

Utjecaj aerodinamičkog paketa na otpor zraka tegljača s poluprikolicom

Goleš, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:998260>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Goleš

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić

Student:

Domagoj Goleš

Zagreb, 2025.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prijateljima i kolegama koji su mi bili potpora tijekom cijelog perioda pisanja ovoga rada. Zahvaljujem se svima koji su me podupirali i bodrili kada je to bilo najpotrebnije. Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Momiru Sjeriću, mag.ing. na pruženoj pomoći oko izrade rada.

Naposljetku zahvaljujem se svojoj cijeloj obitelji što su mi omogućili bezbrižno školovanje i osigurali sve potrebno kako bih se nesmetano bavio svojim zadacima, a pogotovo roditeljima bez kojih ništa do sada ne bi bilo moguće. Hvala vam!

Domagoj Goleš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Goleš** JMBAG: 0035222667

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj aerodinamičkog paketa na otpor zraka tegljača s poluprikolicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of aerodynamic package on the air drag of tractor with semi-trailer**

Opis zadatka:

Iako otpor zraka nije dominantan u ukupnim otporima vožnje, pojedini aerodinamički dodaci na tegljaču s poluprikolicom mogu utjecati na smanjenje otpora zraka. Budući da gospodarska vozila prevaljuju veliki broj kilometara u usporedbi s osobnim vozilima, malo smanjenje otpora vožnje može imati veliki utjecaj na smanjenje utrošenog goriva u životnom vijeku tegljača. U okviru rada analizirat će se pojednostavljene 2D konture i 3D oblici tegljača s poluprikolicom te utjecaj aerodinamičkog paketa na ukupan otpor zraka.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- Definirati pojednostavljenu konturu koja predstavlja poprečni presjek tegljača s poluprikolicom po središnjoj uzdužnoj osi vozila.
- Primjenom programskog paketa Ansys Student™ izračunati faktor otpora zraka za polaznu 2D geometriju vozila te ispitati konvergenciju mreže konačnih volumena.
- Provesti nekoliko varijacija geometrije krovnog spojlera za 2D slučaj te izračunate rezultate faktora otpora zraka usporediti s dostupnim podacima iz literature.
- Proširiti analizu strujanja i izračun faktora otpora zraka za 3D slučaj vozila uzimajući u obzir različite segmente aerodinamičkog paketa koji se mogu ugraditi na vozilo (krovni i bočni spojler kabine, bočna zaštita kotača poluprikolice, stražnji spojler poluprikolice, itd.).
- Odrediti najpovoljniju varijantu aerodinamičkog paketa kojom se ostvaruje najmanji otpor zraka.
- Kvantificirati utjecaj pojedinog segmenta aerodinamičkog paketa na ukupan otpor zraka.
- Analizirati rezultate i izvesti zaključke.

Broj geometrijskih varijanti za 2D i 3D modele će biti dogovoreni s mentorom tijekom izrade rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predvideni datumi obrane:
28. studeni 2024. 30. siječnja 2025. 6., 7. i 10. veljače 2025.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Momir Sjerić Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	OTPORI VOŽNJE	3
2.1	Otpor zraka.....	4
2.1.1	Brzina vožnje	7
2.1.2	Faktor otpora zraka C_d	8
2.1.2.1	Viskozno strujanje	11
2.1.2.2	Određivanje faktora otpora zraka C_d vozila	15
2.1.2.2.1	Računalna dinamika fluida (Computational Fluid Dynamics - CFD) ..	15
2.1.2.2.2	Eksperimentalno određivanje faktora otpora	16
3.	TERETNA VOZILA	19
3.1	Aerodinamika tegljača s poluprikolicom	20
3.2	Elementi nadogradnje tegljača	23
3.1	Elementi nadogradnje poluprikolice	25
4.	IZRADA MODELA	27
4.1	Krovni spojler tegljača (A)	29
4.2	Bočne oplata kabine (B).....	31
4.3	Lokalizatori vrtloženja (C).....	33
4.5	Stražnja krilca poluprikolice (E)	36
5.	SIMULACIJE	37
5.1	Ograničenja studentske dozvole	38
5.2	Kreiranje mreže (okoliša)	38
5.2.1	Vrijednosti parametara mreže za 2D simulaciju	43
5.2.2	Vrijednosti parametara mreže za 3D simulaciju	45
5.3	Određivanje parametara simulacije.....	47
6.	REZULTATI SIMULACIJA STRUJANJA ZRAKA	50
6.1	Rezultati 2D analize strujanja	51
6.1.1	2D analiza polazne geometrije bez nadogradnih elemenata	53
6.1.2	2D analiza utjecaja nadogradnje krovnog spojlera tegljača (2D-A).....	54
6.1.3	Koeficijent tlaka C_p po konturi vozila za 2D slučaj.....	60
6.2	Rezultati 3D analize strujanja	62
6.2.1	3D analiza polazne geometrije bez nadogradnih elemenata	64
6.2.2	3D analiza utjecaja nadogradnje krovnog spojlera tegljača (A)	70
6.2.3	3D analiza utjecaja nadogradnji bočnih oplata kabine (B)	75
6.2.4	3D analiza utjecaja nadogradnji lokalizatora vrtloženja (C).....	80
6.2.5	3D analiza utjecaja nadogradnji prekriva kotača – zavjesa (D).....	85
6.2.6	3D analiza stražnjih krilca poluprikolice (E)	87

6.2.7	3D analiza utjecaja pojedine vrste nadogradnog elementa u skupnom modelu, slučaja s utjecajem ceste, slučajeva s bočnim retrovizorima/kamerama i slučaja sa zaobljenim napadnim kutovima	98
6.3	Utjecaj smanjenja faktora otpora zraka C_d na silu otpora vožnje	102
7.	ZAKLJUČAK	103
8.	LITERATURA	105

POPIS SLIKA

Slika 1. Aerodinamično i tupo tijelo u pogledu dinamike fluida	1
Slika 2. Udjeli otpora uzrokovani dinamičkim tlakom (D_p) i trenjem (D_f) u iznosu ukupnog otpora za različite oblike [2]	1
Slika 3. Smanjenje faktora otpora zraka C_d kroz povijest [1]	2
Slika 4. Postotak ukupne energije goriva koji se troši na savladavanje različitih otpora [ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift-2013-08]	4
Slika 5. Utjecaj dimenzija pneumatika i brzine vožnje na iznos sile otpora uslijed vrtloženja zraka [3]	5
Slika 6. Strujanje oko i preko elemenata vozila i njihov utjecaj [1]	6
Slika 7. Promjena iznosa sile otpora zraka [N] u ovisnosti o brzini vožnje [m/s] [3]	8
Slika 8. Promjena potrebne snage [kW] za savladavanje otpora zraka u ovisnosti o brzini vožnje [m/s] [3]	8
Slika 9. Faktor otpora zraka za različita tijela [2]	9
Slika 10. Strujanje oko cilindra [2]	10
Slika 11. Koeficijent tlaka oko cilindra: A- $Re = 1,1 \cdot 10^5$; B- $Re = 6,7 \cdot 10^5$; C- $Re = 8,4 \cdot 10^6$ [2]	11
Slika 12. Tri različita tipa strujanja [4]	12
Slika 13. Strujnice fluida u smjeru tijela sa označenom točkom stagnacije [4]	12
Slika 14. Strujanje oko cilindra (A) $5 < Re < 40$; (B) $40 < Re < 200$; (C) $300 < Re < 3.0 \cdot 10^5$; (D) $Re_c < Re$ [2]	14
Slika 15. Odvajanje strujnica i nastajanje vrtloga (metoda vodikovog mjehurića) u vodi, ulazna brzina = 24 mm/s, $Re = 195$ [2]	14
Slika 16. Strujanje oko vozila prikazano a) u zračnom tunelu; b) računalnom simulacijom [3]	18
Slika 17. Lokacije objekata koji vrše ispitivanja u zračnim tunelima u Europi [https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1hZ12gjW7BdPJJvZWMxNiYgIW1TZDuZvM&femb=1&ll=52.57970360000167%2C26.48887666665573&z=4]	18
Slika 18. Razlika dopuštenih duljina tegljača sa poluprikolicom u Europi i SAD-u	20
Slika 19. Vrijednosti faktora otpora C_d po kategorijama vozila	20
Slika 20. Mjesta lokalnih utjecaja na ukupni faktor otpora zraka C_d [7]	21
Slika 21. Strujnice zraka u blizini tegljača sa poluprikolicom (plave linije) te mjesta nastajanja zračnih vrtloga (crveno) [7]	21
Slika 22. Utjecaj napadnog kuta naleta vjetra na iznos C_d [3]	22
Slika 23. Elementi tegljača koji utječu na aerodinamički otpor vozila [7]	23

Slika 24. Područja poluprikolice za nadogradnju elemenata za poboljšanje aerodinamičkih značajki [7].....	25
Slika 25. Aerodinamični elementi nadogradnje na poluprikolicu [7].....	26
Slika 26. Model polazne geometrije tegljača s poluprikolicom.....	28
Slika 27. Gabaritne dimenzije polazne geometrije tegljača s poluprikolicom.....	28
Slika 28. Skica profila modela prema slici sa pripadajućim grafom kumulativnog iznosa C_d	29
Slika 29. 2D model za analizu strujanja.....	29
Slika 30. Modeli tegljača sa krovim spojlerom - a) A1; b) A2; c) A3.....	30
Slika 31. Modeli tegljača sa krovim spojlerom A3: a) A3-3000; b) A3-6000	31
Slika 32. Modeli tegljača sa bočnim oplatom kabine B0: a) B400-0; b) B450-0; c) B500-0	32
Slika 33. Modeli tegljača sa bočnim oplatom kabine duljine 500 mm i različitim kutovima otklona: a) B500-0; b) B500-10; c) B500-20.....	33
Slika 34. Modeli sa implementiranim pločama lokalizatora vrtloženja jednake visine ali različitog broja ploča: a) C3-150; b) C5-150; c) C7-150; d) C10-150	34
Slika 35. Modeli sa implementiranim pločama lokalizatora vrtloženja različitih visina ploča: a) C5-50; b) C5-150; c) C5-250	35
Slika 36. Modeli sa prekrivima kotača, odnosno zavjesama: a) D400; b) D600; c) D800; d) D1100.....	36
Slika 37. Modeli sa prekrivima stražnjim krilcima poluprikolice: a) E5; b) E45.....	37
Slika 38. Geometrija okoliša za 2D analizu.....	40
Slika 39. Geometrija okoliša za 3D analizu.....	40
Slika 40. Viskozni sloj podijeljen na veći broj manjih elemenata sa gradijentnim povećanjem visine svakog idućeg sloja kako bi se obuhvatio utjecaj viskoznog sloja uz stijenku [12]	42
Slika 41. Generirana mreža za 2D slučaj - promjena veličine elemenata od vozila prema rubu okoliša; elementi uz vozilo; inflacijski sloj sa podslojevima.....	44
Slika 42. Generirana mreža za 3D slučaj - promjena veličine elemenata od vozila prema rubu okoliša; elementi uz vozilo; inflacijski sloj sa podslojevima.....	46
Slika 43. Primjer stvaranja poremećenog toka iza tijela ima veliku važnost pri analizi i modeliranju turbulentnog strujanja	49
Slika 44. Graf promjene vrijednosti faktora otpora zraka C_d za polaznu geometriju u odnosu na povećanje/smanjenje veličine elemenata uz vozilo (povećanje/smanjenje broja elemenata u mreži), 2D slučaj.....	52
Slika 45. Gore prema dolje: Apsolutni tlak okoliša oko vozila, polja brzine u smjeru strujanja osi x i strujnice oko vozila polazne geometrije za 2D slučaj.....	54
Slika 46. Promjena polja lokalnog tlaka u ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 2D slučaj; od gore prema dolje: 2D-polazna geometrija, 2D-A1, 2D-A3, 2D-A3-3000, 2D-A3- 6000.....	56

Slika 47. Promjena polja lokalne brzine u smjeru osi x ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 2D slučaj; od gore prema dolje: 2D-polazna geometrija, 2D-A1, 2D-A3, 2D-A3-3000, 2D-A3-6000	58
Slika 48. Promjena vektora brzine ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 2D slučaj; od gore prema dolje: 2D-polazna geometrija, 2D-A1, 2D-A3, 2D-A3-3000, 2D-A3-6000	60
Slika 49. Raspodjela koeficijenta tlaka po konturi vozila polazne geometrije za 2D slučaj ...	61
Slika 50. Raspodjela koeficijenta tlaka po konturi vozila modela 2D-A3-3000	61
Slika 51. Graf promjene vrijednosti faktora otpora zraka C_d za polaznu geometriju u odnosu na povećanje/smanjenje veličine elemenata uz vozilo (povećanje/smanjenje broja elemenata u mreži), 3D slučaj	63
Slika 52. Položaj rezultata 3D analize (crveni kvadrat) na grafu rezultata 2D analize.....	64
Slika 53. Manometarski tlak po površini vozila za slučaj polazne geometrije vozila za 3D slučaj	66
Slika 54. Manometarski tlak okoliša oko polazne geometrije vozila za 3D slučaj.....	67
Slika 55. Strujnice oko polazne geometrije vozila za 3D slučaj.....	68
Slika 56. Polja brzine fluida u smjeru z osi oko polazne geometrije za 3D slučaj	69
Slika 57. Vektori apsolutne brzine fluida oko polazne geometrije za 3D slučaj	70
Slika 58. Promjena polja lokalne brzine u smjeru z osi ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, A1, A3, A3-3000, A3-6000	72
Slika 59. Promjena polja lokalnog tlaka i strujnice ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, A1, A3, A3-3000, A3-6000.....	74
Slika 60. Promjena polja lokalne brzine ovisno o tipu geometrije i kutu zaklona bočnih oplata kabine za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, B400-0, B500-0, B500-4, B500-7, B500-11.....	77
Slika 61. Promjena polja lokalnog manometarskog tlaka ovisno o tipu geometrije i kutu zaklona bočnih oplata kabine za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, B400-0, B500-0, B500-4, B500-7, B500-11.....	80
Slika 62. Promjena polja lokalnog manometarskog tlaka ovisno o veličini i broju ploča lokalizatora vrtloženja za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, C3-150, C5-50, C5-150, C5-250, C10-150.....	82
Slika 63. Promjena vektora brzina i strujnica ovisno o veličini i broju ploča lokalizatora vrtloženja za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, C3-150, C5-50, C5-150, C5-250, C10-150.....	85
Slika 64. Promjena strujnica dodavanjem prekriva kotača za 3D slučaj; gornja slika: polazna geometrija; donja slika sa prekrivom kotača D.....	86
Slika 65. Promjena vektora brzina dodavanjem prekriva kotača za 3D slučaj; gornja slika: polazna geometrija; donja slika sa prekrivom kotača D	87

Slika 66. Promjena strujnica ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj yz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E25, E35	89
Slika 67. Promjena strujnica ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj xz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E25, E35	91
Slika 68. Promjena polja lokalne brzine ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj yz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E35 ...	93
Slika 69. Promjena polja lokalne brzine ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj xz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E35 ...	94
Slika 70. Promjena polja lokalnog manometarskog tlaka ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj yz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E35.....	96
Slika 71. Promjena polja lokalnog manometarskog tlaka ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj xz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E35.....	97
Slika 72. Model polazne geometrije sa zaobljenim napadnim kutovima	99
Slika 73. Model polazne geometrije tegljača bočnim zrcalima	100
Slika 74. Model polazne geometrije tegljača s bočnim kamerama.....	100
Slika 75. Geometrija okoliša za 3D analizu sa utjecajem vožnje po cesti.....	101

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ovisnost iznosa faktora otpora C_d za polaznu geometriju o broju elemenata 2D mreže	51
Tablica 2. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike krovnog spojlera tegljača u slučaju 2D strujanja.....	54
Tablica 3. Ovisnost iznosa faktora otpora C_d za polaznu geometriju o broju elemenata 3D mreže	62
Tablica 4. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike krovnog spojlera tegljača u slučaju 3D strujanja.....	70
Tablica 5. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike bočnih oplata kabine u slučaju 3D strujanja.....	75
Tablica 6. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike lokalizatora vrtloženja u slučaju 3D strujanja.....	80
Tablica 7. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane modele promjenjive duljine prekriva kotača u slučaju 3D strujanja.....	85
Tablica 8. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike promjene kuta nagiba stražnjih krilca kabine u slučaju 3D strujanja.....	87
Tablica 9. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike postupne implementacije pojedinih vrsti nadogradnji u slučaju 3D strujanja	98

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
C_d	/	faktor otpora zraka
U	m/s	ulazna brzina
D_p	N	sila otpora uzrokovana dinamičkim tlakom
D_f	N	sila otpora uzrokovana trenjem
F_z	N	sila otpora zraka
p_d	Pa	dinamički tlak
A	m ²	čeoona površina
ρ_z	kg/m ³	gustoća zraka
v_z	m/s	brzina strujanja
B	m	najveća širina vozila
H	m	visina vozila
ν	m ² /s	kinematička viskoznost
η	Pas	dinamička viskoznost
Re	/	Reynoldsov broj
Ma	/	Machov broj
C_p	/	koeficijent tlaka
Re_c	/	kritični Reynoldsov broj
y^+	/	faktor udaljenosti ćelije mreže
f_k	/	faktor otpora kotrljanja
G_v	N	težina vozila

SAŽETAK

Otpori gibanja teretnih vozila jedna su od glavnih stavki promatranja energetske učinkovitosti cestovnog prometa. Dio tih otpora vezan je za strujanje zraka oko i kroz vozilo pod skupnim nazivom otpori zraka. Smanjenjem otpora uzrokovanih gibanjem kroz zrak poboljšava se energetska učinkovitost goriva/vozila uz smanjenje negativnog utjecaja na okoliš. Računalna mehanika fluida (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) pruža mogućnost ekonomičnije analize strujanja i stanja fluida oko vozila/u vozilu te optimizaciju aerodinamičkih komponenti koje utječu na strujanje.

Istraživanje je započeto provođenjem 2D analize strujanja oko vozila kao početnog koraka u razumijevanju aerodinamičkih pojava, nakon čega je provedena detaljnija 3D analiza s ciljem sveobuhvatnijeg uvida u složene strujne karakteristike u okolini vozila. U radu je uz objašnjenje različitih varijabli koje utječu na otpore strujanja detaljnije promotren faktor otpora zraka C_d . Provedena je analiza različitih nadogradnih elemenata na europski tegljač s poluprikolicom s ciljem smanjenja faktora otpora. CFD analize provedene su radi provjere utjecaja parametara varijacija pojedine vrste nadogradnog elementa kao i njegov generalni učinak u realnim uvjetima. Analiza je provedena s elementima (krovni spojler kabine, bočne oplata kabine, stražnja krilca poluprikolice itd.) koji su postavljeni na nekoliko kritičnih regija tegljača i poluprikolice.

Rezultatima je pokazano kako se ispravnim oblikovanjem pojedinih konstrukcijskih dijelova može uvelike utjecati na smanjenje faktora C_d , a posljedično tome i smanjenju potrošnje goriva. Analiza rezultata daje odličan uvid na događanja oko vozila i ponašanja zraka kroz koje se vozilo giba.

Ključne riječi: aerodinamika, tegljač s poluprikolicom, faktor otpora zraka, računalna mehanika fluida (CFD), nadogradni aero elementi

SUMMARY

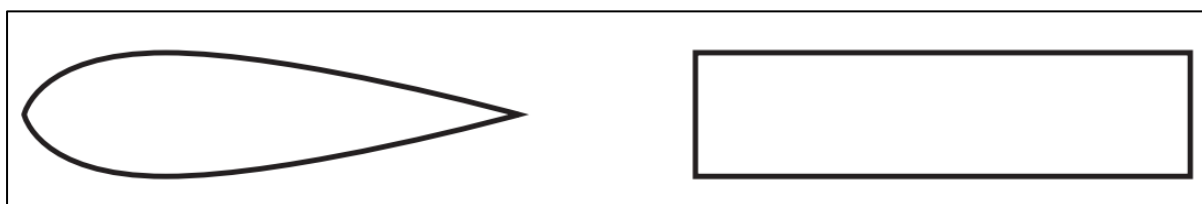
Resistance to motion of heavy-duty vehicles is one of the key aspects in assessing the energy efficiency of road transport. A portion of this resistance is related to the airflow around and through the vehicle, collectively referred to as aerodynamic drag. By reducing the drag caused by movement through the air, fuel and overall vehicle energy efficiency can be improved, while simultaneously reducing the negative environmental impact. Computational Fluid Dynamics (CFD) provides a cost-effective means of analyzing fluid flow and conditions around and within the vehicle, enabling the optimization of aerodynamic components that influence airflow.

The research began with a 2D flow analysis around the vehicle as an initial step in understanding aerodynamic phenomena, followed by a more detailed 3D analysis to achieve a comprehensive understanding of the complex flow characteristics in the vehicle's surroundings. In addition to explaining various variables affecting aerodynamic resistance, the study provides a detailed examination of the drag coefficient (C_d). An analysis of different aerodynamic add-on components for a European semi – trailer truck was conducted with the goal of reducing drag. CFD simulations were carried out to evaluate the influence of parameter variations of individual aerodynamic components, as well as their overall effect under real-world conditions. The analysis was performed on components such as the cabin roof deflector, cabin side fairings, and rear trailer flaps, which were positioned in several critical regions of the tractor-trailer unit. The results demonstrated that proper design of specific structural elements can significantly reduce the C_d factor and, consequently, lower fuel consumption. The analysis results provide valuable insight into the aerodynamic behavior around the vehicle and the airflow through which the vehicle moves.





Keywords: aerodynamics, european semi-trailer truck, drag coefficient, computational fluid dynamics (CFD), erodynamic add-on devices

1. UVOD

U pogledu mehanike fluida cestovna vozila su tupa tijela (bluff bodies) s kompleksnom detaljnom geometrijom koja se nalaze na maloj udaljenosti od tla. Protok fluida preko vozila u potpunosti je trodimenzionalan, granični slojevi su turbulentni, a odvajanje strujanja je uobičajeno te može biti popraćeno ponovnim prijanjanjem. Na stražnjoj strani vozila stvaraju se velike turbulentne praznine koje su u većini slučajeva popraćene uzdužnim pratećim vrtlozima. Tipično za tupa tijela, otpor koji je ključan za većinu cestovnih vozila je otpor uzrokovan dinamičkim tlakom zraka prilikom gibanja vozila kroz medij. Ono je suprotno otporima kojima se suprotstavljaju zrakoplovi i brodovi, a koji se temelje na otporima trenja fluida tijekom gibanja kroz njega. Izbjegavanje odvajanja toka zraka, ili ako to nije moguće, kontroliranje odvajanja, među glavnim su ciljevima kojima se bavi aerodinamika cestovnih vozila. [1]



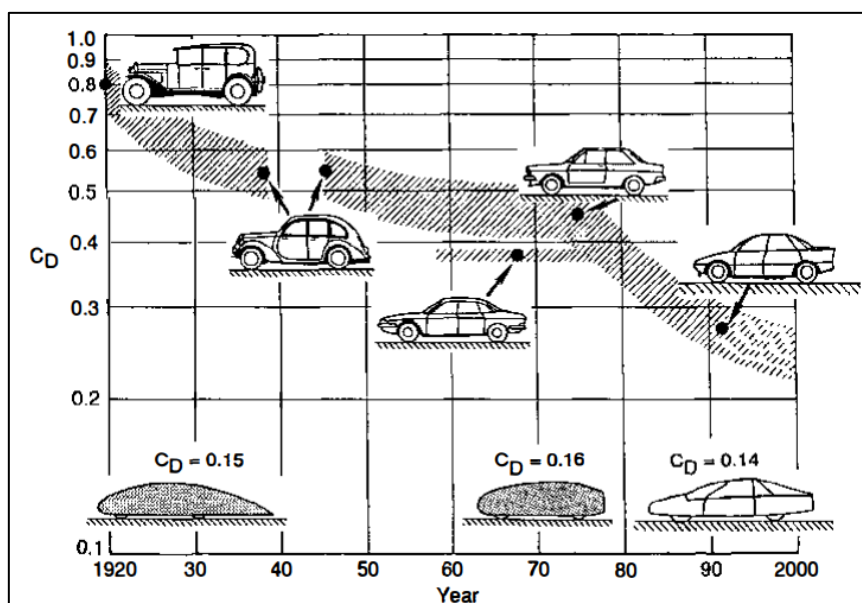
Slika 1. Aerodinamično i tupu tijelo u pogledu dinamike fluida

Shape	Pressure Drag	Friction Drag
	D_p (%)	D_f (%)
	0	100
	≈ 10	≈ 90
	≈ 90	≈ 10
	100	0

Slika 2. Udjeli otpora uzrokovani dinamičkim tlakom (D_p) i trenjem (D_f) u iznosu ukupnog otpora za različite oblike [2]

U počecima razvoja autoindustrije aerodinamika nije imala utjecaja na konstrukciju vozila (premda su ideje aerodinamike vozila i njezinog poboljšanja već postojale) zbog malih brzina koje su vozila postizala. Daljnjim razvitkom i poboljšanjima na području pogonskih dijelova vozila, brzine vožnje su se drastično povećavale, a samim time i utjecaj otpora zraka. Takvim razvojem (također i naftnim krizama koje su se dešavale) počelo se sve više pridavati pažnje

aerodinamičkim značajkama sa ciljem smanjenja otpora zraka, odnosno smanjenjem potrošnje goriva. Na slici 3 prikazan je povijesni razvoj komercijalnih vozila, odnosno njihove konstrukcije, s ciljem smanjenja faktora otpora zraka C_d . Slika također prikazuje neke prototipne modele koji su postojali kao ideja već ranih godina razvoja. Vrijednost C_d prikazana je u logaritamskom mjerilu kako bi se istaknula težina postizanja niskih vrijednosti faktora otpora.



