

Konstrukční návrh a simulace předního křídla pro monopost Formula Student

Konstantyn Horiunov

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 3. ročník
Bakalářský studijní program – STROJÍRENSTVÍ

Abstrakt: Tato práce představuje komplexní aerodynamický a strukturální návrh předního přitlačného křídla pro monopost Formula Student. Hlavním cílem je vytvořit prvek splňující technická pravidla FSG, s garantovanou strukturální integritou při maximálním zatížení a cílovou hmotností do 3,5 kg. Samotná metodika návrhu vychází z fundamentálních poznatků aerodynamiky a mechaniky kompozitů. Iterační vývoj postupuje od počáteční 2D optimalizace profilů přes detailní 3D CFD simulace až po finální pevnostní MKP analýzu. Pro vysoce přesné ověření celkové spolehlivosti a hmotnosti ortotropní uhlíkové konstrukce je do strukturálního modelu přímo namapováno aerodynamické tlakové pole z CFD výpočtu pro maximální rychlost vozu.

Klíčová slova: Formula Student, přední přitlačné křídlo, aerodynamika, výpočetní dynamika tekutin (CFD), metoda konečných prvků (MKP), kompozitní materiály, uhlíková vlákna.

1 Úvod

Projekt Formula Student nepředstavuje pouze stavbu studentského závodního vozu, ale je především komplexní inženýrskou výzvou, kde o celkovém úspěchu rozhodují ty nejmenší detaily a aplikace pokročilých metod navrhování. V takto vysoce konkurenčním prostředí univerzitních týmů z celého světa již nestačí spoléhat se pouze na čistý výkon motoru. Pro dosažení špičkových časů na trati je nezbytná důsledná optimalizace všech klíčových systémů monopostu.

V moderním motorsportu je jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících celkový výkon vozu aerodynamika. Zatímco mechanická přilnavost pneumatik má své nepřekročitelné fyzikální limity, generování aerodynamického přitlaku umožňuje tyto hranice masivně posunout. Zvýšená přitlačná síla radikálně zlepšuje jízdní dynamiku vozu, zkracuje brzdovou dráhu a především umožňuje dosahovat výrazně vyšších rychlostí při průjezdu zatáčkou. Specifikem tratí série Formula Student jsou úzké a technické pasáže.

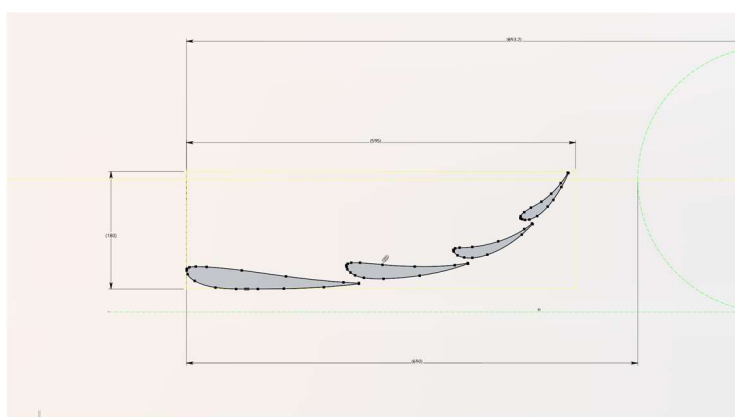
Zásadní roli v celém aerodynamickém balení hraje přední přitlačné křídlo. Jakožto první prvek, který přichází do styku s volným proudem vzduchu, přímo diktuje kvalitu a strukturu proudění pro všechny navazující komponenty vozu, a to zejména pro hlavní podlahu. Cílem této práce je představit komplexní metodiku aerodynamického a strukturálního návrhu předního křídla s využitím pokročilých CFD a MKP simulací. Vývoj efektivního, tuhého a lehkého předního křídla totiž představuje klíčový inženýrský krok, který prokazatelně zvyšuje ovladatelnost a celkovou konkurenceschopnost závodního vozu na trati.

2 CFD simulace

2.1 Návrh aerodynamických profilů a 2D simulace

Prvotní optimalizace tvaru profilů a štěrbin proběhla ve zjednodušeném 2D prostředí. Vzhledem k tomu, že 2D simulace neposkytují absolutně přesné hodnoty celkových sil pro reálné 3D křídlo, nebylo primárním cílem získání absolutních hodnot, ale detailní naladění kaskády tak, aby proud sledoval povrch křídla bez nežádoucího odtržení (separace). Geometrie byla navržena s ohledem na maximalizaci přízemního efektu (*ground effect*) a vytvoření silného *upwash* efektu, který odklání vzduch nad přední pneumatiky.

Pro návrh kaskády byl vytvořen omezující prostor definovaný technickými pravidly soutěže (viz Obr. 1) [1]. Vzhledem k nízkým rychlostem jízdy monopostu ($M < 0,3$) byl výpočetní tunel dimenzován tak, aby čelní plocha kaskády zabírala méně než 5 % plochy tunelu, čímž bylo zamezeno nežádoucímu ovlivnění proudů stěnami. Díky menší výpočetní náročnosti 2D simulací bylo možné vytvořit velmi jemnou výpočetní síť bez nutnosti přijímat kompromisy.

