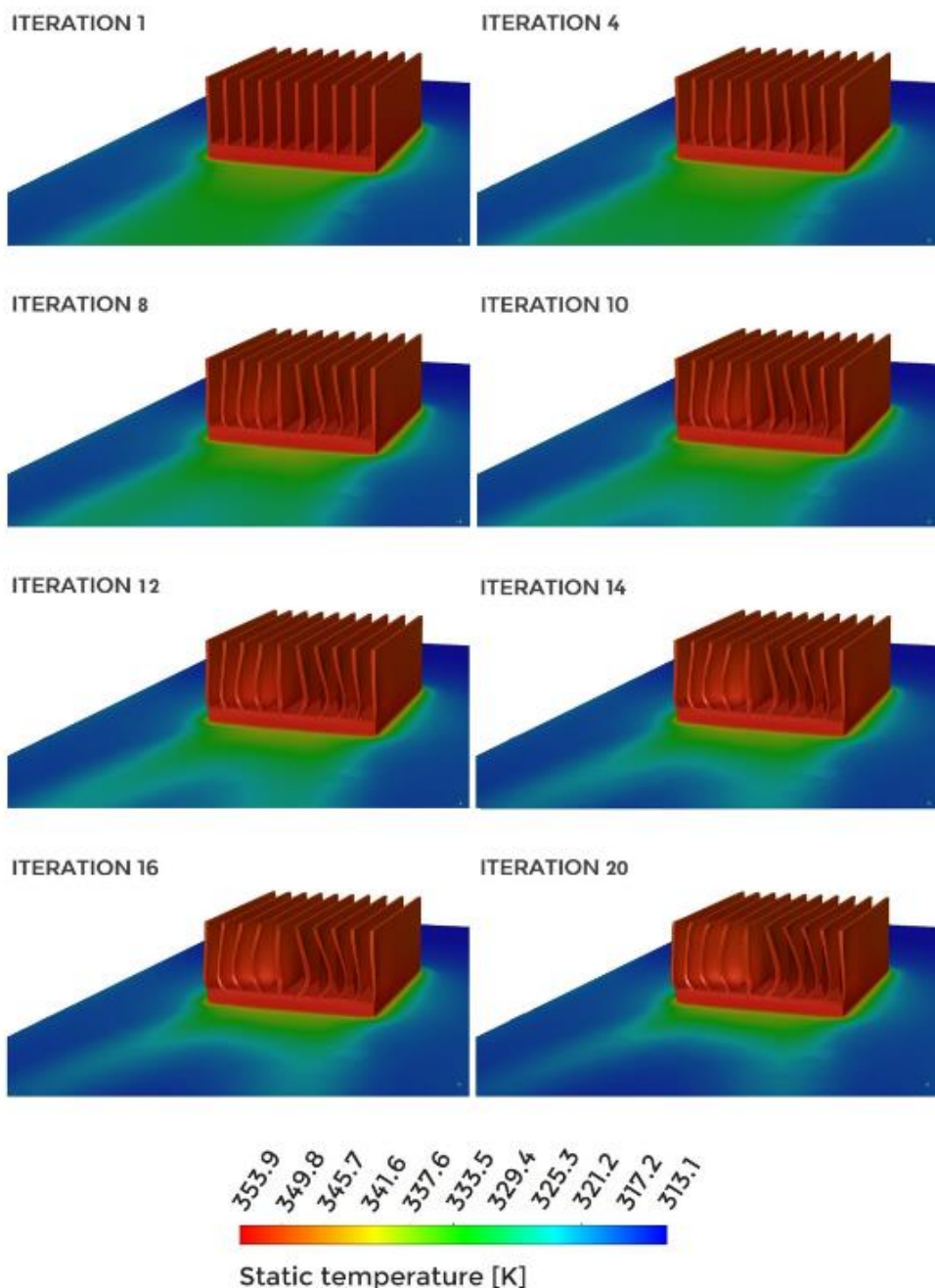
vyznačena oblast za chladičem, jejíž průměrnou teplotu se autoři snaží pomocí adjoint solveru minimalizovat. Na Obr. 8 je zobrazen postupný vývoj tvaru žebér obarvených barevnou škálou podle teploty. [5]



Obr. 6: Design CFD simulace s vzdušným chladičem [5]

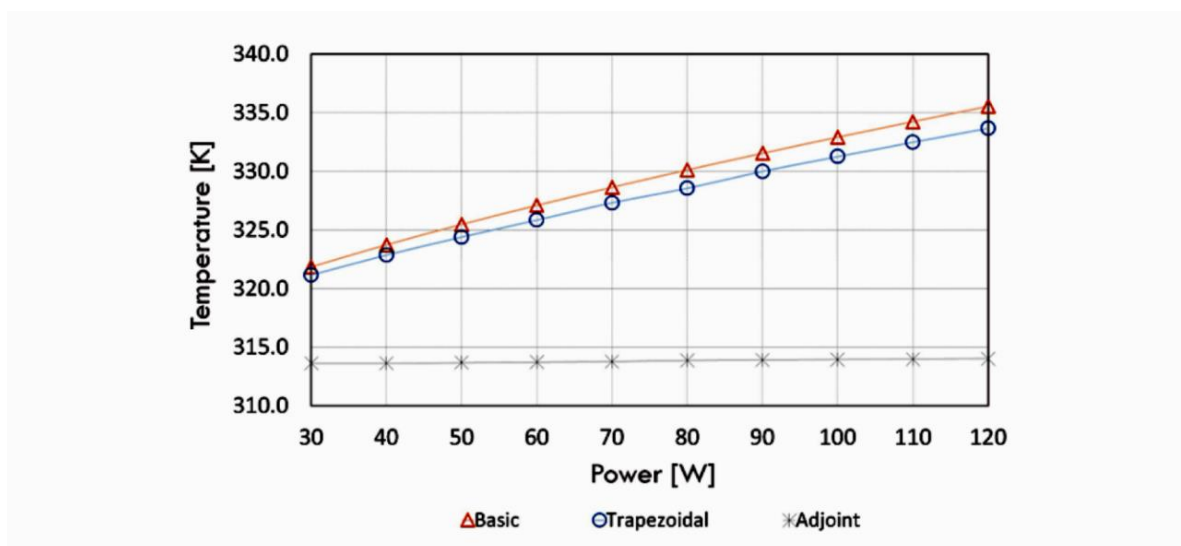


Obr. 7: Výpočetní síť s vyznačenou oblastí, ve které se autoři snaží minimalizovat teplotu [5]

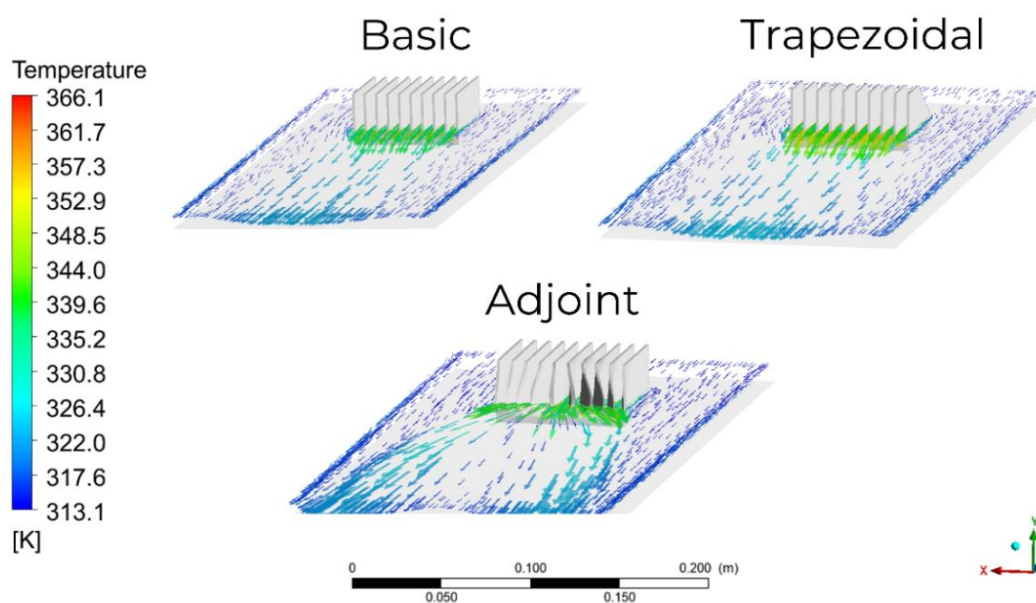


Obr. 8: Postup deformace vzdušného chladiče s barevně vyznačenou teplotou [5]

V článku byly porovnány tři varianty geometrie. Jedna z nich byla základní, tj. pouze obdélníková žebra (basic), dále z ní vycházející varianta se zdeformovanými žebry (adjoint) a ještě varianta se seřízlými náběžnými hranami žebor (trapezoidal). Výsledný graf teploty v oblasti za chladičem v závislosti na výkonu zdroje pod chladičem je pro všechny varianty zobrazen na Obr. 9. Obr. 10 potom zachycuje výsledný tvar proudění za chladičem a s ním i teplotu vzduchu. Na obrázku je pěkně znázorněné, jak pomocí adjoint solveru zdeformovaná žebra odklánějí teplý vzduch stranou, a ten tak neovlivňuje zkoumanou oblast za chladičem. [5]

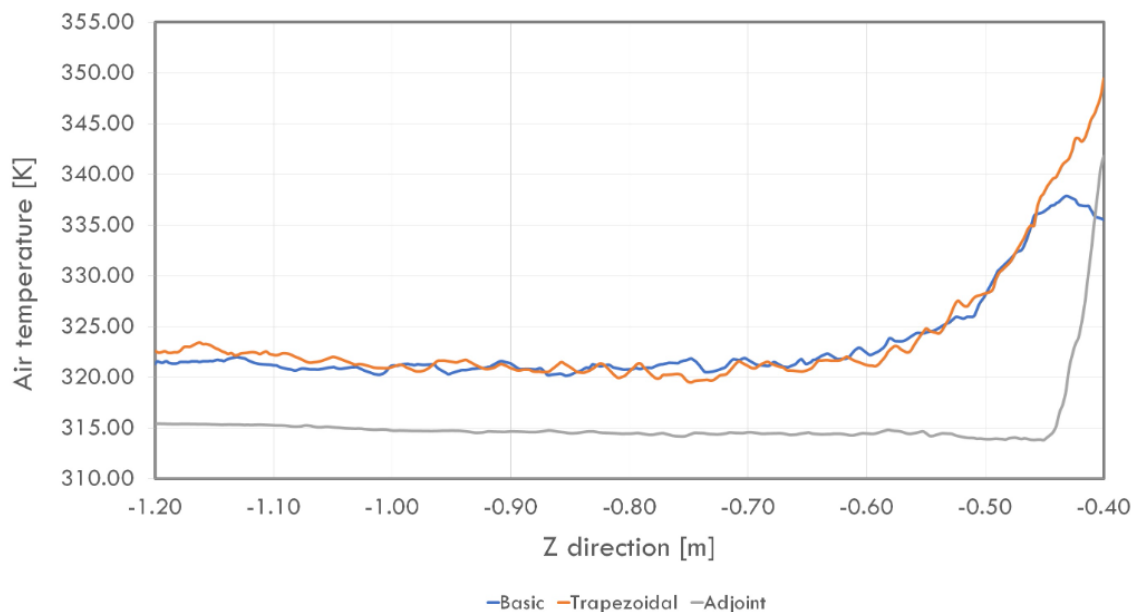


Obr. 9: Graf teploty za chladičem v závislosti na výkonu zdroje pro různé tvary žebíř [5] (Obrázku byl pro lepší čitelnost zvýšen kontrast)



Obr. 10: Proudění v oblasti za chladičem pro různé tvary žebíř obarvené škálou dle teploty [5]

Výsledkem je průběh teploty za chladičem ve střední rovině vykreslený v grafu na Obr. 11. [5]



Obr. 11: Průběh teploty ve střední vertikální rovině za chladičem pro všechny tvary žeber [5]

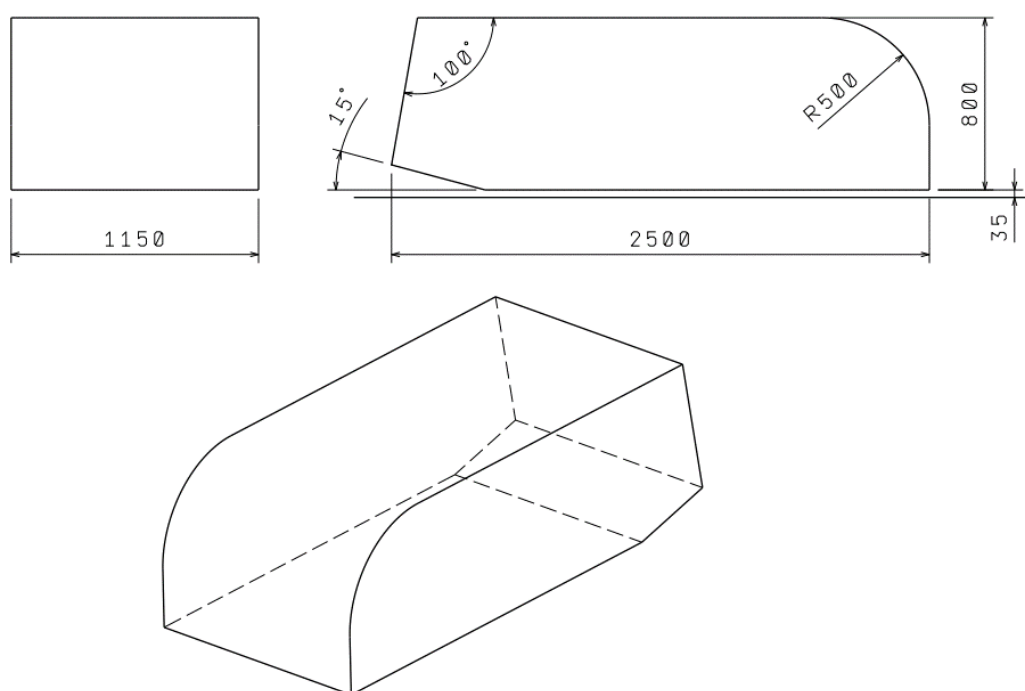
V závěru autoři u adjoint solveru, i přes nepochybně lepší výsledky, uvádí na pravou míru jeho omezení, a to konkrétně velkou citlivost na velikost buňky či například nemožnost použít transientní simulaci. Já za sebe bych k tomu rád přidal ještě jednu poznámku ohledně faktoru, kterému se autoři v textu nevěnují, a tím je cena výrobku. Autoři sice hned na začátku nízkou cenu jako výhodu chlazení vzduchem uvádějí, nezaobírají se však faktem, že adjoint solverem zdeformovaný chladič již o tuto výhodu zcela přichází, neboť se z velmi jednoduchého frézování rázem stává v lepším případě frézování výrazně složitější, ale pravděpodobně spíše dnes ještě stále velmi drahé sintrování. [5]



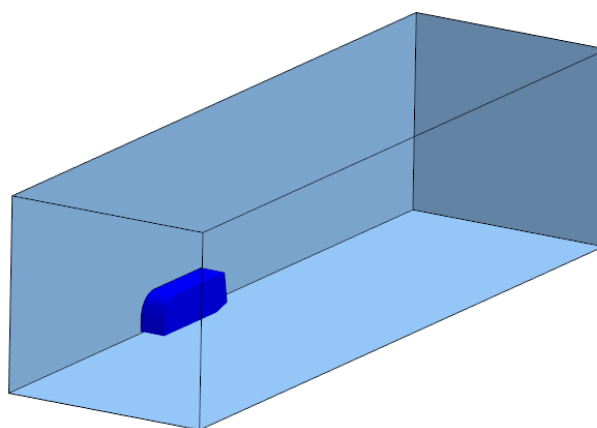
4 První výpočty na jednoduchém modelu

V této kapitole se budu věnovat prvním výpočtům na jednoduchém modelu v softwaru STAR-CCM+. Nastavení simulace použijeme dle standardní metodiky týmu CTU CarTech, pouze použijeme menší doménu, hrubší síť a upravíme pro adjoint nezbytné výpočetní parametry, což teda znamená přechod ze „segregated flow“ na „coupled flow“ a z turbulentního modelu $K - \varepsilon$ na jednorovnicový model Spalart – Allmaras, se kterým adjoint solver dovede pracovat.

Těleso použité pro první výpočty je tvarováno tak, aby mělo řádově podobné rozměry s vozem Formula Student, nemělo vepředu nahoře ostrou hranu, vzadu mělo naznačený difuzor, ale jinak zůstalo co nejjednodušší (Obr. 12). Navíc byly výpočty prováděny pouze na polovině tělesa s použitím okrajové podmínky symetrie. Celý prostor je zobrazen na Obr. 13. Okrajové podmínky byly převzaty ze standardní metodiky, tedy konstantní rychlost na vstupu $v_{inlet} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, zem ubíhající stejnou rychlostí v_{inlet} , atmosférický tlak na výstupu $p_{outlet} = 0 \text{ Pa}$, okrajová podmínka „Symmetry“ na rovině symetrie a druhá boční stěna s horní stěnou v režimu slip, tedy stěna bez tření. (Tedy neplatí, že $v = 0$)



Obr. 12: Tvar a rozměry zkušebního tělesa pro první výpočty



Obr. 13: Výpočetní prostor pro první provedené simulace

4.1 Optimalizace primárního řešiče

Vzhledem k tomu, že se jednalo o první výpočty s pomocí řešiče coupled flow, bylo nutné nejprve „odladit“ výpočetní parametry za účelem co nejrychlejší konvergence. V tomto případě se tedy jedná hlavně o Courantovo číslo, které je pro transienční simulaci definováno dle vztahu (44).

$$C = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (44)$$

Jedná se tedy o poměr rychlosti v násobené časovým krokem Δt ku velikosti buňky Δx . V případě ustálené simulace se v pravém slova smyslu nemůže jednat o časový krok, nicméně význam Courantova čísla je i v našem případě obdobný, neboť má zásadní vliv na stabilitu a konvergenci celého systému. Obzvláště v první fázi výpočtu tak nemůže být příliš vysoké, ovšem jeho udržování na konstantní hodnotě vede k extrémně pomalé konvergenci a k dlouhému výpočetnímu času, jak ukazuje Obr. 14.



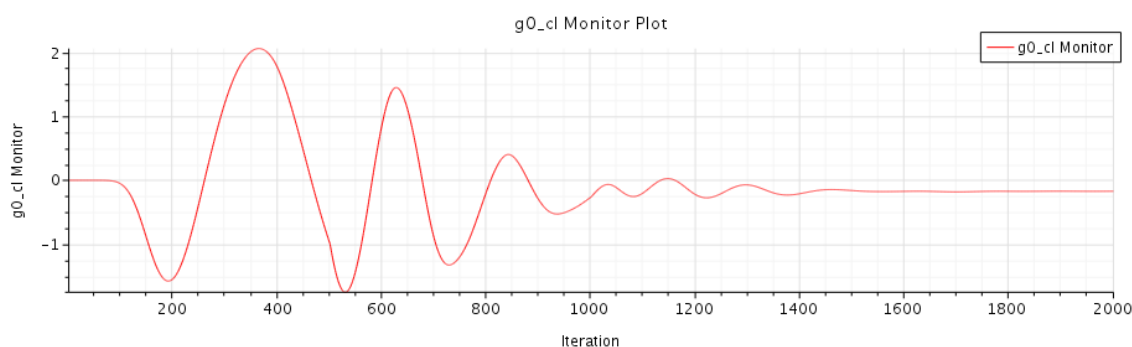
Obr. 14: Graf vypočtené hodnoty vztlaku pro konstantní Courantovo číslo = 7



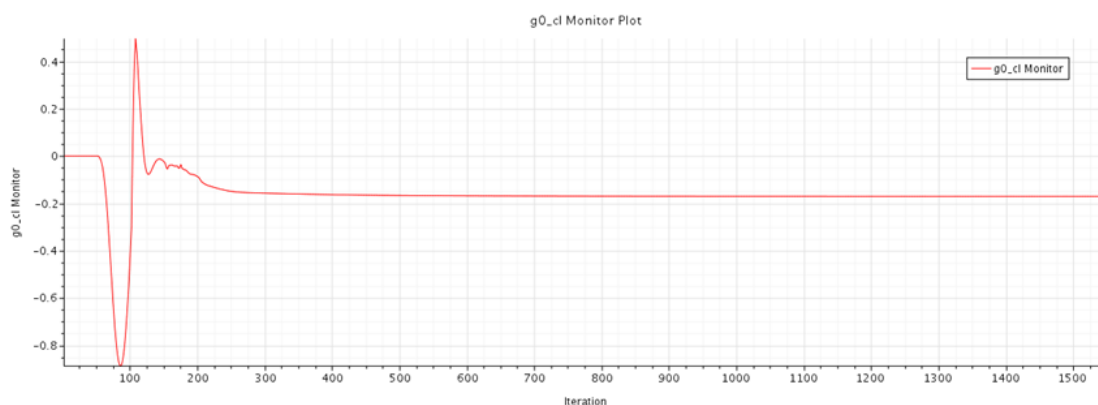
Jedna z možností, jak zrychlit konvergenci je nastavit automatický skript na změnu Courantova čísla po určitém počtu iterací. V našem případě se jednalo nejprve o přičítání stále stejné hodnoty, poté o násobení Courantova čísla.