Slika 3. Smanjenje faktora otpora zraka C_d kroz povijest [1]

Oblik cestovnog vozila prvenstveno je određen funkcionalnim, ekonomskim i estetskim razlozima. Aerodinamičke karakteristike su često generirane kao posljedica oblika vozila, a ne kao potreba. Npr., postoje dobri razlozi zbog kojih duljina vozila ostaje zadana. Duljina osobnog automobila mjeri se njegove veličine, a time i klase. Postavljanje automobila u određenu tržišnu kategoriju zahtijeva prepoznavanje duljine kao nepromjenjive veličine. Nadalje, masa i troškovi izrade proporcionalni su duljini. Sve ostale glavne dimenzije vozila poput širine i visine (koje definiraju prednju površinu) određuju se vrlo rano u procesu dizajna, a ponekad su već unaprijed zadane.

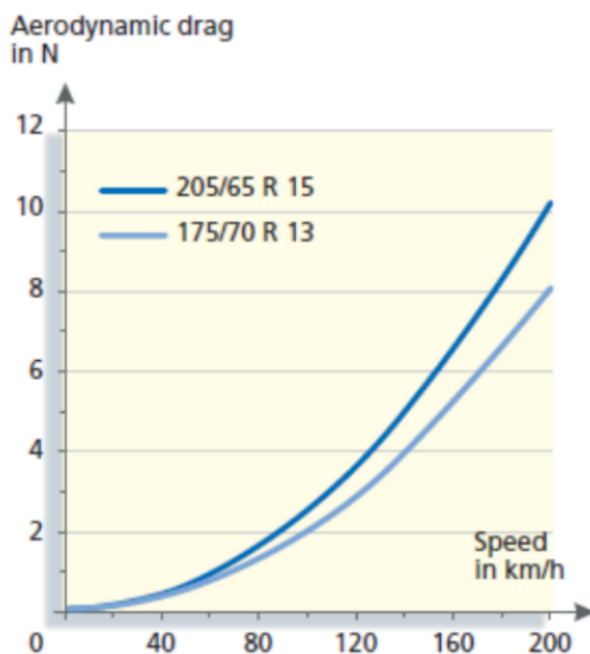
U ovisnosti o svrsi različitih tipova vozila aerodinamički ciljevi se razlikuju. Iako je nizak aerodinamički otpor poželjan za sva cestovna vozila (manji gubitci), druge aerodinamičke značajke također su važne. Negativan uzgon („downforce“) ključan je za upravljivost trkaćih automobila tijekom vožnje kroz zavoje pri velikim brzinama, ali ne igra ulogu teretnim vozilima. Također, teretna vozila nisu uvelike osjetljiva na bočne nalete vjetera kao što su terenska vozila i kombiji, odnosno manja teretna vozila. Moderni automobili sve češće

integriraju aerodinamičke značajke, kako zbog njihove funkcionalnosti, tako i zbog estetskog „aero“ izgleda. U bližoj povijesti veliki je utjecaj imalo povećanje svjesnosti oko zagađivanja okoliša pa se korisnici sve više koncentriraju na „zelene“ specifikacije vozila, odnosno one koje pridonose smanjenju zagađenja. Proces procjene važnosti različitih potreba iz više područja pri konstruiranju vozila usporediv je s drugim granama mehanike fluida, dok je u aerodinamici vozila specifičan jer uključuje dodatne kategorije argumenata kao što su umjetnost, moda i ukus. Za razliku od tehničkih i ekonomskih čimbenika, ovi argumenti su subjektivne prirode i ne mogu se kvantificirati. Budući da je moda promjenjiva, aerodinamička rješenja vozila kontinuirano se usavršavaju, ne težeći jednim konačnom obliku, već se prilagođavaju novim zahtjevima i standardima postavljajući vlastite kriterije i smjernice oblikovanja.

2. OTPORI VOŽNJE

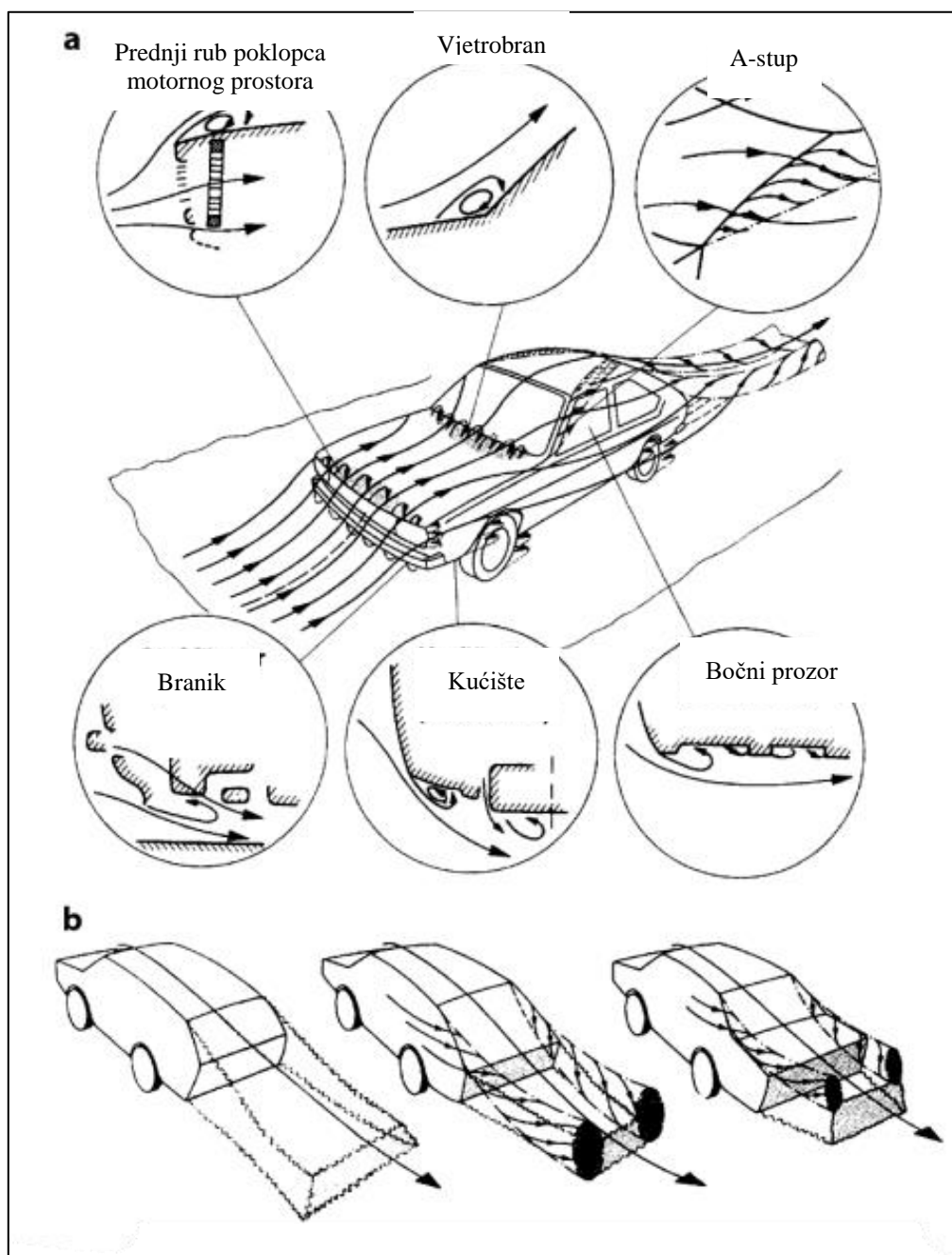
Prema [3] kretanju vozila suprotstavljaju se određeni otpori koje pogonski uređaj vozila mora savladati. Istovremeno, performanse vozila ograničene su karakteristikama prijanjanja kotača (gume) i podloge. Pogon vozila mora osigurati vučne sile koje moraju biti jednake (ili veće) svim otporima vožnje koji djeluju na vozilo, kao i ostvarivanje ciljane brzine vožnje. S druge strane, pogonske sile moraju biti manje od (ili jednake) najvećih sila prijanjanja. Na performanse vozila ne utječe samo najveći moment, odnosno najveća snaga pogonskog motora, već i ponašanje u uvjetima djelomičnog opterećenja i pri različitim režimima rada. Otpore vožnje možemo podijeliti u dvije glavne skupine: a) Osnovni otpori vožnje – prilikom vožnje konstantnom brzinom po ravnoj, horizontalnoj podlozi (cesti), bez protuvjetra; b) Ostali otpori vožnje -otpori vožnje prilikom vožnje na usponu, prilikom ubrzanja, vožnje protiv vjetra, vožnje u zavoju, po mokroj podlozi, itd. U osnovne otpore vožnje spadaju otpor kotrljanja i otpor zraka, a u ostale otpor uspona, otpor ubrzanja, tj. inercije, pumpanje vode iz utora guma, itd. Na idućoj slici prikazan je (u postotcima) gubitak energije tijekom procesa prijenosa snage od pogonskog uređaja do pogonskih kotača te snaga izgubljena na otpore vožnje (crveno uokvireno). Za primjer je analizirana Mercedes-Benz C klasa sa 4 cilindarskim Ottovim motorom radnog volumena 1,8 litara.

vozila, utjecaj ima i vrtloženje zraka uzrokovano okretanjem kotača (prilikom kotrljanja utori na gaznoj površini gume, protektori, utječu na vrtloženje struje zraka koja okružuje gumu). Povećanjem dimenzija gume i brzine vožnje povećava se i utjecaj vrtloženja (slika 5). Sve zajedno daje otpor zraka.



Slika 5. Utjecaj dimenzija pneumatika i brzine vožnje na iznos sile otpora uslijed vrtloženja zraka [3]

Slika 6 skicom prikazuje kritična mjesta vozila gdje dolazi do odvajanja protoka, stvaranja vrtloga ili razdvajanja strujanja, odnosno zone pretlaka i podtlaka. Pod dijelom a) prikazani su prednji i bočni elementi vozila na kojima dolazi do spomenutih pojava, a pod b) utjecaj različitih oblika stražnje strane vozila na stvaranje vrtloga.



Slika 6. Strujanje oko i preko elemenata vozila i njihov utjecaj [1]

Aerodinamičke karakteristike značajno utječu na performanse, upravljivost i stabilnost vozila. Osim što doprinose ekonomičnosti potrošnje goriva, a time i smanjenju emisija štetnih plinova, one također utječu na razinu buke generirane tijekom kretanja kroz zrak. Izuzev hlađenja motora i ostalih komponenti pogonskog sustava te sustava kočenja, grijanje i ventiliranje putničkog prostora također ima veliku važnost prilikom određivanja aerodinamičkih značajki i njihovih posljedica.

Tehničke značajke koje opisuju strujanje fluida oko i kroz vozilo su nestacionarno, nestlačivo strujanje pri brzinama manjim od 0,3 Macha i visoki Reynolds-ov broj ($Re > 1000000$). Stoga se vrijednost sile otpora zraka računa prema sljedećem izrazu:

$$F_z = p_d \cdot C_d \cdot A \quad [N] \quad 1)$$

Odnosno:

$$F_z = \rho_z \cdot \frac{(v+v_0)^2}{2} \cdot C_d \cdot A \quad [N] \quad 2)$$

Gdje su:

p_d – dinamički tlak zraka, [Pa]

v – brzina vozila, [m/s]

v_0 – brzina protuvjetra, [m/s]

ρ_z – gustoća zraka, [kg/m³]

C_d – faktor otpora zraka, [-]

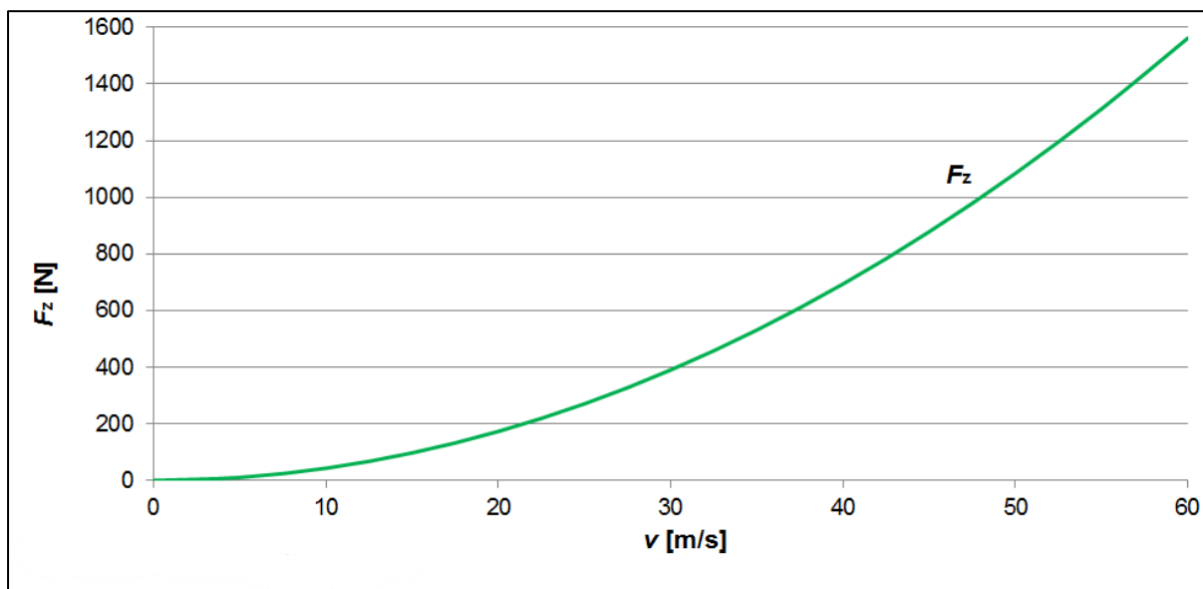
A – čeona površina vozila – poprečni presjek, [m²] = $0,775 \cdot B \cdot H$ (B – širina vozila, [m]; H – visina vozila, [m])

Iz izraza slijedi da je sila otpora zraka ovisna o brzini vožnje, faktorutu otpora zraka i veličini čeone površine vozila. Kao što je već navedeno u uvodu, dimenzije vozila određene su njegovom klasom, zbog čega se čeona površina ne može značajno mijenjati. Osim toga, manja smanjenja čeone površine ne doprinose značajno smanjenju otpora zraka u usporedbi sa druga dva ključna faktora.

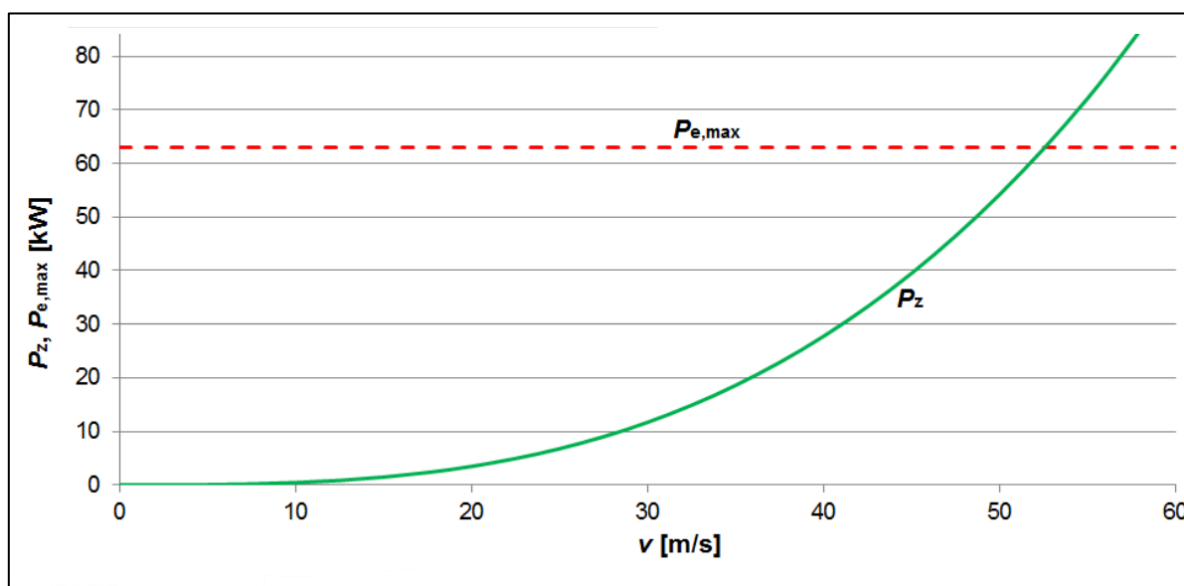
2.1.1 Brzina vožnje

Na varijablu brzine vožnje može utjecati smo pojedinac osobno, odnosno nadležno tijelo donošenjem zakona o ograničenjima brzine vožnje. Shvaćanje utjecaja brzine vožnje i njezinog povećanja u odnosu na povećanje sile otpora zraka prilikom vožnje (a time i potrošnje goriva) nekada nije intuitivno. Npr. za put od 100 km pri vožnji brzinom od 130 km/h (36,11m/s) potrebno je 0,769 sati, odnosno 46 minuta i 9 sekundi. Povećanjem brzine na 150 km/h (41,67 m/s), što je iznad zakonski dopuštene brzine kretanja vozila na autocestama u većini europskih država, potrebno vrijeme za prelazak puta od 100 km iznosi 0.6667 sati odnosno 40 minuta. Povećanjem brzine vozač stigne na odredište 6 minuta i 9 sekundi brže (promjena od 15,38 %). S druge strane iznos sile potrebne za savladavanje otpora zraka pri brzini od 150 km/h veći je za 25% u odnosu na potrebnu silu pri 130 km/h, što vodi prema drastičnom povećanju potrošnje goriva, a samim time i povećanju zagađenja okoliša.

Na sljedećim slikama prikazani su grafovi ovisnosti promjene sile (F_z) i snage (P_z) potrebne za savladavanje otpora zraka u odnosu na povećanje brzine gibanja vozila (v). Za primjer je uzet Renault Clio 1.5 dCi (2006.) [3]



Slika 7. Promjena iznosa sile otpora zraka [N] u ovisnosti o brzini vožnje [m/s] [3]

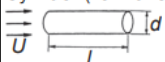
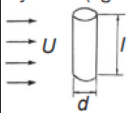
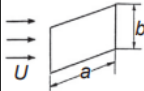

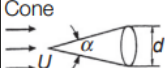
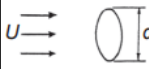



Slika 8. Promjena potrebne snage [kW] za savladavanje otpora zraka u ovisnosti o brzini vožnje [m/s] [3]

2.1.2 Faktor otpora zraka C_d

Faktor otpora zraka je bezdimenzijska veličina koja predstavlja otpor tijela gibanju kroz fluid. Kvantificira utjecaj oblika, kvalitete površine i uvjeta strujanja fluida na iznos sile otpora koja

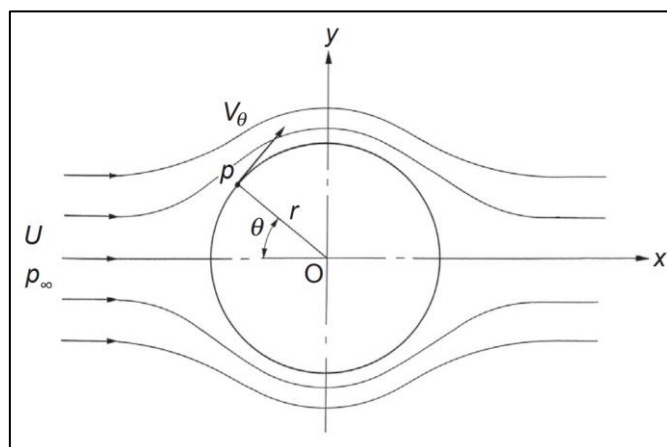
djeluje na objekt. Vrijednost faktora otpora zraka nije konstantna, nego je ovisna o funkcijama brzine strujanja, smjera strujanja, položaja i oblika tijela, gustoće i viskoznosti fluida. Brzina, kinematička viskoznost ν (omjer dinamičke viskoznosti η i gustoće fluida ρ) i karakteristična duljina tijela sadržani su u bezdimenzionalnom Reynoldsovom broju (Re). Reynoldsov broj služi kao kriterij pri utvrđivanju vrste strujanja fluida (detaljnije objašnjeno u nastavku rada). Ovisno o brzini gibanja tijela, uz ovisnost faktora otpora o Reynoldsovom broju, kao drugi parametar se koristi Machov broj (Ma) koji je jednak količniku vrijednosti brzine gibanja tijela kroz neki fluid i brzine zvuka u tome fluidu (do određene vrijednosti Machovog broja se smatra jedna vrsta gibanja, a iznad te vrijednosti druga, što će također biti pojašnjeno u nastavku rada). Pri niskim i suviše nepromjenjivim brzinama strujanja (malim Machovim i neznatno promijenjivim Reynoldsovim brojevima) faktor otpora C_d se može smatrati konstantnim, što omogućuje nepromjenjivo definiranje faktora za vozila.