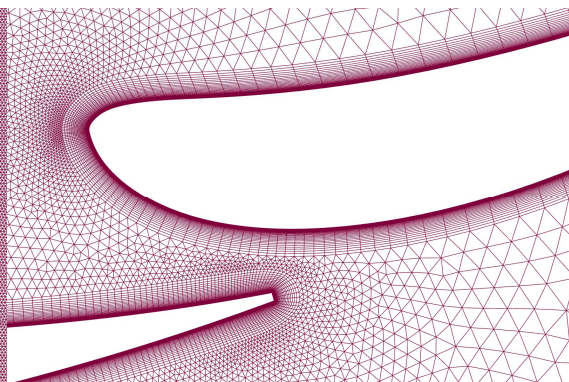


Obr. 1 2d model kaskády

Byly zvoleny následující podmínky globálního nastavení sítě (*Global sizing*): rozměr buněk od 0,01 mm do 50 mm, rychlost růstu (*growth rate*) 1,2, zakřivení (*curvature*) 8° a parametr blízkosti (*proximity*) 5. Pro lokální zjemnění sítě v bezprostředním okolí profilů byly přidány podmínky *curvature* 8° a *proximity* 10 s faktorem růstu 1,1 a velikosti buněk od 0,01 do 1 mm. Pro oblast úplavu za křídlem (*Body of Influence*) byla zvolena cílová velikost buňky 5 mm a *growth rate* 1,1. Nakonec byly na povrchu definovány prizmatické vrstvy pro zacílení bezrozměrné vzdálenosti stěny $y^+ \approx 1$ v celkovém počtu 25 vrstev s faktorem růstu 1,1 (viz Obr. 2 a 3) [2].

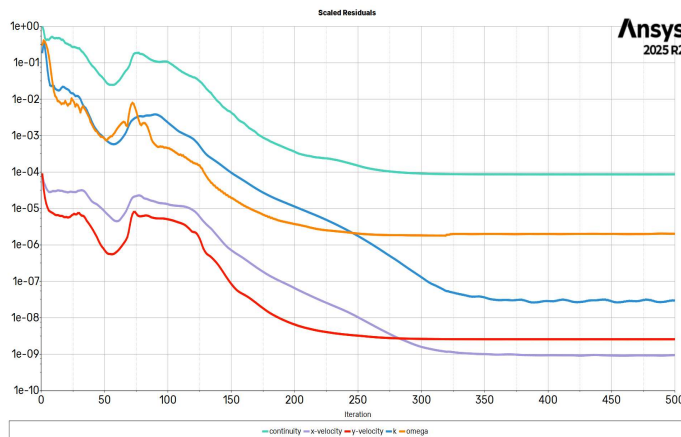


Obr. 2 Síť pro 2D výpočet

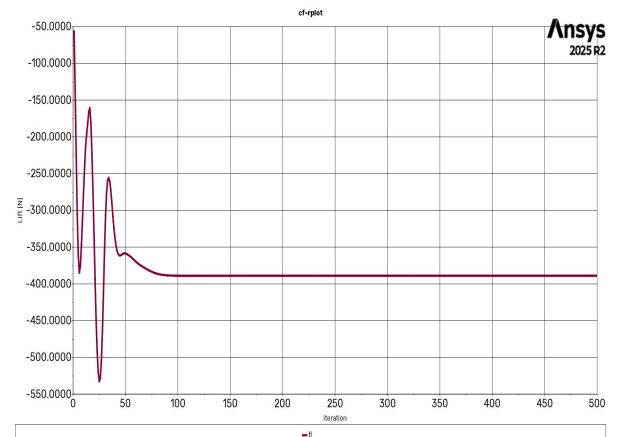


Obr. 3 Mezní vrstva u 2D sítě

Výpočet byl realizován při rychlosti 15 m/s, což odpovídá průměrné rychlosti vozu na trati. Pro simulaci byl využit sdružený řešič (*Coupled Solver*) s modelem turbulence *Menter SST $k - \omega$* . Grafy reziduí a vyhodnocení přitlaku ukazují výbornou a stabilní konvergenci výpočtu (viz Obr. 4 a 5) [3]. Konturový graf magnitudy rychlosti navíc potvrzuje dosažení primárního cíle návrhu – stabilního přilehlého proudu (viz Obr. 6).

