

PREDIKCIA AERODYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ AUTOMOBILU POMOCOU METÓDY CFD

Ing. František Kupec

Katedra automobilovej výroby
Strojnícka fakulta TU v Košiciach
Mäsiarska 74, 040 01, Košice
e-mail: frantisek.kupec@tuke.sk

doc. Ing. Michal Fabian, PhD.

Katedra automobilovej výroby
Strojnícka fakulta TU v Košiciach
Mäsiarska 74, 040 01, Košice
e-mail: michal.fabian@tuke.sk

Abstract

The development and improvement of the aerodynamic properties of new cars is experiencing another stage of progress in the period of increasing the energy efficiency of transport. More and more aerodynamic elements, which in the past were only usable for concept cars, are getting into production vehicles. Since the time for the development cycle of a car is constantly shortening, computer support and specifically the prediction of aerodynamic properties using the method of computational fluid dynamics are used to a high extent in the tuning of aerodynamic properties. Its use must be justified and effective. Despite the continuous progress of computational fluid dynamics methods, there are areas in which a completely accurate result is not guaranteed, which is due to the simplification of computational equations. Nevertheless, this method is increasingly used in the process of developing a car due to its high efficiency and ever-increasing accuracy.

Key words: CFD, aerodynamics, car

ÚVOD

Zlepšovanie aerodynamiky cestných vozidiel bolo začiatkom 20. storočia motivované najmä zvyšovaním maximálnej rýchlosti vozidiel. Význam aerodynamiky do popredia dostávali aj často opakujúce sa palivové krízy vo svete. V 70. rokoch 20. storočia došlo k zvýšeniu požiadaviek na úžitkovosť karosérie vozidiel, čo malo za následok obmedzenie experimentálnych tvarov karosérie automobilov v známych ideálnych aerodynamických tvaroch. Vývoj a zlepšovanie aerodynamiky sa preto začali sústreďovať na detaily karosérií. Postupom času došlo k zisteniam, že aerodynamické vlastnosti karosérie vozidiel možno významne ovplyvniť optimalizáciou detailov alebo pridávaním a úpravou geometrie prvkov karosérie vozidiel. Význam aerodynamiky cestných vozidiel narastá aj z dôvodu zlepšovania kvalitatívnych vlastností automobilu. Jedná sa o znižovanie hluku

vetra, minimalizáciu alebo elimináciu emisií hluku, predchádzanie pôsobeniu nežiaducich vztlakových síl a iných príčin aerodynamickej nestability pri vysokých rýchlostiach. V posledných desiatkach rokov vývoja automobilov je hlavnou motiváciou zvyšovanie energetickej efektivity vozidiel, teda znižovanie nárokov na energetické vstupy. [1]

CFD (Computational Fluid Dynamic), teda výpočtová dynamika tekutín je metóda, ktorá je už niekoľko desaťročí súčasťou vývoja aerodynamiky vozidiel. Jedná sa o počítačovú analýzu správania tekutín alebo vzduchu. CFD sa používa na vylepšenia založené na analýze pri navrhovaní systémov dynamiky tekutín a prenosu tepla v rôznych priemyselných odvetviach ako sú letecký, automobilový, biomedicínsky a elektrotechnický priemysel. V prípade analýzy aerodynamiky automobilu CFD analýza poskytuje vysoko rozlíšené znázornenie kompletného poľa prúdenia okolo vozidla. Hlavným dôvodom využitia CFD je, že umožňuje rýchlejšie vývojové cykly a úsporu nákladov v porovnaní s tradičným testovaním v aerodynamickom tuneli, ktorý sa v minulosti využíval ako hlavný nástroj testovania aerodynamiky. Schopnosť predpovedať aerodynamické vlastnosti rýchlym, iteratívnym a vysoko presným spôsobom umožňuje inžinierom optimalizovať aerodynamické prvky automobilu priamo z ich pracovnej stanice, ešte predtým, ako sú akékoľvek diely vyrobené a nasadené v sériovej výrobe. Súčasne využívanou kombináciou CFD metódy a overením fyzického prototypu v aerodynamickom tuneli možno dosiahnuť presné a smerodajné výsledky pre vývoj automobilov [2][3][4].