Body	Dimensional Ratio	Datum Area, A	Drag Coefficient, C_D
Cylinder (flow direction) 	$l/d = 1$	$\frac{\pi}{4}d^2$	0.91
	2		0.85
	4		0.87
	7		0.99
Cylinder (right angles to flow) 	$l/d = 1$	dl	0.63
	2		0.68
	5		0.74
	10		0.82
	40		0.98
Oblong board (right angles to flow) 	$a/b = 1$	ab	1.20
	2		1.12
	4		1.15
	10		1.19
	18		1.29
	∞		1.40
Hemisphere (bottomless) 	I	$\frac{\pi}{4}d^2$	0.34
	II		1.33
Cone 	$a = 60$ degrees	$\frac{\pi}{4}d^2$	0.51
	$a = 30$ degrees		0.34
Disc 		$\frac{\pi}{4}d^2$	1.2
Ordinary passenger car 	Front projection area		0.28–0.32

Slika 9. Faktor otpora zraka za različita tijela [2]

Kao objekt za primjer koristit će se cilindar smješten u polje strujanja idealnog fluida. Idealnim fluidom smatra se fluid u kojem među slojevima ne djeluje nikakva sila te svi slojevi slobodno struje jedno preko drugih, a brzine strujanja slojeva u nekom prerezu cijevi su jednake (neviskozne tekućine). Cilindar je smješten okomito na smjer strujanja fluida. Na sljedećoj slici skiciran je položeni cilindar i strujnice fluida koje prelaze preko i ispod cilindra. Brzina U je ulazna brzina strujanja fluida, a brzina v_0 predstavlja brzinu fluida u točki koja se nalazi na površini cilindra te se računa prema sljedećem izrazu:

$$v_0 = 2U \cdot \sin\theta \quad [m/s] \quad 3)$$



Slika 10. Strujanje oko cilindra [2]

Ako se ulazni tlak strujanja fluida označi sa p_∞ , a tlak fluida u nekoj točki na površini cilindra sa p onda Bernoullijeva jednažba glasi:

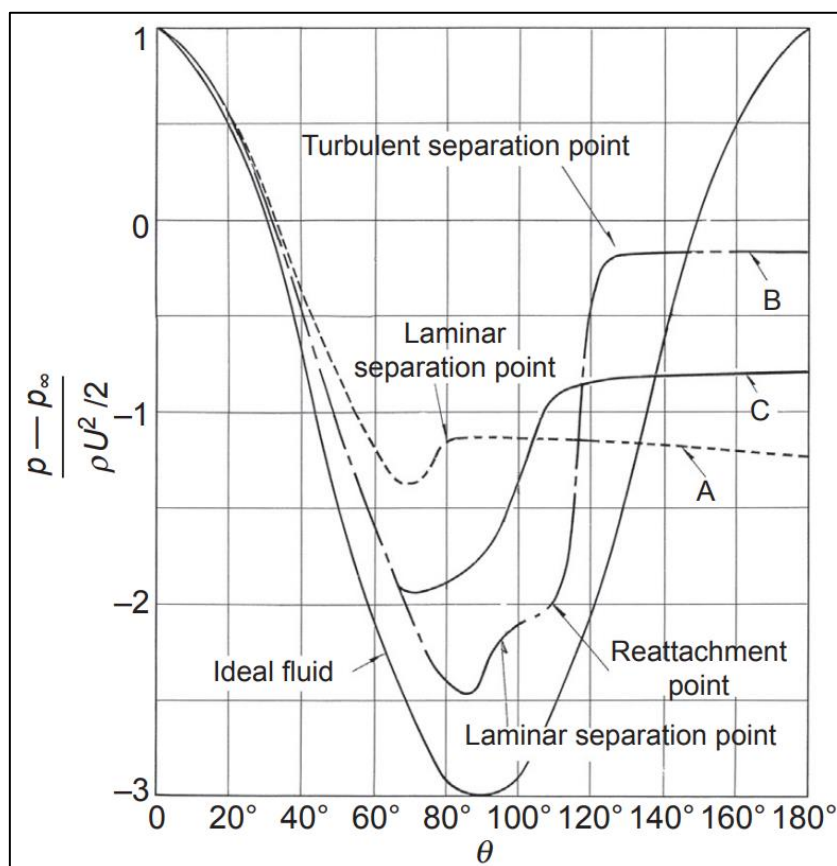
$$p_\infty + \frac{\rho U^2}{2} = p + \frac{\rho v_\theta^2}{2} \quad 4)$$

te iz nje slijedi:

$$p - p_\infty = \frac{\rho(U^2 - v_\theta^2)}{2} = \frac{\rho U^2}{2} (1 - 4\sin^2\theta) \quad 5)$$

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\rho U^2 / 2} = 1 - 4\sin^2\theta \quad 6)$$

Gdje je C_p , koeficijent tlaka, bezdimenzijski broj kojim se prikazuju iznosi tlaka kroz polje strujanja. Svaka točka polja strujanja ima svoj jednoznačno određeni iznos koeficijenta tlaka. Na slici 11 prikazana je raspodjela tlaka za idealnu tekućinu (puna crta) i tri realne tekućine sa različitim iznosima Reynoldsovih brojeva.



Slika 11. Koeficijent tlaka oko cilindra: A- $Re = 1,1 \cdot 10^5$; B- $Re = 6,7 \cdot 10^5$; C- $Re = 8,4 \cdot 10^6$ [2]

Sa slike je vidljiva simetrija iznosa koeficijenta tlaka u odnosu na središnju liniju pravog kuta na smjer strujanja. Posljedično simetriji, otpor tlaka izračunat integracijom raspodjele tlaka jednak je nuli, odnosno iznos sile koja djeluje na cilindar jednaka je nuli. Ovaj fenomen se protivi stvarnoj situaciji strujanja viskoznog fluida oko tijela stoga se naziva d'Alembert-ovim paradoksom.

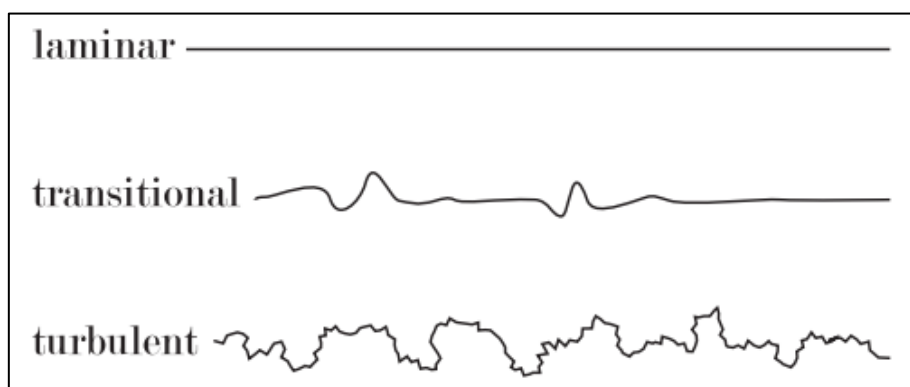
2.1.2.1 Viskozno strujanje

S obzirom na sile koje dominiraju realnom strujom fluida, viskozne ili sile inercije, strujanje možemo podijeliti na laminarno, prijelazno i turbulentno. U laminarnom strujanju slojevi fluida se gibaju paralelno te ne dolazi do njihovog okomitog kretanja, tj. miješanja. Laminarno strujanje je specifično za male brzine te je uzorkovano prevladavanjem viskoznih sila između čestica fluida. Povećavanjem brzine strujanja tok postaje prijelazan te na kraju turbulentan. Prijelazno strujanje ima karakteristike laminarnog i turbulentnog te je uvelike osjetljivo na male promjene stanja strujanja. Turbulentno strujanje je ono u kojem se čestice gibaju kaotično i vrtložno. Takvo strujanje je vrlo nepravilno, čestice prelaze iz jednog sloja u drugi te se može

okarakterizirati kao nepredvidivo. Do turbulentnog strujanja dolazi kad inercijske sile prevladavaju nad viskoznim. Kao mjera za određivanje vrste strujanja koristi se Reynoldsov broj koji je bezdimenzionalan i prikazuje odnos sila inercije i viskoznih sila. Kao što je već spomenuto, Reynoldsov broj je omjer brzine U , kinematičke viskoznosti ν i karakteristične duljine tijela l te se računa:

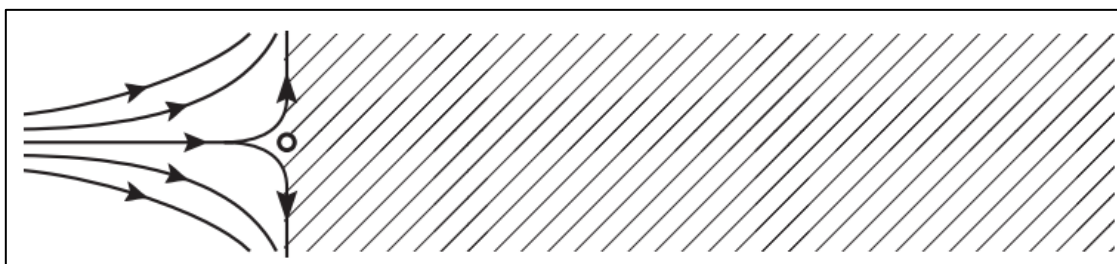
$$Re = \frac{Ul}{\nu} \quad [1] \quad 7)$$

[4] [5].



Slika 12. Tri različita tipa strujanja [4]

Prilikom strujanja fluida po površini nekog tijela može doći do zaustavljanja strujanja, odnosno stagnacije. Takva mjesta se zovu točke stagnacije te je u njima lokalna brzina strujanja fluida jednaka nuli, a lokalni tlak fluida u njegovoj maksimalnoj vrijednosti. Tok u blizini točke stagnacije zove se stagnacijski tok. Na slici 13 prikazan je pojednostavljeni izgled toka oko točke stagnacije gdje je ona prikazana kružićem. [4]



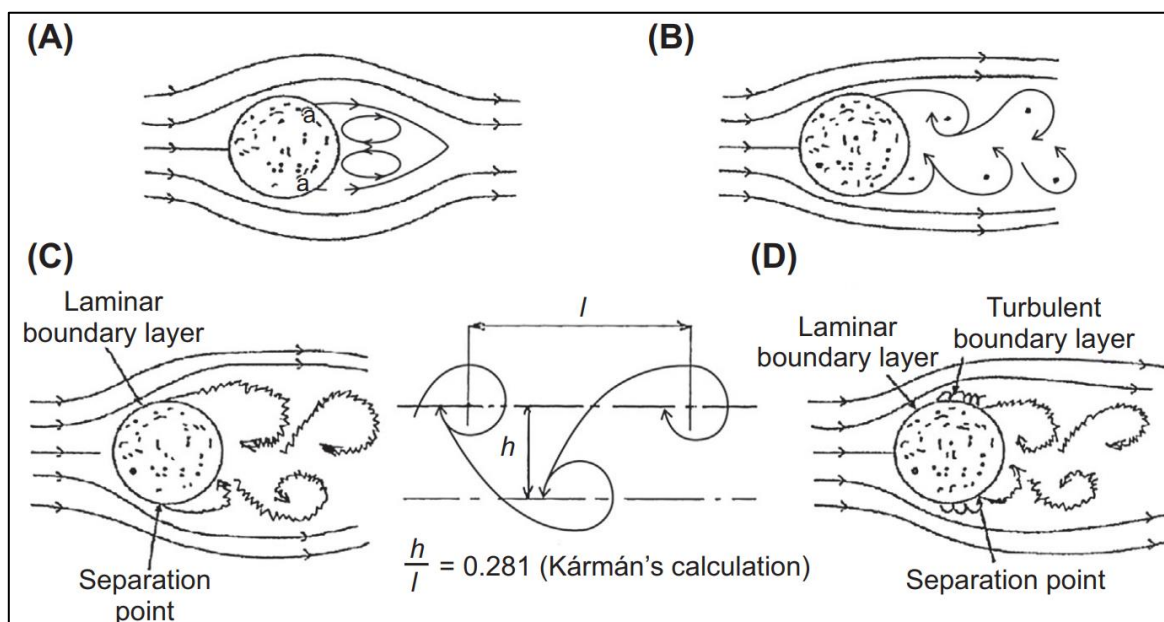
Slika 13. Strujnice fluida u smjeru tijela sa označenom točkom stagnacije [4]

Nastavno na primjer cilindra koji se nalazi okomito na polje strujanja fluida razmatra se slučaj realnog strujanja, odnosno strujanja viskoznog fluida. Slikom 14 pojašnjen je utjecaj promjene Reynoldsovog broja na vrstu strujanja oko cilindra i popratne pojave. Za viskozno strujanje strujnice iza cilindra, pri vrlo niskim vrijednostima $Re < 5$, simetrično se spajaju kao i strujnice ispred cilindra (slika 10). Povećanjem Re do raspona $5 < Re < 40$, granični sloj se simetrično

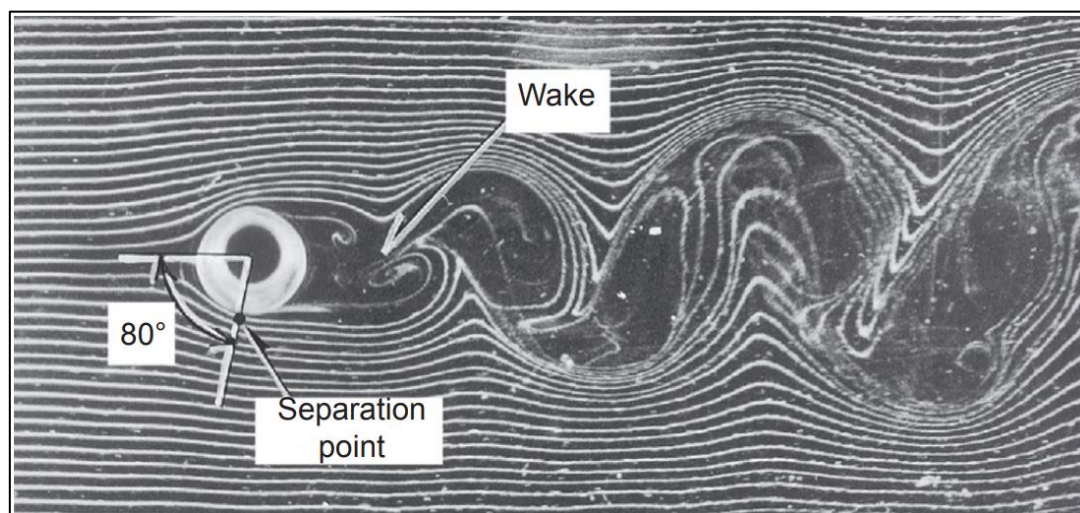
odvaja u točkama a i a' te se formiraju dva vrtloga koja rotiraju u suprotnim smjerovima (dvostruki vrtlozi), a nakon njih se glavne strujnice ponovno spajaju – slika 14-A. Daljnjim povećanjem Re vrtlozi se izdužuju te dolazi do pojave periodičnih oscilacija u području poremećenog toka iza tijela (engl. *wake*). Pri vrijednostima Re iznad 90, vrtlozi se kontinuirano naizmjenično odvajaju s obje strane cilindra kao što je prikazano na slici 14-B. Kod vrijednosti $Re < 200$ u području poremećenog toka prevladavaju laminarni vrtlozi, pri vrijednostima $200 < Re < 300$ područje poremećenog toka sastoji se od turbulentnih vrtloga (nakon vrijednosti zone prijelaza).

Granični sloj ne prestaje biti laminaran za vrijednosti $300 < Re < 3 \cdot 10^5$, a odvajanje toka se događa u točki oko 80° od točke stagnacije (krajnje lijeva točka presjeka profila cilindra) – slika 14-C. Kad Re prijeđe vrijednost $3 \cdot 10^5$ granični sloj polako postaje turbulentan (prijelazno strujanje), a pri $3,8 \cdot 10^5$ postaje potpuno turbulentan. Točka odvajanja pomiče se u smjeru strujanja na 130° kao što je prikazano na slici 14-D. Vrijednost Re kad granični tok postaje u potpunosti turbulentan naziva se kritični Reynoldsov broj (Re_c).

Za viskoznu tekućinu, kako je prikazano na slici 14, linije toka duž površine cilindra odvajaju se od cilindra kako bi se razvili vrtlozi iza njega. Slika 15 prikazuje iniciranje pojave stvaranja vrtloga ispitivačkom metodom vodikovog mjehurića. Za stražnju polovicu cilindra tok se postupno usporava s gradijentom brzine koji doseže nulu. Ta točka je sada točka odvajanja, nizvodno od koje dolazi do obrata toka i stvaranja vrtloga. Točka odvajanja pomiče se nizvodno, kako je prikazano na slici 14-D, s povećanjem Re . Razlog tome je što povećani Re dovodi do turbulentnog graničnog sloja, stoga se čestice tekućine unutar i oko graničnog sloja miješaju međusobno uzrokovano turbulentnim tokom, a posljedica toga je otežano odvajanje od tijela.



Slika 14. Strujanje oko cilindra (A) $5 < Re < 40$; (B) $40 < Re < 200$; (C) $300 < Re < 3.0 \cdot 10^5$; (D) $Re_c < Re$ [2]



Slika 15. Odvajanje strujnica i nastajanje vrtloga (metoda vodikovog mjehurića) u vodi, ulazna brzina = 24 mm/s, $Re = 195$ [2]

Podjela tlaka na površini cilindra jednaka je krivuljama sa slike 11-A,B,C. Stoga, smanjenje tlaka iza cilindra kao posljedicu ima pojavu sile u smjeru toka, odnosno u smjeru suprotnom kretanju vozila.

2.1.2.2 Određivanje faktora otpora zraka C_d vozila

Iznos faktora otpora zraka može se odrediti na više načina: računski, eksperimentalno i korištenjem računalne dinamike fluida (CFD). Računski se može odrediti korištenjem premetnute formule 2) koja glasi:

$$C_d = \frac{2F_z}{\rho_z \cdot (v+v_0)^2 \cdot A} \quad [1] \quad 8)$$

2.1.2.2.1 Računalna dinamika fluida (Computational Fluid Dynamics - CFD)

Računalna dinamika fluida (CFD) grana je mehanike fluida koja koristi numeričke algoritme za rješavanje i analizu problema povezanih sa strujanjem fluida. U automobilskoj industriji CFD je alat koji se koristi za procjenu i optimizaciju aerodinamičkih svojstava vozila, posebice faktora otpora zraka. CFD omogućuje inženjerima simulaciju složenih interakcija između fluida i površine vozila bez potrebe za oslanjanjem isključivo na fizičke prototipove ili testiranje u zračnim tunelima. CFD analiza se bazira na rješavanju temeljnih jednadžbi gibanja fluida, prvenstveno Navier-Stokesovih jednadžbi, koje opisuju ponašanje strujanja fluida. Ove su jednadžbe izuzetno složene i nelinearne, što ih čini praktički nerješivima analitički za sve osim najjednostavnijih slučajeva. CFD alati premošćuju ovo ograničenje diskretizacijom domene fluida u mrežu (engl. *Mesh*) – mrežu malih elemenata – i numeričkim rješavanjem jednadžbi za interakciju svakog elementa, odnosno njihovog čvorišta. Rezultat je detaljna analiza parametara strujanja fluida, poput brzine, tlaka i temperature, u cijeloj domeni mreže. CFD simulacije obično počinju izradom 3D modela vozila, koji se zatim unosi u specijalizirani CFD softver. Sljedeći korak je generiranje mreže, gdje se prostor oko i unutar vozila dijeli na sitne ćelije. Kvaliteta mreže značajno utječe na točnost rezultata; finije mreže pružaju preciznije rezultate, ali zahtijevaju više računalne snage i vremena. Nakon toga se definiraju rubni uvjeti, poput brzine ulaznog zraka i svojstava površine vozila, kako bi se simulirali stvarni uvjeti.

U praksi se CFD koristi za analizu aerodinamičkog otpora vozila simulacijom strujanja zraka i identificiranjem područja visokog tlaka, turbulencije i odvajanja strujanja. Inženjeri mogu vizualizirati linije strujanja oko vozila, prepoznati područja s najviše doprinosa otporu i optimizirati konstrukciju. Primjerice, mogu ispitati prilagodbe oblika krova, optimizaciju retrovizora ili poboljšanje podvozja vozila. Ove iteracije provode se mnogo brže i jeftinije nego izrada i testiranje više fizičkih prototipova. CFD nudi brojne prednosti koje ga čine nezamjenjivim alatom u suvremenom dizajnu vozila. Omogućuje detaljne analize u ranoj fazi

razvoja smanjujući potrebu za skupim i dugotrajnim testiranjima u zračnim tunelima. CFD također omogućuje simulacije scenarija koje je teško ili nemoguće simulirati u fizičkom okruženju, poput uvjeta pri visokim brzinama ili prijelaznih efekata kao što su iznenadni naleti vjetra. Osim toga, CFD pruža sveobuhvatan uvid u polje strujanja, uključujući vizualizaciju pojava poput vrtložnog strujanja, odvajanja struje i distribucije tlaka.

Unatoč prednostima, CFD ima i svoja ograničenja. Jedan od najvećih izazova je točnost rezultata, koja uvelike ovisi o kvaliteti mreže i pretpostavkama u modelu. Pojednostavljena geometrije, modela turbulencije i rubnih uvjeta mogu unijeti pogreške. Također, CFD simulacije mogu biti vrlo složene, zahtijevajući puno računalnih resursa, vrijeme i iskustvo. Stvarna validacija putem ispitivanja u zračnim tunelima ili vožnjama često je potrebna kako bi se potvrdila točnost simulacije. Kao što je već spomenuto, tumačenje CFD rezultata iziskuje duboko razumijevanje dinamike fluida i specifičnih ciljeva analize. Inženjeri moraju kritički procijeniti rezultate, poput sile otpora i faktora otpora, te ih usporediti s eksperimentalnim podacima kad god je to moguće. Važno je prepoznati da su CFD rezultati aproksimacije te da mogu postojati određena odstupanja uslijed ograničenja numeričkih modela. Provođenjem analiza osjetljivosti, u kojima se ključni parametri mijenjaju kako bi se procijenio njihov utjecaj na rezultate, moguće je povećati pouzdanost dobivenih podataka.

Kako računalna snaga nastavlja rasti, tako raste i potencijal CFD-a. Napredne tehnike, kao što je adaptivno generiranje mreže, gdje se mreža dinamički usavršava u područjima s visokim gradijentima strujanja, čine simulacije učinkovitijima. Strojno učenje i umjetna inteligencija također se integriraju u CFD procese kako bi se poboljšalo modeliranje turbulencije i ubrzalo izvođenje simulacija. Nadalje, sve su popularniji hibridni pristupi koji kombiniraju CFD s eksperimentalnim podacima iz zračnih tunela, iskorištavajući prednosti obje metode za pouzdanije rezultate.

U nastavku rada biti će detaljnije objašnjeno oblikovanje analize strujanja oko različitih modela korištenjem CFD alata.