V tuto chvíli by se slušelo říci, že takto obrovská Courantova čísla je možné dovolit si pouze v ustáleném proudění, neboť v případě transientního výpočtu má Courantovo číslo kromě konvergence a stability obrovský vliv také na přesnost. Jeho hodnota se v takových případech pohybuje zpravidla hlouběji pod hodnotou $C \leq 1$. K překročení této hodnoty by vůbec nemělo dojít.

Vrátím tedy k ustálenému proudění a srovnám dvě další varianty kontroly Courantova čísla. V prvním případě (Obr. 15) se jedná o přičítání ke Courantovu číslu, tj. $C_0 = 6$, $C_{n+1} = C_n + 6$ a v druhém případě (Obr. 16) jeho násobení dle $C_0 = 6$, $C_{n+1} = C_n \cdot 4$. Lze si všimnout, že takovéto extrémní zvyšování Courantova čísla dramaticky snižuje potřebný výpočetní čas.



Obr. 15: Zvyšování Courantova čísla o 6



Obr. 16: Násobení Courantova čísla 4

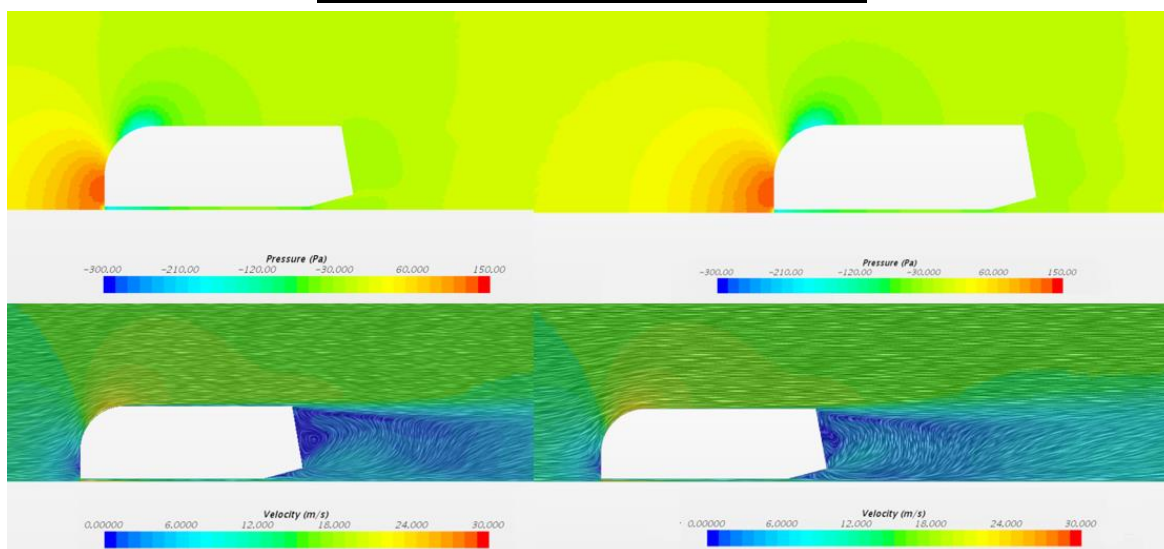
Vzhledem k výraznému vlivu Courantova čísla na přesnost výsledku u transientních výpočtů je namístě ověřit, zdali nemohou být výsledky odlišené i u výpočtů v ustáleném stavu. Při porovnání výsledků posledních dvou výpočtů (viz. Tab. 1), kde se hodnoty



Courantova čísla pohybují ve zcela odlišných řádech, si však lze všimnout, že rozdíl vypočtených hodnot vztlaku L a odporu D je, minimálně pro účely prvních experimentů, zcela zanedbatelný. O něco horší situace nastává, pokud tyto výsledky porovnáme s modelem turbulence $K - \varepsilon$ a řešičem „segregated flow,“ ovšem při změně řešiče jsou změny v číselných výsledcích očekávatelné. V každém případě se nejedná o výsledky neočekávané, či očividně fyzikálně nesprávné, jak dosvědčuje i podobnost řešení na Obr. 17.

Tab. 1: Číselné výsledky vztlaku L a odporu D pro poslední dvě zmiňované simulace

	L [N]	D [N]
+6	-23,5360	31,2389
· 4	-23,5158	31,2288
$K - \varepsilon, SF$	-27,8010	28,3850



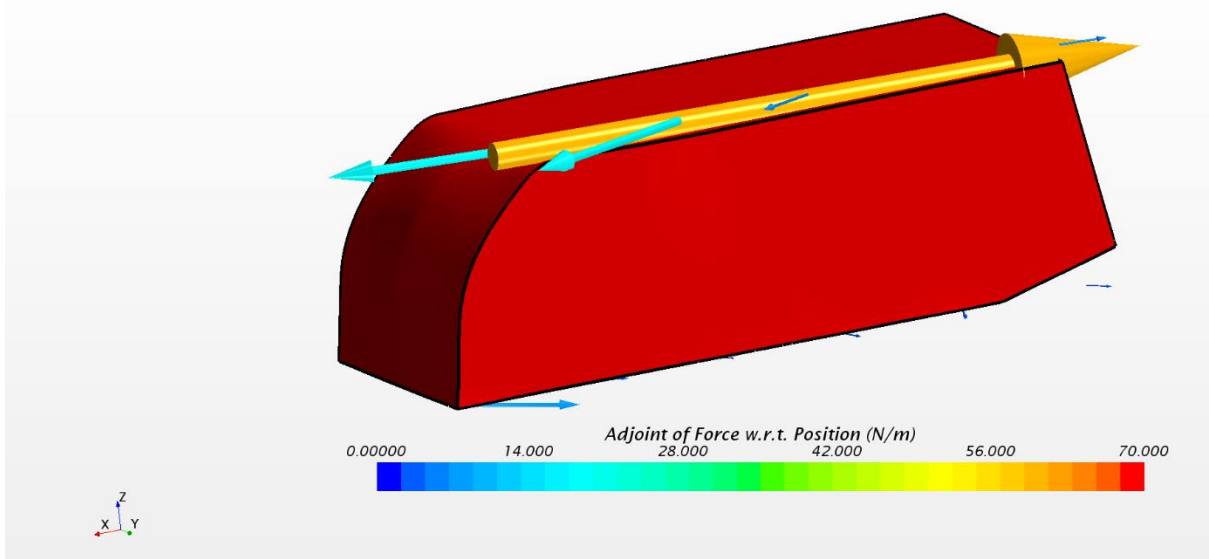
Obr. 17: grafické srovnání segregated flow + K -epsilon (vlevo) oproti coupled flow + Spalart-Allmaras (vpravo) z hlediska tlaku (nahore) a rychlosti (dole)

4.2 Aplikace adjoint solveru na jednoduchý model

Principu funkce tohoto nástroje jsem se již v práci věnoval, nezmiňoval jsem zde však ještě způsob, jakým uživatel může kontrolovat deformaci sítě. V případě softwaru STAR-CCM+ se tak děje pomocí kontrolních bodů, jejichž pozici si uživatel může libovolně navolit. Dále si uživatel zvolí násobek vektoru citlivosti, dále zvaný jako faktor deformace f , o který bude změna sítě provedena. Na Obr. 18 a Obr. 19 pak lze vidět rozdíl v deformaci podle podélných a příčně pozicovaných kontrolních bodů.

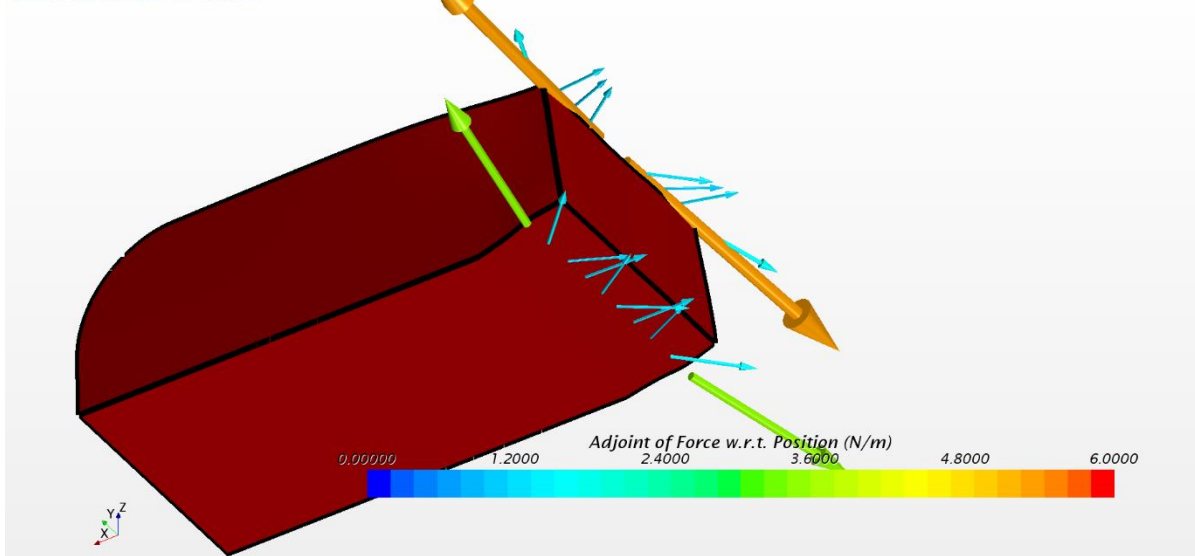


Simcenter STAR-CCM+



Obr. 18: Příklad zdeformování tělesa pomocí 12 kontrolních bodů umístěných podél jeho levých hran. V souladu s největší citlivostí (dominantní oranžová šipka) je nejvíce zdeformována horní přední hrana, kterou v původní geometrii tvořil jeden rádius

Simcenter STAR-CCM+



Obr. 19: Příklad zdeformování tělesa pomocí 10 bodů po jeho zadní části, nejlépe patrné je rozšíření difuzoru zhruba kolem úsečky s kontrolními body

4.2.1 Vliv faktoru deformace

Obě metody na obrázcích výše byly propočítány pro násobek vektoru citlivosti $f = 10^{-3}$ a $f = 10^{-4}$.

K výše zobrazeným obrázkům jsem se tedy dostal nejprve provedením primární simulace dle metodiky popsané v kapitole 4.1 a následným spuštěním adjoint solveru. Po doběhnutí deseti iterací adjoint solveru byla vypočtena citlivost sítě na sílu ve směru $-Z$, tedy na aerodynamický přítlak. Ta byla poté vyobrazena v bodech dle obrázku a tyto body



byly nastaveny jako kontrolní pro deformaci, jejíž výsledek je na obrázcích zobrazen. Jaké číselné výsledky přinesla různá nastavení morfování sítě, včetně porovnání s původní hodnotou získanou primárním výpočtem, ukazuje Tab. 2. Z tabulky vyplývá, že v každém případě došlo ke zlepšení sledované veličiny a dle očekávání k tomu došlo výrazněji v případě desetkrát většího deformačního faktoru. Co je ovšem zajímavé je vysoká závislost na pozici kontrolních bodů. Nárůst přítlaku pro příčně umístěné kontrolní body je výrazně a pro případ větší deformace dokonce mnohanásobně nižší, než je tomu v případě kontrolních bodů umístěných podélně. Je tedy jasné, že rozmístění bodů je klíčové pro co nejefektivnější využití nástroje.

Tab. 2: Výsledky první iterace adjoint solveru pro různé hodnoty deformace a různé umístění kontrolních bodů

Faktor deformace	$1 \cdot 10^{-4}$		$1 \cdot 10^{-3}$	
Příčně	$L [N]$	-23,5491	$L [N]$	-23,6788
	$D [N]$	31,2227	$D [N]$	31,1678
Podélně	$L [N]$	-23,7314	$L [N]$	-25,5084
	$D [N]$	31,1729	$D [N]$	30,6124

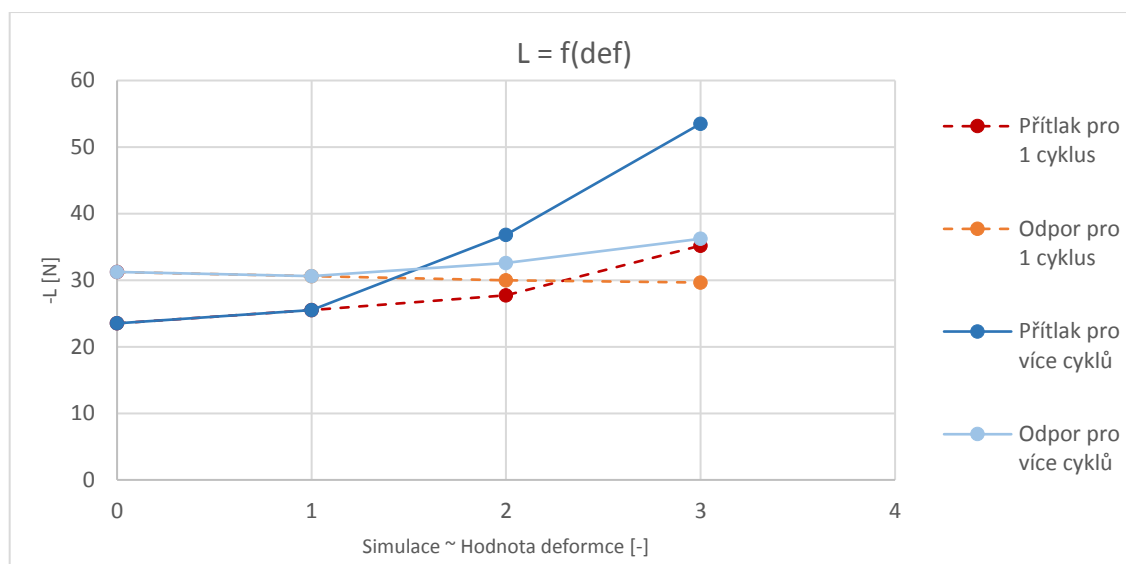
Původní	$L [N]$	-23,5158
	$D [N]$	31,2288

4.2.2 Vliv počtu cyklů adjoint solveru

Další věc, na kterou jsem se chtěl zaměřit je, jaký vliv na výsledek má počet cyklů adjoint solveru, který provedeme pro dosažení ekvivalentní hodnoty deformace. Tedy jaký bude rozdíl mezi použitím faktoru $f = 3 \cdot 10^{-3}$ a použitím faktoru $f = 1 \cdot 10^{-3}$ třikrát po sobě. To teda znamená vždy po deformaci sítě znovu provést celý cyklus od primárního výpočtu, přes adjoint solver až po nový výpočet citlivosti. Již z principu bude druhá varianta značně výpočetně náročnější, ale je rozumné očekávat, že přinese lepší výsledky. Jak tyto výsledky vypadají ukazuje graf na Obr. 20. Zorientovat se v tomto grafu je poněkud složitější, ale pokusím se zobrazení popsat tak, aby to bylo snadno představitelné. Odstíny modré znázorňují změnu přítlaku a pro informaci také odporu tělesa s provedením dalších cyklů adjoint solveru. Odstíny červené potom představují výsledek simulace vždy s odpovídající hodnotou deformace, ale získané pouze jedním cyklem. Například pro hodnotu 2 na ose X máme tedy v modrém hodnotu přítlaku pro dva cykly výpočtu při použití



$1 \cdot 10^{-3}$ a v červeném hodnotu přitlaku po použití pouze jednoho cyklu adjoint solveru s faktorem $2 \cdot 10^{-3}$. Z tohoto důvodu je spojnice mezi červenými body znázorněna pouze přerušovaně, neboť se nejednalo o jeden, postupně se zlepšující výpočet, ale o opakování stejného výpočtu s různou hodnotou deformace. Pro lepší přehlednost jsou výsledné hodnoty uvedeny i v Tab. 3.



Obr. 20: Graf srovnání vyšších hodnot deformace oproti dělení na nižší s větším počtem cyklů

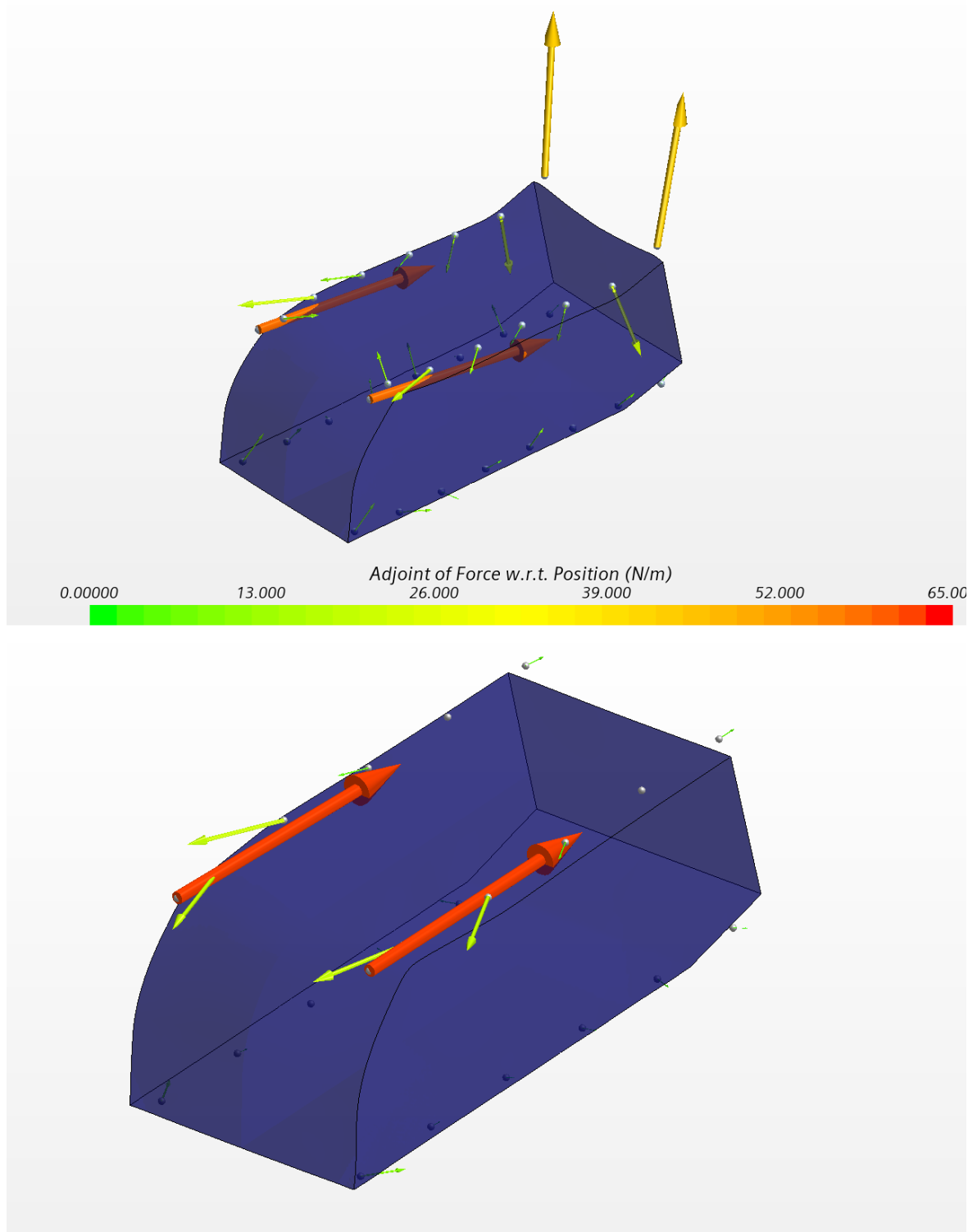
Tab. 3: Číselné hodnoty přitlaku a odporu pro zmiňované simulace

	Přítlak [N]		Odpor [N]	
Původně	23,52		31,22	
f	1x1e-03			
Hodnoty	25,51		30,61	
f	1x2e-03	2x1e-03	1x2e-03	2x1e-03
Hodnoty	27,71	36,81	30,00	32,60
f	1x3e-03	3x1e-03	1x3e-03	3x1e-03
Hodnoty	35,20	53,51	29,65	36,22

Z původních 23,5 N přitlaku se tedy použitím deformačního faktoru $3 \cdot 10^{-3}$ hodnota zvedla na 35,2 N, což je téměř 50% nárůst. Oproti tomu použitím deformačního faktoru $1 \cdot 10^{-3}$ se sice napoprvé přitlak zvedl pouze na 25,5 N, jednalo se tedy 8,5% nárůst, nicméně po dalších dvou cyklech adjoint solveru se již hodnota přitlaku rovná 53,5 N, což odpovídá 128 % nárůstu. V případě striktního omezení výpočetním časem tak bude varianta vyšší deformace zpravidla výhodnější. Pokud však vezmu v potaz určité omezení hodnotou deformace, případně složitostí tvaru, které je koneckonců všudypřítomné, není volba již tak jednoznačná. Pravděpodobně nebude možné donekonečna upravované tvary zvětšovat a už vůbec ne zmenšovat, čili určitá efektivita kroku je, spolu s výpočetním časem, určitě také



důležitá. Na čím více cyklů bude deformování síť rozděleno, tím účinněji lze daný prostor využít. Výsledná geometrie obou přístupů i s citlivostí pro konečný cyklus adjoint solveru je vyobrazena na Obr. 21.