POUŽITIE CFD PRI VÝVOJI AUTOMOBILU

Metóda CFD čoraz vo vyššej miere dopĺňa použitie konvenčného aerodynamického tunela, v ktorom dochádza k testovaniu aerodynamiky osobných vozidiel. Pred použitím metódy CFD v procese vývoja automobilu ako náhrady aerodynamického tunelu musia byť podľa [1] splnené tri požiadavky:

- Očakáva sa presnosť výsledkov na rovnakej úrovni ako v aerodynamickom tuneli s úrovňou rozlíšenia na $\Delta C_D = 0,001$, nakoľko významné zníženie odporu sa často dosiahne len nahromadením mnohých z takto malých zlepšení,
- Časová náročnosť by mala byť porovnateľná s aerodynamickým tunelom, vrátane času potrebného na výrobu modelu a všetkých fyzických a numerických modifikácií počas procesu vývoja,

- Celkové náklady by mali byť porovnateľné s aerodynamickým tunelom.



Obr. 1 Aerodynamický tunel pre fyzické skúmanie aerodynamiky automobilu [6]

Súčasný softvérový nástroj spĺňa tieto požiadavky a dá sa očakávať, že ich v najbližších rokoch vysoko prekonajú použitie aerodynamického tunela pri vývoji automobilu z hľadiska času a nákladov. Vývoj CFD stále pokračuje neustálymi inováciami hardvéru a softvéru. Napriek tomu sa vývoj aerodynamiky cestných vozidiel realizuje pomocou metódy CFD a zároveň sa výsledky podporujú meraním v aerodynamických tuneloch. [1][3]

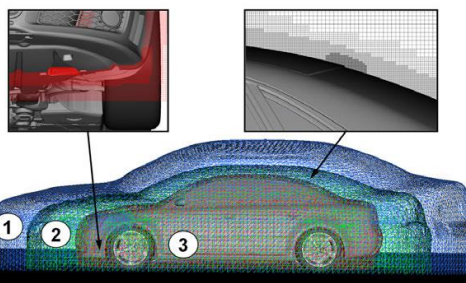
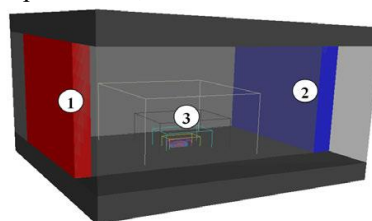
PRINCÍP CFD METÓDY

Známe výpočtové metódy sú založené na zákonoch zachovania hmotnosti, hybnosti a zákone zachovania energie. O tieto zákony sa opierajú Navier-Stokesové rovnice popisujúce prúdenie nestlačiteľnej Newtonovej kvapaliny. Popis prúdenia predstavuje sústava nelineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc 2. rádu. Metódy CFD riešia tieto rovnice len v približnej aproximácii - rovnice sú z hľadiska fyzikálnych javov rôznymi spôsobmi zjednodušené. Presné riešenia Navier-Stokesových rovníc (NSE) existujú len pre špeciálne prípady a len niekoľko z nich je relevantných pre automobilovú techniku. V automobilovom vývoji aerodynamiky sa využívajú len zjednodušené verzie NSE, pre ktoré je možné a realizovateľné numerické riešenie. [1] Medzi zjednodušeniami patria napríklad: zanedbané viskózne účinky, nerotačné prúdenie alebo časové spriemerovanie prietokových množstiev v prietokovom poli. Všetky tieto zjednodušené NSE idealizujú fyziku a vzdávajú sa od skutočných prírodných podmienok. Druhá kategória zjednodušení je matematického charakteru, zavedená spôsobom riešenia vybraných rovníc. V princípe, diferenciálne rovnice opisujúce kontinuum, sú diskretizované spolu so špecifickými okrajovými podmienkami (t. j. sú aplikované na malé, ale konečné objemy vo výpočtovej oblasti). Tieto zjednodušené sú vykonávané v záujme zrýchlenia výpočtu avšak v takej miere, aby bola zachovaná miera relevancie výsledku. Presnosť

CFD metódy je možné nastaviť individuálne v závislosti od požadovaného výsledku. Možnosti CFD simulácií poskytujú zadanie presných okrajových podmienok konkrétneho aerodynamického tunelu vrátane modelov pásových a valčekových systémov pre presnú simuláciu jazdy. [2].