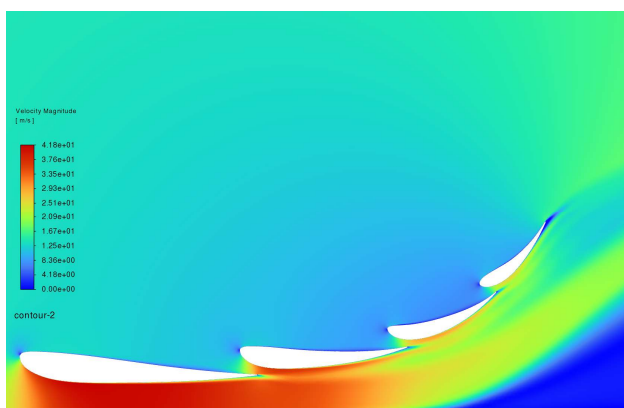


Obr. 4 Průběh reziduí ve 2D

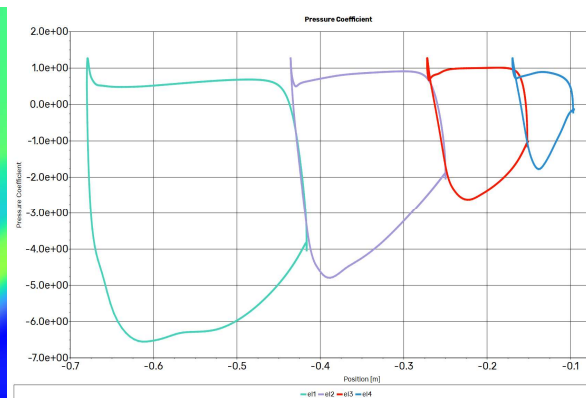


Obr. 5 Ustálení hodnoty přitlaku ve 2D

Z grafu rozložení koeficientu přitlaku podél profilu je dále patrné, že křivka C_l na spodní straně roste plynule bez náhlých skoků či zploštění (viz Obr. 7). To exaktně dokazuje správnou funkci navržených profilů i štěrbin: proud disponuje dostatečnou energií k překonání nepříznivého tlakového gradientu a nedochází k jeho odtržení (separaci).



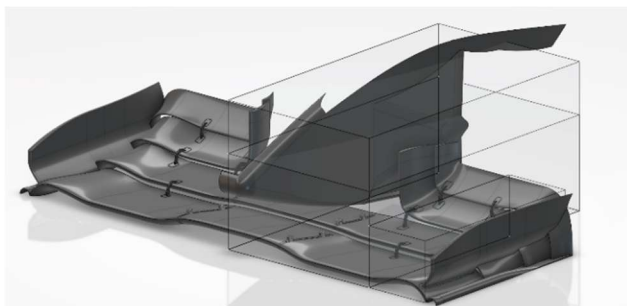
Obr. 6 Rychlost proudu

Obr. 7 Rozložení tlakového součinitele C_L po kaskádě

2.2 Navrh křídla a simulace ve 3D:

Středová část kaskády profilů byla záměrně nadzvednuta a její úhel náběhu snížen, což sice lokálně snižuje přitlak křídla, ale přivádí energetický proud vzduchu k podlaze. Tento jev zároveň přesouvá těžiště aerodynamického tlaku (CoP) více dozadu, což je žádoucí z hlediska jízdní dynamiky vozu. Na vnějších koncích křídla jsou aplikovány svislé bočnice (*endplates*) doplněné o vodorovné desky ve tvaru polotrubky (*vortex generators*), které tvoří aerodynamickou ucpávku a generují dodatečný přitlak bez nárůstu odporu. Vzhledem k nadměrnému urychlení vzduchu blíže k jejich konci a jeho následnému přechodu do turbulentního stavu (čímž vznikala rozsáhlá separační bublina ovlivňující proud na spodní

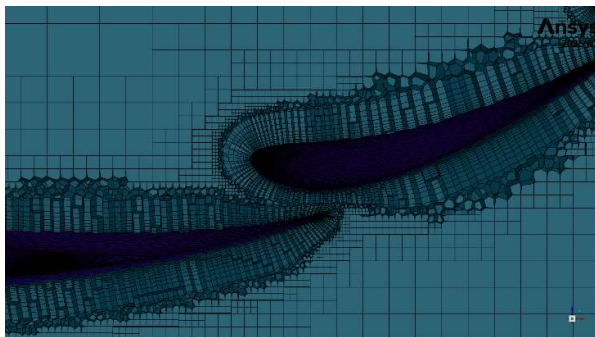
části profilu), byly tyto generátory směrem ke konci plynule transformovány do plochého tvaru. Tím se zabránilo nežádoucímu nadměrnému zrychlení proudu. Celá vnější sekce je navíc natočena ven pro vytvoření *outwash* efektu a zamezení přetékání vzduchu z oblasti s běžným (atmosférickým) tlakem do podtlakové oblasti pod křídlem. *Outwash* efektivně odklání proud zcela mimo rotující přední pneumatiky, čímž minimalizuje celkový odpor vozu a současně zvyšuje ohybovou tuhost kaskády. Vnitřní zakončení profilů u nosu vozu je pak vyřešeno ostrým ohybem o 90° vzhůru, který efektivně odhání turbulentní vzduch mimo nasávací otvory bočních chladičů. Tím je zajištěn plynulý průtok chladicím systémem a k zadním aerodynamickým prvkům se dostává čistý vzduch, což maximalizuje jejich celkovou účinnost (viz Obr. 8).



Obr. 8 Křídlo v hranicích, definovaných podle pravidel a rámu

Před generováním sítě byl původní CAD model zjednodušen odstraněním drobných elementů a uzavřením technologických otvorů pro zajištění vodotěsnosti (*watertight model*). Využitím rovinné symetrie křídla byla modelována pouze polovina výpočetní domény, což snížilo výpočetní a paměťové nároky na polovinu.