Obr. 21: Srovnání výsledných geometrií variant $3e-3$ (dole) a $3 \times 1e-3$ (nahore)

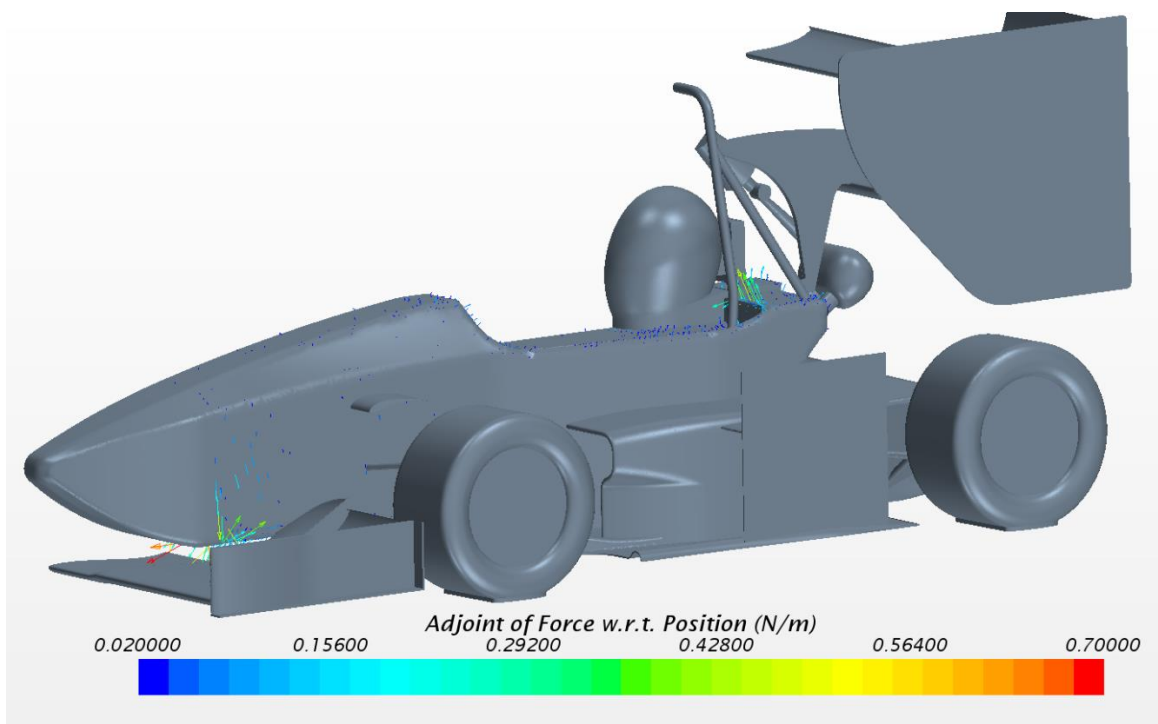


Z obrázku lze vyčíst, že deformace vepředu je velmi podobná. Znamená to tedy, že hodnota citlivosti sítě se zde příliš nemění během cyklů, a tak se vícero menšími kroky dostaneme na víceméně stejný tvar, jako jedním větším. Vzadu je však na první pohled vidět velký rozdíl, a to že metoda s větší deformací vůbec nedokázala podchytit hlavní zdroj přitlaku, kterým je zvýšení zadní odtokové hrany. Zdůrazňuje to tedy kompromis, kterého se uživatel dopouští, pokud používá příliš vysokou hodnotu deformace. Na jednu stranu získává vyšší „účinnost“ vzhledem k výpočetnímu času, na druhou stranu se však může připravit o velké množství snadno získaného přitlaku.



5 Výpočty s celým vozem

Po úspěšném ověření metodiky na jednoduchém modelu je tedy na místě přejít na složitější tvary, v mém případě na vůz Formula Student jako takový. Ohledně nastavení simulace bylo na zprovoznění výpočtu potřeba upravit znovu nastavení Courantova čísla, aby došlo ke konvergenci celého systému. Zkoumaná geometrie, převzatá z vývoje vozu FS.12 pro sezónu 2020, spolu s prvním výpočtem a znázorněním citlivosti, je vyobrazena na Obr. 22.



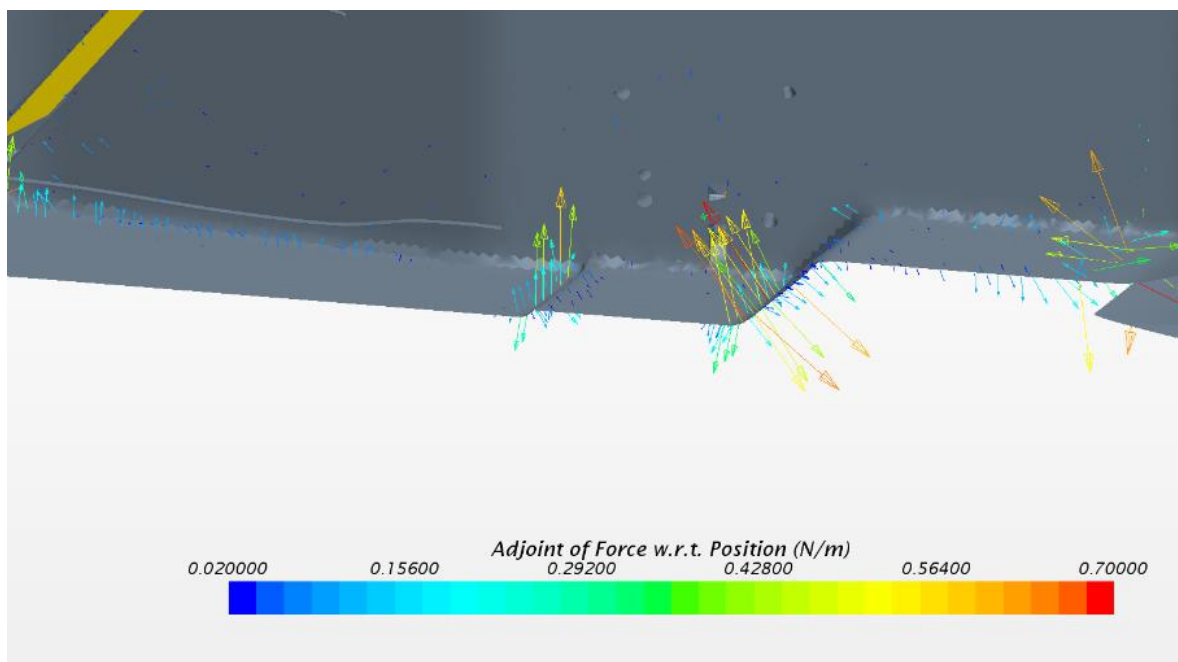
Obr. 22: Použití adjoint solveru na celý vůz studentské formule. Na ještě nezdeformované geometrii CFD modelu vozu je zde zobrazen vektor citlivosti podél monokoku vozu.

5.1 Deformace monokoku

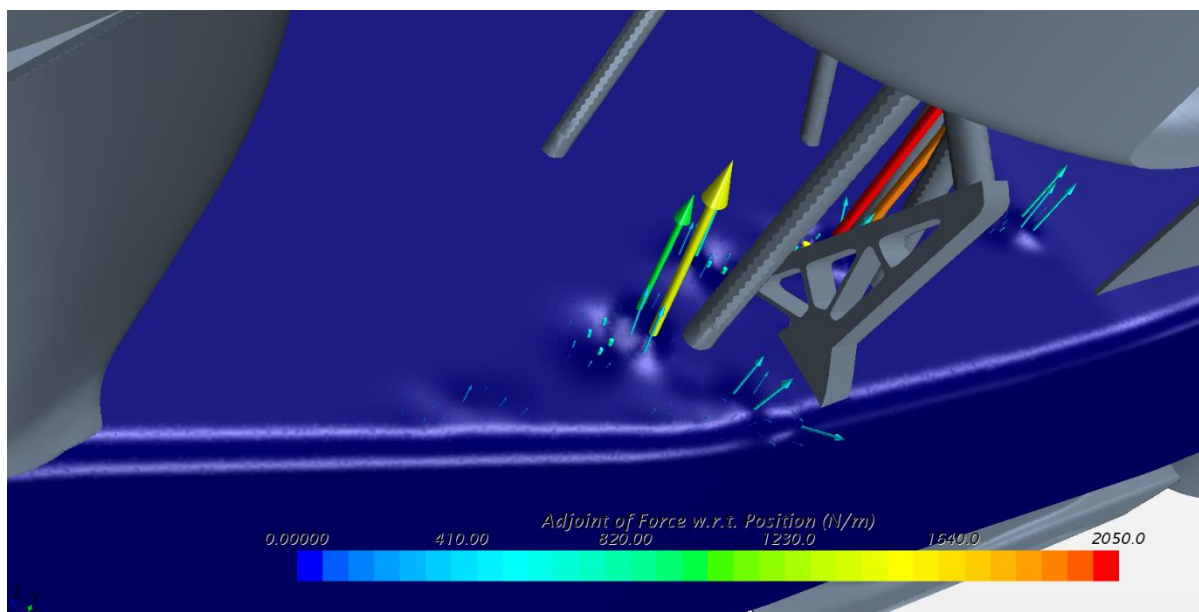
Jak je již patrné z obrázku výše, citlivost je zobrazena v sadě bodů vytvořené pomocí odsazení od hlavní části šasi, tedy karbonového monokoku. Jedná se o velký díl složený z jednodušších tvarů, který by tedy nemusel podléhat přílišné náročnosti z hlediska kvality sítě. Zároveň se jedná o poměrně robustní díl, který by měl na sobě snést výraznější změny, aniž by muselo dojít k naprosto nereálné deformaci sítě. Z Obr. 23 níže však můžeme vyčíst zásadní úskalí používání adjoint solveru. Z obrázku je patrné, že řádově nejvyšší hodnoty citlivosti jsou zpravidla vypočítány v malých oblastech, například v hranách, či v místech, kde proudění interaguje ještě s dalším dílem, jak ukazuje Obr. 24. Na tomto obrázku, už lze také vidět, jak se geometrie zdeformuje v případě, že tuto sadu bodů použijeme jako kontrolní. Místo očekávané deformace celého šasi zůstane geometrie naprosto beze změny až na právě zmiňovaná místa, kde se díky vysokým citlivostem vytvoří doslova „boule,“ či



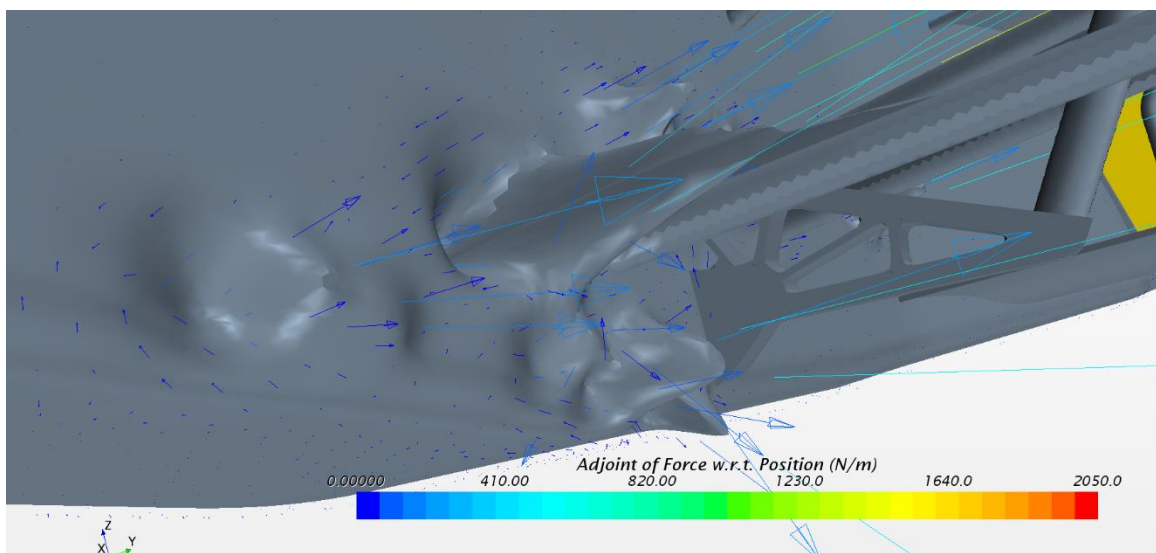
naopak důlky. Extrémní a pro simulaci zcela nepoužitelný tvar je pro zajímavost uveden v Obr. 25.



Obr. 23: Vyobrazení citlivosti podél šasi vozu, detail na spodní plochy



Obr. 24: Již zdeformovaná geometrie při použití zmiňované sady bodů jako kontrolních. Deformoval se pouze monokok, tedy modrá část.



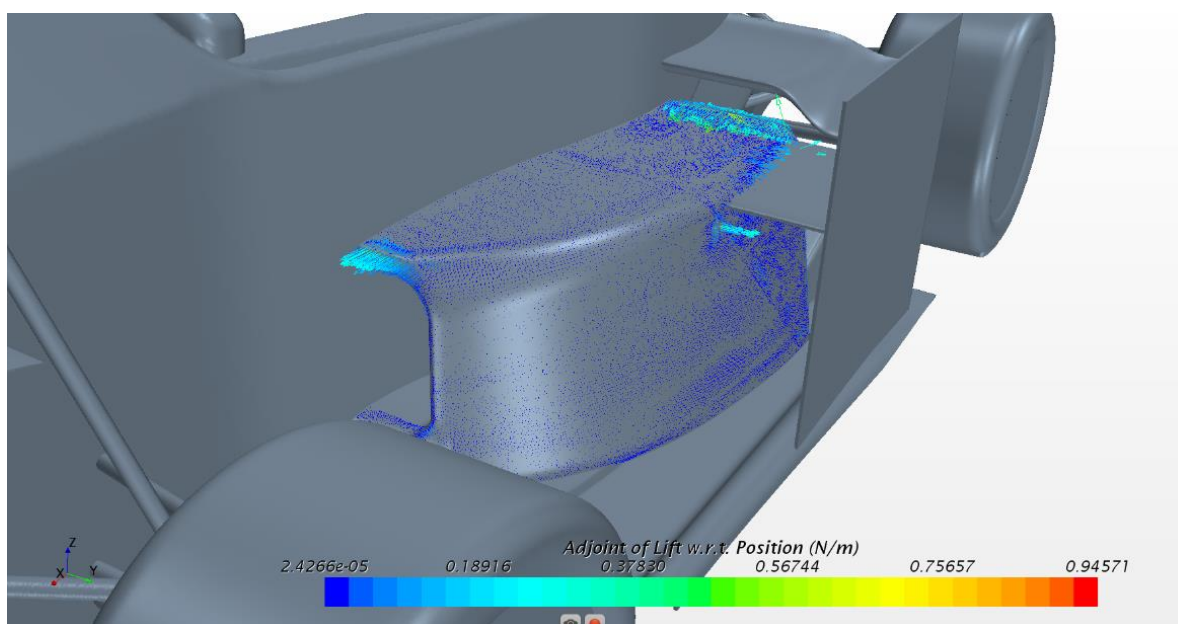
Obr. 25: Citlivost vypočtená pro jemněji vysítovaný monokok na již výrazně zdeformované síti

5.2 Deformace bočnic

Po výpočtech spojených s deformací monokoku jsem se přesunul na další část vozu, tedy bočnice neboli sidepody. Tentokrát se již jedná o geometrii z návrhu vozu FS.13.

5.2.1 Boční kryt

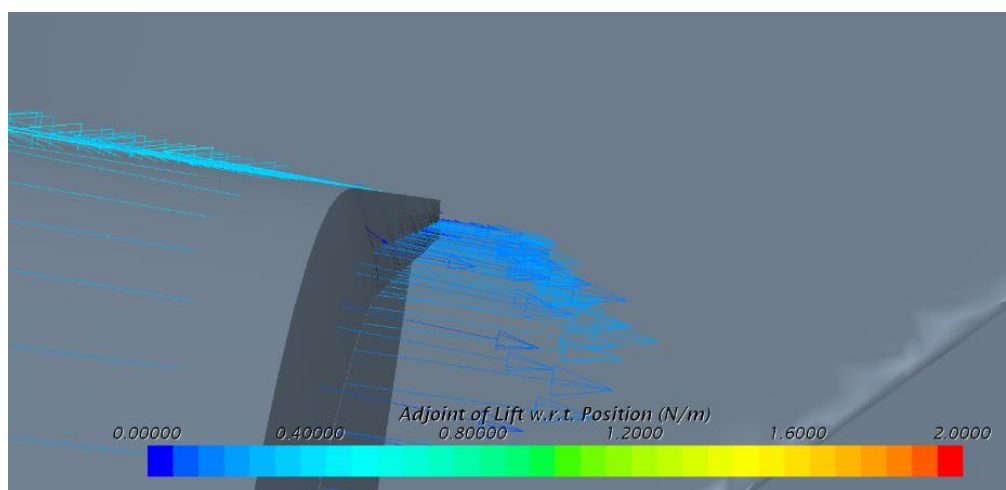
Pro začátek jsem zvolil nejdominantnější díl celé sestavy, tedy kryt jako takový. Jako sledovanou veličinu zatím zachovejme aerodynamický přítlak, ovšem zredukovaný pouze na oblast bočnic a zadní křídlo. Jak vypadá citlivost, tentokrát na simulaci se stejně jemnou sítí, jako ostatní simulace dle standardní metodiky týmu CTU CarTech, je patrné z Obr. 26.



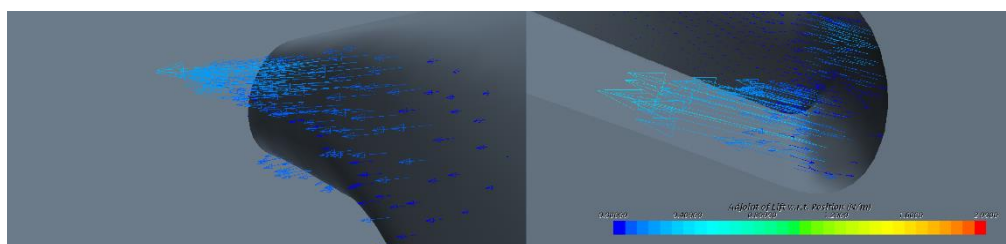
Obr. 26: Citlivost na sidepodech z vývoje vozu FS.13



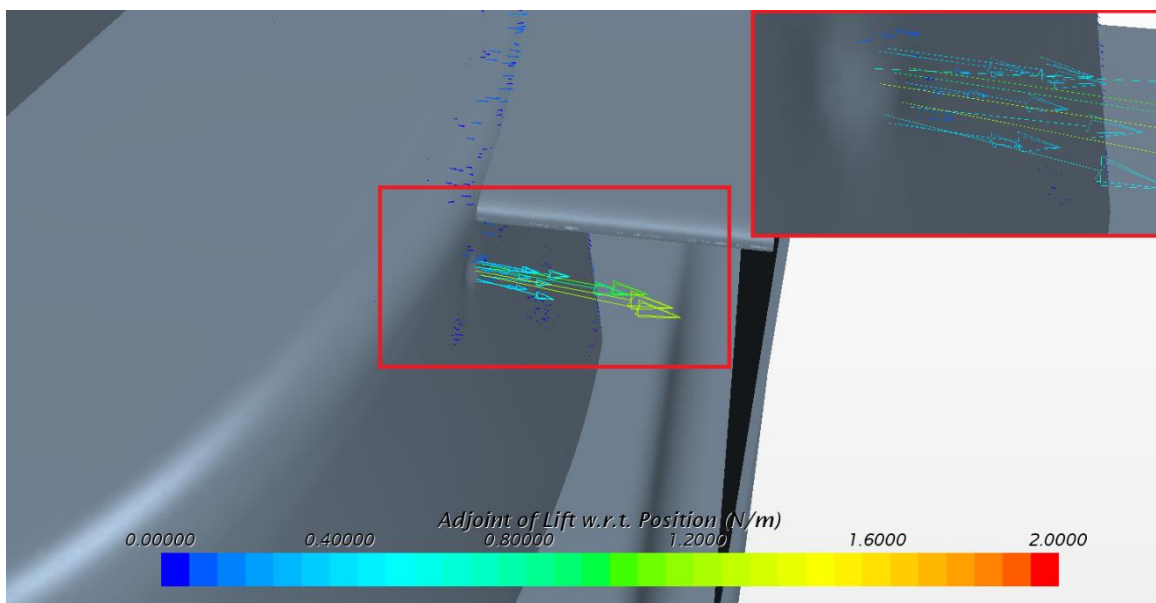
Lze si všimnout, že trendy jsou velmi podobné jako v případě monokoku. Nejvyšších citlivostí dosahujeme na náběžné a odtokové hraně, případně v místě, kde sidepod interaguje s bočním profilem. Navíc si můžeme všimnout, že hodnoty citlivosti jsou na rozdíl od dřívějších simulací velmi malé. Pokud si však přes velký faktor deformace přeci jen vynutíme alespoň pouhým okem viditelnou změnu sítě, opět si všimneme, že drtivá většina zůstane naprosto nezměněna. Adjoint solver má tendenci zaostřovat odtokovou hranu sidepodu, jak zachycuje Obr. 27 a k tomu mírně deformovat hranu náběžnou, hlavně v horní části (Obr. 28). Důvod, proč si adjoint solver vybral hlavně horní hranu je logický, protože vyrovnáním tlaků podle horizontální hrany je možné dosáhnout vyššího přtlaku, zatímco podél boční, tedy vertikální hrany se na přtlaku nic nezmění. Jiné by to pochopitelně bylo, pokud bychom se snažili snížit například odpor vozidla. Opět se zde také projevuje fenomén „boulí“ v místech interakce proudění s jinou částí vozu, to ukazuje Obr. 29, kde přímo před bočním profilem vektor jasně ukazuje jednu z nejvyšších citlivostí kolem krytu.