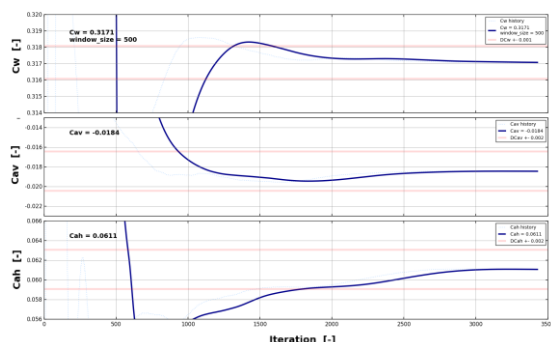
Základný princíp metódy CFD podľa [2] pozostáva z týchto hlavných krokov:

1. **Preprocessing**, ktorý zahŕňa diskretizáciu výpočtovej oblasti. Prúdiace médium je rozdelené metódou konečných prvkov na konečný počet elementov v trojrozmernom priestore, pričom každý z nich má svoje priradené lokálne a globálne súradnice. Najmenší element má veľkosť 2 milimetre. V automobilovom vývoji sú zaužívané možnosti nastavenia hustoty siete v oblastiach s vysokým významom – napríklad predný A stĺpik, oblasť brzdových kotúčov pre presnejšiu analýzu citlivých oblastí. Tu sú elementy veľkosti približne 1,1 milimetra.



Obr. 2 Preprocessing – diskretizácia, oblasti 1 až 3 s rôznou veľkosťou buniek od najväčšej po najmenšiu [1]

2. **Solving** zahŕňa riešenie numerických rovníc pre každý z diskretizovaných elementov metódou konečných prvkov. Vypočítané sú tlakové polia, vektory rýchlostí, transportné rovnice a rovnice hybnosti prostredníctvom prevodu parciálnych diferenciálnych rovníc na sústavy lineárnych rovníc. Vykonaných je niekoľko iterácií a cieľom je dostať sa ku konvergentnému výsledku jednotlivých veličín.



Obr. 3 Graf konvergence jednotlivých aerodynamických koeficientov počas výpočtu [9]

3. **Postprocessing** zahŕňa podrobnú analýzu a vizualizáciu výsledkov jednotlivých veličín. Analýza sa vykonáva prostredníctvom vizualizačných nástrojov, ktoré graficky vykresľujú jednotlivé aerodynamické sily a momenty ako bezrozmerné koeficienty rozložené po skúmanej geometrii povrchu vozidla. Vyobrazené sú farebnou škálou a vykresľovaním trojrozmerných útvarov pre vizualizáciu vírov. [3]

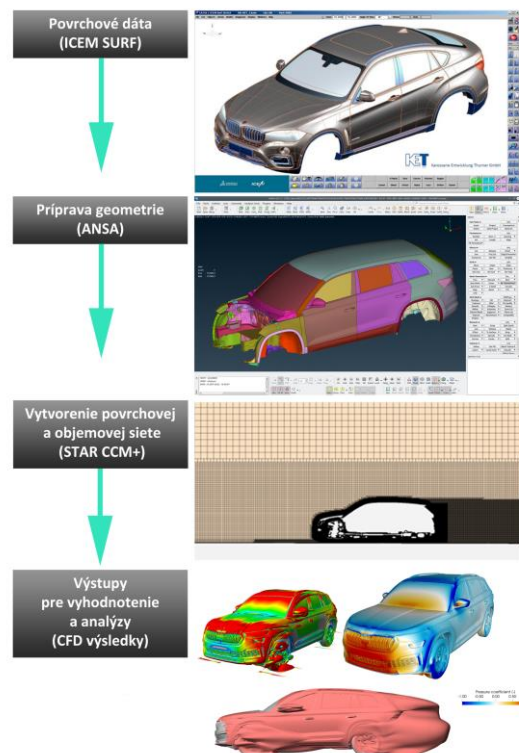
Presnosť a relevantnosť výstupu CFD analýzy závisí aj od zvoleného matematického modelu pre popis turbulentného prúdenia. Samotné turbulentné prúdenie sa skladá z rôzne veľkých turbulentných vírov, ktoré obsahujú väčšinu energie. Tieto víry sa postupne rozpadávajú na menšie. Práve v popise turbulentného prúdenia je kľúčový problém CFD simulácií. Podľa [4] neexistuje všeobecne použiteľný model turbulencií, voľba turbulentného modelu závisí na spôsobe toku, požadovanej presnosti riešenia, dostupnej výpočtovej technike a množstvu dostupného času pre simuláciu. [4]

Výber matematického modelu a spôsob riešenia numerickej simulácie je samostatnou vedeckou disciplínou a je závislé od použitého softvéru pre riešenie CFD simulácie. Spomenúť možno štyri základné typy matematických modelov využívaných pre popis turbulentného prúdenia v CFD simulácií aerodynamiky automobilov:

- DNS (Direct Numerical Simulation),
- LES (Large Eddy Simulation),
- RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes),
- DES (Detached Eddy Simulation) [3][5].