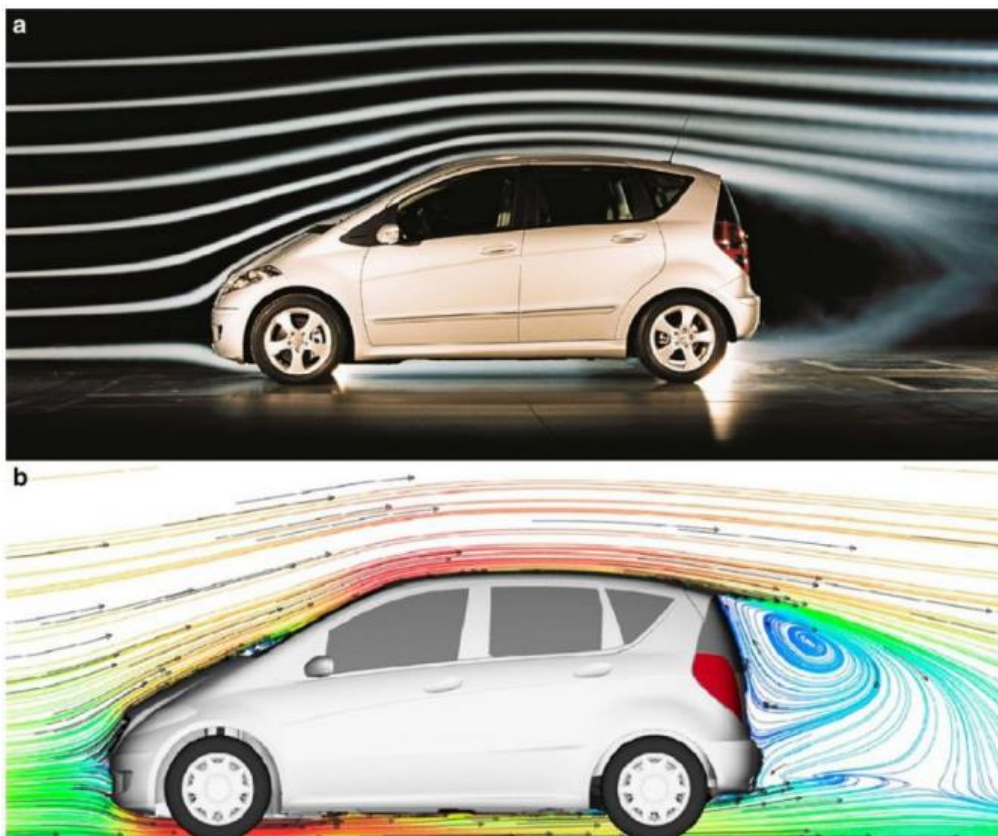
2.1.2.2.2 *Eksperimentalno određivanje faktora otpora*

Eksperimentalno određivanje faktora otpora vozila zraka najčešće se vrši u zračnim tunelima. Može ih se nazvati sofisticiranim alatima koji se koriste za procjenu i usavršavanje aerodinamičkih svojstava tijela, sa naglaskom na faktor otpora C_d . Zračni tuneli omogućuju inženjerima da u kontroliranim uvjetima rekonstruiraju strujanje zraka oko vozila, zrakoplova,

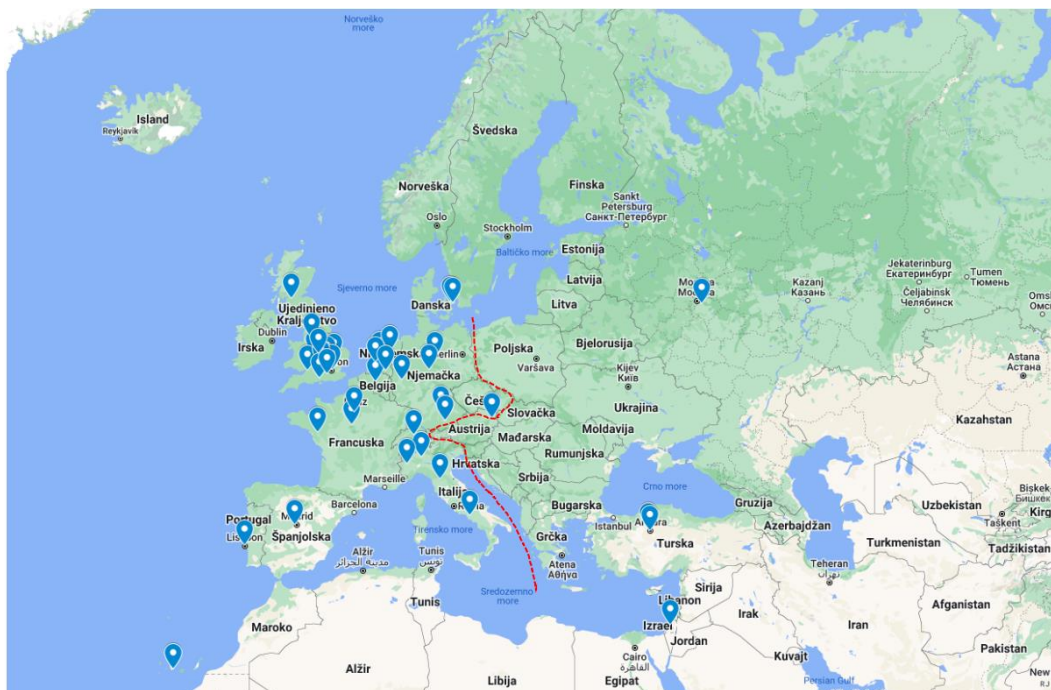
zgrada, pa čak i sportske opreme. Tijelo koje se ispituje, bilo da je riječ o umanjenom modelu ili prototipu u prirodnoj veličini, postavlja se u ispitni dio zračnog tunela gdje određene brzine zraka simuliraju uvjete strujanja kojima bi tijelo bilo izloženo tijekom kretanja. Precizna mjerenja sila koje djeluju na objekt, poput otpora i uzgona, vrše se pomoću naprednih instrumenata, uključujući balansne utege, senzore tlaka i površinske transducere. Na temelju tih mjerenja izračunava se faktor otpora, uzimajući u obzir dimenzije objekta, brzinu zraka i gustoću fluida.

Suvremeni zračni tuneli nadilaze sama mjerenja sila, koristeći napredne tehnike vizualizacije poput tragova dima, laserske velicometrije čestica (engl. *Particle Image Velocimetry - PIV*) i boja osjetljivih na tlak. Ove metode pružaju detaljan uvid u složene aerodinamičke pojave poput ponašanja graničnog sloja, odvajanja strujanja, turbulencije i stvaranja vrtloga. Promatranje tih efekata u zračnom tunelu omogućuje inženjerima da izmijene konstrukciju kako bi smanjili otpor, odgodili odvajanje strujanja ili kontrolirali turbulenciju.

Zračni tuneli također imaju ključnu ulogu u provjeri rezultata računalne dinamike fluida (CFD). Iako su moderni CFD alati dovedeni do visokog stupnja preciznosti, njihova točnost ovisi o pretpostavkama i aproksimacijama koje se moraju provjeriti eksperimentalnim podacima iz vjetrotunelskih ispitivanja. Ovo omogućuje opsežno testiranje varijacija dizajna i identifikaciju optimalnih oblika i značajki bez potrebe za fizičkim prototipovima. Integracijom rezultata iz zračnih tunela s CFD simulacijama, inženjeri mogu postići temeljito razumijevanje aerodinamičkih svojstava vozila, što vodi do optimiranih izvedbi i oblika vozila



Slika 16. Strujanje oko vozila prikazano a) u zračnom tunelu; b) računalnom simulacijom [3]



Slika 17. Lokacije objekata koji vrše ispitivanja u zračnim tunelima u Europi

[<https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1hZ12gjW7BdPJJvZWMxNiYgIW1TZDuZvM&femb=1&ll=52.57970360000167%2C26.48887666665573&z=4>]

3. TERETNA VOZILA

Prema [6] teretna vozila (teretni automobil) definirana su kao motorna vozila za prijevoz tereta s najmanje 4 kotača odnosno motorna vozila za prijevoz tereta s tri kotača ako im je najveća dopuštena masa > 1000 kg. Dimenzije vozila određene su:

- a) Najveća duljina vozila je razmak između najizbočenijega prednjeg i stražnjeg dijela vozila, bez tereta.
- b) Najveća širina vozila je razmak između najizbočenijih bočnih dijelova vozila, bez tereta.
- c) Najveća visina vozila je razmak između vodoravne podloge i najvišeg dijela vozila kad je neopterećeno i kada su gume napumpane na tlak koji propisuje proizvođač vozila.

a) Najveće dopuštene duljine vozila iznose:

- I. poluprikolice (mjereći od stražnjeg kraja do vučnog svornjaka) 12,00 m
- II. tegljača s poluprikolicom 16,50 m

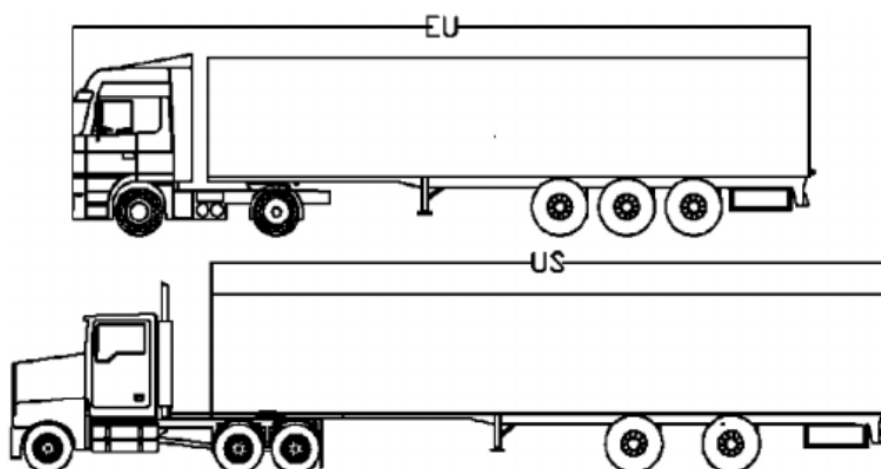
b) Najveća dopuštena širina mopeda s dva kotača je 1 m, mopeda s tri kotača, lakih četverocikla, motocikla, motocikla s tri kotača, motocikla s bočnom prikolicom i četverocikla je 2 m, a ostalih vozila 2,55 m

c)

- I. Najveća dopuštena visina mopeda, mopeda s tri kotača, lakih četverocikla, motocikla, motocikla s tri kotača, motocikla s bočnom prikolicom i četverocikla je 2,5 m, a ostalih vozila je 4,0 m.
- II. Svi dijelovi vozila moraju se nalaziti unutar propisane najveće dopuštene visine vozila uvećane za najviše 50 mm od vrijednosti iz stavka I.
- III. Visina vozila na kojem se izvodi nadogradnja ne smije biti veća od one koju je predvidio proizvođač vozila.

U okviru ovoga rada analizirati će se aerodinamičke značajke europskog tegljača s poluprikolicom (*cab-over engine* - COE). Konstrukcijske izvedbe tegljača se razlikuju u različitim dijelovima svijeta, te također dopuštene duljine, širine, visine i mase tegljača i njihovih priključnih vozila variraju u odnosu na ostale dijelove svijeta. Zanimljivost te razlike može se opravdati povijesnim razlozima i razvojima različitih kontinenata. Zbog užih cesta i zahtjevnijih uvjeta manevriranja u Europi, europski kamioni dizajnirani su s manjim radijusom

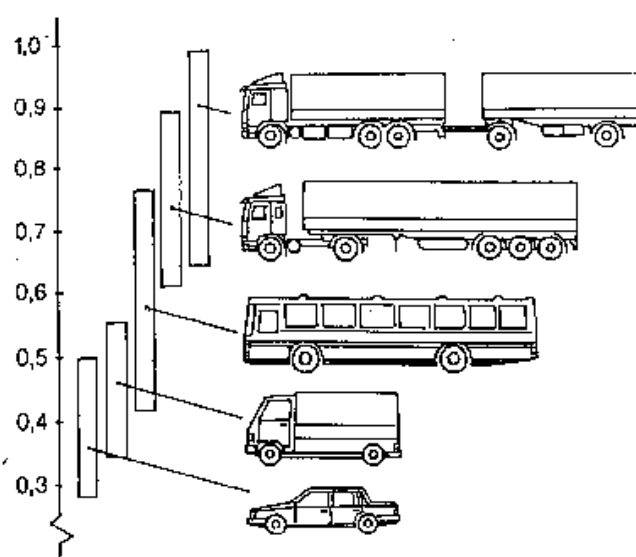
zakretanja u usporedbi s američkim kamionima, koji se prilagođavaju širim cestama i većem broju prometnih traka u Sjedinjenim Državama.



Slika 18. Razlika dopuštenih duljina tegljača sa poluprikolicom u Europi i SAD-u

3.1 Aerodinamika tegljača s poluprikolicom

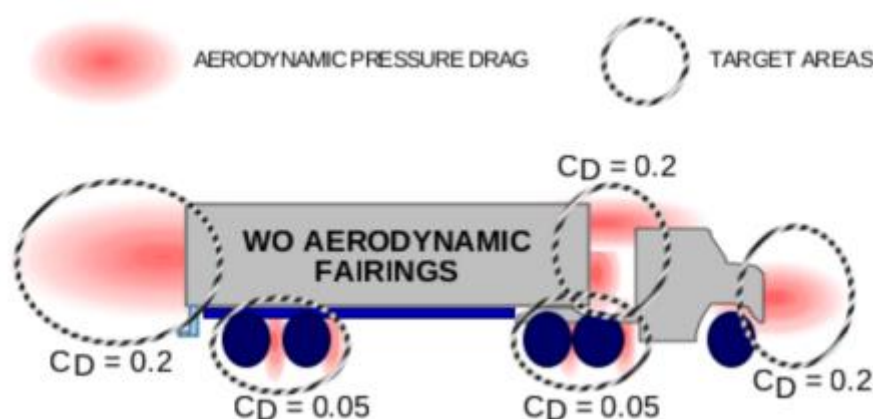
U pogledu aerodinamičkih značajki, teretna vozila generalno imaju lošu konstrukciju. Visoki faktori otpora zraka posljedica su velike čeonice površine sa neoptimiranim prijelaznim radiusima i konstrukcijskim rješenjima. Vrijednosti C_d teretnih vozila kreću se između 0,6 pa sve do 1,0 što su dva do tri puta veće vrijednosti nego kod komercijalnih vozila. Na slici 19 prikazana je vrijednost faktora otpora po kategoriji vozila na kojoj se vidi velika razlika između vrijednosti C_d teretnih vozila nasprem ostalih kategorija.



Slika 19. Vrijednosti faktora otpora C_d po kategorijama vozila

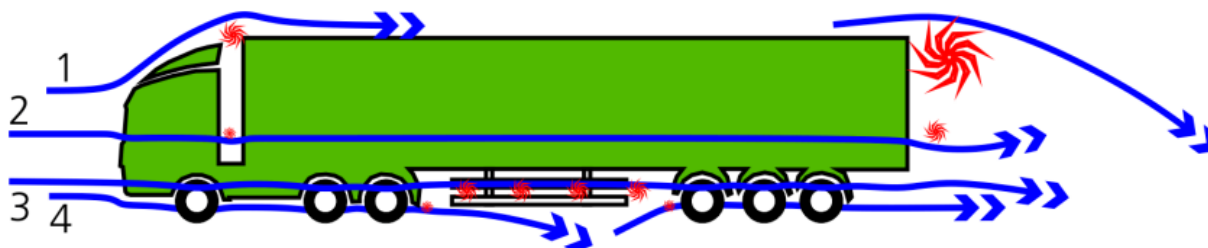
U ovom radu tupo tijelo predstavlja tegljač sa poluprikolicom na kojemu će se provesti analiza promjene faktora otpora zraka C_d u odnosu na konstrukciju i položaje različitih rješenja, odnosno dijelova koji se dodaju na vozila sa ciljem smanjenja samog otpora zraka. Sile koje djeluju na tegljač su primarno uzrokovane pojavama zona različitih tlakova po dužini vozila i odvajanjem toka. Stoga, potrebno je smanjiti spomenutu razliku u tlakovima i reducirati odvajanje toka (koliko je moguće) kako bi se za posljedicu smanjio otpor gibanja kroz medij. Bitno je ponoviti da faktor otpora zraka ovisi samo o obliku vozila, a ne i o njegovim dimenzijama (o tome ovisi ukupna sila otpora zraka).

Na tegljaču sa poluprikolicom može se uočiti više mjesta koja zbog svoje konstrukcije i položaja na vozilu pridonose povećanju faktora otpora zraka. Neka od njih su prednja maska tegljača, razmak (praznina) između tegljača i poluprikolice, kotači, oblik završnog kraja prikolice, itd.



Slika 20. Mjesta lokalnih utjecaja na ukupni faktor otpora zraka C_d [7]

Za jednostavnije razumijevanje strujanja zraka oko vozila slikom 21 prikazane su strujnice u blizini tegljača sa poluprikolicom.



Slika 21. Strujnice zraka u blizini tegljača sa poluprikolicom (plave linije) te mjesta nastajanja zračnih vrtloga (crveno) [7]

Strujnica 1 giba se gornjom stranom vozila. Ovdje odbojnik i spojler usmjeravaju struju zraka sa prednjeg dijela vozila prema gore u smjeru prednjeg dijela poluprikolice. Ako spojler nije

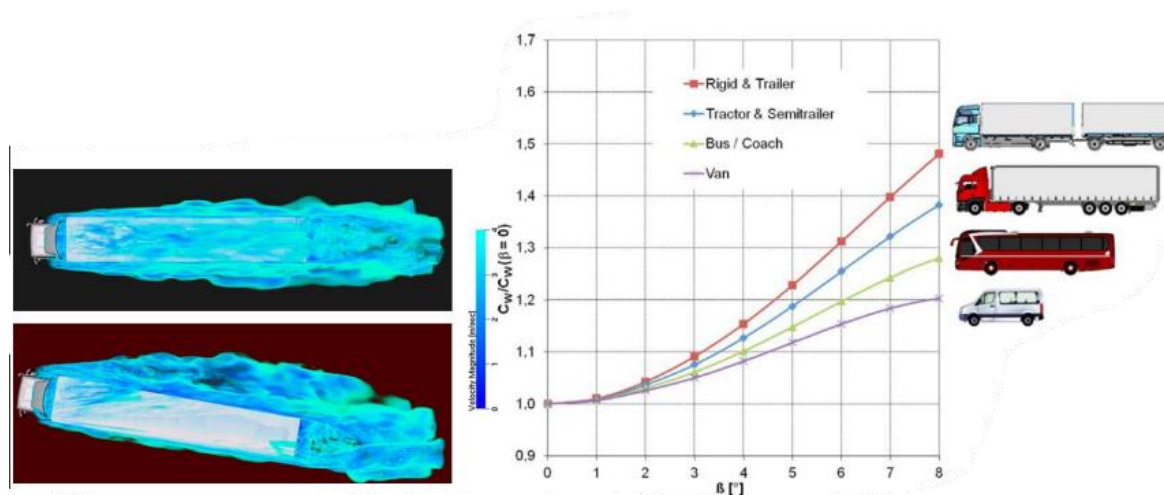
pravilno ugrađen, odnosno pravilno napravljen za taj model vozila i pripadajuće mu prikolice koju tegli, a prednji brid prikolice je oštar, protok zraka će biti poremećen što će utjecati na povećanje faktora otpora. To je prikazano na slici 21 kao crveni vrtlog na početku prikolice (lijevom kraju), a nastavak strujanja uz gornji dio prikolice te naknadno naglo razdvajanje toka od prikolice prikazano je sa velikim crvenim vrtlogom na kraju prikolice (desni dio).

Strujnica 2 giba se bočnim stranama vozila. Prednji odbojnik usmjeruje struju zraka bočno od tegljača gdje ona prelazi (kao i strujnica 1) na poluprikolicu. Također oštrina brida prikolice utjecati će na faktora otpora zraka, kao i već spomenuto naglo odvajanje toka na kraju prikolice.

Strujnica 3 giba se donjom stranom vozila. Moderni tegljači imaju ugrađene bočne panele koje smanjuju utjecaj vrtloženja zraka uzrokovanog vrtnjom kotača. Na područjima gdje je smještena dodatna oprema i limovi za zaštitu od udaraca dolazi do turbulencija u strujama jer je njihov oblik nepravilan. Nastali vrtlozi povećavati će se sa povećanjem udara bočnih naleta vjetra. Kao i kod strujnica 1 i 2, na kraju prikolice dolazi do naglog odvajanja struje što uzrokuje povećani otpor.

Strujnica 4 prati vozilo na razini tla. Tok je ujednačen bez velikih turbulencija i poremećaja. Ovdje je bitno napomenuti da ne smije postojati nekakav dio opreme koji bi na prednjoj strani bio otvoren, a na stražnjoj zatvoren jer bi imao ulogu zaustavnog padobrana te uzrokovao veliki otpor. Položaj tegljača i prikolice što bliže tlu je poželjan, ali nepraktičan zbog vertikalnog gibanja šasije. [7]

Bitno je napomenuti da uz nabrojene i objašnjene poremećaje veliku ulogu imaju bočni naleti vjetra na samo strujanje preko i oko vozila (slika 22). Na kraju prikolice sve struje se spajaju u jednu veliku.

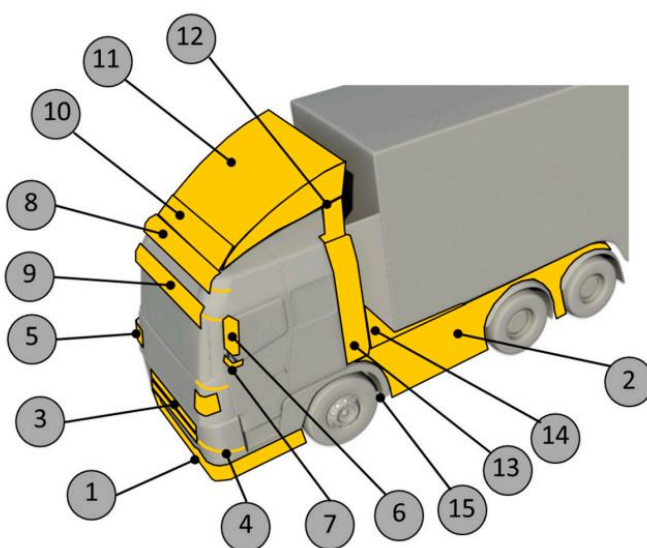


Slika 22. Utjecaj napadnog kuta naleta vjetra na iznos C_d [3]

3.2 Elementi nadogradnje tegljača

Kao dodatna mjera poboljšanja značajki mora se uzeti u obzir dimenzioniranje i konstruiranje osnovnih dijelova tegljača. Oblikovanje tegljača prikolice promatrano je kao zasebna cjelina jer ovisi o proizvođaču i mogućnostima nadogradnje dijelova na sami vučni stroj. Samim optimiranjem oblika, kutova, bridova, zaobljenja uvelike se može utjecati na strujanje preko i oko vozila. Na slici 23, prema [7] je za primjer prikazan tegljač sa označenim dijelovima koji su konstruirani sa ciljem smanjenja otpora zraka (označene su značajke).

- 1 – usmjerivač strujanja na odbojniku
- 2 – bočne ploče
- 3 – aktivna prednja rešetka
- 4 – bočno zaobljenje
- 5 – zakrilca
- 6 – aerodinamični bočni retrovizori
- 7 – bočne kamere
- 8 – zaobljenje prednjeg gornjeg brida kabine
- 9 – štitnik kabine od Sunca
- 10 – usmjerivač strujanja iznad kabine
- 11 – spojler tegljača
- 12 – bočne oplata krova kabine
- 13 – produžetci bočnih oplata
- 14 – ploče za popunjavanje praznina
- 15 – glatko podvozje



Slika 23. Elementi tegljača koji utječu na aerodinamički otpor vozila [7]

- 1) Usmjerivač strujanja je glatko produženje branika, koje usmjerava strujanje zraka oko tegljača umjesto duž grubog podvozja. U većini slučajeva, usmjerivač strujanja je već integriran u branik.
- 2) Bočne ploče tegljača prekrivaju bočni razmak između prednjih i stražnjih kotača tegljača i smanjuju turbulencije uzrokovane šupljinom i/ili spremnikom goriva.
- 3) Aktivne rešetke za protok zraka smanjit će strujanje zraka kroz motorni prostor. Potreban je napredni upravljački uređaj rešetki u ovisnosti o sustavu termalnog upravljanja motorom kako bi se spriječilo pregrijavanje.
- 4) Polumjer bočnog zaobljenja kabine važan je za usmjeravanje strujanja zraka od prednjeg dijela oko kabine prema stranama kamiona. Veći polumjer je bolji, ali cjelokupni dizajn kabine mora se detaljno razmotriti kako bi se dobio optimizirani polumjer različitih bridova

5) Zakrilca za usmjeravanje zraka na bočnim bridovima kabine služe za usmjeravanje strujanja zraka oko bridova. Ako su bridovi kabine već dobro zaobljeni, pozitivan učinak može se pretvoriti u negativan.

6) Ogledala s niskim otporom, kao i nosači i držači ogledala, obično su optimalno zaobljeni kako bi smanjili turbulencije i pravilno usmjerili strujanje zraka.

7) Bočne kamere mogu smanjiti otpor jer su mnogo manje od ogledala. U nekim slučajevima otpor se povećava ako su zamijenjena ogledala omogućavala bolje strujanje zraka oko ruba, pa se cjelokupni dizajn kabine mora detaljno razmotriti.