Obr. 27: Zostření odtokové hrany



Obr. 28: Citlivost na náběžné hraně sidepodu zvenku (vlevo) a zevnitř (vpravo)

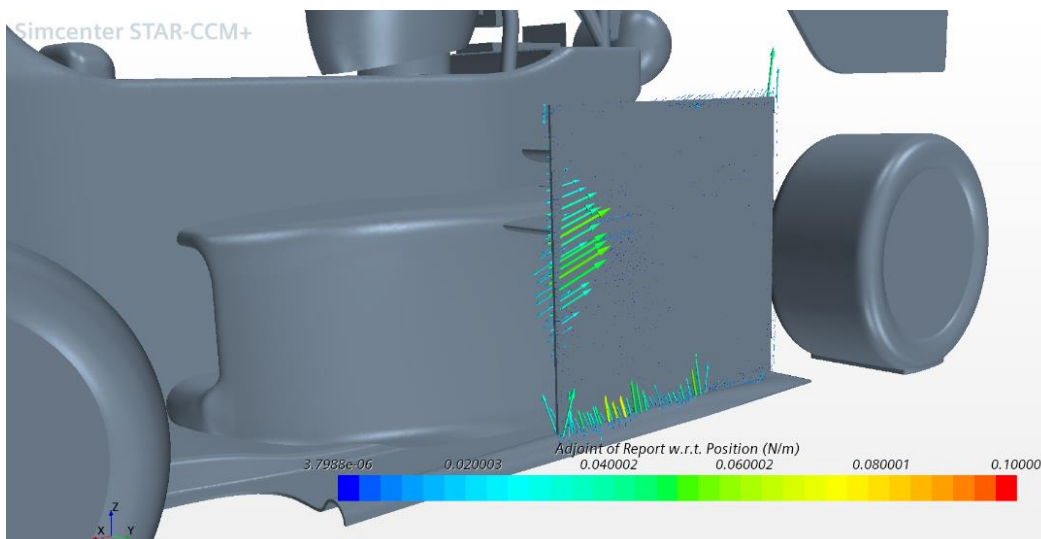


Obr. 29: Boule v oblasti interakce proudění s bočním profilem

Ze zatím zjištěných informací lze tedy vyvodit, že použití velkého množství kontrolních bodů rovnoměrně rozmístěných okolo součásti nikdy nepovede ke změně tvaru součásti jako celku. Naopak je to vhodné k finální optimalizaci náběžných a odtokových hran. Další problém, pokud bychom chtěli deformovat celou část, bude, že morfovat můžeme jen do chvíle, než některé buňky sítě získají záporný objem. V tuto chvíli již není možné provést další cyklus primárního řešiče. Proto je tedy na velké změny vhodné použít spíše hrubší síť.

5.2.2 Deformace boční desky (endplatu)

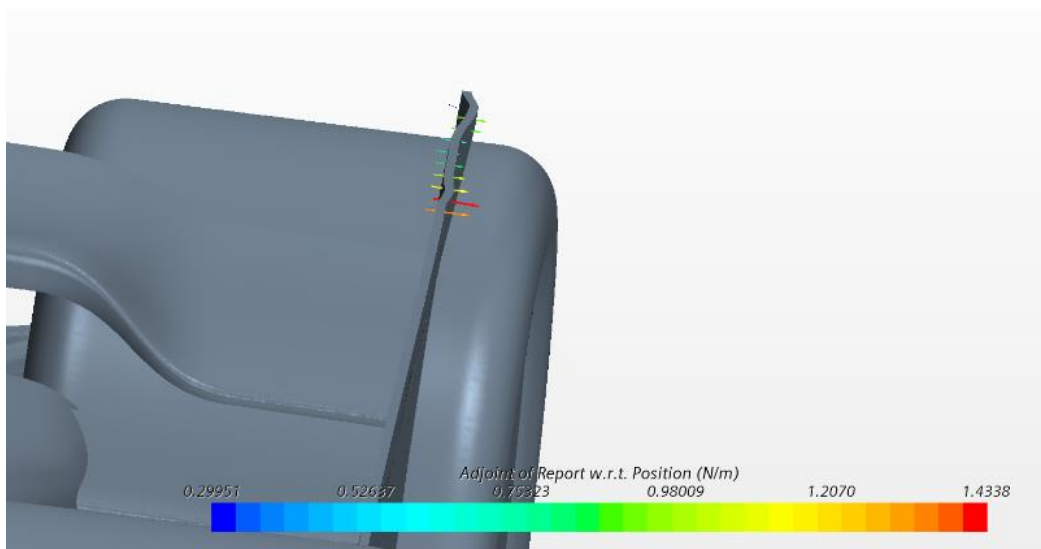
Když už je tedy k dispozici takto jemně vysíťovaná simulace, rozhodl jsem se pokusit ještě o deformaci další součásti vozu ve stejné oblasti, a to konkrétně boční desky přichycené k aerodynamickým profilům kolem krytu. Zobrazení citlivosti ukazuje Obr. 30. Aby nebylo morfování sítě omezené podél dolní hrany, je zde ponechána mezera mezi deskou a podlahou vozu. Z rozsahu barevné škály je rovněž vidno, že citlivost je v tomto místě velmi malá.



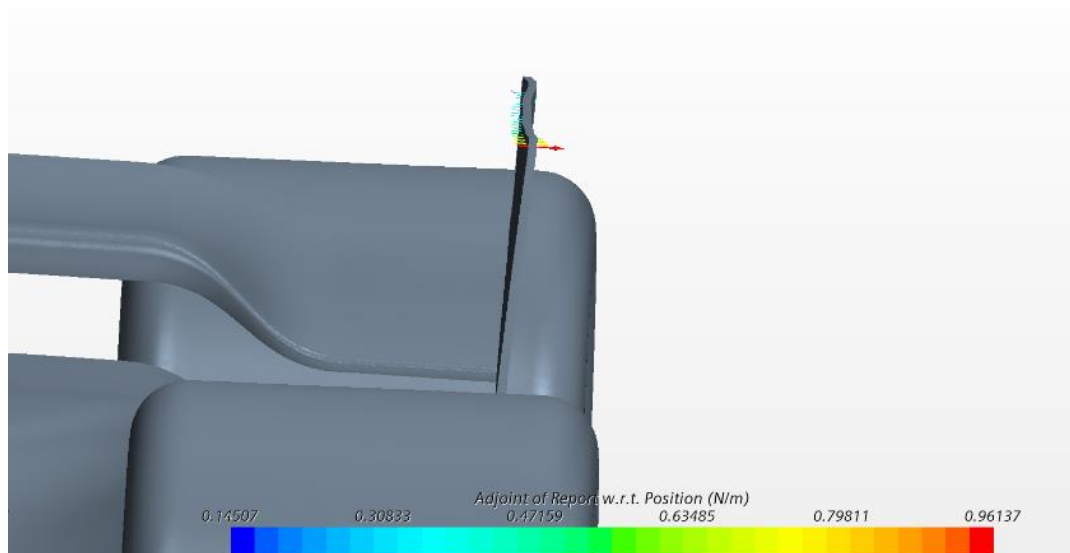
Obr. 30: Citlivost podél bočního endplatu

Protože se jedná pouze o jednoduchou rovnou desku, budou na ní dobře patrné různé trendy deformace, které vzniknou odlišnými způsoby použití kontrolních bodů.

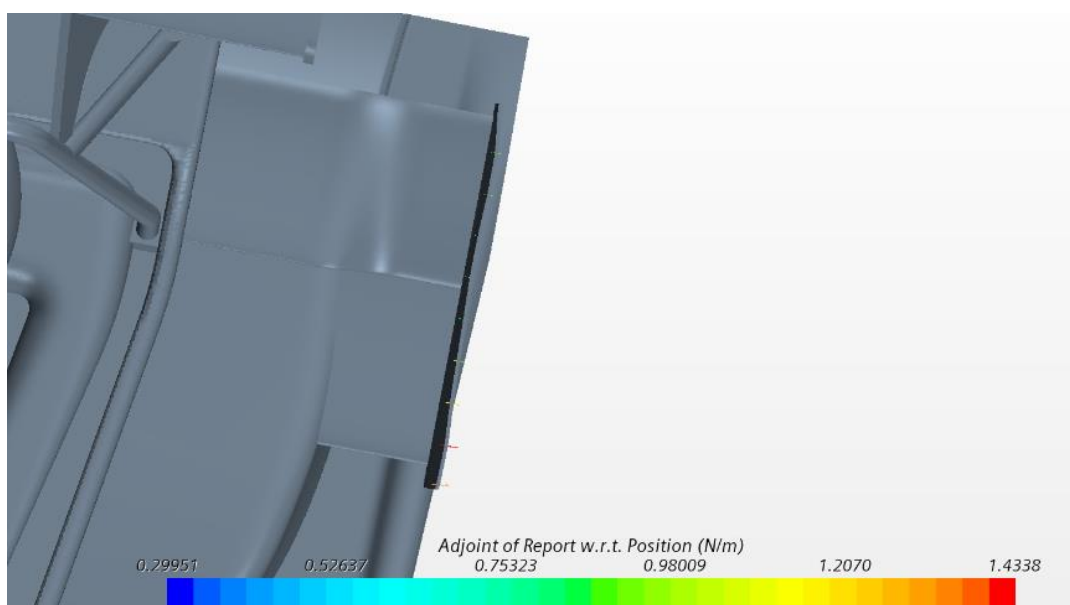
Jedna z možností je úprava **horní hrany**. Na obrázcích níže (Obr. 31, Obr. 32, Obr. 33 a Obr. 34) jsou vyobrazeny varianty, které mají rozmístěných 10 nebo 20 kontrolních bodů podél identické křivky u horní hrany endplatu. Endplate byl v obou případech zdeformován faktorem $f = 1 \cdot 10^{-2}$.



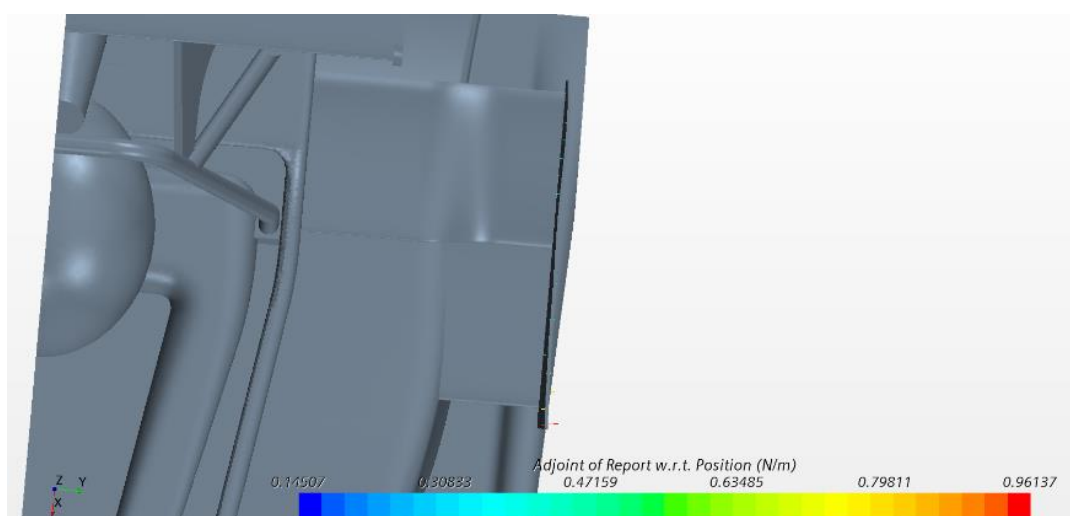
Obr. 31: 10 kontrolních bodů podél horní hrany endplatu



Obr. 32: 20 kontrolních bodů podél horní hrany endplatu



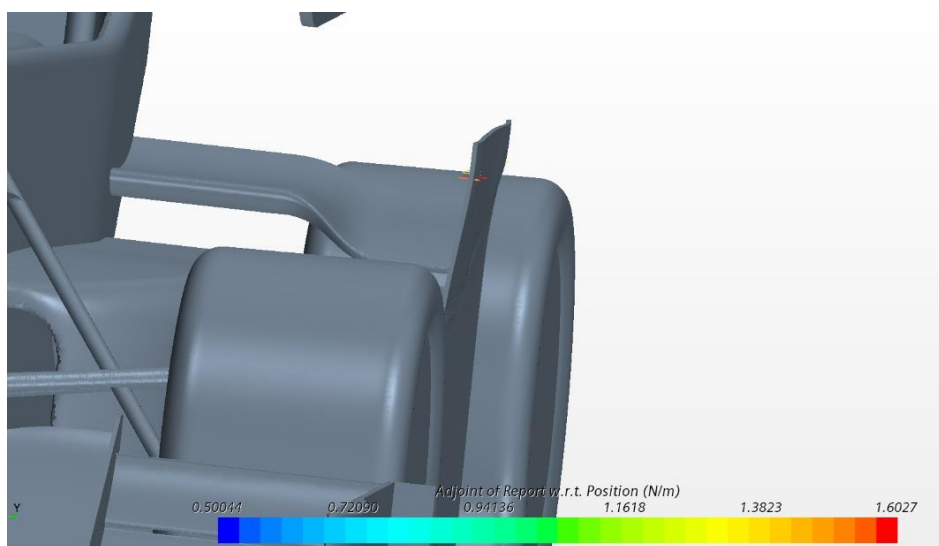
Obr. 33: 10 kontrolních bodů podél horní hrany endplatu, pohled shora



Obr. 34: 20 kontrolních bodů podél hrany endplatu, pohled shora

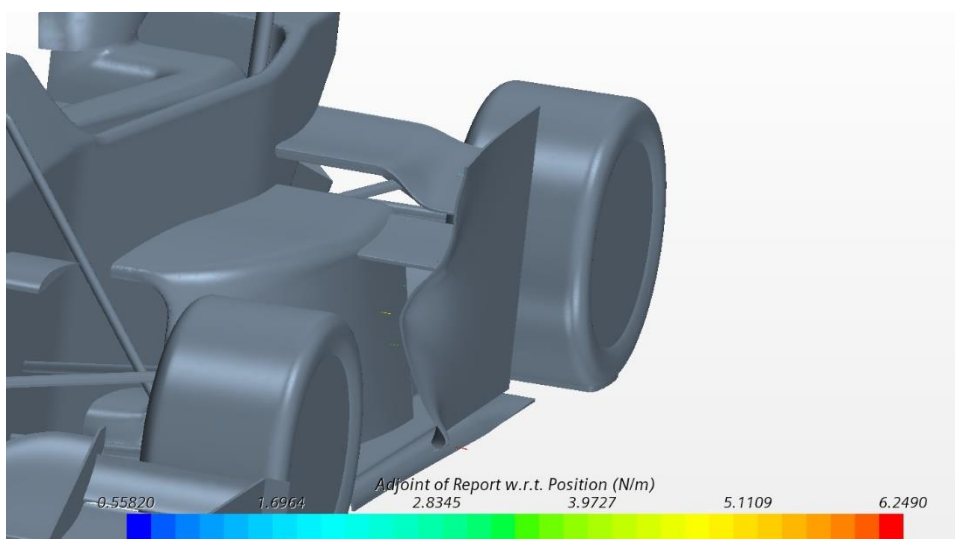


Při soustředěnějším pohledu je z obrázku vidět, že vyšší počet kontrolních bodů zmenšuje hodnotu deformace. Opět je tedy vhodné hledat určitý kompromis, neboť s vyšším počtem kontrolních bodů lze očekávat vyšší shodu deformace s citlivostí a tím i vyšší dříve zmiňovanou „účinnost“ deformace. Pro zajímavost uvedme ještě variantu, kdy body nejsou podél žádné hrany dílu. Deformace podle kontrolních bodů umístěných po vodorovné čáře značně pod horní hranou endplatu je patrná na Obr. 35.

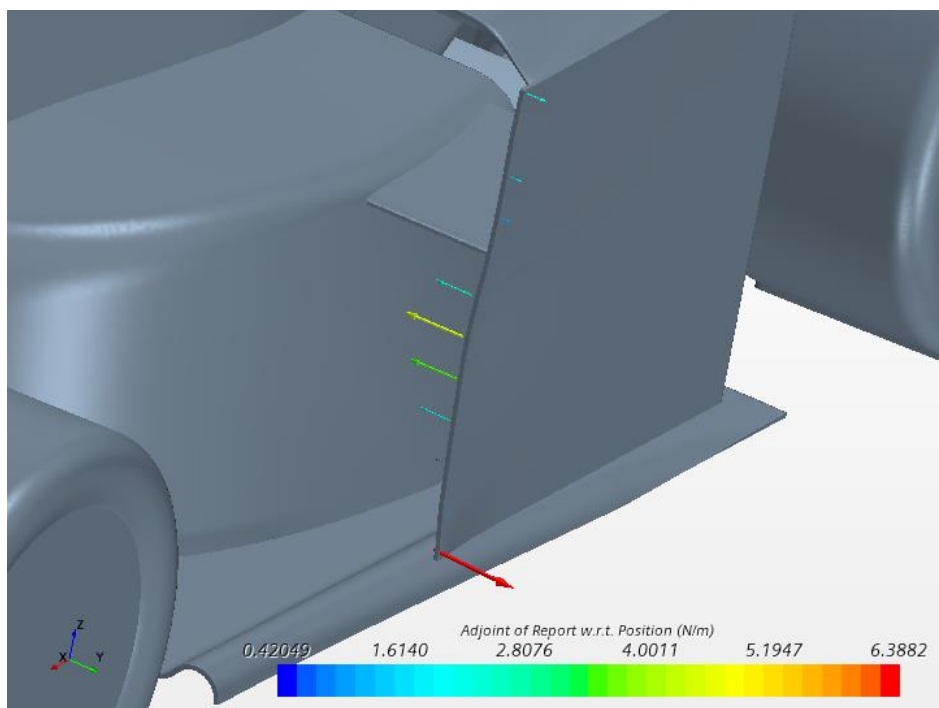


Obr. 35: Deformace pomocí kontrolních bodů, které nejsou v blízkosti žádné hrany

Po experimentech s hranou horní se pojdme podívat na **hranu přední**. Aby nedocházelo ke zkreslení, pro Obr. 36, kde je deformace přední hrany zobrazena, byl použit stejný faktor deformace jako na obrázcích výše, tedy $f = 1 \cdot 10^{-2}$. Protože jsou však citlivosti podél přední hrany téměř řádově vyšší než podél hrany horní, je tato deformace příliš velká. Na Obr. 37 je tedy potom deformace podle stejných kontrolních bodů, ovšem pouze s faktorem $f = 2 \cdot 10^{-3}$, který byl použit pro další pokračování v simulaci.