PROCES CFD ANALÝZY

Podrobnejší popis proces CFD analýzy interpretuje schéma na obrázku č. 4, kde sú zobrazené jednotlivé fázy simulácie aerodynamiky automobilu. Popis k jednotlivým krokom je vysvetlený v bodoch 1 ž 4.



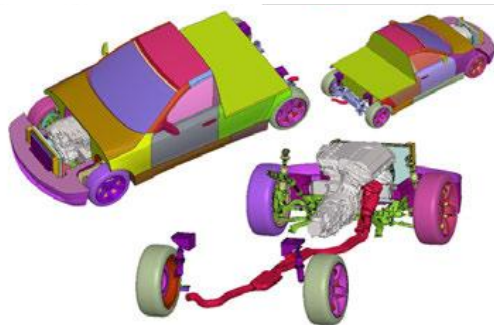
Obr. 4 Schéma postupu pri CFD analýze [1][9]

1. POVRCHOVÉ DÁTA

Povrch karosérie vozidla je tvorený tzv. pohľadovými plochami, ktoré sú zhotovené CAD softvéromi pre tvorbu A-class plôch (napríklad ICEM Surf). Ide o vysoko presné povrchové dáta rešpektujúce ako dizajnové požiadavky, tak konštrukčné a technologické požiadavky. Tieto dáta sú exportované vo formáte .iges, ktorý reprezentuje skúmanú geometriu povrchu.

2. PRÍPRAVA GEOMETRIE AUTOMOBILU

Okrem povrchových dát je pre relevantný výstup potrebná aj konštrukčná časť dát. Ide o časti podvozku, motorový priestor, agregát, zavesenie náprav a výfukovú sústavu. Pre čo najpresnejší výstup musí zohľadňovať reálnu geometriu skúmaného automobilu. Naopak štruktúrne časti, v ktorých nedochádza k prúdeniu vzduchu a k priamej interakcii s externou aerodynamikou vozidla, nemusia byť súčasťou vstupnej geometrie automobilu.



Obr. 5 Geometria reprezentujúca štruktúrne časti vozidla [1]

Takto kompletnú geometriu je potrebné upraviť do stavu, s ktorým je schopný pracovať CFD nástroj. Realizuje sa napríklad v softvéri ANSA. Úpravou sa rozumie zacelenie povrchu automobilu. Dopĺňané sú najmä medzery medzi karosárskymi dielmi, vstupné chladiace otvory alebo otvory v podvozku vozidla. Tie musia byť v každom mieste zaslepené tak, aby došlo ku kompletnému a „vodotesnému“ uzavretiu skúmanej geometrie. V oblastiach, ktoré sú predmetom skúmania – funkčné otvory karosérie pre chladenie, aerodynamické prieduchy alebo oblasti motorového priestoru sú umiestnené špecifické uzatváracie objemy a plochy, pomocou ktorých sú tieto oblasti analyzované. Úplnou prípravou geometrie sa rozumie vytvorenie celistvého povrchového modelu automobilu vrátane vnútorných funkčných otvorov, pričom výstupom je geometria pre vytvorenie siete nástrojom CFD. [4][9]

3. VYTVORENIE POVRCHOVEJ A OBJEMOVEJ SIETE

Softvérové nástroje, v schéme vyobrazený STAR CCM+, automaticky definujú na základe vstupnej geometrie povrchovú a objemovú sieť. Cieľom je využiť čo najmenší počet buniek siete pre čo najpresnejší popis skúmaných oblastí. Potrebné je využiť čo najpresnejší popis blízko hraníc skúmanej geometrie pre presný popis prúdenia. Znižujú sa tak nároky na výpočet bez ovplyvnenia presnosti simulácie. Zjemnenie povrchovej siete automobilu je možné použiť okolo citlivých oblastí. V prípade potreby sa softvérovo vykonáva aj automatická oprava povrchu, ktorá opraví vygenerovanú povrchovú sieť buď ignorovaním alebo úpravou hrán jednotlivých prvkov. [7][8]