8) Obod krova kabine može biti zaobljeni znak ili neka vrsta zaobljenog brida kako bi se smanjile turbulencije na oštrim rubovima krova. Danas su rubovi već zaobljeni, a znakovi su integrirani u oplatu ili iza vjetrobranskog stakla (obično se koriste za prikaz imena operatera ili reklame).

9) Sjenilo kabine uglavnom štiti vozača od zasljepljivanja. Stariji tegljači s sjenilima kabine koja su imala oštre rubove mogli su imati pozitivan učinak na silu otpora. U većini slučajeva kod današnjih tegljača taj je učinak negativan.

10) Usmjerivač strujanja na krovu kabine usmjerava strujanje zraka glatko prema gornjoj ivici prikolice bez stvaranja turbulencija. Potrebno ga je prilagoditi visini prikolice. Ponekad je to jednostavna, blago zaobljena ploča. Danas je mali deflektor na krovu kabine integriran u spojler krova kabine kako bi se izjednačile visine tegljača i poluprikolice u nekim vozilima.

11) Spojler krova kabine je čvrst i složeno oblikovan oblik (može se reći klinasti oblik) na krovu kabine koji usmjerava strujanje zraka od prednjeg dijela tegljača oko prikolice. Ponekad je dodatni mali spojler na krovu kabine integriran kako bi se prilagodile različite visine prikolica.

12) Bočna oplata krova kabine ima nekoliko dodatnih krutih dijelova postavljenih s ciljem smanjenja razmaka između kabine i poluprikolice, čime se smanjuje otpor uzrokovan bočnim naletima vjetra.

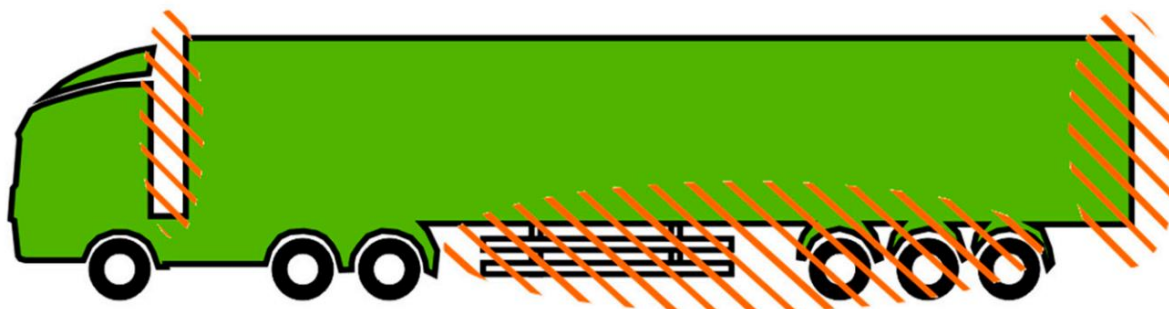
13) Produžetci bočnih oplata kabine usmjeravaju strujanje zraka s uže kabine na širu prikolicu i smanjuju učinke bočnog naleta vjetra smanjivanjem razmaka između kabine i poluprikolice.

14) Ploče za popunjavanje praznina tegljača zaglađuju neravno područje klinastog zgloba iza kabine gdje je prikolica povezana s tegljačem. Smanjuju se turbulencije uzrokovane bočnim naletima vjetra i strujanjima uz podvozje prema razmaku između tegljača i poluprikolice.

15) Glatko podvozje smanjuje javljanje turbulencija uzrokovano hrapavim/neravnim podvozjem.

3.1 Elementi nadogradnje poluprikolice

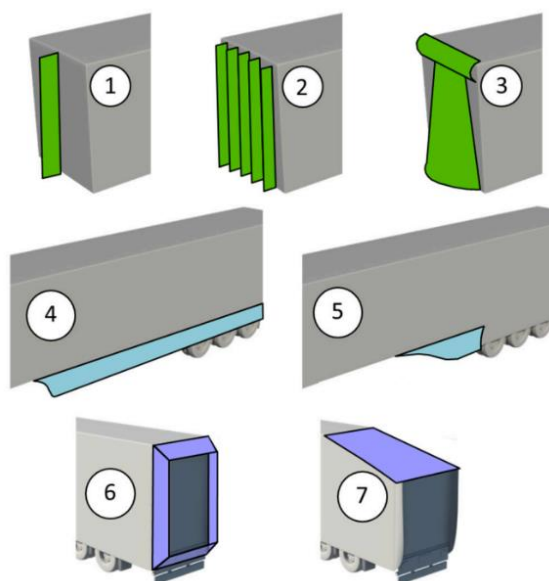
Na slici 24 prikazana su tri područja na prikolici koja su od posebnog interesa za implementaciju aerodinamičnih elemenata. Prvo područje je ispred prikolice, odnosno razmak između tegljača i poluprikolice. Drugo područje je donji dio poluprikolice gdje se nalaze štitnici podvozja, kutije s alatima i paletama ili rezervni kotači. Također, bočni dijelovi prikolice su od interesa zbog svih grubih razmaka između kotača, blatobrana i osovina. Treće područje je stražnji dio prikolice. Sve prikazane mjere mogu se klasificirati u ova tri područja. Unutar svakog područja, obično se može instalirati samo jedan uređaj za unaprjeđenje aerodinamike teretnog vozila.



Slika 24. Područja poluprikolice za nadogradnju elemenata za poboljšanje aerodinamičkih značajki [7]

Kao što je prikazano u prethodnom poglavlju, oblikovanjem tegljača može se manipulirati strujanjem zraka oko vozila. Tako se oblikovanjem prikolice/poluprikolice, odnosno nadogradnjom dodatnih aerodinamičnih dijelova može utjecati na smanjenje otpora zraka cijelog vozila. Na slici 25, prema [7] prikazani su neki od mogućih elemenata nadogradnje na prikolicu tegljača, a u nastavku rada je objašnjen njihov utjecaj na smanjenje otpora strujanja.

- 1 – razdjelna ploča
- 2 – lokalizator vrtloženja / stabilizator
- 3 – zračni stožac
- 4 – bočne ploče prikolice / krilca
- 5 – poklopci kotača / odbojnik čestica
- 6 – stražnja krilca
- 7 – skošenje krova



Slika 25. Aerodinamični elementi nadogradnje na poluprikolicu [7]

1) Razdjelna ploča dijeli protok zraka lijevo i desno od prikolice i razbija glavne vrtloge stvarajući manje lokalne vrtloge. U slučaju naleta bočnog vjetra, zatvara prazninu između vučnog vozila i prikolice te smanjuje protok zraka kroz tu prazninu, stvarajući dodatne vrtloge s dodatnim otporom. Razdjelna ploča je učinkovitija kod većih praznina između tegljača i prikolice.

2) Lokalizator vrtloženja / stabilizator sličan je razdjelnoj ploči. Proizvodi nekoliko lokalnih vrtloga između ploča koji smanjuju tlak na prednjoj strani poluprikolice. Glavni vrtlog se smanjuje, a time i otpor. Kao i razdjelna ploča, smanjuje učinke bočnog naleta vjetra zatvaranjem praznine između vučnog vozila i prikolice. Lokalizator vrtloženja je učinkovitiji za veće praznine između tegljača i prikolice.

3) Zračni stožac usmjerava protok zraka izravno oko prikolice bez stvaranja manjih lokalnih vrtloga poput razdjelne ploče ili stabilizatora. Ovisno o tipu, također zatvara prazninu između vučnog vozila i prikolice te time smanjuje otpor uzrokovan učincima naleta bočnog vjetra.

4) Bočne ploče / bočna sukinja / bočna krila zatvaraju prazninu ispod prikolice između stražnjeg dijela tegljača i kotača prikolice. Postoje različite konfiguracije za bočna krila. Kratka krila obično završavaju prije kotača prikolice, duga krila obično pokrivaju kućišta kotača, a potpuno zatvorena krila pokrivaju i kotače. Postoji mnogo različitih konstrukcijskih rješenja koja dovode do različitih rezultata.

5) Poklopci kotača / odbojnici čestica djeluju kao umjereni bočna krila. Ovdje su uglavnom kotači prikolice zaštićeni od bočnog vjetra i protoka zraka ispod prikolice u smjeru vožnje. Stvaranje vrtloga ispod prikolice je smanjeno. Odbojnik čestica je učinkovitiji za veće praznine ispod prikolice.

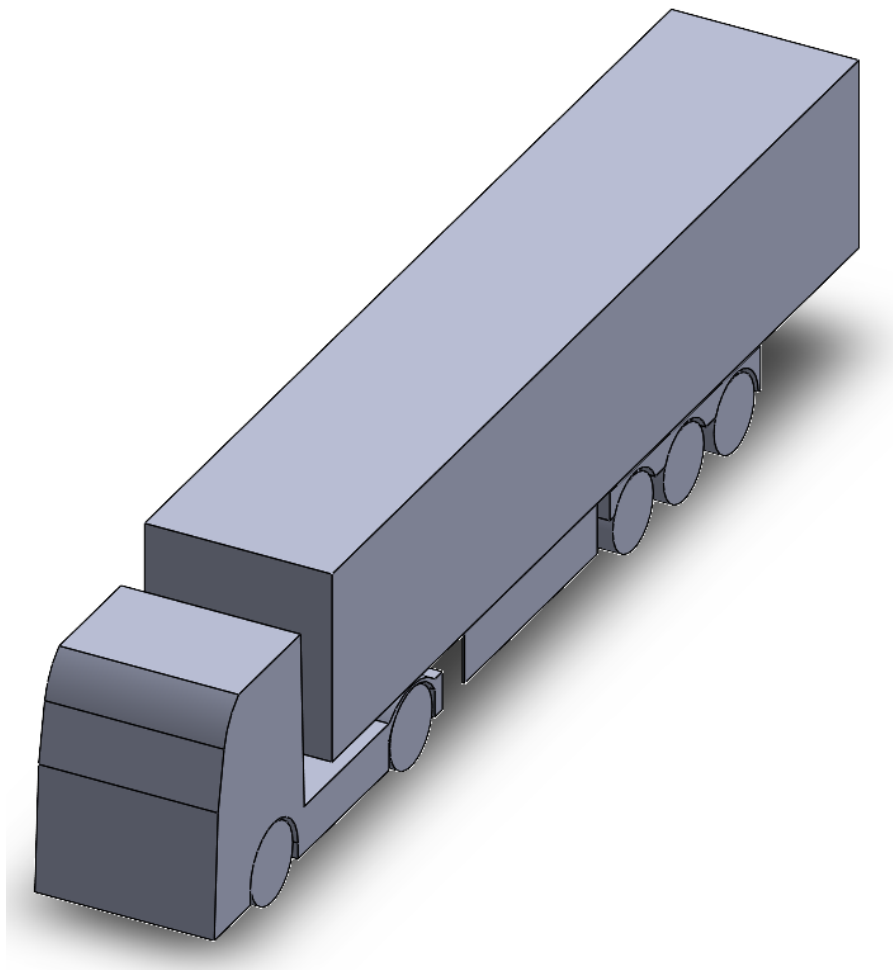
6) Stražnja krilca prijanjaju protok zraka na gornjoj i bočnim stranama prikolice kako bi došlo do ranijeg spajanja i smanjenja vrtloga iza prikolice. U EU maksimalna duljina sklopivih krilaca je ograničena na 500 mm iza prikolice. [13]

7) Skošnje krova smanjuje područje vrtloga iza prikolice, slično stražnjim panelima za produljivanje. Glavni nedostatak ovog dizajna je manji teretni prostor u smislu volumena unutar trenutnog zakonodavstva. Da bi standardna prikolica u obliku kutije bila potpuno napunjena, teret mora imati gustoću od $\approx 300 \text{ kg/m}^3$.

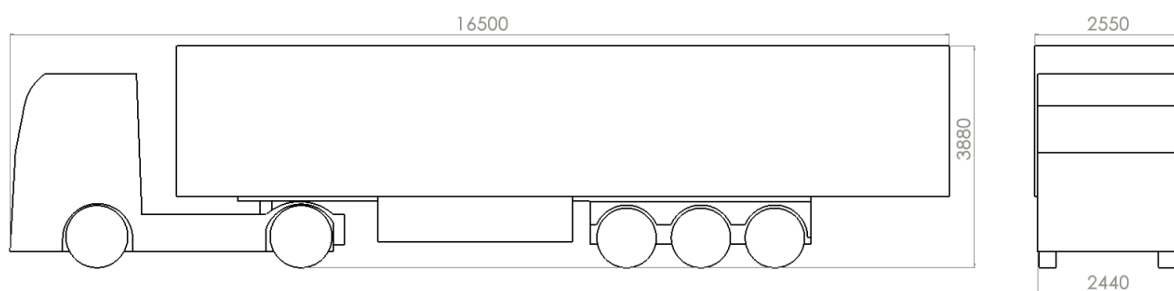
4. IZRADA MODELA

U radu su se provele simulacije na velikom broju modela s različitim oblicima i parametrima elemenata za nadogradnju na tegljač s poluprikolicom. Modeli su napravljeni u računalnoj CAD aplikaciji SolidWorks 2020. Kao geometrija za polazno vozilo koristio se primjer tegljača s priložene slike u nastavku. Na slici se nalazi i graf C_d po duljini vozila koji će se kasnije usporediti sa dobivenim grafom u analizi. Model je kreiran prema vozilu MAN TGX širine kabine 2,44 m [8], maksimalno dopuštene širine poluprikolice 2,55 m, ukupne maksimalno dozvoljene duljine (od prednjeg vrha tegljača do stražnjeg dijela poluprikolice) 16,5 m i visine poluprikolice (a i najvišeg dijela tegljača sa nadogradnjom krovnog spojlera) od gazne točke kotača do vrha poluprikolice 3,88 m. Na sljedećim slikama prikazan je izgled polazne geometrije modela, njegove dimenzije i početna skica koja je napravljena koristeći se (kao što je spomenuto) priloženom slikom konture tegljača s poluprikolicom.

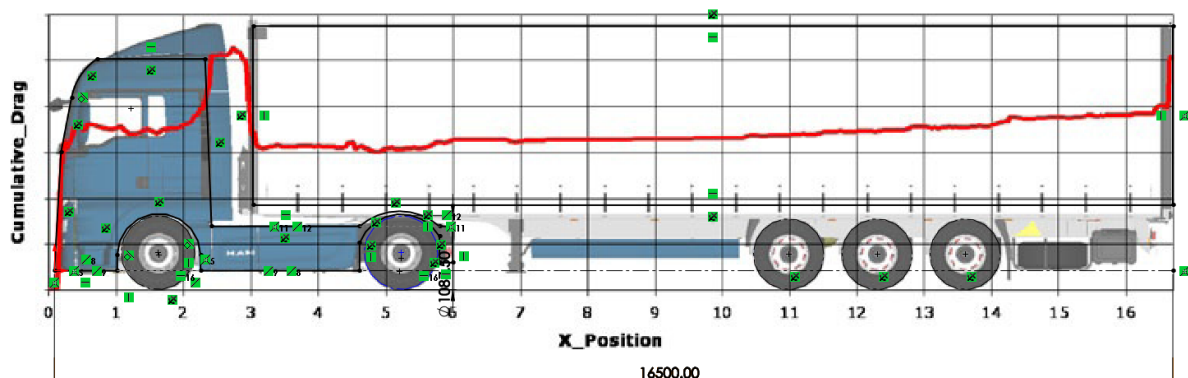
Sve vrijednosti prikazane na skicama modela su izražene u milimetrima.



Slika 26. Model polazne geometrije tegljača s poluprikolicom



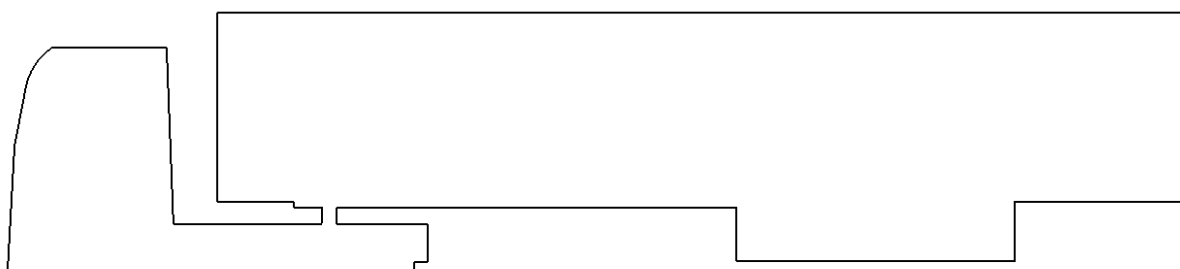
Slika 27. Gabaritne dimenzije polazne geometrije tegljača s poluprikolicom



Slika 28. Skica profila modela prema slici sa pripadajućim grafom kumulativnog iznosa C_d

Svaki model je izrađen na osnovi polaznog modela bez mijenjanja njegovih parametara na koji su se dodavala konstrukcijska rješenja.

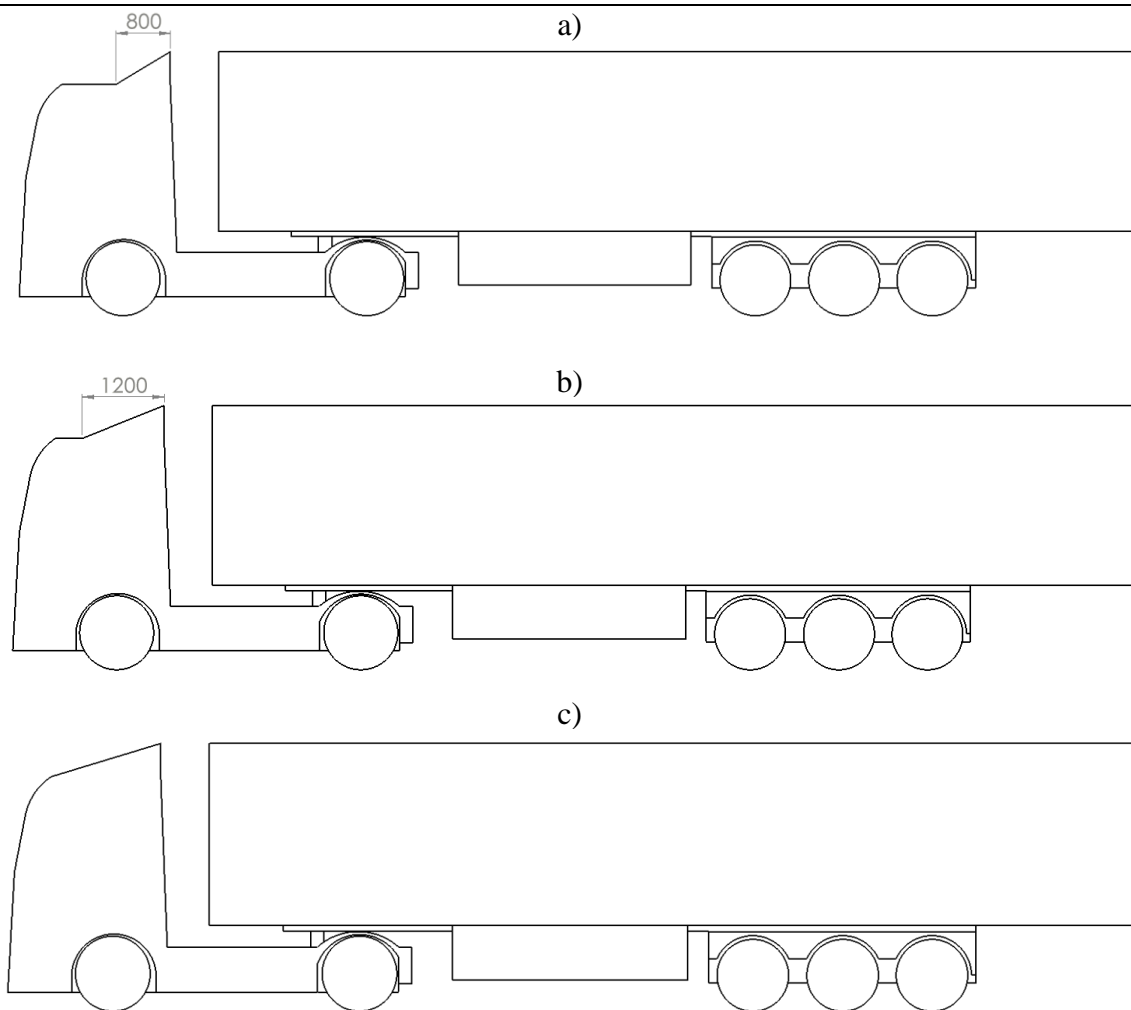
Za 2D modele koristila se funkcija srednje plohe 3D modela. Stoga na 2D modelima nema praznina za kotače i još nekih detalja kako bi modeli za analizu mogli biti referentni jedan prema drugome kao što je prikazano na slici 29.



Slika 29. 2D model za analizu strujanja

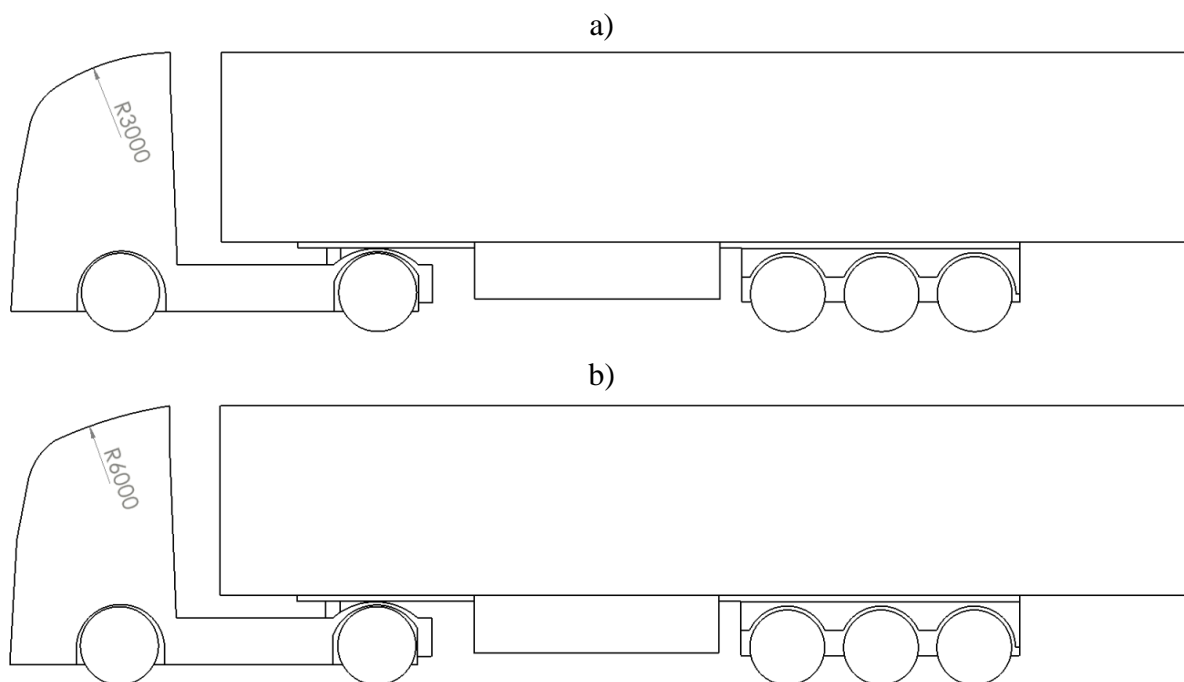
4.1 Krovni spojler tegljača (A)

Za provjeru utjecaja krovnog spojlera kreirana su 3 modela različite udaljenosti početka spojlera od prednjeg dijela kabine – A1, A2, A3. Na slici 30 prikazane su vrste analiziranih spojlera, a na slici 31 varijacija jedne od njih.