Obr. 36: Deformace přední hrany při použití faktoru $f=1e-02$

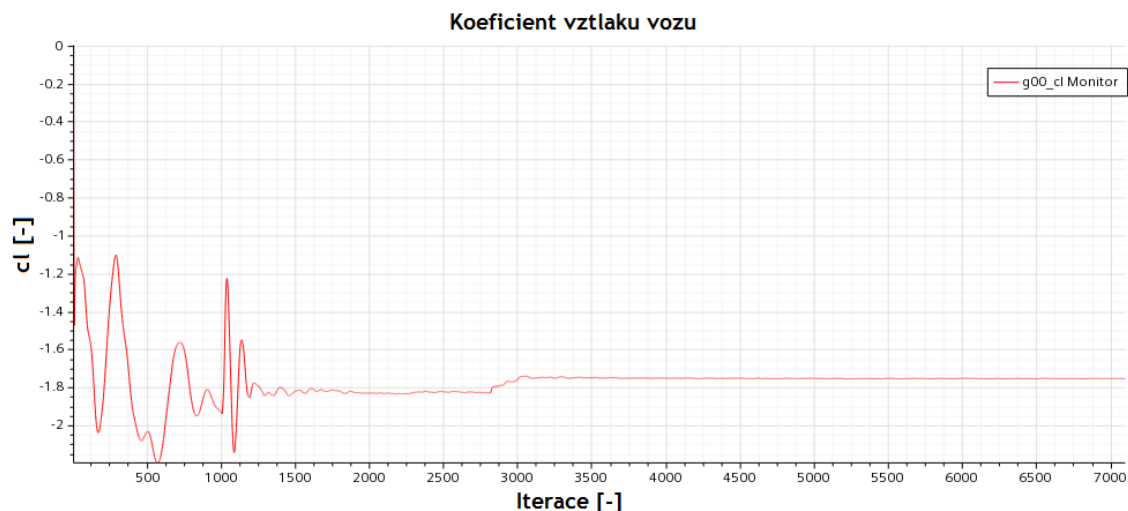


Obr. 37: Deformace při použití menšího faktoru, tedy $2e-03$

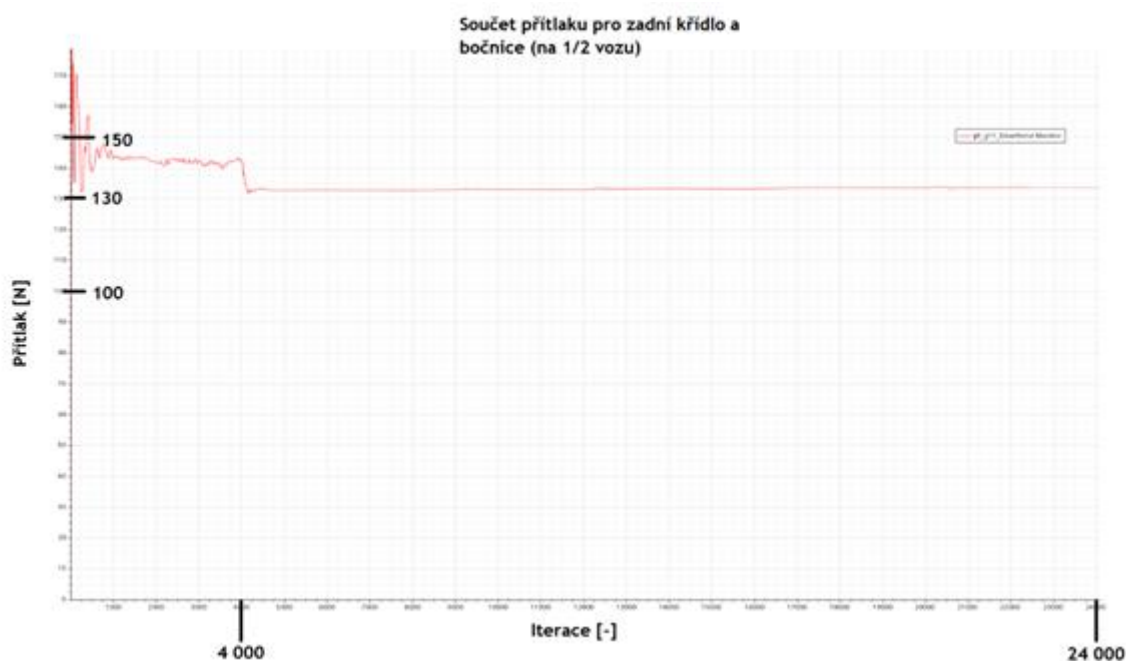
5.2.3 Další simulační cykly

Po různých experimentech s morfováním jednotlivých dílů, byly provedeny další cykly adjoint solveru. Znamená to tedy spustit znovu primární řešič na již zdeformované síti. V této podkapitole se kromě poslední zmiňované boční desky vrátím ještě také k bočnímu krytu. Nebude to však k dalšímu vývoji dílu, nýbrž k demonstraci dalšího úskalí používání adjoint solveru, a tím je konvergence. Dobře viditelné je to na Obr. 38, kde je zachycen koeficient vztlaku Cl bočnic a zadního křídla. Prvních 2750 iterací je snaha primárního řešení zkonvergovat úlohu. Na řešení nejsou vidět žádné náznaky, že by mělo dojít ke konvergenci lepší. Již takhle se navíc jednalo o velmi časově náročný výpočet, a tak byl adjoint solver „nasazen“ již po této době. Když se však podíváme na výsledek, zjistíme, že po prvním cyklu adjointu vykáže simulace výrazné zhoršení sledovaného přítlaku (tedy nárůst záporného koeficientu vztlaku). V rozmezí mezi 2750 a konečných více než 7000 iterací je navíc ještě ve výpočtu skryto několik dalších cyklů adjoint solveru a deformace, které však již k žádné pouhým okem viditelné změně nevedou.

Vzhledem k tomu, že všechny deformace sítě během cyklů byly podobných rozměrů, lze vyloučit, že by se jednalo o správné číselné výsledky. Je tedy skutečně namístě hledat problémy v konvergenci. Obdobný problém je patrný i na Obr. 39. Zde je však problém ještě nápadný a simulace před hodnotou 4 000 ještě není zdaleka zkonvergována.



Obr. 38: Graf sledovaného koeficientu vztlaku pro simulaci se zdeformovaným bočním krytem



Obr. 39: Graf sledovaného přítlaku pro simulaci se zdeformovanou boční deskou s použitím prvního cyklu adjoint solveru po 4 000 iteracích

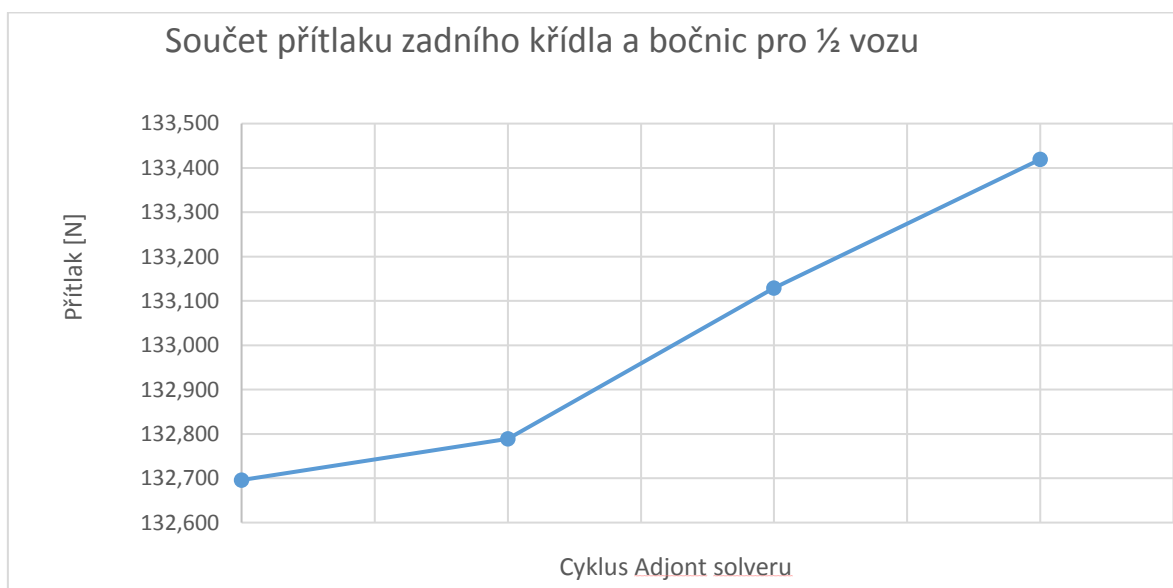
Byla tedy provedena simulace s větším počtem iterací v primárním řešiči. Na Obr. 40 je obdobný graf, jako na obrázku výše, ovšem pro simulaci, kde primární řešení probíhalo až do 20 000 iterací. Již na první pohled je vidět, že trend velké změny po prvním použití adjoint solveru se zde neopakuje. Ovšem ani žádný velký zisk přítlaku v grafu též očividně vidět není. Abychom se tedy vůbec přesvědčili o správné funkci nástroje, je potřeba, místo pouhého pohledu na graf, data alespoň velmi jednoduše statisticky zpracovat. Poměrně častým trikem na získávání číselných hodnot s CFD simulací je průměrování několika posledních iterací. Pokud uděláme totéž s průběhem naší simulace, tedy že vždy



zprůměrujeme posledních 200 hodnot před zásahem adjoint solveru, zjistíme, že skutečně po malých krůčcích dochází k nárůstu, jak je vidět z grafu na Obr. 41.



Obr. 40: Graf sledovaného přítlaku pro simulaci se zdeformovanou boční deskou s použitím prvního cyklu adjoint solveru po 20 000 iteracích

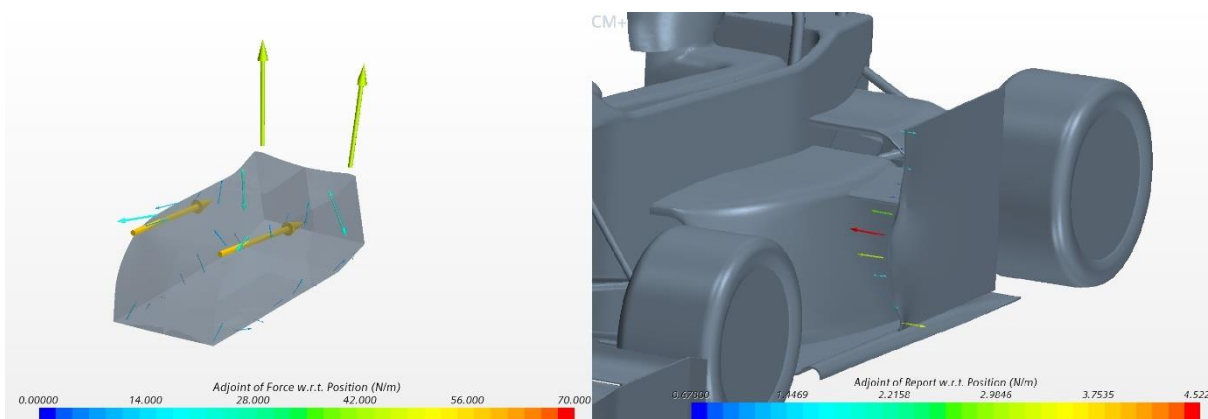


Obr. 41: Průměrná hodnota každých 200 iterací před zásahem adjoint solveru

Takováto hodnota zisku přítlaku není pochopitelně nijak ohromující. Když vezmeme v úvahu výpočetní náročnost celého procesu a zisk okolo 1,4 N na celém voze (hodnota z grafu přenásobena dvěma), pak se o žádný velký přínos nejedná. Je tedy nutné zamyslet se nad důvodem, proč takovéto použití adjoint solveru nevede k vyšším nárůstům přítlaku, jako tomu bylo například v jednodušších simulacích. Jedno ze zásadních úskalí tkví pochopitelně již v citlivosti v celé oblasti jako takové. Na Obr. 42 lze vidět, že výše zmiňovaný jednoduchý model dosahoval po zdeformování více cykly řádově vyšších citlivostí než na celém voze zkoumaná boční deska. Teoreticky to může být problém pouze nevhodného



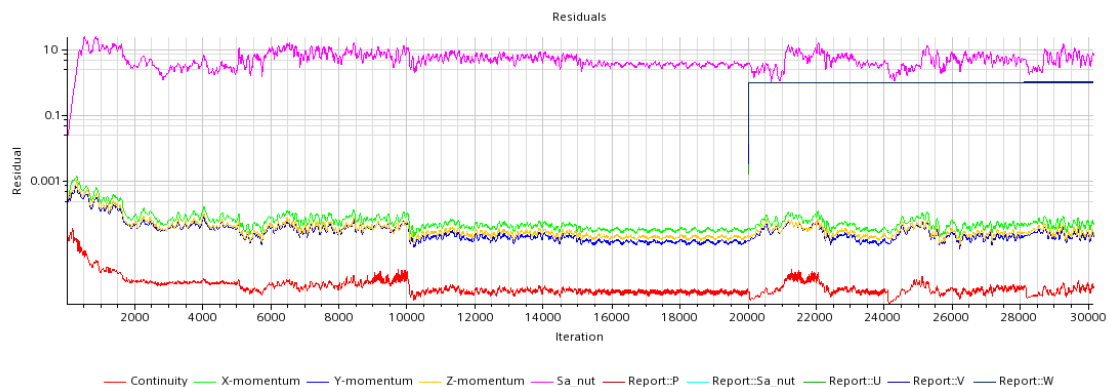
umístění zkoumané části vozu, neboť je skryta v úplavu od předního kola. To je tedy první vysvětlení, které se nabízí.



Obr. 42: Srovnání prvotního jednoduchého modelu a modelu celého vozu, především z hlediska hodnot citlivosti

Tím druhým by mohla být nedostatečná kvalita sítě. Tím nemyslím ani tak, že by kvalita sítě měla negativní vliv na funkci adjoint solveru, naopak spíše na práci primárního řešiče, který zkrátka nemusí být na takto hrubé síti schopen správně podchytit menší změny tvaru.

Co však zcela jednoznačně má vliv na správnou funkci adjoint solveru je zde již několikrát zmiňovaná konvergence. Na jednu stranu byl výpočet spuštěn velmi dlouho, na druhou stranu to vůbec nemusí znamenat, že byl skutečně správně zkonvergovaný. Pokud koukáme jen po hodnotě sledované veličiny, pak by se mohlo z grafu zdát, že se její hodnota již ustálila. Kromě toho je však možné hodnotit konvergenci systému ještě jedním způsobem, a tím jsou residua. Graf residuí ukazuje kvadratický průměr chyb iterační metody na pravé straně přes všechny buňky sítě pro všechny řešiče. Není možné z něj jasně určit, kdy je simulace zkonvergovaná, především proto, že neexistuje žádná jednoznačně správná hodnota residuí, která by byla obecně brána za dostatečnou. Je ovšem pravdou, že by hodnoty měly poklesnout o několik řádů a mělo by dojít k jejich ustálení. Obr. 43 ukazuje průběh reziduích přes oněch 20 000 iterací před spuštěním adjoint solveru. V obrázku lze vidět, že druhá podmínka je splněna, residua již jen mírně oscilují a dalším pokračováním iterace už k žádné změně hodnot nedojde. Hodnoty jako takové jsou však problematické, a ačkoliv opět nelze požadavky přesně kvantifikovat, o pokles o několik řádů se zde jedná jen těsně, a to navíc mimo případ reziduí řešiče turbulence *Sa_Nut*, který je úplně mimo požadovaná kritéria. Obzvláště vzhledem ke zvýšeným požadavkům adjoint solveru na konvergenci nelze tyto hodnoty brát jako dostatečné.



Obr. 43: Residua v průběhu simulace boční desky, kde k prvnímu zásahu adjoint solveru došlo po 20 000 iteracích

Pokud tedy nelze dosáhnout dostatečné konvergence na primární simulaci, je nutné něco změnit na přístupu k metodice. První věc, která určitě nepomáhá konvergenci, je složitost celé simulace. Používání simulací celého vozu je zbytečně výpočetně náročné, tím spíše pro použití adjoint solveru. Proto se v dalším vývoji budu soustředit na výpočty pouze se zkoumanými částmi vozu.

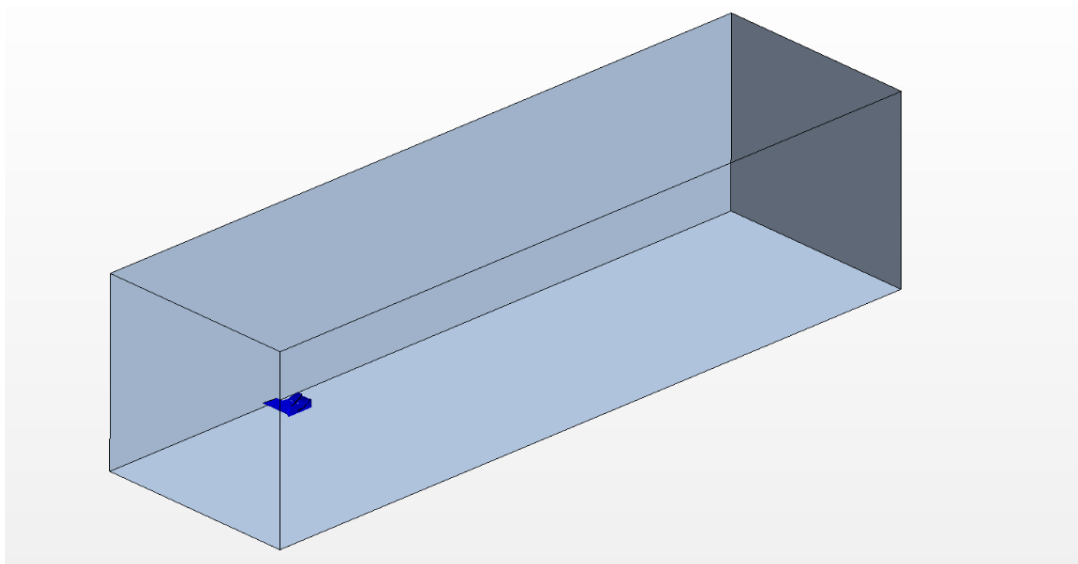


6 Simulace jednotlivých dílů

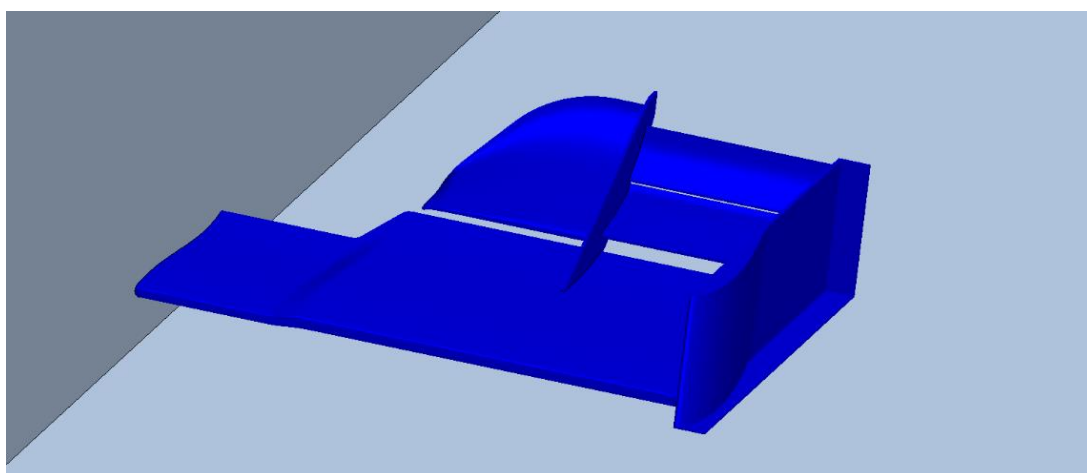
Začneme opět nejtypičtějším příkladem, kterým je přední křídlo. Jeho velkou výhodou je, že bude vždy nehledě na ostatní díly v „čerstvém vzduchu“, tedy že koeficient celkového tlaku Cp_{TOT} bude při náběhu na křídlo roven jedné, a tudíž lze očekávat nejvyšší hodnoty citlivosti. Oproti tomu nevýhodou je, že naopak silně ovlivňuje obtékání všech částí za ním. Proto je nutné k simulacím se samotným předním křídlem přistoupit opatrně, neboť jednostranné zvyšování přítlaku na předním křídle nemusí být pro vůz nutně přínosné. Proto bych chtěl metodiku také vyzkoušet na křídle zadním. Jeho výhoda zase naopak bude ta, že získaný přítlak na zadním křídle již nemůžete na jiné části vozu ztratit, proto by měly být výsledky adjoint solveru „pravdivější“. Nicméně vyvstávají dva problémy. První je, že proudění, které obtéká zadní křídlo je příliš odlišné od proudění ve volném prostoru, takže vývoj ve volném vzduchu pomocí adjoint solveru by opět nemusel fungovat na celém voze. Druhá nevýhoda použití této metodiky na zadní křídlo je, že díky velkým ztrátám bude silně ovlivněné vozem před sebou, a tak na něm budou obecně citlivosti menší.

6.1 Přední křídlo

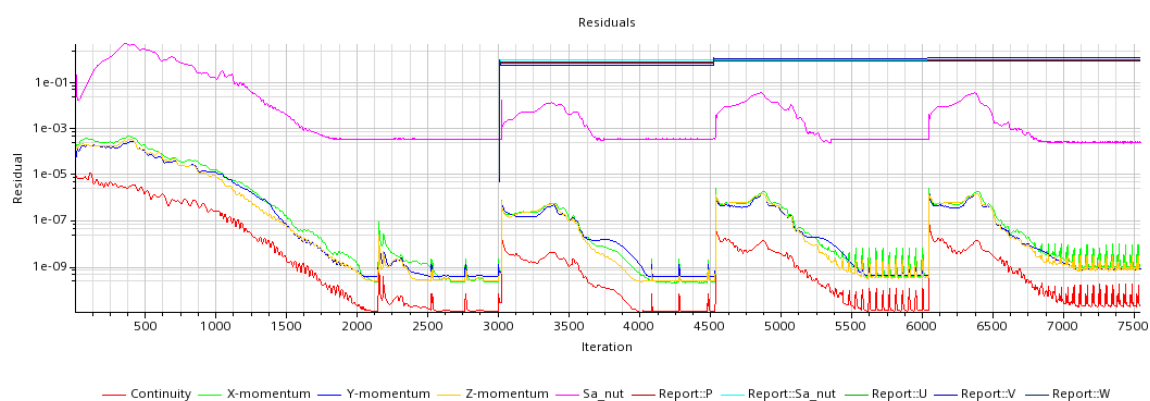
Jako první jsem se věnoval simulaci předního křídla. Jedná se o stejně nastavenou simulaci, jako v předchozích případech, pouze došlo ke zmenšení výpočetního prostoru a odstranění ostatních částí vozu. Výslednou geometrii a detail na přední křídlo tak ukazují Obr. 44 a Obr. 45. Pokud jde o residua, ty jsou vidět na Obr. 46. Můžeme zde pozorovat výrazně lepší a rychlejší konvergenci, než o jakou se jednalo v předchozím případě s celým vozem. Jak je již z obrázku vidět, po 3 000 iteracích, kdy byla již simulace zkonvergována, byl použit adjoint solver a po každém jeho cyklu znovu proběhlo 1 500 primárního řešení CFD simulace. Z grafu residuí vyplývá, že bylo vždy dosaženo maximální možné konvergence.