V pre-processoru Ansys Fluent Meshing byla nejprve vytvořena povrchová obálka (*Surface Wrap*) s rozsahem elementů 0,7 až 175 mm a faktorem růstu (*Growth Rate – GR*) 1,4. Síť v okolí tělesa byla zjemněna třemi objemy v úplavu (BOI; 18, 30 a 50 mm; GR 1,25) a na samotném povrchu křídla funkcemi *Proximity* (minimum 0,7 mm, 5 buněk v mezeře) a *Curvature* (pro úhel 8°). Povrchová síť byla následně diagnostikována a optimalizována nástroji *General Improve*, *Collapse* a *Delaunay Swap*, čímž byly odstraněny topologické defekty a maximální zkosenost buněk (*Skewness*) byla sražena pod bezpečnou hodnotu 0,7.

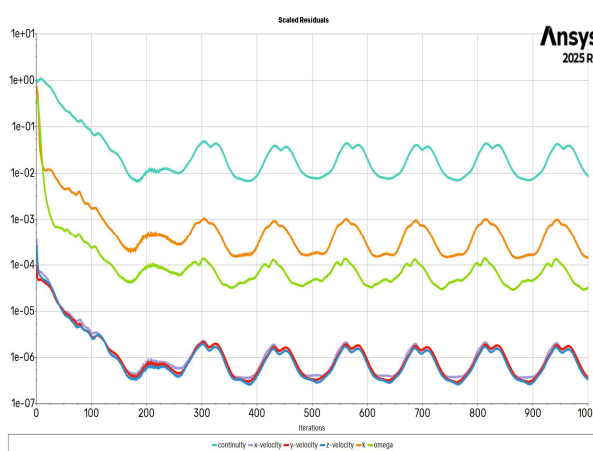


Obr. 9 Mezní vrstva u 3D sítě

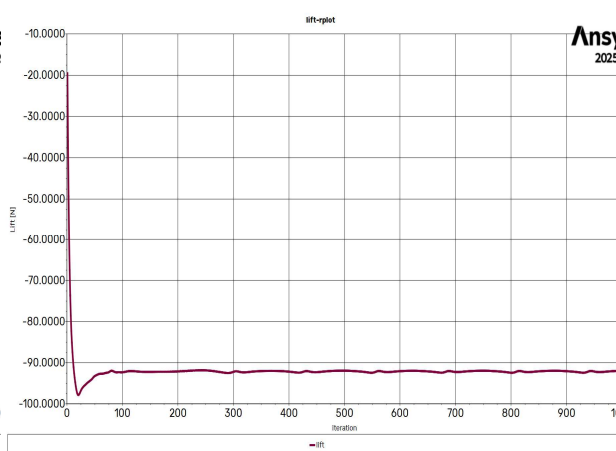
Pro vnitřní objem byla zvolena hybridní síť *Poly-Hexcore*, kombinující přesné ortogonální šestistěny ve volném proudu a flexibilní mnohostěny u stěn. Z důvodu úspory množství buněk

a výpočetního času byla tloušťka první prizmatické vrstvy zvolena pro cílovou hodnotu $y^+ \approx 30$, což umožňuje využití stěnových funkcí (*Wall Functions*). Výsledný počet vrstev byl stanoven na 6 s GR 1,2, což vede k celkové tloušťce mezní vrstvy přibližně 10 mm (viz Obr. 9). Minimální ortogonální kvalita domény dosáhla po finálním vyhlazení bezpečné hodnoty 0,26 [2].

Výpočet probíhal pomocí sdruženého řešiče (*Coupled Solver*) a modelu turbulence *Menter SST $k - \omega$* , což zajistilo vysokou numerickou stabilitu. Koeficienty odporu (C_D) a přítlaku (C_L) byly vztaženy k čelní průmětové ploše polovičního modelu při referenční teplotě 30 °C a rychlosti 15 m/s. Pro potlačení oscilací v řešení byla aktivována funkce *High Order Term Relaxation* (HOTR) a pole bylo inicializováno hybridní metodou. Ta umožňuje vytvořit počáteční odhad tlakového pole v tunelu, čímž znatelně šetří celkový počet výpočetních iterací [3].