Slika 30. Modeli tegljača sa krovnim spojlerom - a) A1; b) A2; c) A3

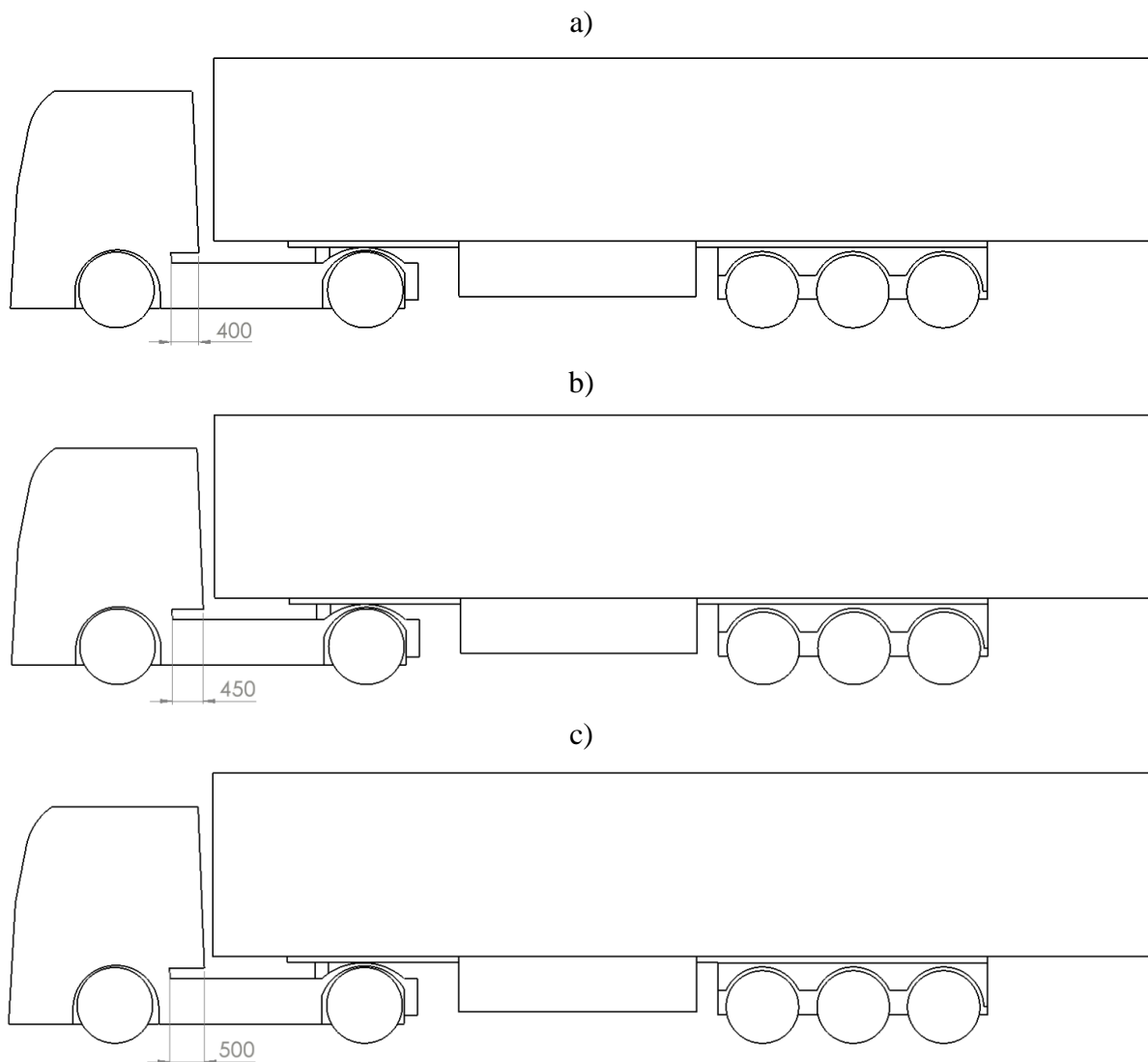
Za 3D modele ovih primjera krovni spojler ima širinu jednaku kao tegljač (2,44 m). Sa analizom stvarnih tegljača i njihovih spojlera, pretpostavka je da veličina zakrivljenja spojlera utječe na strujanje zraka oko vozila. Stoga se na primjeru A3 napravila analiza utjecaja zakrivljenja na dodatna četiri modela: A3-3000, A3-4000, A3-5000 i A3-6000 gdje brojevi 3000, ..., 6000 označavaju veličinu radijusa zakrivljenja u milimetrima.



Slika 31. Modeli tegljača sa krovnim spojlerom A3: a) A3-3000; b) A3-6000

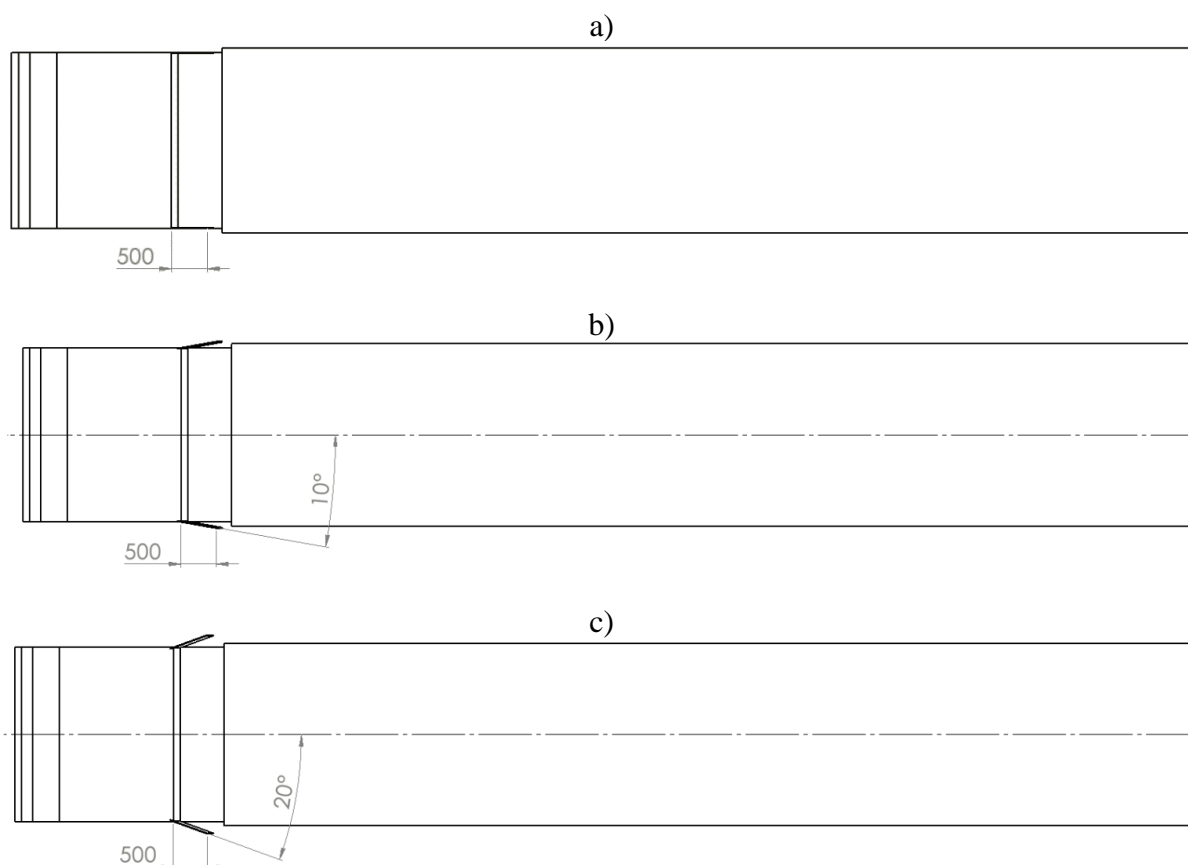
4.2 Bočne oplate kabine (B)

Kao parametri za analiziranje utjecaja bočnih oplata na strujanje i usmjeravanje toka zraka oko vozila i prikolice (naknadno spajanje na površinu prikolice) napravljeni su modeli na kojima se analizirao parametar duljine krila na utjecaj strujanja i kut otklona krila u odnosu na uzdužnu os vozila. Na modelima B400-0, B450-0 i B500-0 nula označava kut otklona u odnosu na uzdužnu os vozila, a brojevi 400, 450 i 500 udaljenost krajnjeg ruba bočne oplata od stražnjeg dijela kabine. Bočne oplata prate mali nagib kabine te su bridovi paralelni sa njom. Neki od modela prikazani su na sljedećim slikama.



Slika 32. Modeli tegljača sa bočnim oplatama kabine B0: a) B400-0; b) B450-0; c) B500-0

Zbog detaljnije analize utjecaja kuta otklona bočnih oplata provedene su simulacije na modelima za svaki stupanj otklona do 15° , te za 20° . Za analizu utjecaja otklona korišten je parametar najveće udaljenosti kraja bočne oplata od kraja kabine iznosa 500 mm (pretpostavka je bila da će od analiziranih 400, 450 i 500 mm udaljenosti baš ta najveća pokazati najbolje rezultate).



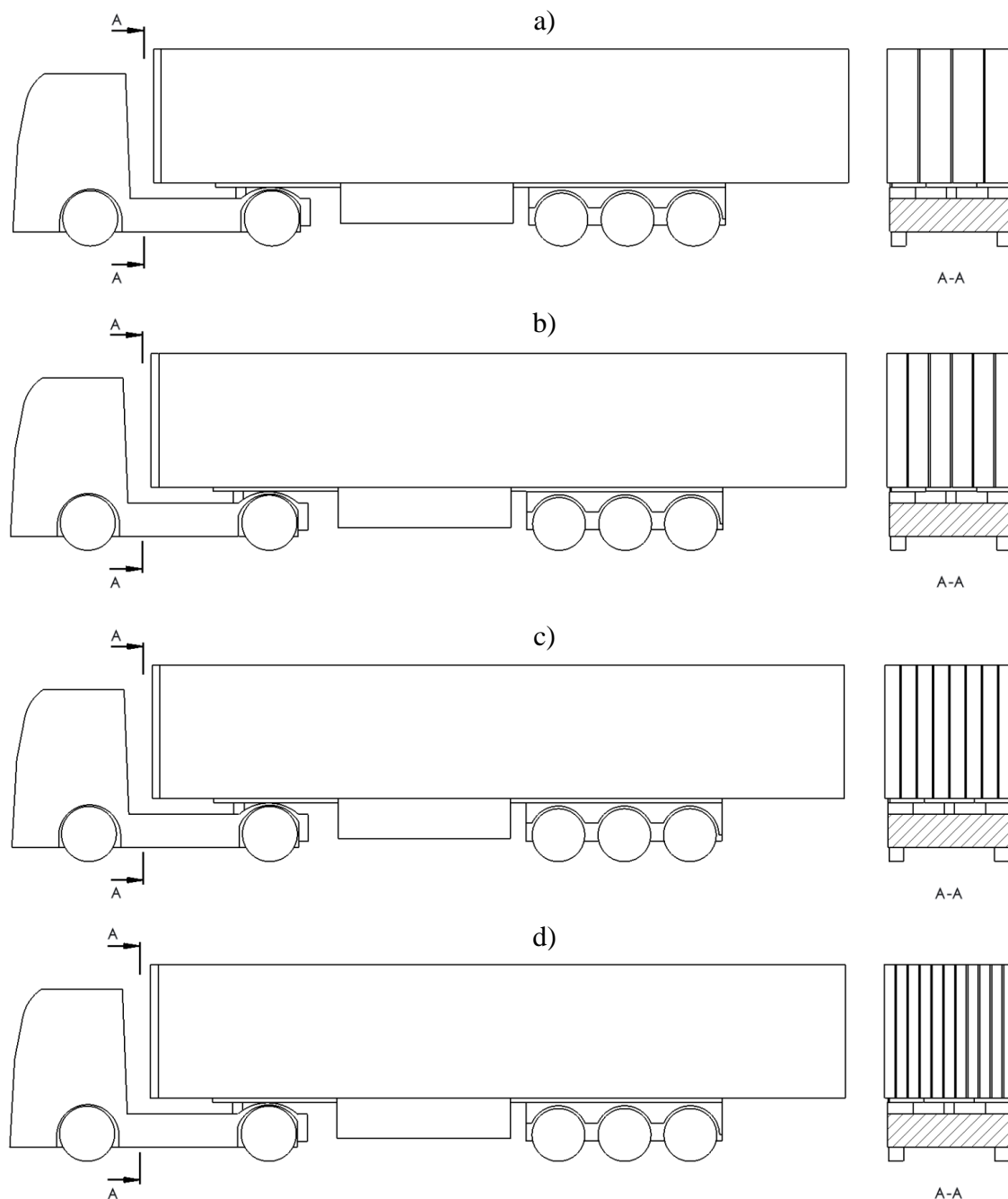
Slika 33. Modeli tegljača sa bočnim oplatama kabine duljine 500 mm i različitim kutovima otklona: a) B500-0; b) B500-10; c) B500-20

4.3 Lokalizatori vrtloženja (C)

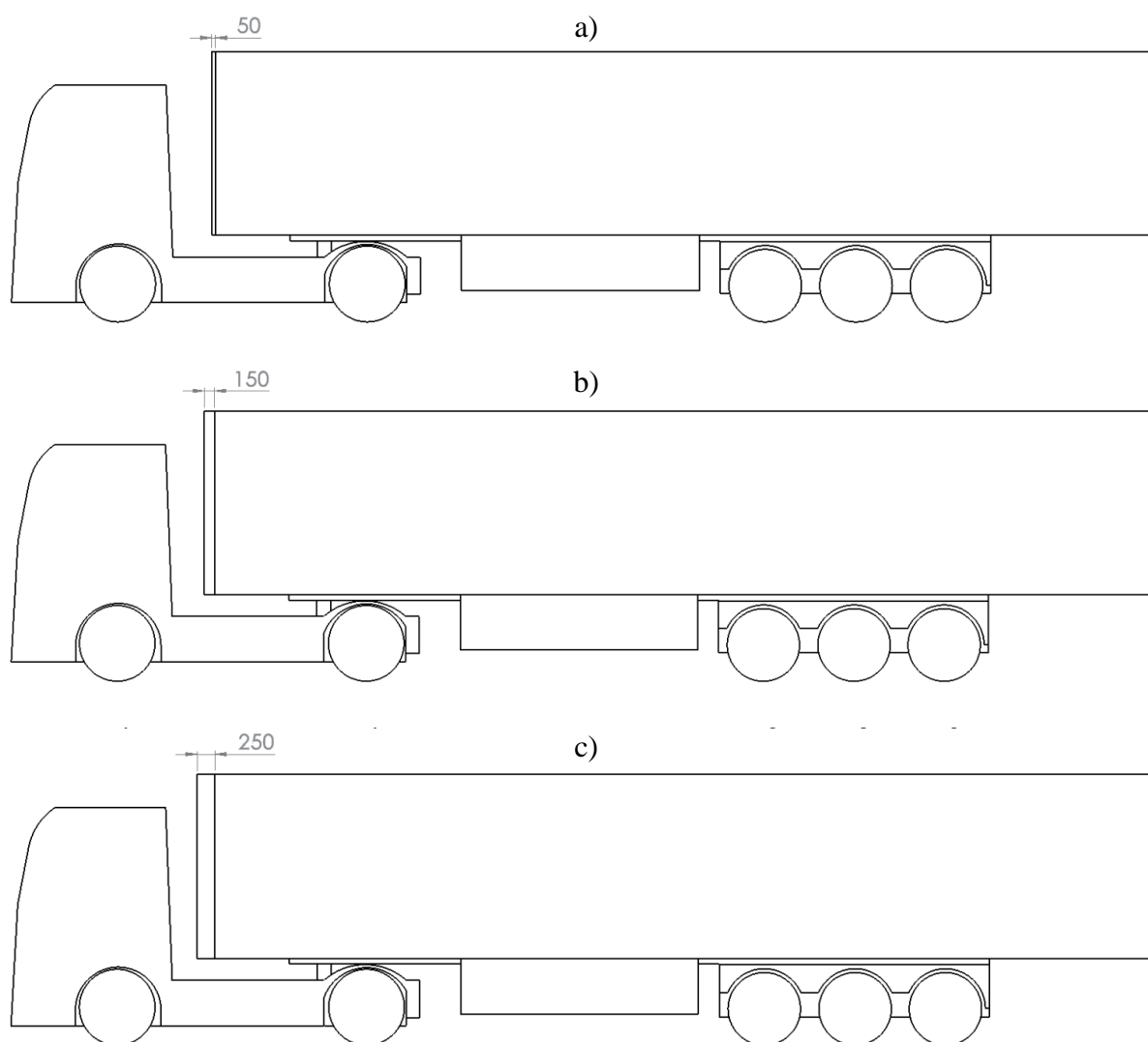
S ciljem smanjenja faktora otpora zraka povezanog sa strujanjem u prostoru između kabine tegljača i poluprikolice, za strujanje bez bočnih naleta vjetra i za strujanje sa bočnim naletima vjetra, kreiran je aerodinamički dodatak koristeći se objavljenim podacima. Princip konstrukcije je utemeljen na tehnologiji kontroliranja stvorenih vrtloga u kojoj je konstrukcijsko rješenje kreirano u svrhu reguliranja vrtloženja u područjima stvaranja vrtloga uzrokovanih aerodinamički oštrim bridova. Rubovi ploča su s razlogom napravljeni oštrima (bez zaobljenja) kako bi se osiguralo razdvajanje toka koji prolazi između kabine i prikolice na dva susjedna ruba, odnosno kako bi se osiguralo stvaranje vrtloga između dvije susjedne ploče. Svaki lokalizirani vrtlog doprinosi smanjenju tlaka na prednjoj strani poluprikolice. [9]

Dimenzije ploča lokalizatora vrtloženja su iste duljine (od vrha do dna prednje strane poluprikolice) i iste širine (30 mm), a mijenjao se broj implementiranih ploča i njihova visina u odnosu na prednju stranu poluprikolice. Modeli su nazvani C3-150, C5-150, C7-150 i C10-

150 gdje brojevi 3,5,7 i 10 označavaju broj ploča po modelu, a u ovom slučaju broj 150 visinu tih ploča. Nakon provjere utjecaja broja ploča na smanjenje faktora otpora zraka provedene su simulacije varijacijama visine ploča na modelu koji će dati najbolje rezultate. Analizirane visine su 50, 100, 150, 200 i 250 mm.



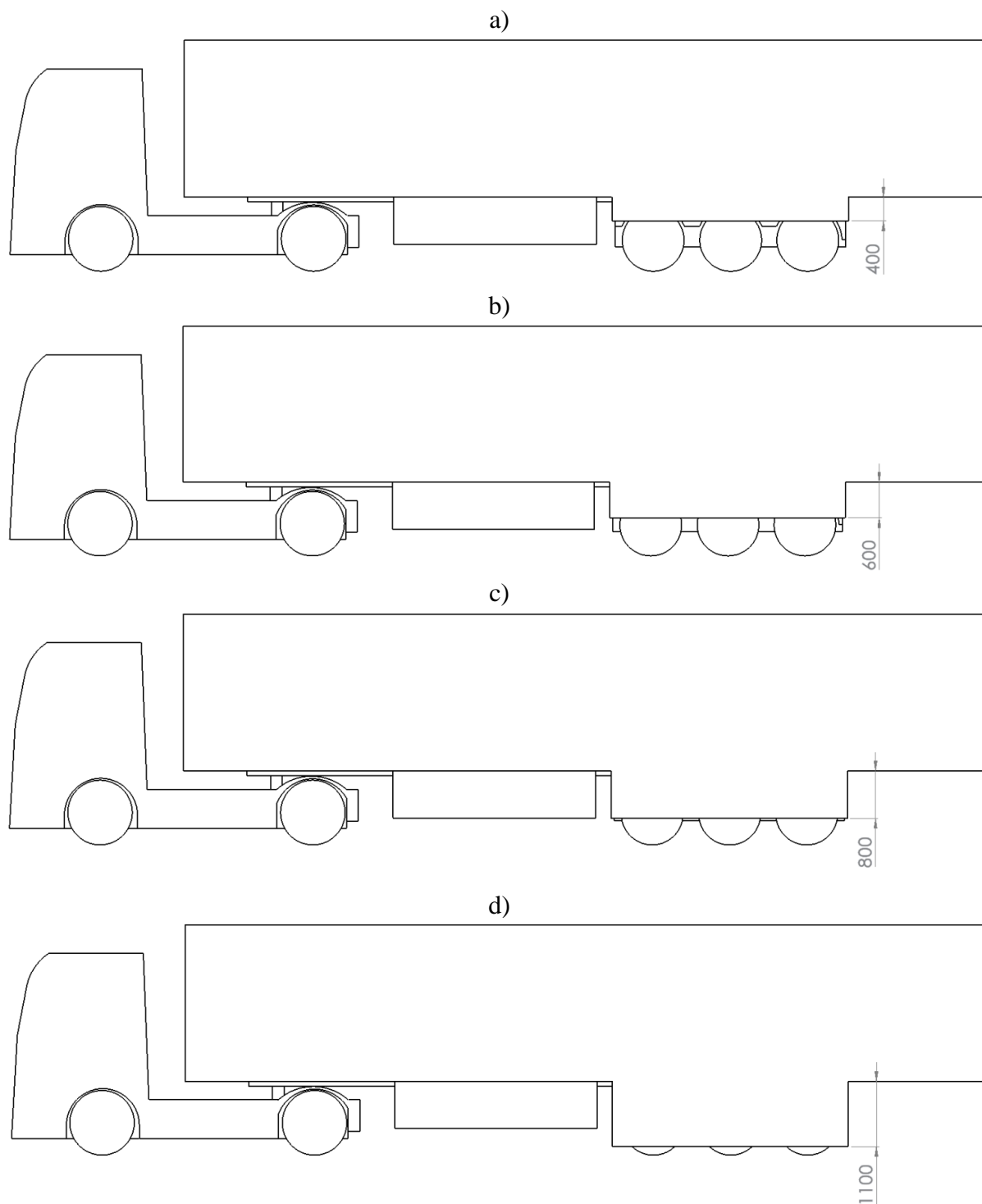
Slika 34. Modeli sa implementiranim pločama lokalizatora vrtloženja jednake visine ali različitog broja ploča: a) C3-150; b) C5-150; c) C7-150; d) C10-150



Slika 35. Slika 36. Modeli sa implementiranim pločama lokalizatora vrtloženja različitih visina ploča: a) C5-50; b) C5-150; c) C5-250

4.4 Prekriv kotača - zavjesa (D)

Za analizu utjecaja uzdužnog strujanja preko kotača, odnosno utjecaj neravnine površine i praznina oko kotača kreirani su modeli gdje je analiziran utjecaj dužine zavjese preko kotača uz konstantnu širinu. Stoga, prekriv je stavljen samo preko dijela poluprikolice gdje se nalaze kotači, a duljina se varirala prema sljedećim modelima: D400, D600, D800 i D1100 gdje brojke 400, 600, 800 i 1100 označuju udaljenost donjeg ruba zavjese od donjeg ruba poluprikolice kao što je prikazano na sljedećoj slici.