Obr. 44: Celý výpočetní prostor simulace za účelem vývoje předního křídla



Obr. 45: Detail na geometrii předního křídla



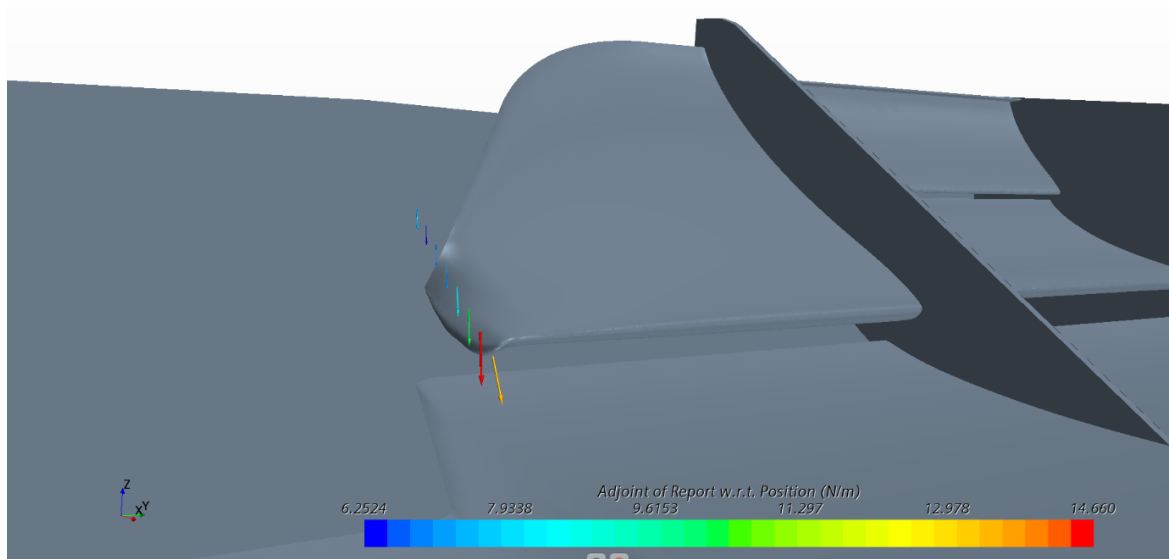
Obr. 46: Rezidua simulace předního křídla od počátku výpočtu až po třetí cyklus adjoint solveru

Co se nastavení deformace týče, jako deformovatelnou jsem zvolil vnitřní klapku za hlavním profilem a kontrolní body rozmístil po úsečce vedoucí v blízkosti této hrany (Obr. 47). Nejvíce pro toto rozhodnutí hovoří fakt, že se jedná o volnou, a tím i snadno deformovatelnou hranu bez velké interakce s ostatními součástmi křídla. Za povšimnutí také



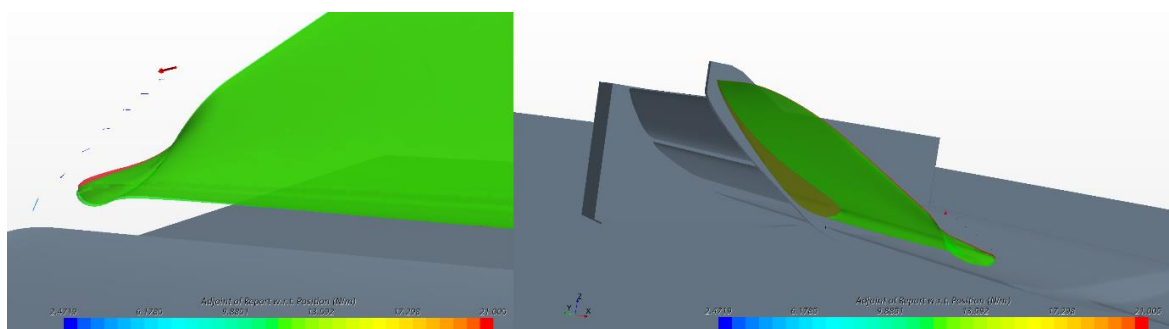
stojí násobně vyšší citlivost oproti simulacím bočnic, což je v souladu s výše uvedenými předpoklady.

Simcenter STAR-CCM+



Obr. 47: Kontrolní body pro deformaci předního křídla i s vypočtenou citlivostí po proběhnutí prvního cyklu adjoint solveru

Všechny tři cykly adjoint solveru byly provedeny s deformačním faktorem $1 \cdot 10^{-4}$. Na Obr. 48 je zobrazen výsledek, ke kterému se adjoint solver s používáním stále stejných kontrolních bodů dopracoval. Zajímavé je především srovnání s prvním výpočtem citlivosti, neboť očividně došlo v kontrolních bodech k podstatné změně. Je proto možné, že změna kontrolních bodů mezi jednotlivými cykly by mohla přinést lepší výsledky.



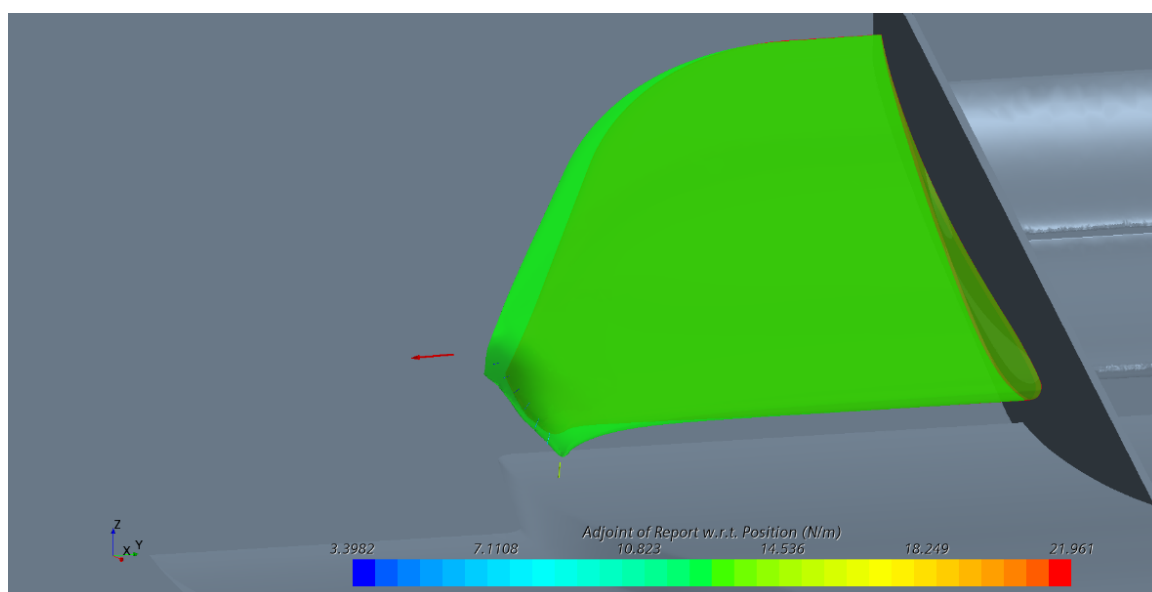
Obr. 48: Srovnání původního (červeně) a výsledného (zeleně) tvaru klapky předního křídla

Graf přítlaku ukazuje Obr. 49. Není sice zachycen od úplného začátku, nicméně je z něj opět patrný jasný nárůst vždy po každém novém cyklu. Když se však podíváme na levou osu s přítlakem, zjistíme, že se opět o žádné velké skoky nejedná. V tom je tedy situace podobná, jako při minulých pokusech, ovšem tentokrát se jedná o dobře zkonvergovanou simulaci a úskalí tedy může být v malých deformacích, případně v hrubé výpočetní síti.



Obr. 49: Vývoj přítlaku předního křídla přes cykly adjoint solveru

Rozhodl jsem se tedy zkombinovat dvě možnosti, ke kterým jsme v této podkapitole došli a jednak posunout kontrolní body tak, aby byly znovu blíže k deformovanému konci klapky, a jednak použít deformační faktor vyšší, tedy například $1 \cdot 10^{-3}$. Jak se znovu změní citlivost v kontrolních bodech a jak se následně pomocí morfování sítě změní tvar zakončení klapky ukazuje Obr. 50.



Obr. 50: Další deformace klapky, tentokrát s novými kontrolními body a deformačním faktorem $f=1e-03$. Pod novým, zeleným tvarem prosvítá červeně obarvená původní geometrie

Desetinásobně větší deformace je pochopitelně velký skok a je pravda, že spíše, než o deformaci tvaru krajní hrany se jedná víceméně o tvar nový. Při pohledu na výsledek výpočtu tohoto tvaru na Obr. 51 lze zjistit, že skutečně došlo k výrazně většímu přínosu, a to konkrétně $0,6 N$ na polovině předního křídla. Jedná se tím pádem o podobný zisk, jako při simulaci celého vozu, a to tentokrát za cenu několikanásobně nižšího výpočetního času. Je



však třeba pamatovat na úskalí, že zvýšení přítlaku na předním křídle nemusí nutně znamenat takové zvýšení na celém voze.



Obr. 51: Přítlak nejnovější více zdeformované verze

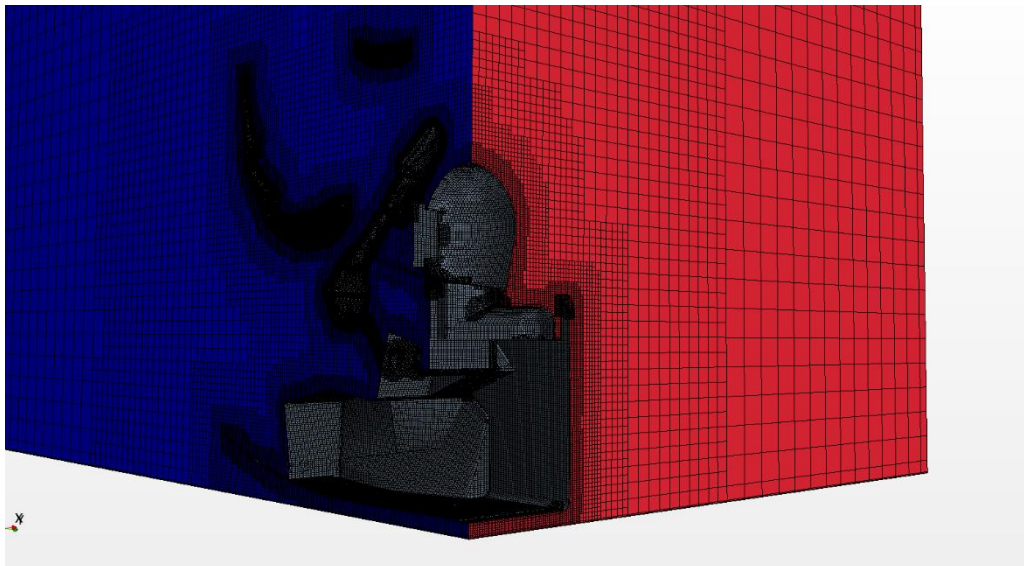
Před posunutím se k další simulaci se zde ještě vrátím k dalšímu faktoru, který ovlivňuje konvergenci, a tím je nastavení metodiky simulace jako takové. Změna metodiky je však velmi náročná záležitost, která by na diplomovou práci vystačila sama o sobě. Ostatně právě metodikou návrhu vozu se ve své diplomové práci zabýval kolega z týmu CTU CarTech Ing. Martin Ševčík. Již původní metodika, která sloužila jako základ pro simulace před provedením dříve popsaných změn, byla výhradně jeho zásluha. V rámci své diplomové práce však tuto metodiku ještě výrazně zdokonalil. Velká výhoda v tomto případě je, že tato metodika je „odladěná“ na řešič coupled flow, což je tím pádem o jeden změněný parametr méně. Proto budu dále z této nové metodiky v následujících simulacích vycházet. [6]

6.2 Simulace zadního křídla

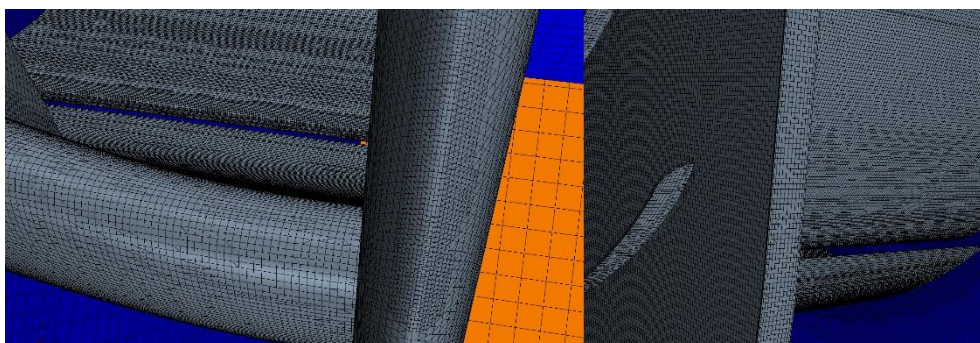
Jak již bylo zmíněno, zjednodušená simulace orientovaná na zadní křídlo má výhodu, že zadní křídlo již neovlivňuje proudění kolem žádné další části vozu. Je však potřeba počítat s tím, že pokud křídlo umístíme do volného proudění, nebudou výsledky odpovídat skutečnému dění kolem křídla na voze. Je tedy potřeba vliv ostatních částí vozu na zadní křídlo do simulace nějak zakomponovat. V naší simulaci se jedná o zadní křídlo ze čtvrtého konstrukčního stavu vozu FS.14. Místo potřeby počítat s celým vozem je v simulaci použito pouze několik částí přímo sousedících se zadním křídlem a samotná doména začíná až okolo hlavy pilota. Toto je samozřejmě při výpočtech „od nuly“ zcela špatný přístup, ovšem v našem případě již existuje z vývoje vozu spočítaná výrazně kvalitnější simulace celého vozu. Pro tento výpočet byla použita výsledná metodika diplomové práce Ing. Ševčíka, rozšířená o použití MRF zón pro přední kolo a ventilátor chlazení, což je předmětem



bakalářské práce kolegy Martina Kubáka. Z této simulace tedy vyexportuji okrajovou podmínku vstupu a získám tak plně vyvinuté, realitě blízké proudění hned na začátku výpočetní domény. Výpočetní doménu již se zobrazenou sítí ukazují Obr. 52, Obr. 53 a Obr. 54. [6]

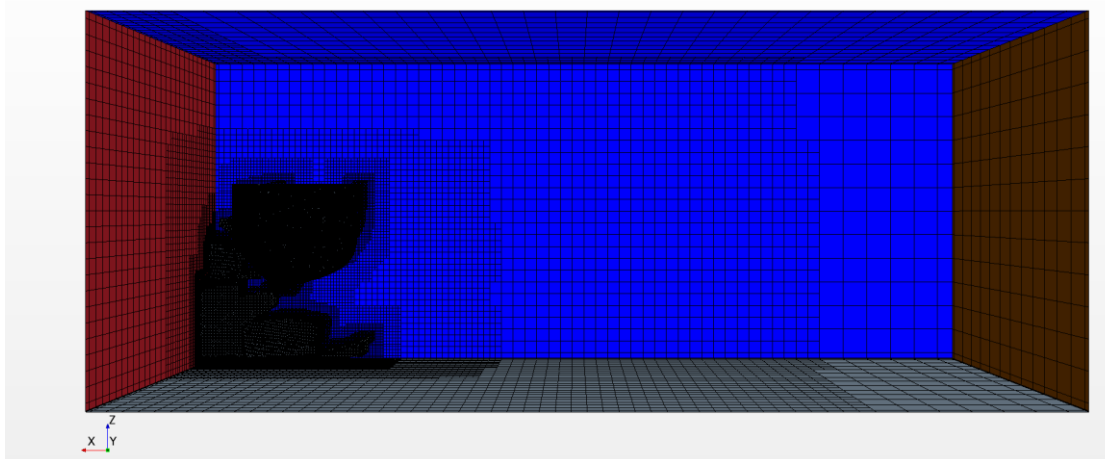


Obr. 52: Geometrie a výpočetní síť simulace zadního křídla



Obr. 53: Detail na vysítování zadního křídla

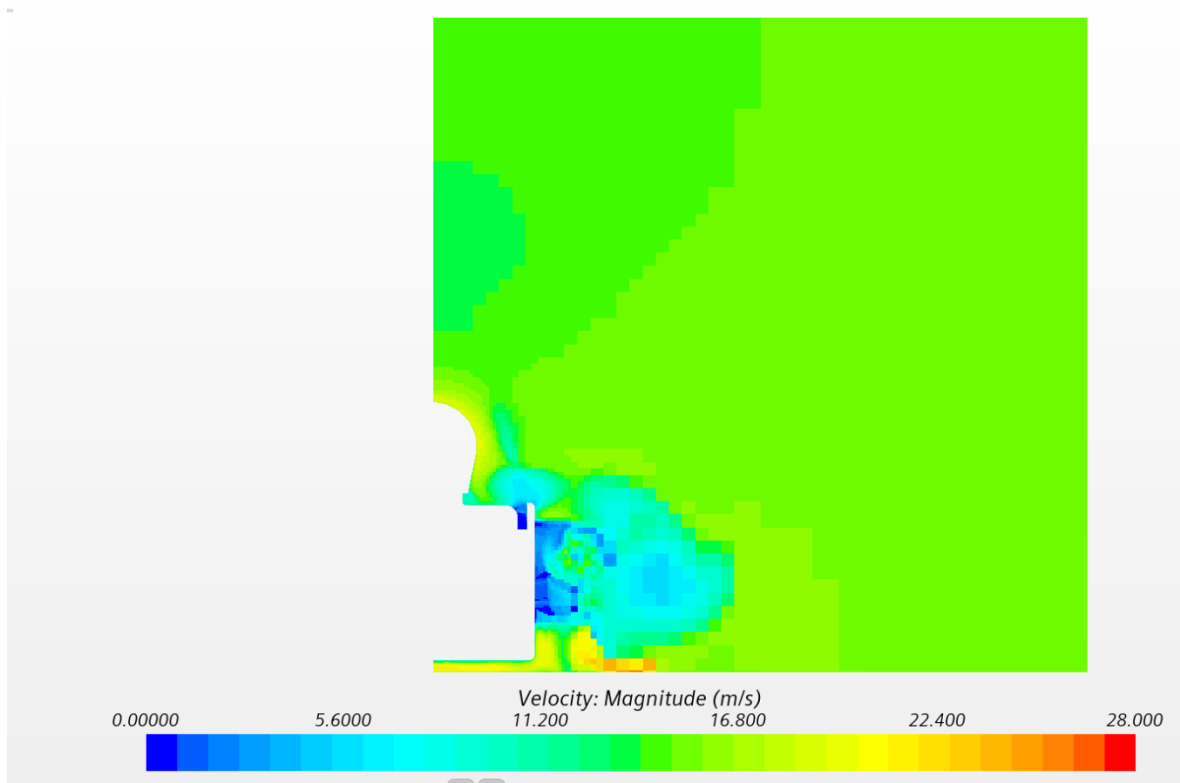
Simcenter STAR-CCM+



Obr. 54: Výpočetní prostor simulace zadního křídla



Okrajová podmínka vstupu rychlosti je vyobrazena na Obr. 55. Lze na ní vidět vliv i těch částí vozu, které nejsou v simulaci přítomny. Pochopitelně za vstupem již bude jejich absence způsobovat odchylky, ale jedná se o díly, které by již dále neměly zadní křídlo příliš ovlivnit. Díly, které jsou zadnímu křídлу nejbližší, tedy sání a motorový prostor zůstaly v simulaci zachovány.