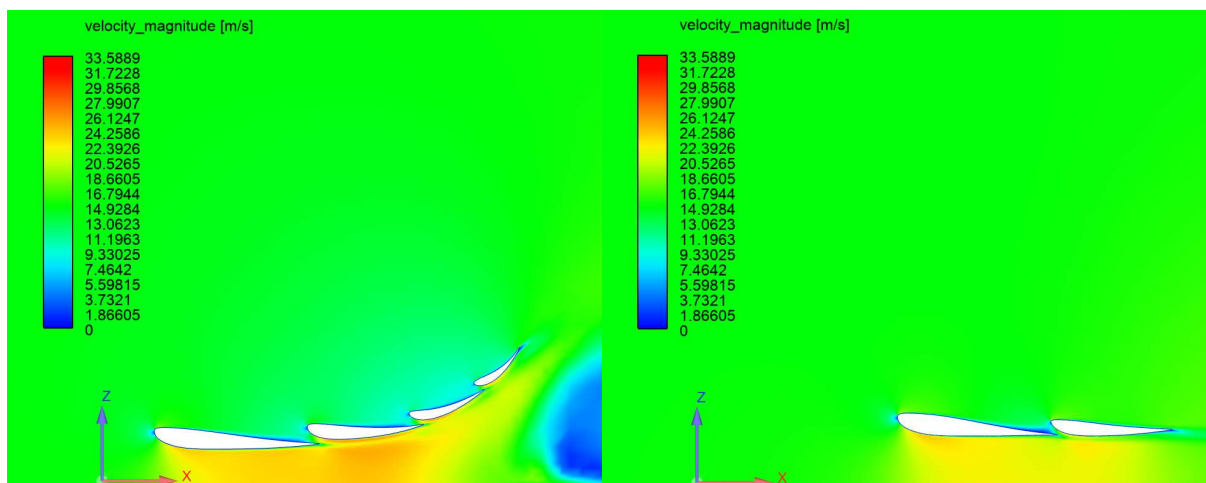
Obr. 10 Průběh residuí v 3D



Obr. 11 Ustálení hodnoty přítlaku ve 3D

Výpočet byl nastaven na 1000 iteraci a došlo k rozkmitání (viz Obr. 10), což není problém vzhledem k ustálení přítlačné síly (maximální odchylka do 0,4 N) (viz. Obr 11), přičemž vliv drobných fluktuací turbulentního úplavu byl eliminován zprůměrováním posledních 100 iterací. Při referenční rychlosti 15 m/s generuje polovina křídla přítlak $L = -92 \text{ N}$ ($C_L = -7,13$) a odpor $D = 16 \text{ N}$ ($C_D = 1,24$). Výsledná aerodynamická účinnost $\frac{L}{D} \approx 5,75$ prokazuje vysokou efektivitu navržené kaskády.

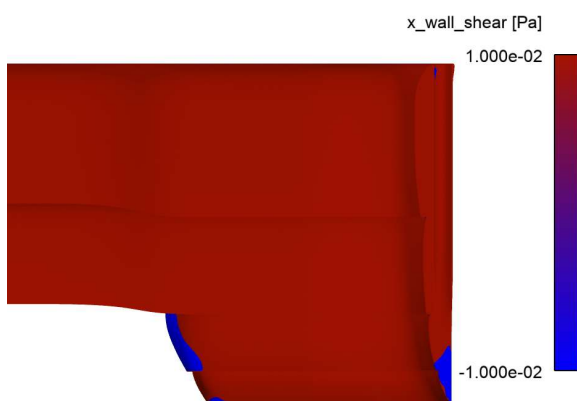
Podélné řezy rychlostního pole (viz Obr. 12 a 13) potvrzují správnou funkci křídla. Vnější, prostorově agresivnější kaskáda efektivně odklání proud mimo přední pneumatiky (*outwash* efekt), čímž minimalizuje celkový odpor vozu. Na obrázku je rovněž patrná bublina turbulentního vzduchu, která vzniká nasáváním vzduchu z vnější strany s vyšším (téměř atmosférickým) tlakem do podtlakové oblasti pod křídlem. Z vizualizace je však zřejmé, že pod spodní plochou křídla nadále proudí vzduch plynule směřovaný vzhůru. Tato turbulentní struktura tedy neovlivňuje výkon okrajové části kaskády nijak kritickým způsobem. Plošší středová část naopak urychluje proud záměrně méně a nesměruje ho vzhůru, což by jinak způsobilo jeho náraz na podlahu a ztrátu kinetické energie. Díky tomu je hlavní podlaha vozu zásobována čistým, vysokoenergetickým vzduchem.



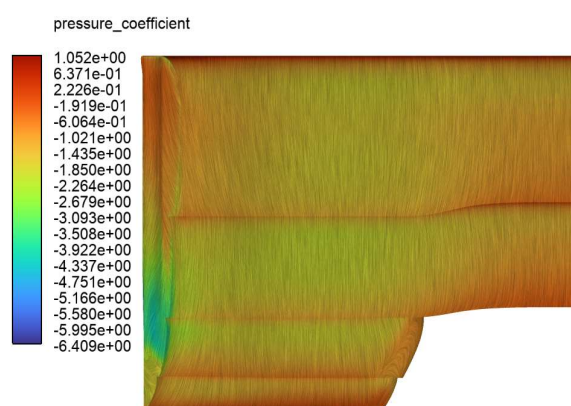
Obr. 12 Rychlost proudu na konci křídla

Obr. 13 Rychlost proudu uprostřed křídla

Analýza podélného smykového napětí na stěně τ_w (viz Obr. 14), u které byla barevná paleta omezena pouze na kladné a záporné hodnoty, ukazuje rozsáhlou plochu s kladným třením. To značí vysokou celkovou efektivitu křídla a potvrzuje, že jeho výkon není kriticky degradován zmíněnou turbulentní bublinou. K lokální separaci a vzniku turbulentní bubliny (indikované propadem sacího tlaku a záporným τ_w) dochází primárně na konci *vortex generátoru* (odkud se následně šíří turbulentní bublina) a na svislých přechodech třetího a čtvrtého profilu. Toto lokální odtržení je však inherentním důsledkem 90° zakřivení profilu, které je nezbytné pro tvorbu *outwash* efektu. Rozložení tlakového koeficientu C_p s vykreslením mezních proudnic (viz Obr. 15) vizuálně prokazuje dosažení silného *outwash* efektu na vnější straně křídla. Zároveň je zde patrný náhlý propad sacího tlaku (přiblížení C_p k nule), což přesně koreluje s místem vzniku turbulentní bubliny.