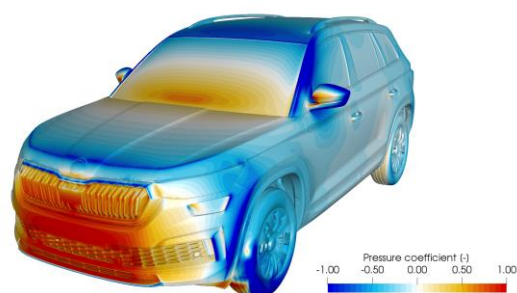
4. VÝSTUPY CFD ANALÝZY

Medzi výstupy CFD analýzy patria vizualizácie prúdenia vzduchu vykreslené na základe vypočítaných tlakových koeficientov. Ich rozložením do osí X, Y a Z sú vizualizované - aerodynamický odpor pôsobiaci proti pohybu vozidla v smere osi X (obr. 6), zdvihová sila pôsobiaca v smere osi Z (obr. 7), v prípade

skúmania bočného vetra aj bočná sila v smere osi Y. V jednotlivých obrázkoch sú modrou farbou znázornené záporné hodnoty, naopak červeno kladné hodnoty pôsobenia síl.

Z celkového tlaku sú pomocou ISO plôch vizualizované vírenia v okolí karosérie vozidla (obr. 8). Metódou vizualizácie vírov pomocou Q kritéria [10] sú vyobrazené rýchlosti jednotlivých zložiek vírov (obr. 9). Na základe pohybových rovníc sú generované smer a rýchlosť jednotlivých prúdnic okolo automobilu (obr. 10).

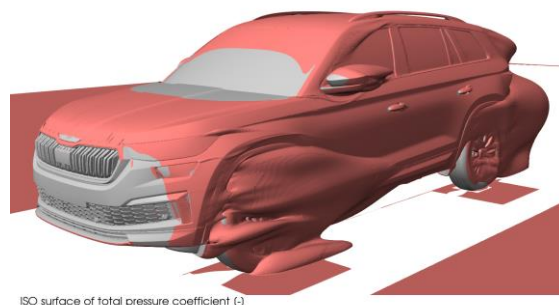
Z každej vypočítanej veličiny z obrázkov 5 až 9 sú k dispozícii všetky preddefinované pohľady. Podrobná analýza prúdenia vo vnútorných štruktúrach sa vykonáva prostredníctvom vizualizácie prúdenia v jednotlivých rezoch (obr. 11).



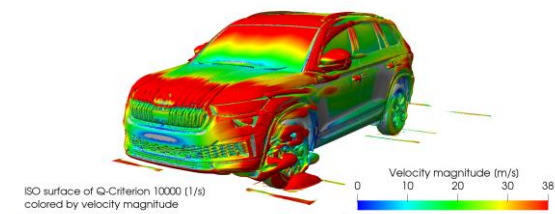
Obr. 6 Rozloženie odporu vzduchu – tlaku v pozdĺžnom smere po skúmanej karosérii vozidla [9]



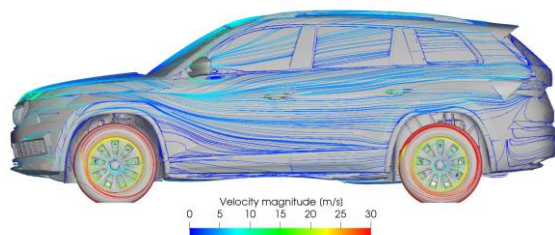
Obr. 7 Rozloženie zdvihovej sily – tlaku vo zvislom smere po skúmanej karosérii vozidla [9]



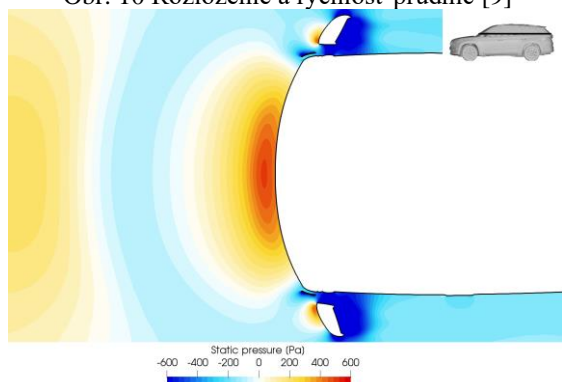
Obr. 8 Vizualizácia ISO plôch z celkového tlakového koeficientu [9]



Obr. 9 Vizualizácia vírov metódou Q-kritéria a rýchlosti zložiek vírov[9]



Obr. 10 Rozloženie a rýchlosť prúdnic [9]



Obr. 11 Statický tlak v reze roviny Z = 1100 mm [9]