Obr. 55: Rychlost vstupu do simulace pro zadní křídlo

6.2.1 Hrubší síť pouze ve volném prostoru

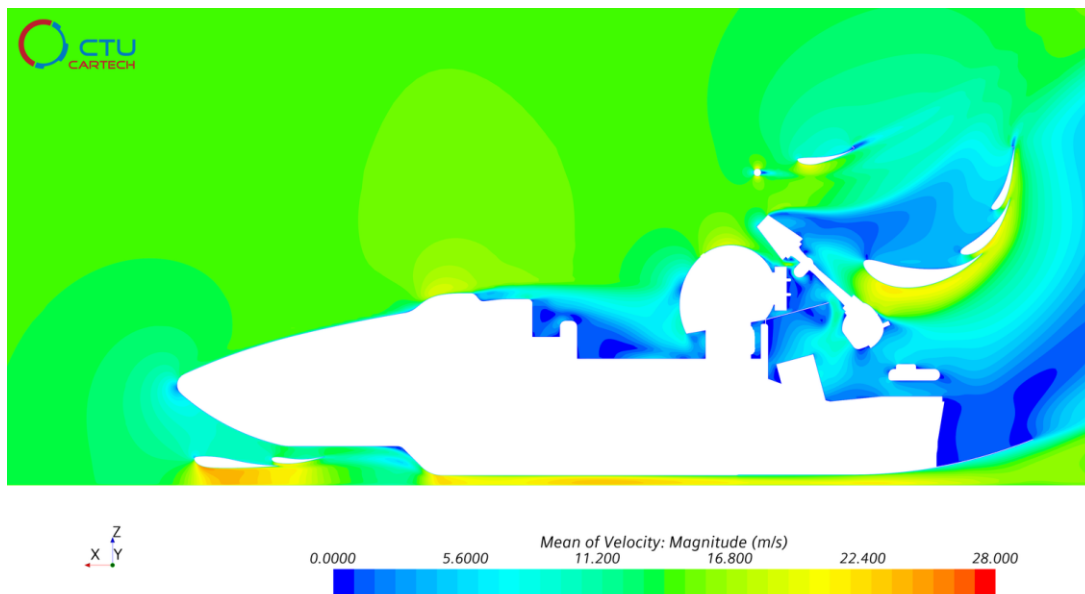
Jediná změna na metodice byla tedy spojena s velikostí výpočetní sítě. Bylo odstraněno několik zjemňovacích boxů, takže výsledná síť měla místo téměř třiceti milionů buněk pouze milionů pět. Zjednodušení výpočtu se přeci jen pozitivně projevilo na koeficientu vztlaku zadního křídla cl , který oproti plnému výpočtu, při používání průměru posledních 300 iterací klesl z $-1,185$ na hodnotu $-1,402$. Výpočet cl v metodice probíhá dle rovnice (45), kde L je vztlak zadního křídla, který je přímým výstupem ze simulace, ρ je konstantní hustota vzduchu $1,17 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, A je referenční plocha, která má pro lepší porovnávání zafixovanou hodnotu na $1,053 \text{ m}^2$, což je hodnota čelní plochy vozu a v je rychlost vozu $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$cl = \frac{2 \cdot L}{\rho \cdot A \cdot v^2} \quad (45)$$

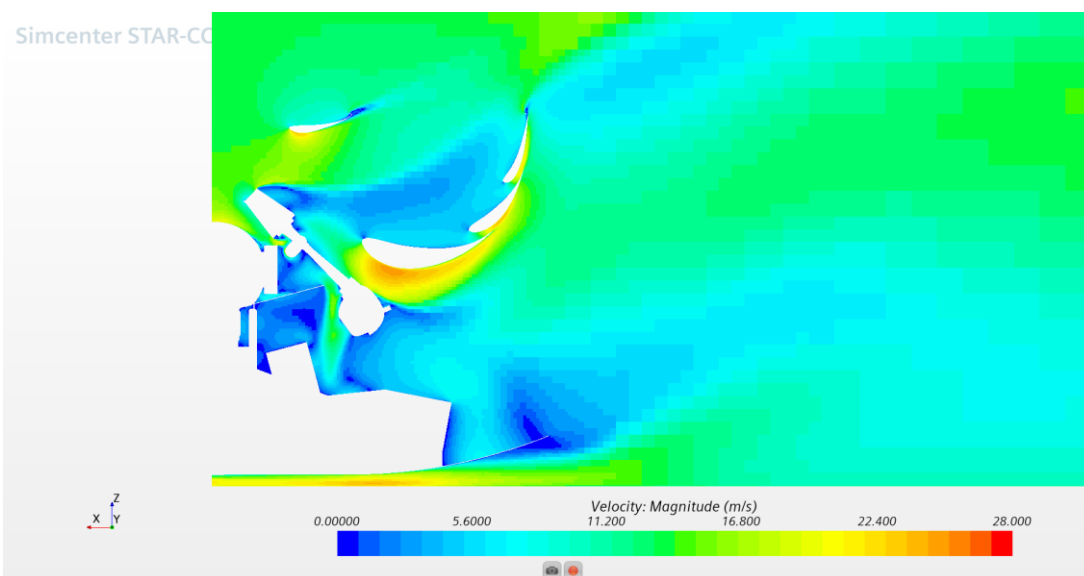
Na Obr. 56 je potom zobrazena rychlost proudění na rovině symetrie při plném výpočtu dle standardní metodiky a na Obr. 57 rychlost proudění pro stejnou rovinu v mém



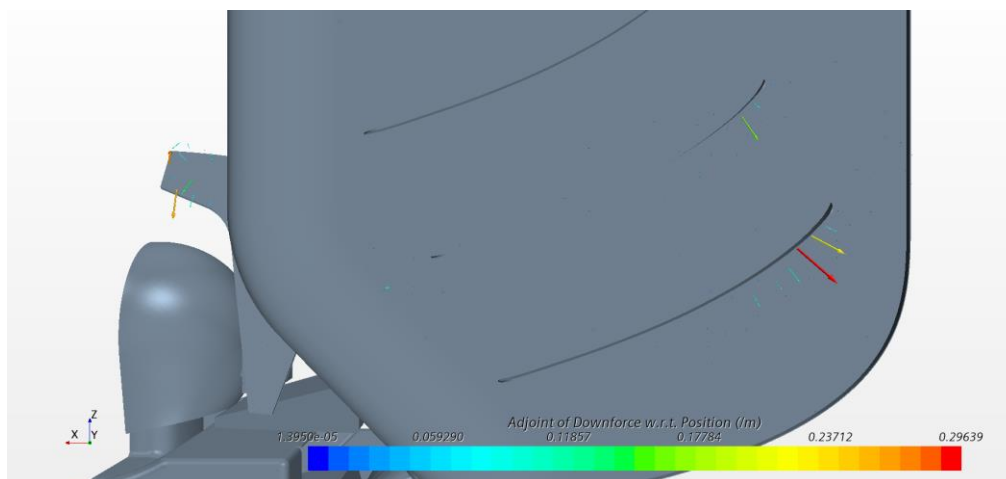
zjednodušeném výpočtu. Z obrázku je patrná vyšší rychlost pod hlavním profilem zadního křídla. Také je vidět menší úplav za šasi vozu, což může být způsobeno chybějícími zadními koly. Po provedení deseti iterací adjoint solveru byla vykreslena citlivost v kontrolních bodech rozmístěných podél celého zadního křídla. Ta je vyobrazena na Obr. 58.



Obr. 56: Řez rychlosti v rovině XZ dle standardní simulace týmu CTU CarTech

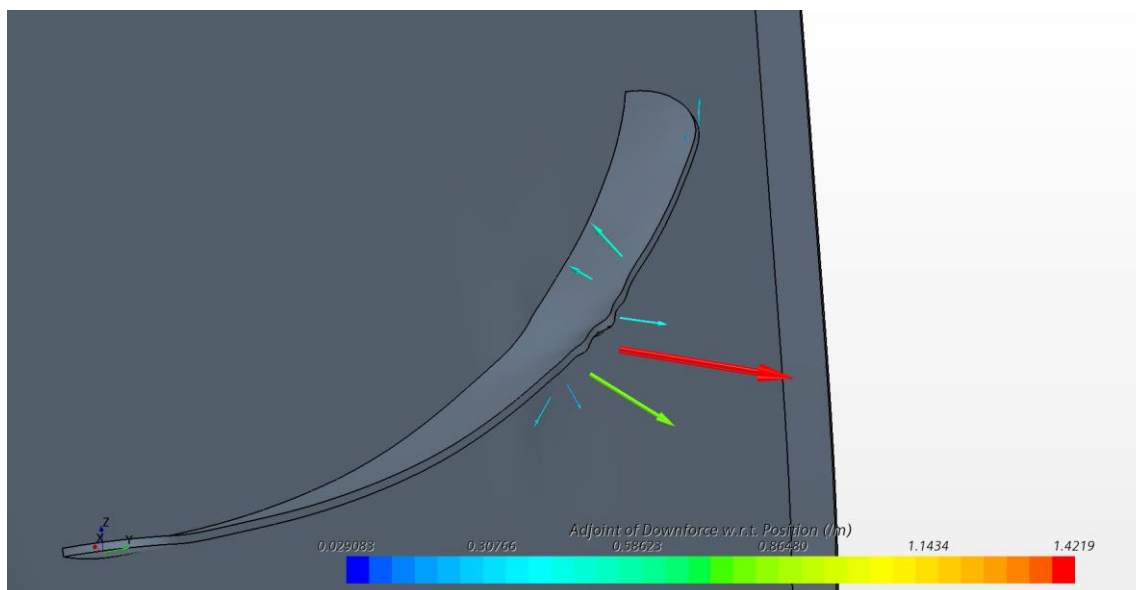


Obr. 57: Řez rychlosti v rovině XZ dle zjednodušené simulace

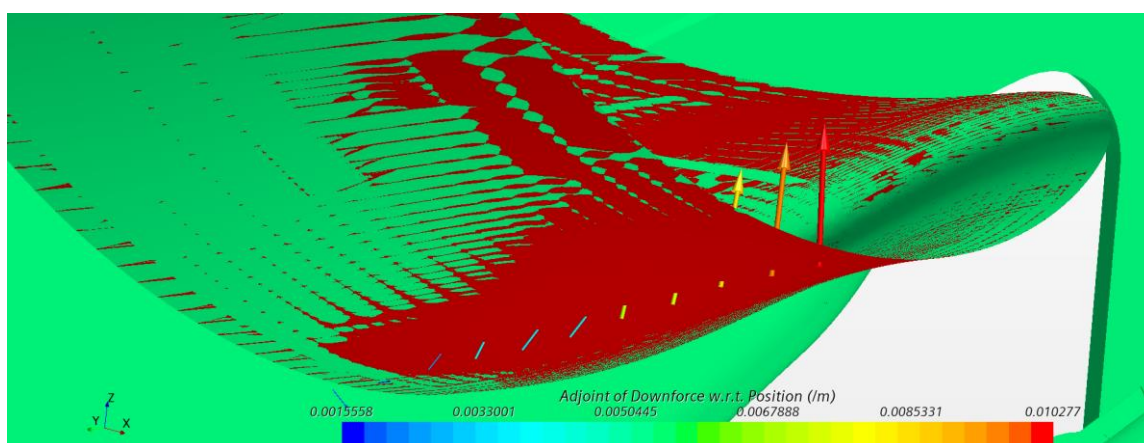


Obr. 58: Vykreslení citlivosti na přítlak v okolí zadního křídla. Největší hodnoty bylo dosaženo na konci spodního deflektoru na endplatu křídla

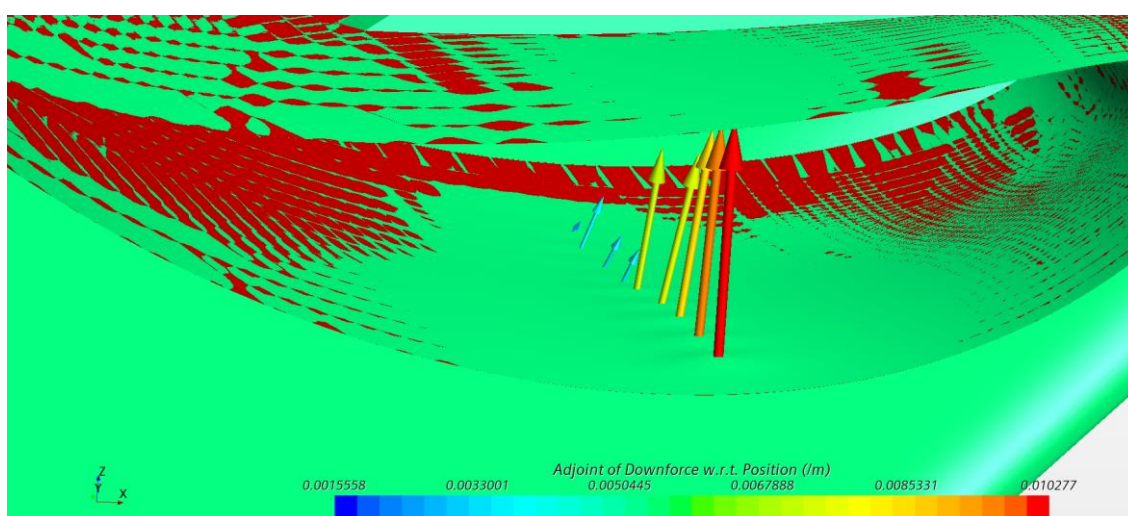
Pro nejvyšší citlivost byly pro deformaci zvoleny kontrolní body rozmístěné právě podle konce dolního deflektoru a poté ještě podél spodní plochy hlavního profilu. Citlivost v těchto místech sice nedosahuje hodnot jako citlivost podél deflektoru, jedná se však o místo, kde je proudění zpravidla nejrychlejší, což znamená, že se z hlediska profilu jedná o největší zdroj podtlaku. Pozice kontrolního bodu tentokrát nebyly vytvořeny pomocí úseček, nýbrž, vzhledem k zakřivení deformovaných povrchů, ručně v jedné rovině. Pro obě sady kontrolních bodů proběhly dva cykly adjoint solveru. Kontrolní body spolu se zdeformovanou geometrií jsou na Obr. 59 pro první variantu a na obrázcích Obr. 60 a Obr. 61 pro variantu druhou. Pro první variantu, tedy pro deformaci deflektoru byl zvolen faktor deformace co největší tak, aby nedošlo ke zborcení výpočetní sítě a k vytvoření buněk se záporným objemem. Jmenovitě se tak jednalo o $f = 1 \cdot 10^{-2}$ pro první cyklus a o $f = 5 \cdot 10^{-3}$ pro cyklus druhý. Pro druhou variantu, kde se pracovalo s výrazně nižší citlivostí byla geometrie deformována faktorem $f = 3 \cdot 10^{-1}$



Obr. 59: Zdeformovaný spodní deflektor po dvou cyklech adjoint solveru.



Obr. 60: Pohled zespod hlavního profilu pro variantu kontrolních bodů na jeho podtlakové straně. V obrázku je červeně vyobrazena původní geometrie a zeleně zdeformovaný tvar

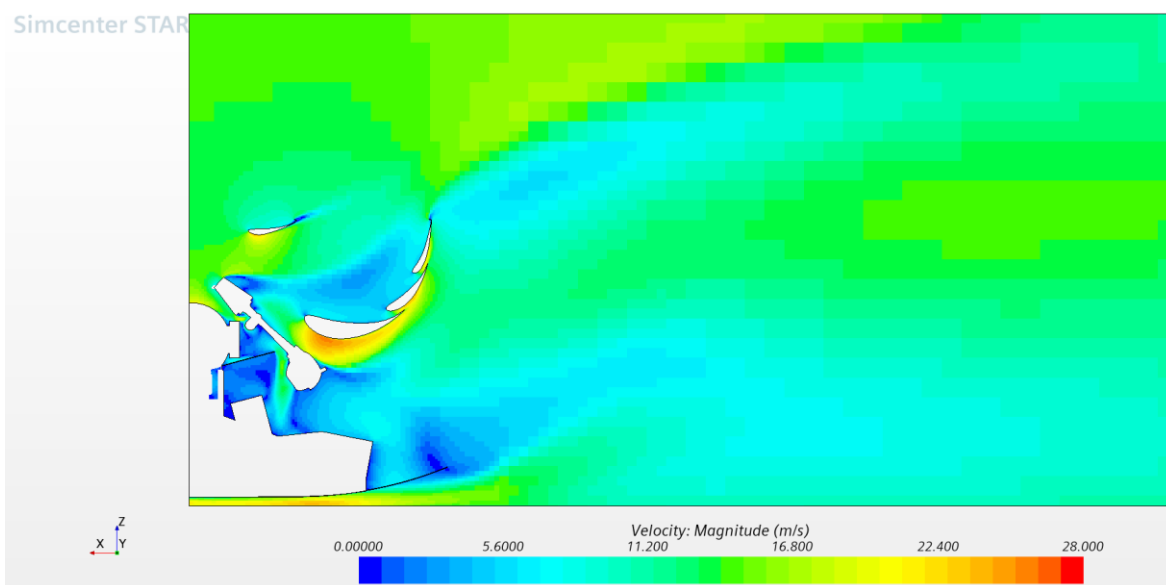


Obr. 61: Pohled dovnitř hlavního profilu pro variantu kontrolních bodů na jeho podtlakové straně. V obrázku je červeně vyobrazena původní geometrie a zeleně zdeformovaný tvar



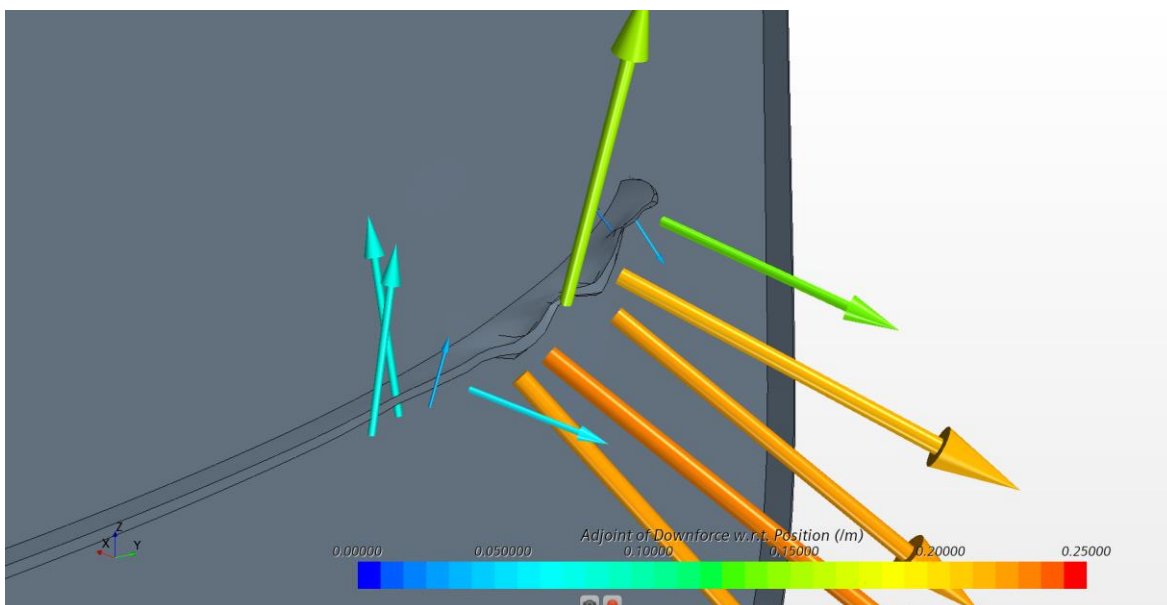
6.2.2 Hrubší síť i v okolí dílů

Jak lze rozpoznat z obrázku výše, opět v případě hlavního profilu dochází k deformaci tvaru jako celku jen do určité míry a opět se tvoří boule. V práci již byla zmíněna zatím nepotvrzená hypotéza, že pokud je cílem měnit tvar jako takový, spíše než provádět lokální deformace, mohla by hrubší síť být řešením problému. Proto byla simulace zadního křídla provedena ještě jednou, tentokrát však s dvojnásobnou velikostí sítě v okolí všech částí vozu. Toto nastavení rozdělilo doménu na dva a půl milionu buněk. Pro porovnání řešení opět uvádím řez rychlosti v rovině symetrie XZ (Obr. 62) Hodnota vztlaku pro zadní křídlo je v této verzi $-1,38956$.

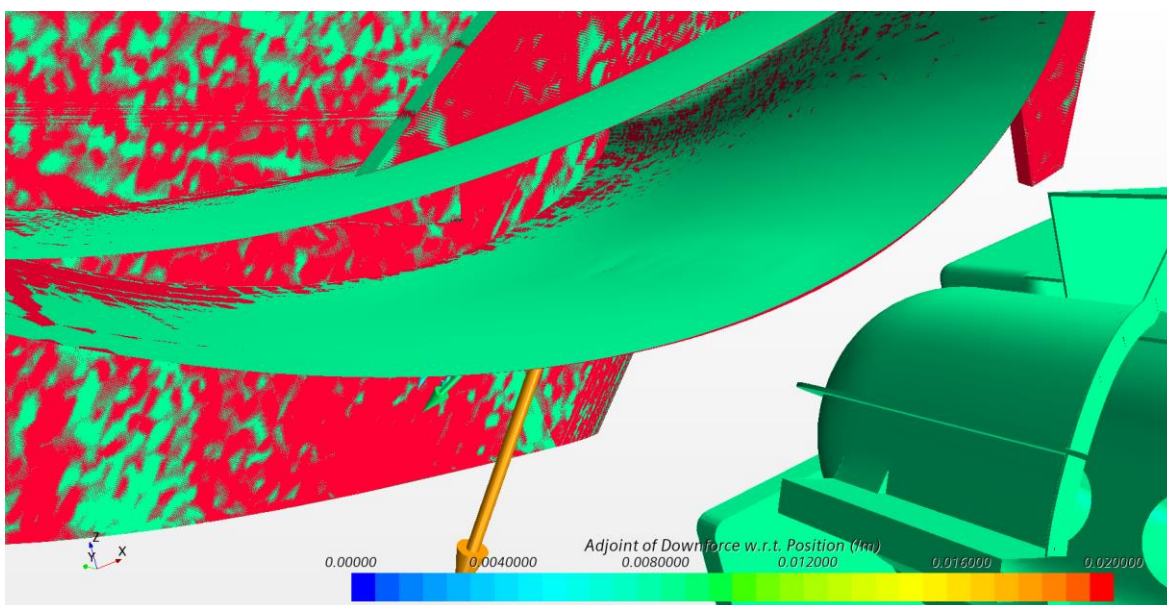


Obr. 62: Řez rychlosti v rovině symetrie pro simulaci s hrubou sítí kolem stěn vozu

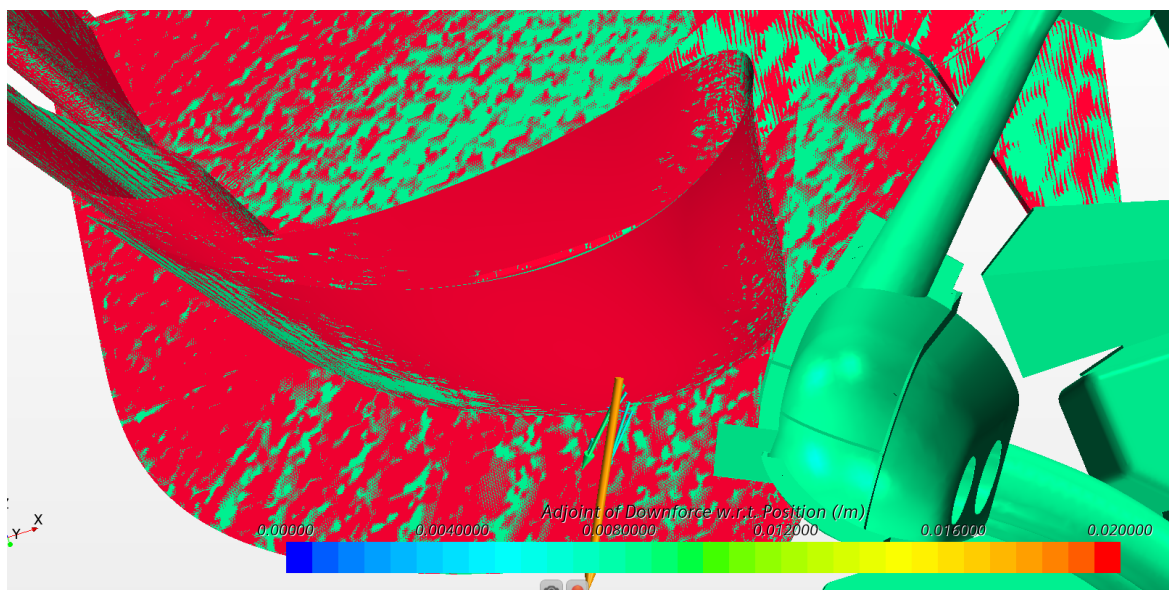
I tato simulace byla propočítána pro stejné dvě pozice kontrolních bodů. Pro variantu deformace deflektoru je výsledný tvar sítě i citlivostí uveden na Obr. 63, kdy deformační faktor měl hodnotu $f = 1 \cdot 10^{-1}$ pro první cyklus a $f = 3 \cdot 10^{-2}$ pro cyklus druhý. Obr. 64 a Obr. 65 potom ukazují deformaci hlavního profilu. Při srovnání zdeformované geometrie s hruběji vysítovanými částmi vozu s variantou dřívější, je znát, že u hrubší sítě se deformuje větší plocha profilu oproti síti jemnější. Volba sítě tedy závisí na tom, jak velká změna geometrie je cílem úlohy. Dále je zajímavé, že vektor citlivosti v předchozí síti mířil jednoznačně nahoru a v této simulaci míří spíše dolů a dozadu. I to je pravděpodobně důsledek deformování větší plochy, nicméně trend spočívající v tom, že nová geometrie má tendenci být nad původní, zůstává.