Obr. 14 Smykové napětí na povrchu křídla zespodu

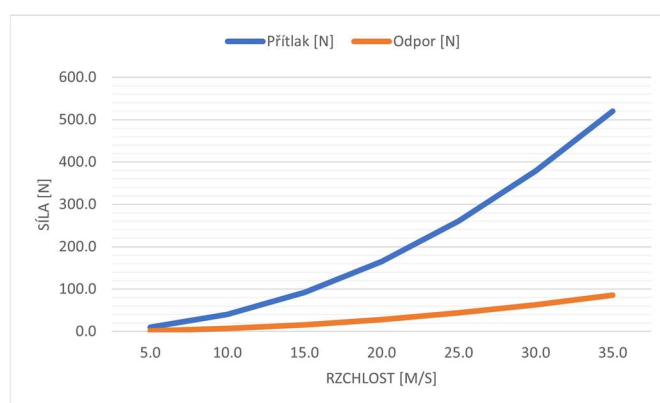


Obr. 15 Tlakový koeficient zespodu

Parametrická studie pro rychlosti 5 až 35 m/s (viz Tab. 1 a Obr. 16) prokazuje, že do rychlosti 10 m/s jsou aerodynamické síly nepatrné, ale po jejím překročení začínají v souladu s aerodynamickou teorií kvadraticky narůstat. Z trendu křivek je zřetelně patrné, že nárůst přítlaku je výrazně strmější než nárůst čelního odporu, což křídlu umožňuje generovat masivní přítlak pro směrovou stabilitu vozu bez drastické penalizace brzdícím odporem.

Tabulka 1 Tabulka aerodynamických sil a koeficientů

Rychlost [m/s]	CL	Přítlak [N]	CD	Odpor [N]	CL:CD
5	7	10	1.3	1.8	5.6
10	7.1	40.5	1.2	7.1	5.8
15	7.1	92	1.2	16	5.8
20	7.2	165.1	1.2	28.3	6.1
25	7.3	260.4	1.2	44.1	6.3
30	7.3	378.5	1.1	63.2	6.5
35	7.4	520	1.1	85.6	6.7



Obr. 16 Závislost aerodynamických sil na rychlosti

3 FEM simulace

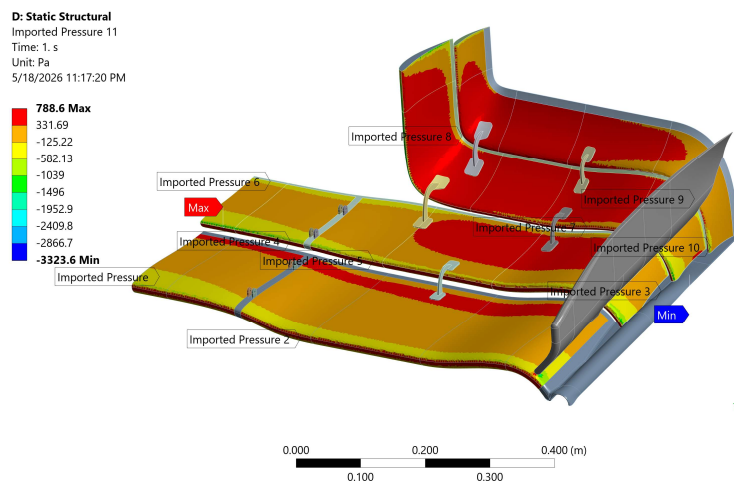
Pro dosažení maximální ohybové tuhosti křídla při minimální hmotnosti byla struktura aerodynamických profilů navržena jako sendvičová, složená z lehkého polystyrenového jádra a dvou vnějších vrstev uhlíkové biaxiální tkaniny (0,5 mm po vytvrzení). Jelikož vlivem zatížení dojde nejdříve k separaci jádra a skořepiny, byla do kompozitní skladby přidána vrstva epoxidové pryskyřice o tloušťce 0,1 mm, která slouží jako lepidlo. Transfer lokálních koncentrovaných sil do skořepiny je zajištěn pomocí 8 žeber z leteckého duralu (EN AW-7075-T6, tl. 3 mm) obepínajících hlavní středový nosný držák (6 mm). Proti vzájemnému pohybu a aerodynamickému *flutteru* jsou profily zafixovány 10 hybridními uhlíkovými spojkami (tělo z jednosměrných UD vláken, patky z kvazi-izotropních sekaných vláken *forged carbon*).

Strukturální integrita byla ověřena statickou pevnostní analýzou v softwaru ANSYS za využití aerodynamického tlakového pole importovaného z CFD pro rychlost 35 m/s. Jelikož u CFD simulací byla použita síť typu polyhedra, ANSYS nepodporuje přímý export zatížení. Z tohoto důvodu byly hodnoty tlaku vyexportovány jako datový soubor se třemi složkami polohy v prostoru a příslušnou hodnotou tlaku. Následně byl tento soubor ručně nadefinován jako tlakové pole pomocí nástroje *External Data*. Topologie byla upravena na hybridní model s využitím sdílené topologie (*Shared Topology*), kde aerodynamické potahy byly modelovány jako skořepiny a jádra jako plná tělesa. Tento přístup zajistil tvorbu konformní sítě a nasimuloval dokonalé adhezni spojení bez výpočetně nestabilních kontaktních vazeb.