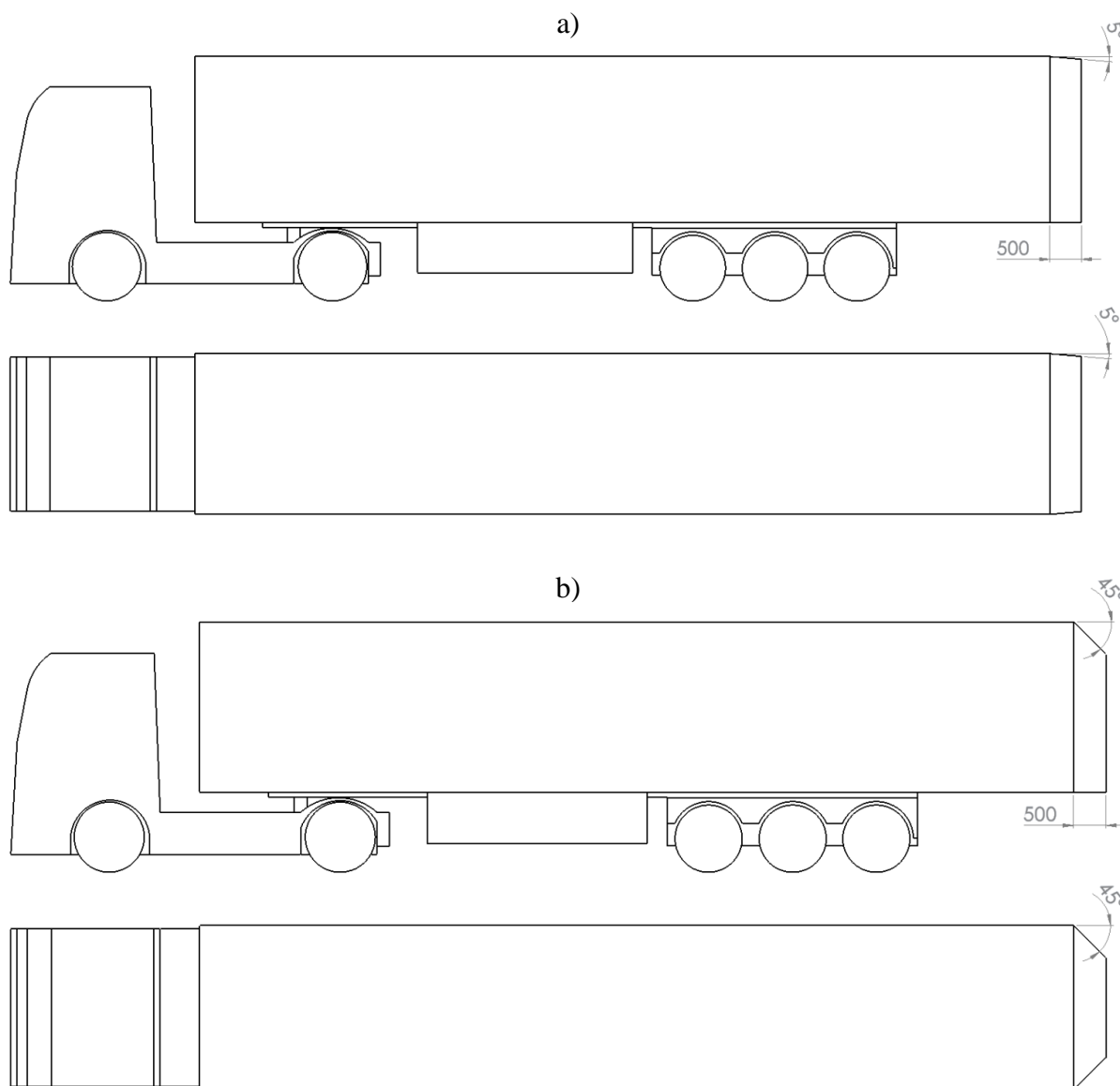


Slika 37. Modeli sa prekrivima kotača, odnosno zavjesama: a) D400; b) D600; c) D800; d) D1100

4.5 Stražnja krilca poluprikolice (E)

Na modelima za analizu produljene ploče („krilca“) stavljena su sa bočnih strana i sa gornje strane poluprikolice. Duljina krilaca je konstanta u smislu udaljenosti od stražnje strane

poluprikolice, odnosno 500 mm, a kut nagiba krilaca u odnosu na bočne i gornju stranu poluprikolice je korišten kao promjenjiva varijabla. Analizirani su modeli E5, E10, E15, E20, E25, E30, E35, E40 i E45 gdje brojke označuju kut nagiba.



Slika 38. Modeli sa prekrivima stražnjim krilcima poluprikolice: a) E5; b) E45

5. SIMULACIJE

ANSYS je sveobuhvatan paket alata za simulaciju korišten u inženjerstvu dizajniran za rješavanje složenih problema iz područja dinamike fluida, mehanike konstrukcija, prijenosa topline i međudjelovanja fizikalnih fenomena. Njegova svestranost i preciznost čine ga prvim izborom u automobilskim, zrakoplovnim, energetskim i elektrotehničkim industrijama. U

akademskim krugovima, ANSYS služi kao ključni alat za obrazovanje i istraživanje, omogućujući studentima i stručnjacima analizu stvarnih inženjerskih slučajeva.

ANSYS paket nudi mnoštvo mogućnosti koje pomažu pri postavljanju i rješavanju željenih problema. Omogućuje rješavanje širokog spektra fizikalnih pojava, odnosno jednoznačno rješavanje više različitih problema u isto vrijeme (npr. u istraživanjima vezanim za aerodinamiku vozila omogućava paralelno analiziranje koristeći se računalnom dinamikom fluida i toplinskom analizom kako bi se procijenio prijenos topline na vanjskim površinama vozila). Koristi napredne module za rješavanje protoka fluida uključujući sve vrste strujanja (laminarno, turbulentno, prijelazno, stlačivo, nestlačivo itd.). Oni također omogućuju analizu različitih pojava poput otpora zraka, uzgona i odvajanja (te prijanjanja) strujanja uz složenu geometriju (tegljač, poluprikolica, ...). ANSYS podržava paralelno računanje na sustavima s više jezgri i klasterima visokih performansi, značajno smanjujući vrijeme izračuna za velike simulacije. Ipak, studentska licenca ima ograničenja u ovom aspektu (detaljnije objašnjeno u nastavku). Jednostavnim intuitivnim sučeljem za izradu geometrije, generiranje mreže, postavljanja simulacija i obradu podataka omogućava brzo učenje te snalaženje u njegovim brojnim mogućnostima. Njegovi alati za vizualizaciju pomažu u interpretaciji složenih podataka, nudeći grafičke prikaze i animacije za ilustraciju strujanja, raspodjele tlaka i aerodinamičkih sila.

5.1 Ograničenja studentske dozvole

Prema [10] studentska verzija Ansys softvera sadrži određena ograničenja koja će imati utjecaj na kvalitetu rezultata, kao i njihovog prikaza u nastavku rada. Veličine modela (u ovom slučaju okoliša) su ograničene na 1040000 ćelija/čvorova. Podržava uvoz neutralnih formata poput IGES i STEP, kao i *Parasolid* (XT) unutar *Ansys DesignModeler*-a. Za paralelno provođenje simulacija podržava do 16 jezgri procesora. Ova ograničenja čine studentsku verziju prikladnom za edukacijske svrhe, ali može biti nedovoljna za složenije ili veće projekte koji zahtijevaju veću računalnu snagu ili napredne značajke dostupne u komercijalnim verzijama.

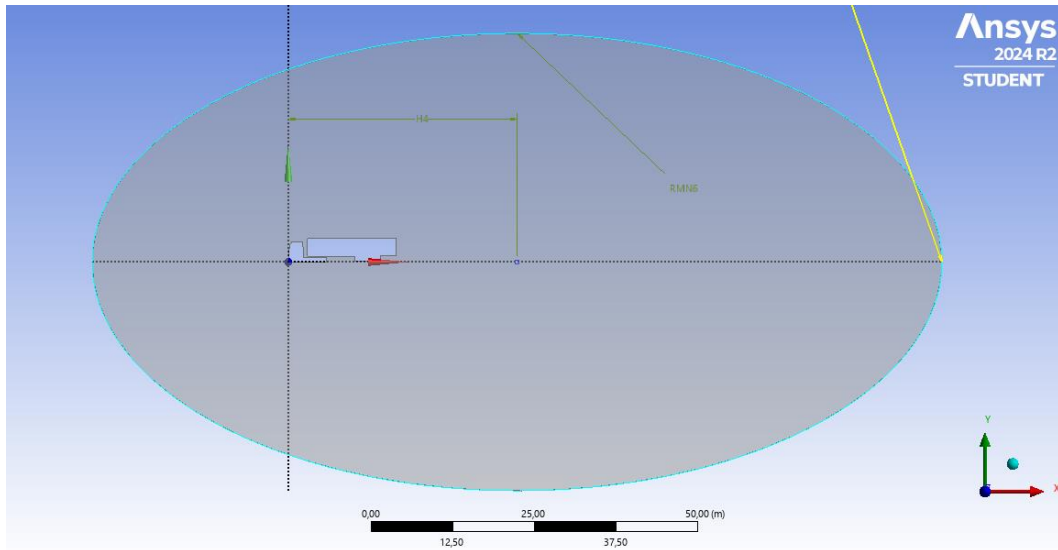
5.2 Kreiranje mreže (okoliša)

Generiranje visokokvalitetne mreže (engl. *mesh*) jedan je od najvažnijih koraka u procesu računalne dinamike fluida (CFD) jer izravno utječe na točnost, stabilnost i računalne zahtjeve simulacije. U slučaju aerodinamičke analize, kao što je tegljač s poluprikolicom, mreža mora biti dovoljno detaljna da ispravno uhvati ključne značajke strujanja poput graničnog sloja,

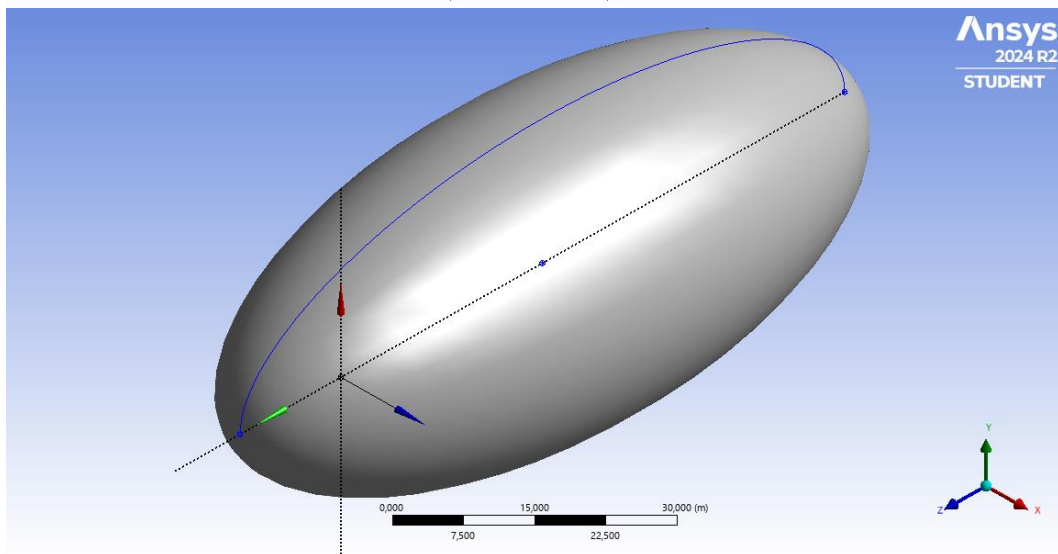
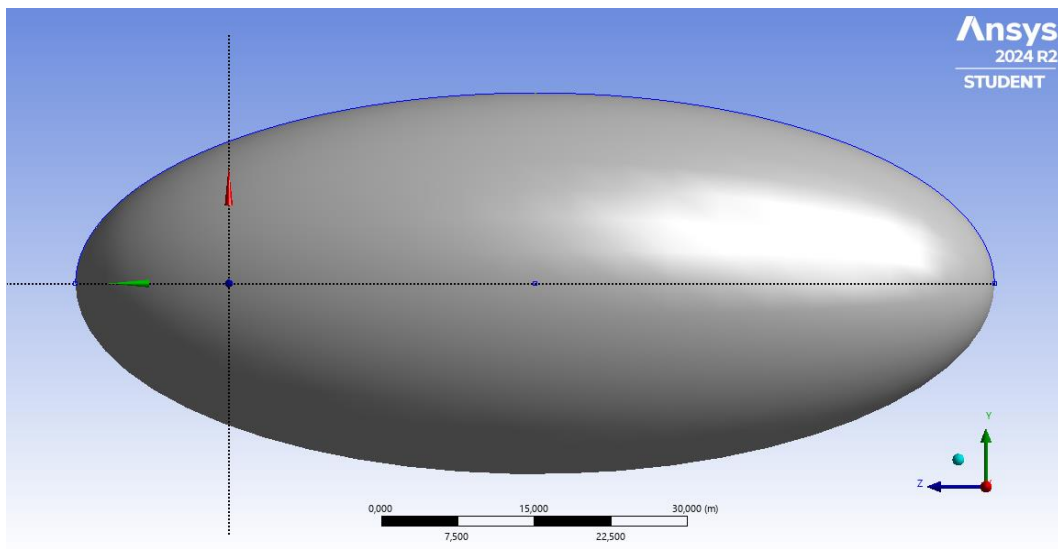
turbulentnih područja i odvajanja strujanja. Kreiranje mreže može se podijeliti u nekoliko općenitih postupaka koji su objašnjeni u nastavku rada.

Bitno je napomenuti da se u provedenim analizama u radu zanemaruje utjecaj ceste po kojoj bi tegljač vozio, stoga se tijelo analizira unutar velikog međuprostora gdje su granice okoliša dovoljno udaljene od vozila da nemaju utjecaja na njega.

Nakon kreiranih modela koji se uvezu kao datoteka *Parasolid* potrebno je postaviti domenu analize, odnosno okoliš u kojem se vozilo nalazi. Prostor mora biti dovoljno velik kako bi se izbjegao utjecaj rubnih uvjeta na rezultate simulacije. U obzir se moraju uzeti povratna strujanja na prednjem dijelu poluprikolice, strujanja na većoj udaljenosti iza poluprikolice (smirivanje turbulentnih vrtložnih strujanja) i deflektirana strujanja iznad i ispod vozila. Analizom različitih oblika geometrije okoliša određen je optimalni izgled domene – elipsa. Odabiranjem elipsastog izgleda okoliša optimiran je prostor koji će biti umrežen, a s ranije spomenutim ograničenjima studentske dozvole, smanjuje se broj elemenata unutar domene za jednake parametre veličine elementa. Za slučaj 2D analize strujanja elipsa je domena okoliša, u presjeku je veća od polazne elipse 3D domene koja je eliptično tijelo. Mala poluos elipse za 2D analizu iznosi 35 m, a za 3D 19 m. Velika poluos elipse za 2D analizu iznosi 65 m, a za 3D 45 m.



Slika 39. Geometrija okoliša za 2D analizu



Slika 40. Geometrija okoliša za 3D analizu

Unutar programa ponuđeno je više metoda mreženja (engl. *meshing*) koje su pogodne za različite slučajeve, odnosno prilagođavaju se geometriji i zahtjevima simulacije. Automatskim mreženjem omogućuje se brzo stvaranje mreže koristeći automatske postavke što je korisno za početne iteracije. Strukturirano mreženje koristi pravokutne elemente koji su raspoređeni u pravilnom uzorku što je optimalan izbor mreženja za slučajeve jednostavnije geometrije s pravilnim oblicima modela. Nestrukturirano mreženje koristi nepravilne trokutaste i tetraedarske elemente koji se lako prilagođavaju složenim geometrijama. Ovaj oblik mreženje/elementa se odabrao za slučajeve analizirane u ovom radu iako je geometrija tegljača s poluprikolicom pojednostavljena, ipak se i dalje sastoji od velikog broja različitih nepravilnih elemenata s prazninama između njih. Hibridnim mreženjem kombinira se strukturirana mreža (u područjima graničnog sloja) i nestrukturirana mreža (u ostatku domene) kako bi se omogućila ravnoteža točnosti i računalne učinkovitosti.

Kako je ranije u radu spomenut granični sloj i zbivanja unutar njega, te njegova važnost za utjecaj otpora fluida na tijela koja se gibaju kroz njega, veliku ulogu pri postavljanju simulacija ima oblikovanje mreže u područjima tik uz vozilo. U njima dolazi do velikih gradijenata brzine i smicanja koje mreža mora u što točnijem obliku obuhvatiti. Za to se koristi opcija *inflation* sloja. Ona omogućuje stvaranje slojeva ćelija blizu površine vozila koja su različite veličine i oblika od ostatka elemenata koji čine okoliš. Visina prvog sloja elemenata mora biti dovoljno mala kako bi se postigao točan y^+ , odnosno dimenzijski parametar koji definira razlučivost u blizini zida. Dimenzijski parametar y^+ je bezdimenzijska veličina koja se koristi u računalnoj dinamici fluida (CFD) za procjenu kvalitete mreže u blizini zida tijekom simulacija turbulentnog toka. On predstavlja relativnu udaljenost prvog sloja ćelija od zida u odnosu na veličinu graničnog sloja i turbulentnih svojstava toka. Parametar y^+ se računa prema sljedećem izrazu:

$$y^+ = \frac{\rho \cdot u_\tau \cdot y}{\mu} \quad [/] \quad 9)$$

gdje su:

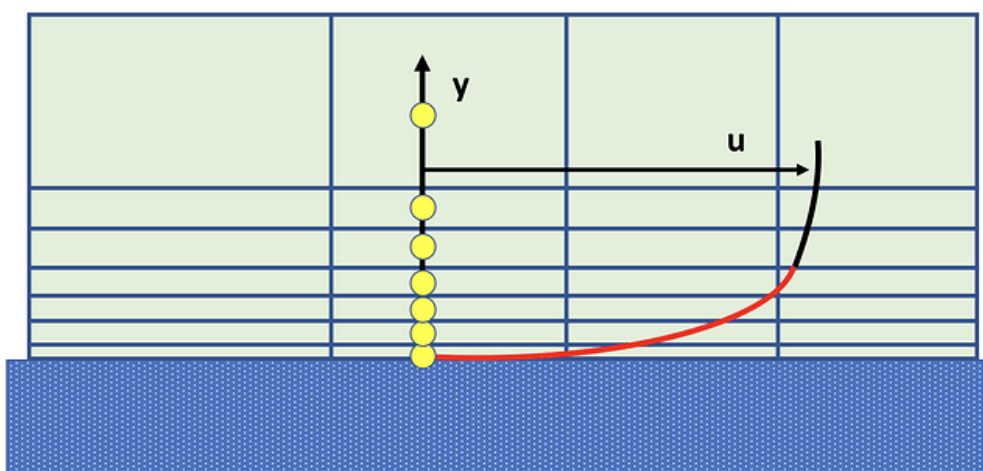
y – udaljenost središta prvog elementa od zida [m]

ρ – gustoća fluida [kg/m^3]

u_τ – brzina trenja [m/s]

μ – dinamička viskoznost fluida [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

Parametar y^+ služi za mjerenje omjera viskoznih i turbulentnih sila u graničnom sloju blizu stijenke (neki izvori nazivaju parametar y^+ Reynoldsovim brojem graničnog sloja fluida). Koristi se za određivanje odgovarajuće razlučivosti mreže kako bi simulacija pravilno opisala ponašanje protoka u blizini zida. U nastavku rada biti će objašnjen model turbulencije SST $k-\omega$ koji se koristio u analizama, a za njegovu pouzdanost dobivenih rješenja preporuča se iznos y^+ parametra < 2 jer ne koristi funkcije zida (engl. *wall functions*) pa prva ćelija mreže mora biti unutar viskoznog (veliki gradijent brzine) sloja.



Slika 41. Viskoзни sloj podijeljen na veći broj manjih elemenata sa gradijentnim povećanjem visine svakog idućeg sloja kako bi se obuhvatio utjecaj viskoznog sloja uz stijenku [12]

Zbog spomenutih ograničenja studentske dozvole za programski paket ANSYS potrebno je optimirati kreiranu mrežu elemenata koji predstavljaju okoliš. Kako bi se postigla ravnoteža između točnosti rezultata i količine elemenata, mreža je prilagođena u različitim dijelovima domene. Manji elementi su postavljeni na područje oko modela tegljača sa poluprikolicom, a veći na rubove same domene okoliša. Veličina elemenata mijenja se gradijentnim porastom, a tu je ulogu imao oblik okoliša (eliptičan) i pozicija modela tijela unutar domene okoliša jer omogućuje brže povećanje veličine elemenata na prednjoj strani modela (tegljača) gdje je gradijent fizikalnih veličina manji i ne utječe uvelike na konačni rezultat, a područja uz tijelo i iza njega gdje su veći gradijenti promjene brzine i tlaka imaju sporije povećanje veličine elemenata.

Nakon kreiranja željene mreže provjerava se njena kvaliteta kroz nekoliko veličina: iskrivljenost mreže - definira pravilnost oblika mreže, vrijednosti ispod 0,3 se smatraju optimalnima; omjer stranica elemenata - odnosi se na razlike u duljinama stranica ćelija,

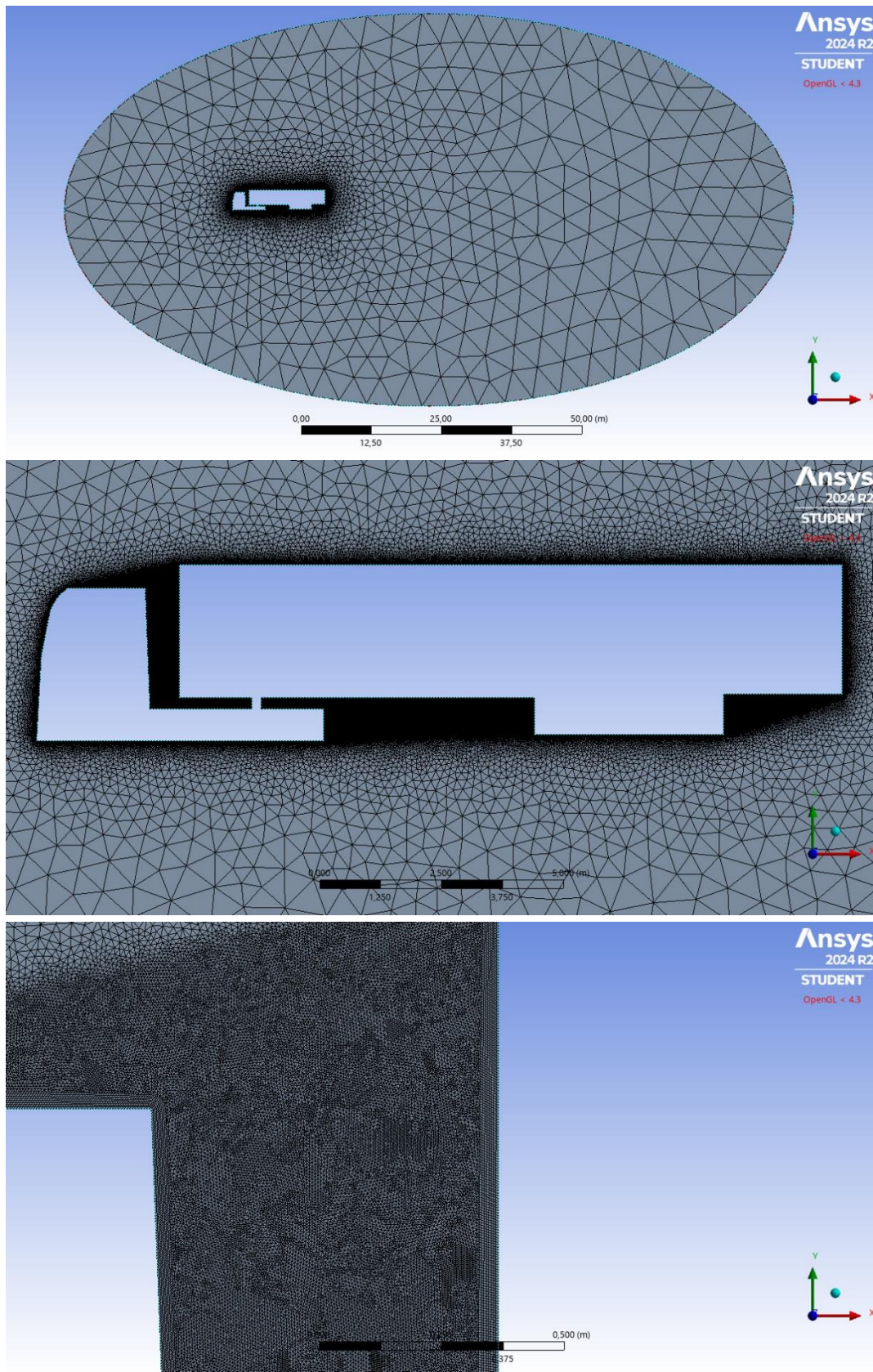
preveliki omjeri mogu uzrokovati numeričke nestabilnosti; ortogonalnost mreže - mjeri kutove između susjednih ćelija, visoka ortogonalnost (blizu 90°) poboljšava stabilnost simulacije.