Ďalšie možnosti postprocess analýzy predstavujú softvérové vizualizačné nástroje. V závislosti od využitého CFD nástroja sú buď integrované v softvéri, ktorý CFD vykonal alebo môžu byť využité podľa konkrétneho cieľa štúdia vybraného javu špeciálne softvéry PowerFLOW, PowerVIZ, EnSight, FieldView alebo ParaView. [1]

ZÁVER

CFD, teda výpočtová dynamika tekutín čoraz viac prevláda vo vývoji aerodynamiky automobilov. Môžu za to jej silné stránky, medzi ktoré patria:

- Rýchlosť vykonania simulácie a získania presnej predstavy o prúdení a jeho charakteristike,
- nenáročnosť pri tvarových zmenách jednotlivých častí automobilu – jednoduchá zmena geometrie a opätovné spustenie simulácie,
- predstava o prúdení v ukrytých oblastiach motorového priestoru, v oblasti kolies

a podvozku, rovnako vizualizácia prúdenia v rezoch automobilu,

- možnosť modelovania prostredia, v ktorom je simulácia vykonávaná a rýchla zmena okrajových podmienok,
- výhoda použitia pri experimentálnych návrhoch bez potreby fyzického prototypu,
- možnosť detailnej a úplnej optimalizácie skúmaných geometrií.

Mimo týchto výhod sú známe aj nevýhody CFD simulácií, ktoré nemožno opomíňať:

- Presnosť vizualizovaného prúdenia je závislá od zvoleného matematického modelu popisu turbulencií,
- neexistuje adekvátna diskretizácia skúmaného prostredia, ani adekvátna sieť pre presné zobrazenie prúdenia v hraničných vrstvách – prechod medzi laminárnym a turbulentným prúdením okolo karosérie,
- problémy pri popise separácií prúdenia v nepriaznivých tlakových gradientoch,
- nepresnosť pri mechanickej deformácii skúmanej geometrie – napríklad pneumatík.

Aj z týchto dôvodov sú pre vývoj aerodynamiky automobilov využívané aerodynamické tunely pre úplný popis prúdenia okolo karosérie vozidla. Ďalším výskumom v oblasti CFD, aplikáciou vylepšených matematických modelov do softvérov a zohľadňovaním mechanickej deformácie komponentov je možné presnosť CFD simulácie zvýšiť. Zároveň sa tak zvyšujú nároky na výpočtové zariadenia

PodĎakovanie

Tento príspevok bol vypracovaný s podporou projektu KEGA 006TUKE-4/2020.

Literatúra

- [1] Schuetz, T.: Aerodynamics of Road Vehicles, Fifth Edition, Warrendale, Pennsylvania, USA, 2016 SAE International, eISBN 978-0-7680-8253-1.
- [2] Sharma, A.: Introduction to Computational Fluid Dynamics, Mumbai, Maharashtra, India, 2022, ISBN 978-3-030-72883-0.
- [3] Hoffmann, K. A., & Chiang, S. T.: Computational fluid dynamics, Vol. 1-3, Kansas: Engineering Education System, 2000, 67208-1078.
- [4] Galyard, A. P.: The Appropriate Use of CFD in the Automotive Design Process, Jaguar Land Rover, 2009 SAE International, 2009-01-1162.

-
- [5] Joshi J.B. et al.: CFD simulation of stirred tank: Comparison of turbulent models. Part II: Axial flow impellers, multiple impellers and multiphase dispersion” 89, 2011, 754-816.
- [6] FCA, What’s Behind: V zákulisí vývoja a výskumu. [online]. Tlačová správa. [cit. 2022-11-01]. Dostupné na internete: <<https://www.media.stellantis.com/sk-sk/fca-archive/press/fca-what-s-behind-v-zakulisi-vyvoja-a-vyskumu>>
- [7] Frank, M.: Fluid Mechanics, Seventh edition, University of Rhode Island, 2011, ISBN 978-0-07-352934-9.
- [8] Fischer, S.: Vehicle aerodynamics CFD simulation in Simcenter STAR-CCM+, [online]. 2021, [cit. 2022-10-25]. Dostupné na internete: <<https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/vehicle-aerodynamics-cfd-simulation-in-simcenter-star-ccm/>>
- [9] Interné materiály ŠKODA AUTO, a.s.
- [10] Baker, M.: Q-criterion for Vortex Visualization [online]. 2021, [cit. 2022-11-03]. Dostupné na internete: <<https://www.m4-engineering.com/q-criterion-for-vortex-visualization>>