Tvorba sítě primárně cílila na maximalizaci čtyřúhelníkových buněk (*Prime Quad Dominant*) nezbytných pro správné mapování kompozitních vláken. Byly použity lineární elementy 1. řádu s normálovým úhlem 10° a velikostí 0,5–3 mm. V modulu ANSYS ACP byla následně

definována kompozitní skladba ploch: 0,1 mm čisté pryskyřice pro predikci delaminace a dvě vrstvy biaxiální tkaniny pootočené o 45°. Výsledná jmenovitá tloušťka skořepiny činila 0,6 mm s extruzí směrem vně jádra. Patky spojek z *forged carbonu* byly nahrazeny izotropním modelem hliníku.

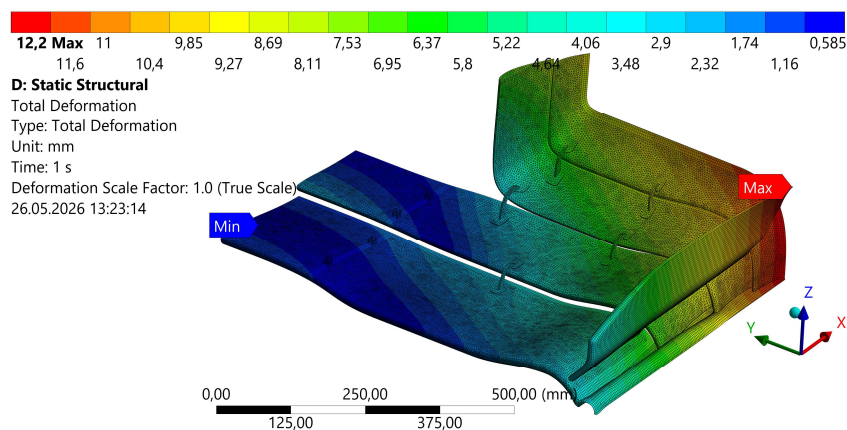
V modulu Static Structural byla aplikována rovinná symetrie a fixace pomocí vazby *Remote*



Obr. 17 Importovaný statický tlak

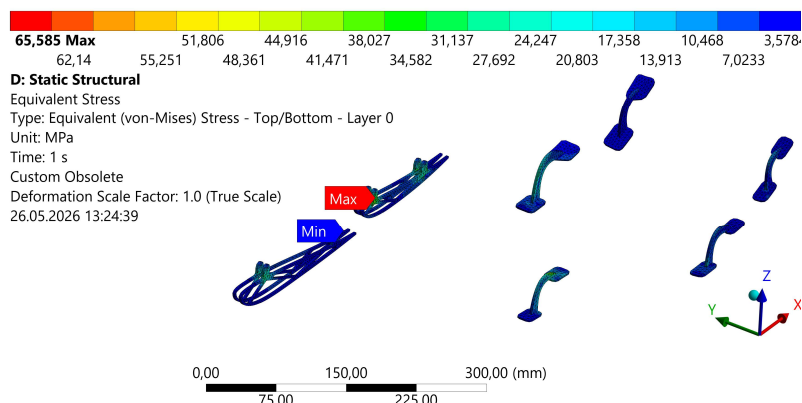
Displacement v otvorech kotevních žebber. Mapovací algoritmus následně interpoloval aerodynamické tlakové pole z CFD sítě přímo na uzly skořepin MKP sítě (viz Obr. 17), čímž bylo dosaženo vysoce přesného přenosu fyzikálního zatížení.

Maximální průhyb křídla pod aerodynamickým zatížením (při 35 m/s) dosáhl lokálně na nejvzdálenější odtokové hraně endplatu hodnoty 12,2 mm (viz Obr. 18). V kontextu technických pravidel soutěže, která povolují statický průhyb 10 mm při bodovém zatížení 200 N, představuje tato provozní deformace dostatečnou bezpečnostní rezervu a potvrzuje vysokou ohybovou tuhost sendvičové struktury.



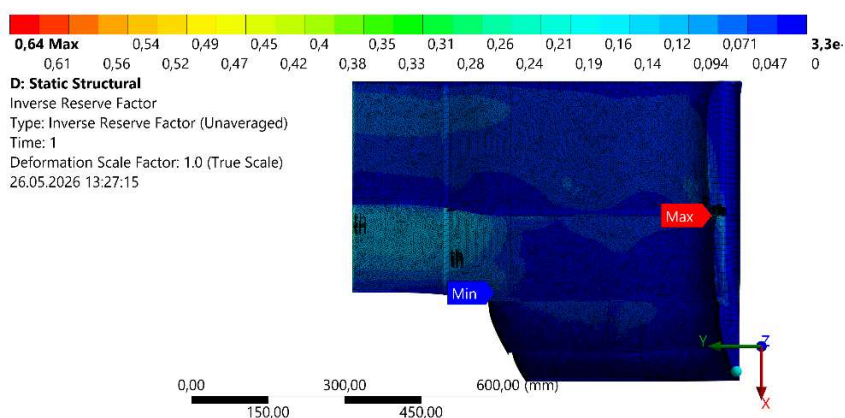
Obr. 18 Deformace křídla

Maximální redukované napětí von Mises v izotropních elementech (primárně v duralových kotevních žebrech a stabilizačních spojkách) nepřekročilo hodnotu 70 MPa (viz Obr. 19). Jelikož mez kluzu materiálu EN AW-7075T6 přesahuje 400 MPa, je návrh vysoce bezpečný. Tato hodnota zároveň potvrzuje únosnost kompozitních spojovacích patek, pro něž byl dural zvolen jako konzervativní izotropní substitute.