Obr. 63: Zdeformovaný deflektor po dvou cyklech adjoint solveru v simulaci s hrubou sítí okolo dílů



Obr. 64: Deformace zadního křídla pro hrubší sítí okolo dílů, pohled na vnitřek podtlakové části profilu. Zdeformovaná sítí je vyznačena zeleně, červená modře



Obr. 65: Deformace zadního křídla pro hrubší síť okolo dílů, pohled zespod podtlakové části profilu. Zdeformovaná síť je vyznačena zeleně, původní červeně

Finální hodnocení simulací zadního křídla je uvedeno v Tab. 4. Z tabulky vyplývá, že deformace deflektoru nevedla ke zlepšení číselných výsledků. Znamená to tedy, že volit místo pro deformaci podle největší citlivosti vůbec nemusí být správná cesta. Deflektor pravděpodobně bude mít největší zisk pro malé deformace, ale s výraznějším morfováním tento zisk ztrácí. Pro optimalizace takovýchto malých tvarů je tedy nutné postupovat v menších deformacích, což se ovšem nevyplatí z hlediska výpočetního času, neboť i přes velkou citlivost je na takto malé ploše potenciál pro zisk přítlaku velmi malý. Oproti tomu i přes malou citlivost pomohla změna hlavního profilu, a to více na hrubé síti. Po přepočtu z c_l zpět na vztlak L dle upravené rovnice (45) se jedná o pokles z $-192,6 N$ na $-193,1 N$. Přítlak celého vozu po vynásobení rozdílu dvěma vzrostl o $1,4 N$.

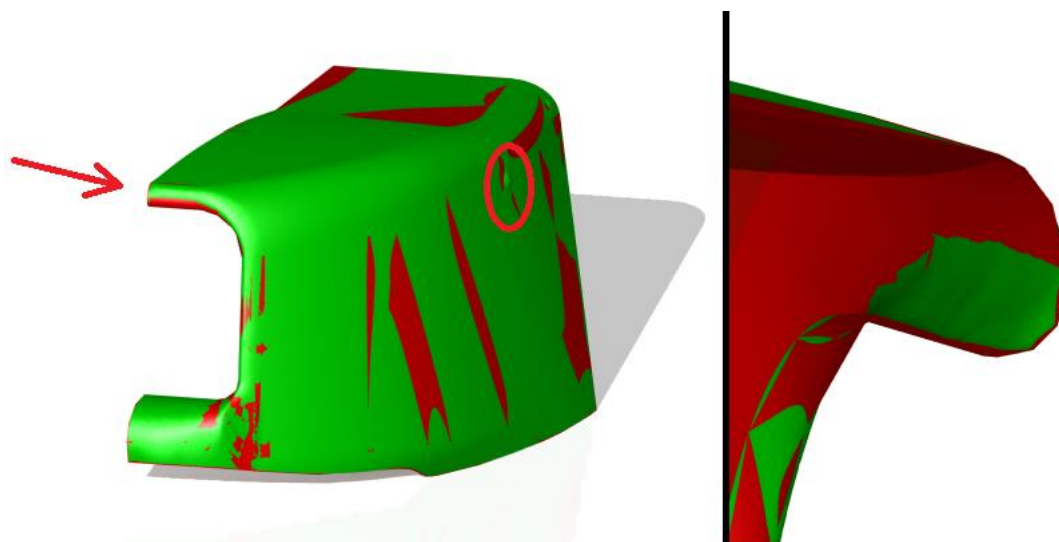
Tab. 4: Číselné srovnání simulací zadního křídla

Koeficient/faktor deformace		c_{l0}	f_1	c_{l1}	f_2	c_{l2}
Jemná verze	Deflektor	-1,40191	1e-02	-1,40179	5e-03	-1,40189
	Profil	-1,40191	3e-01	-1,40229	3e-01	-1,40247
Hrubá verze	Deflektor	-1,38956	1e-01	-1,38906	3e-02	-1,38921
	Profil	-1,38956	3e-01	-1,39028	3e-01	-1,39307



7 Další práce se zdeformovanými díly

Za předpokladu, že se podaří díl pomocí adjoint solveru tvarově optimalizovat, nabízí se pochopitelně také otázka, jak s danou geometrií dále pracovat. Toto je zatím stále nepříliš dobře řešitelná úloha, neboť zdeformovanou geometrii umožňuje program STAR-CCM+ exportovat pouze ve formátu STL. Na Obr. 66 uvádím porovnání vyexportovaného výsledného tvaru bočního krytu z dřívější kapitoly oproti původnímu tvaru. Oproti ostatním srovnáním geometrií je rozdíl ten, že zde se již jedná o modely otevřené v CAD softwaru Catia. Optimalizované modely je tedy možné dostat zpět do konstrukčního softwaru, nikoli však jako modely, se kterými lze dále pracovat. Mohu sloužit jen jako předloha pro nové, „živé“ modely. To ovšem potom znamená, že časová náročnost zpracování závisí případ od případu. Například přemodelovat náběžnou hranu na obrázku níže vpravo by měla být otázka jen několika minut, na druhou stranu jakýkoliv složitější tvar by mohl být otázkou hodin.



Obr. 66: Porovnání původní STP geometrie před simulací a vyexportovaného STL sidepodu. Vlevo je v červeném kroužku vidět ona dříve zmiňovaná boule v místě interakce s bočním profilem. Vpravo je pohled zevnitř náběžné hrany.



8 Závěr

Hlavní náplní této práce bylo především vyzkoušení adjoint solveru pro možné použití pro vývoj vozu Formula Student. Bylo tedy nutné nejprve odzkoušet simulaci na jednoduchém modelu s fyzikálním nastavením simulace obdobnému tomu, které se používá pro návrh monopostu. Od velmi slibného začátku, kdy zkušební tělísko nabíralo velice snadno přitlak se však objevilo mnoho komplikací. Adjoint solver vyžaduje vhodný kompromis s velikostí sítě, neboť příliš jemná síť má tendenci deformovat součásti velmi lokálně. Na druhou stranu příliš hrubá síť nemusí pochopitelně dávat správné výsledky. Další problém je velká složitost monopostu pro použití adjoint solveru vzhledem k jeho výpočetní náročnosti, proto není výhodné pracovat se simulací celého vozu. Dále samozřejmě záleží, jaký díl je předmětem optimalizace, neboť při tvorbě simulace speciálně pro vývoj jednoho konkrétního dílu je nutné dobře zvážit vliv ostatních dílů na funkci dílu vyvíjeného, ale i obráceně. Navíc je potřeba vzít v potaz fakt, že vývoj vozu Formula Student probíhá velmi rychle a není v něm tedy čas na dlouhé optimalizace menších dílů, které nemají velký vliv na celkové vlastnosti vozu. Před začleněním adjoint solveru do metodiky návrhu vozu bych doporučil, aby se velmi pečlivě prozkoumal vliv zanedbání modelu turbulence. Lze předpokládat, že do určité míry deformace budou platné hodnoty z obecně přesnějšího modelu $K - \varepsilon$, ale pro přepočítání výrazněji deformované sítě už bude přesnější použít pro celý výpočet model Spalart-Allmaras, i za cenu nepřesnějších prvotních hodnot. Dále by bylo dobré v rámci týmu nějak „normalizovat“ velikost výpočetního objemu pro dílčí simulace a určit, jaké zmenšení výpočetního prostoru či jaké ústupky z jemnosti sítě je ještě rozumné udělat, aby došlo k uvolnění dostatečného výpočetního výkonu pro použití adjoint solveru.

8.1 Číselné zhodnocení výsledků

V Tab. 5 je číselný zisk pomocí adjoint solveru na všech simulacích uvedených v této práci. Součástí tabulky je také komentář, kde jsou ještě jednou zhodnoceny výsledné hodnoty, hlavně pak jejich důvěryhodnost. Já osobně bych doporučil optimalizaci křídla s tím, že u zadního křídla je potřeba větší část vývoje nastavení sítě a velikosti výpočetního prostoru, zatímco u předního křídla bych zkoušel přidat do simulace některé další díly, například přední nápravu s předním kolem. Jedna z možností, jak adjoint solver efektivně využít by mohla být optimalizace tvaru předního křídla, kdy by zkoumanou veličinou byl odpor kola s nápravou. Skutečný zisk z této simulace by však bylo možné posoudit až po přepočtu nové geometrie dle standardní metodiky s celým vozem, kde by nižší odpor náprav a kola mohl mít pozitivní vliv na přitlak bočních difuzorů či křídla zadního.



Tab. 5: Číselné srovnání všech diskutovaných využití adjoint solveru

	Zisk přítlačku [N]	Komentář
Boční deska	1,4	Použití SA modelu a hrubší sítě pro zbytek vozu. Na jednu stranu se použitím SA modelu vzdáváme určité přesnosti, na druhou stranu samotná velikost deformace by důvěryhodnost výsledků simulace neměla zhoršovat
Přední křídlo	1,2	Použití SA modelu, absence ostatních částí vozu. Obzvláště u předního křídla je důležité znát jeho vliv na ostatní části vozu. Na druhou stranu se jednalo o velmi rychle spočtené simulace
Zadní křídlo	1,4	Použití frozen turbulence, hrubá síť. Vliv ostatních částí vozu je zkreslený a zadní křídlo dává více přítlačku, než ve standardní simulaci dle metodiky [6], kromě toho s větší deformací způsobuje použití "frozen turbulence" ztrátu přesnosti



9 Seznam obrázků

Obr. 1: Studentská formule FS.13 týmu CTU CarTech na MSV v Brně [1].....	9
Obr. 2: Příklad zobrazení citlivosti na přítlak v blízkosti aerodynamického profilu....	11
Obr. 3: Cyklus adjoint solveru	19
Obr. 4: Původní (vlevo) a výsledná geometrie úlohy z bakalářské práce Ing. Pavla Heinze [3].....	20
Obr. 5: Původní a výsledné tvary na základě zvyšování vztlaku (vlevo) či snižování odporu (vpravo) pro různý počet kontrolních bodů (cp) s dvěma různými přístupy k turbulenci v softwaru Open Foam [4]	21
Obr. 6: Design CFD simulace s vzdušným chladičem [5].....	22
Obr. 7: Výpočetní síť s vyznačenou oblastí, ve které se autoři snaží minimalizovat teplotu [5].....	22
Obr. 8: Postup deformace vzdušného chladiče s barevně vyznačenou teplotou [5].....	23
Obr. 9: Graf teploty za chladičem v závislosti na výkonu zdroje pro různé tvary žeber [5] (Obrázku byl pro lepší čitelnost zvýšen kontrast).....	24
Obr. 10: Proudění v oblasti za chladičem pro různé tvary žeber obarvené škálou dle teploty [5].....	24
Obr. 11: Průběh teploty ve střední vertikální rovině za chladičem pro všechny tvary žeber [5]	25
Obr. 12: Tvar a rozměry zkušební tělesa pro první výpočty.....	26
Obr. 13: Výpočetní prostor pro první provedené simulace.....	27
Obr. 14: Graf vypočtené hodnoty vztlaku pro konstantní Courantovo číslo = 7	27
Obr. 15: Zvyšování Courantova čísla o 6	28
Obr. 16: Násobení Courantova čísla 4	28
Obr. 17: grafické srovnání segregated flow + K-epsilon (vlevo) oproti coupled flow + Spalart-Allmaras (vpravo) z hlediska tlaku (nahore) a rychlosti (dole).....	29
Obr. 18: Příklad zdeformování tělesa pomocí 12 kontrolních bodů umístěných podél jeho levých hran. V souladu s největší citlivostí (dominantní oranžová šipka) je nejvíce zdeformována horní přední hrana, kterou v původní geometrii tvořil jeden rádius	30
Obr. 19: Příklad zdeformování tělesa pomocí 10 bodů po jeho zadní části, nejlépe patrné je rozšíření difuzoru zhruba kolem úsečky s kontrolními body.....	30
Obr. 20: Graf srovnání vyšších hodnot deformace oproti dělení na nižší s větším počtem cyklů.....	32
Obr. 21: Srovnání výsledných geometrií variant $3e-3$ (dole) a $3 \times 1e-3$ (nahore)	33
Obr. 22: Použití adjoint solveru na celý vůz studentské formule. Na ještě nezdeformované geometrii CFD modelu vozu je zde zobrazen vektor citlivosti podél monokoku vozu.....	35
Obr. 23: Vyobrazení citlivosti podél šasi vozu, detail na spodní plochy.....	36
Obr. 24: Již zdeformovaná geometrie při použití zmiňované sady bodů jako kontrolních. Deformoval se pouze monokok, tedy modrá část.	36
Obr. 25: Citlivost vypočtená pro jemněji vysíťovaný monokok na již výrazně zdeformované síti.....	37
Obr. 26: Citlivost na sidepodech z vývoje vozu FS.13	37
Obr. 27: Zostření odtokové hrany	38
Obr. 28: Citlivost na náběžné hraně sidepodu zvenku (vlevo) a zevnitř (vpravo)	38
Obr. 29: Boule v oblasti interakce proudění s bočním profilem.....	39
Obr. 30: Citlivost podél bočního endplatu	40



Obr. 31: 10 kontrolních bodů podél horní hrany endplatu.....	40
Obr. 32: 20 kontrolních bodů podél horní hrany endplatu.....	41
Obr. 33: 10 kontrolních bodů podél horní hrany endplatu, pohled shora	41
Obr. 34: 20 kontrolních bodů podél hrany endplatu, pohled shora	41
Obr. 35: Deformace pomocí kontrolních bodů, které nejsou v blízkosti žádné hrany .	42
Obr. 36: Deformace přední hrany při použití faktoru $f=1e-02$	42
Obr. 37: Deformace při použití menšího faktoru, tedy $2e-03$	43
Obr. 38: Graf sledovaného koeficientu vztlaku pro simulaci se zdeformovaným bočním krytem	44
Obr. 39: Graf sledovaného přítlaku pro simulaci se zdeformovanou boční deskou s použitím prvního cyklu adjoint solveru po 4 000 iteracích	44
Obr. 40: Graf sledovaného přítlaku pro simulaci se zdeformovanou boční deskou s použitím prvního cyklu adjoint solveru po 20 000 iteracích	45
Obr. 41: Průměrná hodnota každých 200 iterací před zásahem adjoint solveru.....	45
Obr. 42: Srovnání prvotního jednoduchého modelu a modelu celého vozu, především z hlediska hodnot citlivosti	46
Obr. 43: Residua v průběhu simulace boční desky, kde k prvnímu zásahu adjoint solveru došlo po 20 000 iteracích	47
Obr. 44: Celý výpočetní prostor simulace za účelem vývoje předního křídla.....	49
Obr. 45: Detail na geometrii předního křídla.....	49
Obr. 46: Rezidua simulace předního křídla od počátku výpočtu až po třetí cyklus adjoint solveru.....	49
Obr. 47: Kontrolní body pro deformaci předního křídla i s vypočtenou citlivostí po proběhnutí prvního cyklu adjoint solveru	50
Obr. 48: Srovnání původního(červeně) a výsledného (zeleně) tvaru klapky předního křídla	50
Obr. 49: Vývoj přítlaku předního křídla přes cykly adjoint solveru.....	51
Obr. 50: Další deformace klapky, tentokrát s novými kontrolními body a deformačním faktorem $f=1e-03$. Pod novým, zeleným tvarem prosvítá červeně obarvená původní geometrie.....	51
Obr. 51: Přítlak nejnovější více zdeformované verze.....	52
Obr. 52: Geometrie a výpočetní síť simulace zadního křídla	53
Obr. 53: Detail na vysíťování zadního křídla	53
Obr. 54: Výpočetní prostor simulace zadního křídla	53
Obr. 55: Rychlost vstupu do simulace pro zadní křídlo.....	54
Obr. 56: Řez rychlosti v rovině XZ dle standardní simulace týmu CTU CarTech.....	55
Obr. 57: Řez rychlosti v rovině XZ dle zjednodušené simulace.....	55
Obr. 58: Vykreslení citlivosti na přítlak v okolí zadního křídla. Největší hodnoty bylo dosaženo na konci spodního deflektoru na endplatu křídla	56
Obr. 59: Zdeformovaný spodní deflektor po dvou cyklech adjoint solveru.	57
Obr. 60: Pohled zespod hlavního profilu pro variantu kontrolních bodů na jeho podtlakové straně. V obrázku je červeně vyobrazena původní geometrie a zeleně zdeformovaný tvar	57
Obr. 61: Pohled dovnitř hlavního profilu pro variantu kontrolních bodů na jeho podtlakové straně. V obrázku je červeně vyobrazena původní geometrie a zeleně zdeformovaný tvar	57
Obr. 62: Řez rychlosti v rovině symetrie pro simulaci s hrubou sítí kolem stěn vozu .	58



- Obr. 63: Zdeformovaný deflektor po dvou cyklech adjoint solveru v simulaci s hrubou sítí okolo dílů 59
- Obr. 64: Deformace zadního křídla pro hrubší síť okolo dílů, pohled na vnitřek podtlakové části profilu. Zdeformovaná síť je vyznačena zeleně, červená modře 59
- Obr. 65: Deformace zadního křídla pro hrubší síť okolo dílů, pohled zespod podtlakové části profilu. Zdeformovaná síť je vyznačena zeleně, původní červeně 60
- Obr. 66: Porovnání původní STP geometrie před simulací a vyexportovaného STL sidepodu. Vlevo je v červeném kroužku vidět ona dříve zmiňovaná boule v místě interakce s bočním profilem. Vpravo je pohled zevnitř náběžné hrany. 61



10 Seznam tabulek

Tab. 1: Číselné výsledky vztlaku L a odporu D pro poslední dvě zmiňované simulace	29
Tab. 2: Výsledky první iterace adjoint solveru pro různé hodnoty deformace a různé umístění kontrolních bodů	31
Tab. 3: Číselné hodnoty přtlaku a odporu pro zmiňované simulace	32
Tab. 4: Číselné srovnání simulací zadního křídla	60
Tab. 5: Číselné srovnání všech diskutovaných využití adjoint solveru	63



11 Použitá literatura

- [1] Facebook. *CTU CarTech* [online] cit. [3. 1. 2022] Dostupné z:
<https://www.facebook.com/ctucartech/photos/10158413094553639>
- [2] Simcenter STAR CCM+. *Theory* [online] cit. [3. 1. 2022] Dostupné z:
<https://docs.sw.siemens.com/documentation/external/PL20200805113346338/en-US/userManual/userguide/html/index.html?#page/STARCCMP%2FGUID-7DED1D9B-AAA1-48D4-93A0-62B176764E35.html%23>
- [3] HEINZ, P. Adjoint solver. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Prokop Moravec.
- [4] SCHRAMM M.; STOEVE SANDT B.; PEINKE J. Optimization of Airfoils Using the Adjoint Approach and the Influence of Adjoint Turbulent Viscosity. *Computation* 2018, 6, 5. <https://doi.org/10.3390/computation6010005>
- [5] CZERVIŃSKI, G.; WOŁOSZYN, J. Optimization of Air Cooling System Using Adjoint Solver Technique. *Energies* 2021, 14, 3753. Dostupné z <https://doi.org/10.3390/en14133753>
- [6] ŠEVČÍK, M. Metodika návrhu aerodynamiky vozu Formula Student. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2021. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Hatschbach, CSc.