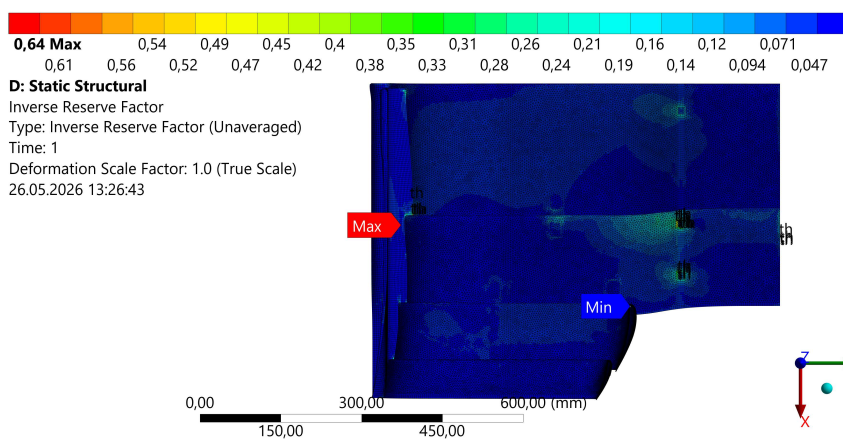


Obr. 19 Napět v izotropních elementech

Vzhledem k tomu, že v základní knihovně materiálů softwaru ANSYS nebyly dostupné koeficienty pro hypotézu Tsai-Wu, byla pevnost ortotropního uhlíkového potahu a adhezivní vrstvy lepidla vyhodnocena pomocí konzervativní Tsai-Hillovy pevnostní hypotézy, která nerozlišuje zatížení v tahu a tlaku. Výsledná maximální hodnota pevnostního kritéria je 0,64. Vzhledem k její pozici přímo na odtokové hraně se však pravděpodobně jedná o lokální výpočetní nepřesnost. Reálné vyšší hodnoty koeficientu se nacházejí v okolí míst přilepení stabilizačních spojek a na spodním povrchu křídla, kde generovaný podtlak táhne profil směrem dolů (viz Obr. 20 a 21). Výsledky této simulace spolehlivě potvrzují, že v uhlíkovém vlákne ani ve vrstvě lepidla nedošlo k překročení bezpečné únosnosti. Navržená konstrukce křídla tak plně vyhovuje všem tuhostním i pevnostním požadavkům.



Obr. 20 Tsai-Hillovo kritérium na spodí ploše



Obr. 21 Tsai-Hillovo kritérium na horní ploše

4 Hmotnostní odhad

Hmotnostní bilance předního křídla (viz Tab. 2), vypočtená z objemových dat CAD modelu a materiálových hustot, vykazuje celkovou hmotnost o více než 600 g nižší, než byl stanovený limit 3,5 kg. Těto významné hmotnostní úspory pro závodní monopost bylo dosaženo při plném zachování strukturální tuhosti a bezpečnosti proti mechanickému porušení.

Tabulka 2 Hmotnostní odhad

Komponenta (Materiál)	Hustota ρ [kg/m^3]	Objem V [$10^{-6}m^3$]	Hmotnost m [kg]
Uhlíkový potah (skořepina)	1 451	1 145,90	1,663
Stabilizační držáky (kompozit)	1 451	30,7	0,045
Epoxidová pryskyřice (lepidlo)	1 160	23,9	0,277
Kotevní žebra (EN AW-7075-T6)	2 804	38,6	0,108
Vymezovací podložky (plast)	1 000	64,6	0,065
Sendvičové jádro (PVC pěna)	60	11 900,00	0,714
Celková hmotnost sestavy			2,872

5 Závěr

Tato práce úspěšně splnila všechny cíle návrhu předního křídla pro monopost Formula Student. CFD simulace prokázaly vysokou aerodynamickou efektivitu kaskády, generování stabilního přitlaku a úspěšné odklonění proudu mimo přední pneumatiky. Strukturální MKP analýza potvrdila spolehlivost kompozitní skořepiny, jejíž cílená pevnostní rezerva kompenzuje výrobní nepřesnosti a zvyšuje bezpečnost při nárazu. Predikovaná hmotnost navíc podkročila cíl o 600 gramů, což garantuje splnění limitu i u reálného výrobku. Zvolená metodika a získaná data tak tvoří pevný inženýrský základ pro budoucí vývoj aerodynamických paketů a poslouží jako exaktní podklad pro obhajobu konstrukce v disciplíně Engineering Design Event na mezinárodních soutěžích.

Literatura

- [1] FORMULA STUDENT GERMANY. *Formula Student Rules 2026* [online]. 2026. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2026/rules/FS-Rules_2026_v1.1.pdf
- [2] TU, Jiyuan. *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Third edition. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2018. ISBN 978-0-08-101127-0.
- [3] BAKER, T J. *Fluent User's Guide*. 2025.