ANSYS Fluent nudi opciju automatskog poboljšanja određenog postotka mreže u područjima sa velikim gradijentima i lošijom kvalitetom.

Zaključno je generiranje visokokvalitetne mreže u CFD analizi koji zahtijeva pažljivu pripremu, prilagodbu i validaciju. Pravilno definirana mreža osigurava točne rezultate uz minimalne računalne zahtjeve. Kod aerodinamičke analize tegljača s poluprikolicom, posebna pažnja posvećuje se graničnom sloju, ključnim područjima protoka i lokalnoj finoći mreže, čime se osigurava detaljna i pouzdana simulacija.

5.2.1 Vrijednosti parametara mreže za 2D simulaciju

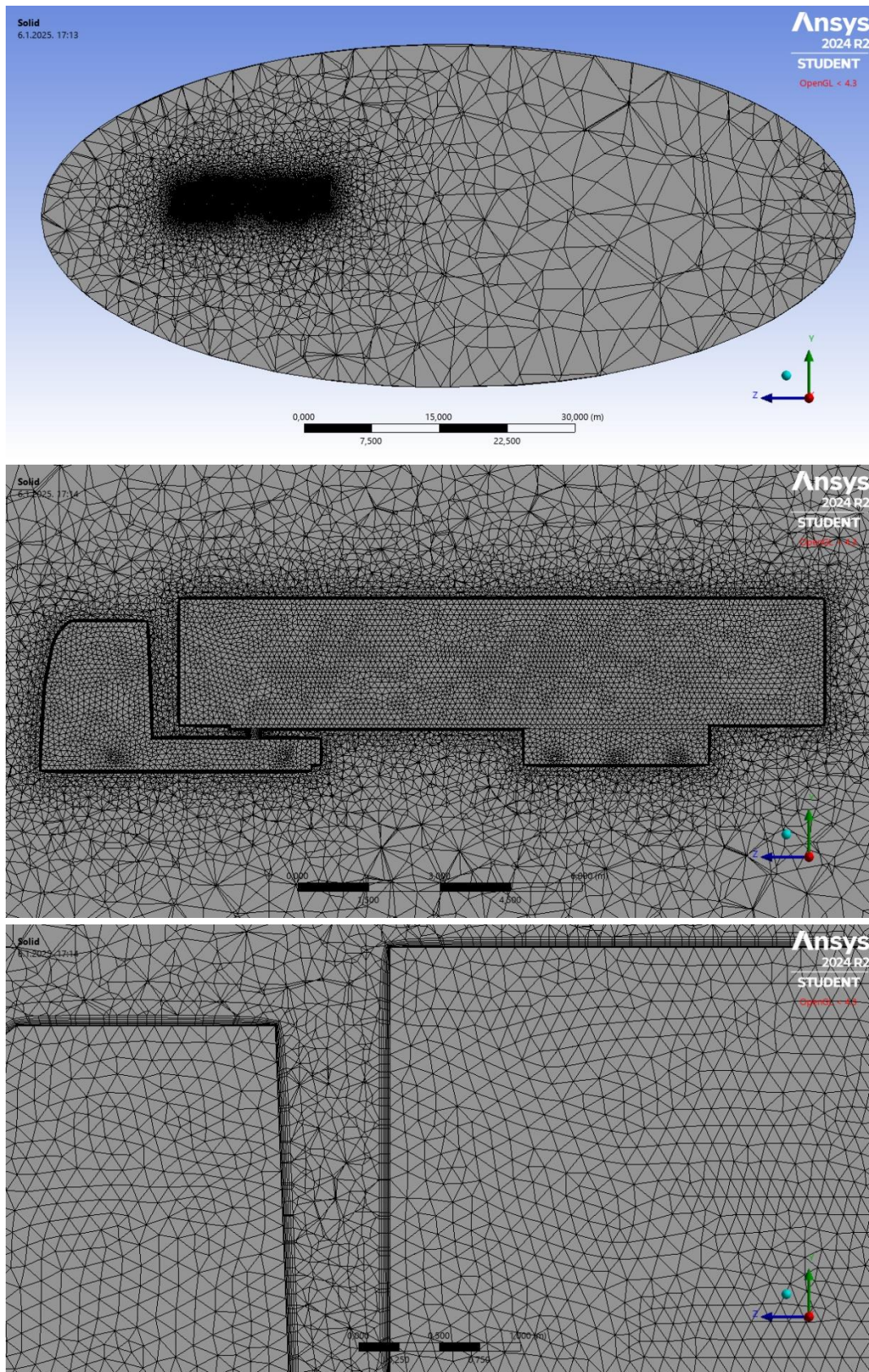
Za kreiranje mreže elemenata u 2D slučaju, uz objekt analize (vozilo) odabrana je veličina elemenata od 0,005 m koja se povećava s odmakom od bridova vozila prema rubu okoliša stopom rasta od 1,2 te dolazi do krajnje veličine od 5 m na samim rubovima. Granični sloj modeliran je inflacijskim slojem sa 8 podslojeva stopnim povećanjem od 1,2 i visinom prvog podsloja od 0,005 m. Na sljedećim slikama prikazana je 2D generirana mreža prema ranije objašnjenim parametrima. Odabir ovih vrijednosti biti će objašnjen u nastavku rada.



Slika 42. Generirana mreža za 2D slučaj - promjena veličine elemenata od vozila prema rubu okoliša; elementi uz vozilo; inflacijski sloj sa podslojevima

5.2.2 Vrijednosti parametara mreže za 3D simulaciju

Za kreiranje mreže elemenata u 3D slučaju, uz objekt analize (vozilo) odabrana je veličina elemenata od 0,11 m koja se povećava s odmakom od bridova vozila prema rubu okoliša stopom rasta od 1,2 te dolazi do krajnje veličine od 8 m na samim rubovima. Granični sloj modeliran je inflacijskim slojem sa 7 podslojeva stopnim povećanjem od 1,2 i visinom prvog podsloja od 0,005 m. Na sljedećim slikama prikazana je 3D generirana mreža prema ranije objašnjenim parametrima. Odabir ovih vrijednosti biti će objašnjen u nastavku rada.



Slika 43. Generirana mreža za 3D slučaj - promjena veličine elemenata od vozila prema rubu okoliša; elementi uz vozilo; inflacijski sloj sa podslojevima

5.3 Određivanje parametara simulacije

U fazi postavljanja simulacije u ANSYS Fluentu, donose se ključne odluke za definiranje fizikalnih modela, numeričkih metoda i rubnih uvjeta, osiguravajući precizne rezultate simulacije prilagođene specifičnom problemu. Za analizu faktora otpora vozila, odabrane konfiguracije pružaju ravnotežu između točnosti i računalne učinkovitosti. Kako su ranije u radu spomenuta ograničenja studentske dozvole ANSYS programa, ona će indirektno utjecati na odabire određenih parametara simulacije preko kvalitete mreže koja je generirana za analizirane slučajeve.

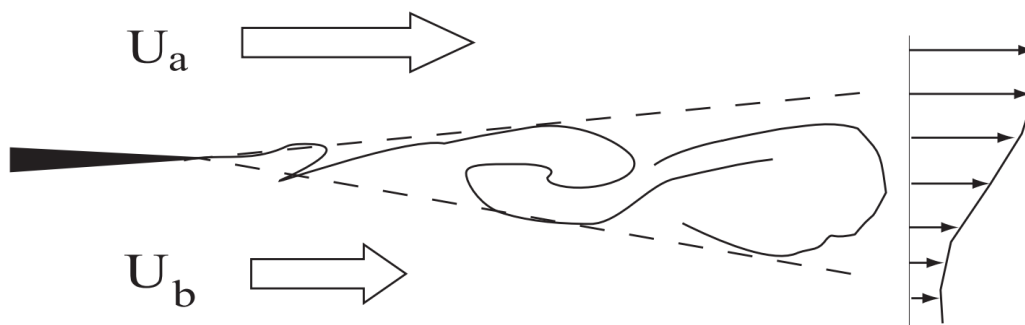
Za odabir rješavača (*Solver-a*) ponuđene su dvije mogućnosti: rješavač na temelju tlaka i rješavač na temelju gustoće. Razlikuju se po načinu rješavanja jednadžbe kontinuiteta, momenta, energije i prijenosa tvari. Rješavač temeljen na tlaku rješava jednadžbu tlaka s ciljem očuvanja mase i može se koristiti u većini simulacija. Kod rješavača temeljenog na tlaku postoje dva algoritma: segregirani i spregnuti. Kod segregiranog rješavača temeljenog na tlaku, upravljачke jednadžbe rješavaju se sekvencijalno, dok se kod spregnutog rješavača jednadžbe kontinuiteta i momenta rješavaju istovremeno. Rješavač temeljen na gustoći (s eksplicitnom ili implicitnom formulacijom) rješava jednadžbu kontinuiteta zajedno s jednadžbama momenta, energije i prijenosa tvari kao spregnuti sustav jednadžbi. Dodatne jednadžbe (npr. za turbulenciju ili zračenje) rješavaju se sekvencijalno. Općenito, rješavač temeljen na tlaku tradicionalno se koristi za tokove koji su nestlačivi ili slabo stlačivi (granica se uzima $< 0,3$ Mach-a), međutim, spregnuti rješavač temeljen na tlaku može se nositi s umjereno stlačivim tokovima. Rješavač temeljen na gustoći uglavnom se preporučuje za tokove velike brzine i visoke stlačivosti ($> 0,3$ Mach-a). Dostupnost modela u Fluent-u, performanse rješavača i veličina mreže (spregnuti rješavači zahtijevaju više memorije za velike mreže) tri su kriterija za odabir odgovarajućeg rješavača. [12]

U slučaju ovog rada razmatrala se vožnja tegljača s poluprikolicom pri konstantnoj brzini od 90 km/h (25 m/s) bez utjecaja protuvjetra/bočnih naleta vjetra. Prethodno pojašnjenim razlikama među rješavačima koji se nude u paketu ANSYS Fluent, a analizom toka koji ima brzinu strujanja od 90 km/h koja je daleko od brzina pri kojima bi se tok smatrao stlačivim, ipak se odabire suprotan rješavač od onog koji bi se trebao koristiti (rješavač na temelju gustoće). Neuspjelim dobivanjem konvergencije rješenja s rješavačem temeljenom na tlaku rezultiralo je ispitivanjem ponašanja rješavača temeljenom na gustoći koji je rezultirao zadovoljavajućim vrijednostima. Pri brzini od 90 km/h, iako je tok tehnički nestlačiv, potpuno

spregnuti pristup rješavača temeljenog na gustoći može robusnije obraditi složene interakcije toka (poput zona recirkulacije, područja iza vozila ili odvajanja toka). Ovaj pristup može pomoći u prevladavanju problema s konvergencijom u regijama gdje rješavači temeljeni na tlaku imaju poteškoća s dosljednim povezivanjem tlaka i brzine. Rješavač temeljen na tlaku osjetljiviji je na kvalitetu mreže, osobito u područjima s naglim gradijentima tlaka ili zonama odvajanja oko kamiona. Bilo kakve nepravilnosti u mreži mogu poremetiti konvergenciju. Ako mreža nije optimizirana (npr. ima nepravilan omjer stranica ćelija ili visok stupanj iskrivljenja), rješavač temeljen na gustoći može bolje podnijeti te nedostatke zahvaljujući svojoj implicitnoj obradi svih varijabli. Posljedica odabira SST $k-\omega$ modela turbulencije (detaljnije objašnjeno u nastavku) je osjetljivost na razlučivost blizu zida (niske y^+ vrijednosti). Ako parametri ćelija blizu zida nisu ispravni, rješavač temeljen na tlaku mogao bi imati poteškoća u ispravnom modeliranju učinaka graničnog sloja, što može dovesti do divergencije rezultata. Rješavač temeljen na gustoći mogao bi ublažiti neke od tih problema zahvaljujući robusnijem povezivanju varijabli toka. Rješavač temeljen na tlaku obično zahtijeva precizno podešavanje faktora pod-opuštanja za postizanje konvergencije u složenijim modelima. Ako ti parametri nisu pažljivo prilagođeni, rješavač može propasti u konvergenciji (vrijednosti iteracija su relativno prevelike da bi ikada došlo do konvergencije). Rješavač temeljen na gustoći, budući da je potpuno spregnut, često konvergira jednostavnije bez potrebe za opsežnim podešavanjem parametara. Unatoč korištenja rješavača temeljenog na gustoći, program i dalje gleda tok pri brzini od 90 km/h kao nestlačivi. Rješavač zanemaruje varijacije gustoće za tokove s niskim Mach-ovim brojem ako su nametnute pretpostavke nestlačivosti. [11]

U literaturama se za model turbulencije u CFD analizama preporučuju najčešće dva oblika – $k-\varepsilon$ i SST $k-\omega$ pogotovo za analize aerodinamika vozila. Modeli su ključni za detaljno simuliranje ponašanja složenih strujanja fluida, posebno u slučajevima koji uključuju odvajanje toka, recirkulaciju (povratno strujanje) i interakcije u graničnom sloju. $k-\varepsilon$ model je model temeljen na dvije jednadžbe u kojem se rješavaju jednadžba turbulentne kinetičke energije (k) i jednadžba stope disipacije energije (ε). Ovaj model posebno je učinkovit za simulaciju potpuno razvijenih turbulentnih tokova udaljenih od stijenki, poput onih u slobodnim smičnim slojevima (slojevi različitih brzina koji su odvojeni zaprekom spajaju se nakon zapreke i uslijed razlika u brzinama stvaraju područje poremećenog toka kojem širina postepeno raste – stražnji kraj poluprikolice – slika 43 [14]) ili u dalekom poremećenom području iza vozila. Međutim, ovisnost o funkcijama zida i ograničena razlučivost blizu stijenke čine ga manje pogodnim za strujanja koja uključuju snažno odvajanje graničnog sloja ili značajne nepovoljne gradijente

tlaka. S druge strane, SST $k-\omega$ (*Shear Stress Transport $k-\omega$*) model kombinira prednosti $k-\omega$ modela za područja blizu stijenki i $k-\epsilon$ modela za ponašanje u daljem području od vozila. Ovaj model nesmetano prelazi između ta dva pristupa, koristeći $k-\omega$ unutar graničnog sloja kako bi precizno simulirao strujanja blizu stijenki te prelazeći na $k-\epsilon$ u slobodnom strujanju kako bi osigurao stabilnost i točnost. Ovaj hibridni pristup čini SST $k-\omega$ model posebno pogodnim za primjene koje uključuju odvajanje toka, snažne nepovoljne gradijente tlaka ili složene geometrije, poput onih koje se javljaju u aerodinamičkim analizama vozila.



Slika 44. Primjer stvaranja poremećenog toka iza tijela ima veliku važnost pri analizi i modeliranju turbulentnog strujanja

Kreiranjem granica okoliša eliptičnog izgleda (jedna zajednička granica) kao rubni uvjet odabrana je opcija *pressure far-field*-a kojom se definirala brzina i smjer nastrujavanja zraka. Taj rubni uvjet idealan je za aerodinamičke probleme van vozila jer precizno modelira ponašanje strujanja na beskonačnoj udaljenosti, oponašajući uvjete otvorene atmosfere daleko od vozila. Zbog korištenja tog rubnog uvjeta kao fluid unutar okoliša odabran je zrak kojeg program razmatra idealnim plinom (a i zbog odabira rješavača). Odabir stacionarnog vremenskog pristupa (*steady-state*) omogućuje pretpostavku da protok doseže stabilnu konfiguraciju, čime se povećava računalna učinkovitost jer prolazni efekti nisu primarni fokus u ovakvim analizama. Implicitna formulacija povećava stabilnost i omogućuje korištenje većih vremenskih koraka, što ubrzava konvergenciju uz očuvanje numeričke pouzdanosti. Prostorna diskretizacija temeljena na Green-Gauss čvorovima odabrana je za procjenu gradijenata, pružajući veću točnost u usporedbi s pristupom temeljenim na ćelijama, što je posebno važno kod nestrukturiranih mreža često korištenih za složene geometrije vozila. Za promjenjive veličine protoka, turbulentnu kinetičku energiju i stopu disipacije turbulencije, korištenje diskretizacije drugog reda uzvodno (*second-order upwind*) povećava točnost smanjenjem numeričke disprezije i pruža bolju razlučivost gradijenata. Ovo je posebno važno u područjima s velikim promjenama brzine, poput površine vozila gdje tlak i trenje igraju ključnu ulogu.

Okolišni tlak ujednačenog strujanja zraka iznosi 101325 Pa.

Ovim postavkama simulacija osigurava se da numerički okvir rješenja odgovara fizikalnim karakteristikama protoka uz održavanje računalne učinkovitosti. Svaka odluka doprinosi preciznom predviđanju aerodinamičkog ponašanja vozila, osiguravajući pouzdane rezultate faktora otpora, što je ključno za optimizaciju konstrukcijskih rješenja nadogradnih elemenata.

6. REZULTATI SIMULACIJA STRUJANJA ZRAKA

U ovom poglavlju sustavno će se analizirati rezultati aerodinamičke analize, počevši s naglaskom na dvodimenzionalnoj (2D) simulaciji toka. Analiza 2D toka služi kao temeljni korak koji pruža uvid u osnovne karakteristike toka oko tegljača s poluprikolicom i ističe ključna područja interesa, poput zona odvajanja, ponašanja struje u područjima poremećenog toka i ukupne raspodjele tlaka. Ovaj pojednostavljeni pristup omogućuje preliminarno razumijevanje kako konstrukcijska rješenja ili njihove promjene utječu na aerodinamičke performanse, posebno u smislu faktora otpora.

Nakon analize 2D rezultata, provest će se detaljnija i svestranija analiza koristeći trodimenzionalne (3D) simulacije toka. Rezultati 3D simulacija obuhvaćaju složene interakcije koje nisu u potpunosti prikazane u 2D analizi, poput trodimenzionalnih struktura u poremećenom području toka, poprečnih tokova i interakcija turbulencijskih vrtloga na rubovima vozila. Usporedbom 2D i 3D rezultata, cilj ovog rada je identificirati trendove, potvrditi početna opažanja i otkriti eventualne razlike ili dodatne fenomene koji se javljaju u potpuno trodimenzionalnom kontekstu. Ovaj dvostupanjski pristup, započinjanje s 2D analizom i prijelazom na 3D, osigurava sveobuhvatnu procjenu aerodinamičkog ponašanja, omogućujući dublje razumijevanje kako dinamika toka utječe na faktor otpora i ukupne performanse vozila.

Za pretpostaviti je da će rezultati u slučaju 2D strujanja biti veći od rezultata za slučaj 3D strujanja, ali u ovome radu biti će suprotno. Program promatra 2D analizu kao beskrajno široko tijelo te se strujanja ne odvijaju s bočnih strana vozila, već samo preko i ispod. Do problema dolazi zbog utjecaja različitosti finoće mreže, što će biti objašnjeno u nastavku rada.

U analizama će rezultati biti prikazani grafički i s vrijednostima računalno izračunatih C_d -ova za različite slučajeve analize.

Neke od rezultata usporediti će se sa rezultatom polazne geometrije i izraziti će se relativno smanjenje rezultata C_d . Relativno smanjenje će se računati prema sljedećoj formuli:

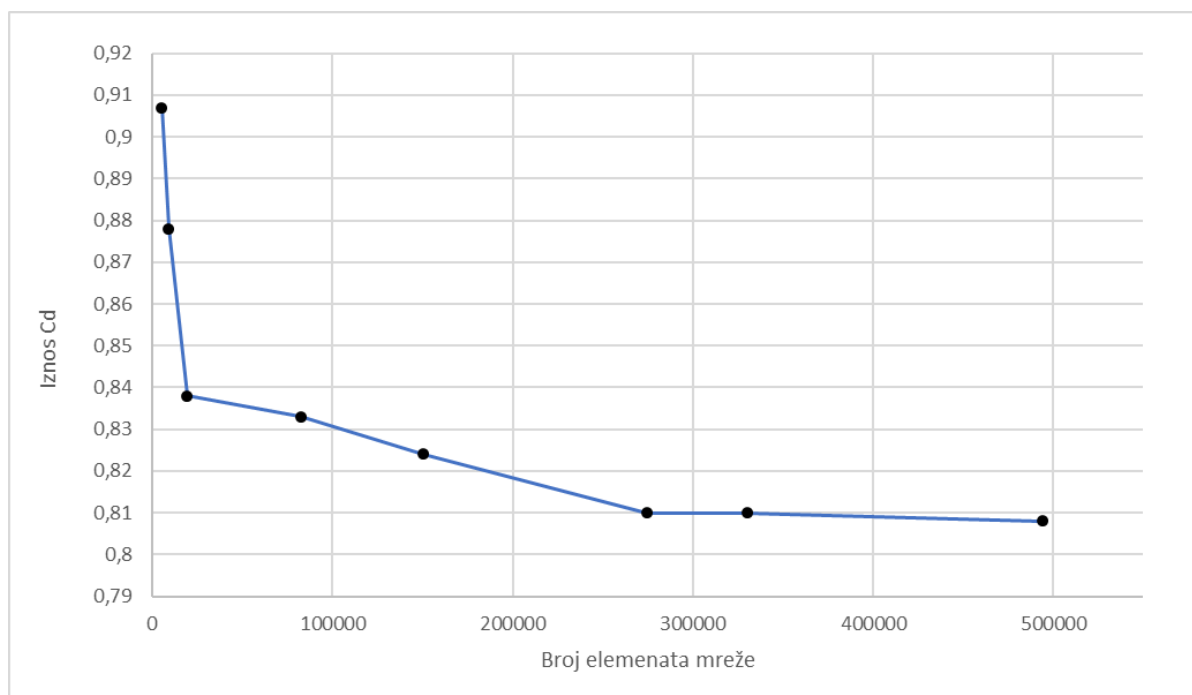
$$\Delta C_d = \frac{C_{d-polazno} - C_{d-promatrano}}{C_{d-polazno}} \cdot 100 \quad [/\] \quad 10)$$

6.1 Rezultati 2D analize strujanja

Ranije objašnjenim i obrazloženim načinom kreiranja mreže i utjecajem mrežnih parametara na konačni rezultat, provedena je analiza utjecaja veličine elemenata na promjenu rješenja. Kao mjera određivanja optimalnog broja elemenata mreže u svrhu postizanja najboljih rezultata s što manjom zahtjevnošću procesne energije te analizom samih rezultata utjecaja kvalitete mreže na dobivene rezultate, proveden je niz simulacija za polaznu geometriju kojima se utvrdio najbolji omjer broja elemenata i krajnjeg rezultata C_d . Broj elemenata se mijenjao s povećanjem/smanjenjem varijable veličine elemenata uz analizirani objekt (vozilo) bez mijenjanja parametara inflacijskog sloja i veličine elemenata uz krajnji rub okoliša. Dobivene vrijednosti su prikazane u tablici 1, a na slici 44 su isti rezultati prikazani pomoću grafa.

Tablica 1. Ovisnost iznosa faktora otpora C_d za polaznu geometriju o broju elemenata 2D mreže

Broj elemenata	5412	9059	19417	82505	150444	274859	330477	493926
C_d polazne geometrije	0,907	0,878	0,838	0,833	0,824	0,810	0,810	0,808



Slika 45. Graf promjene vrijednosti faktora otpora zraka C_d za polaznu geometriju u odnosu na povećanje/smanjenje veličine elemenata uz vozilo (povećanje/smanjenje broja elemenata u mreži), 2D slučaj

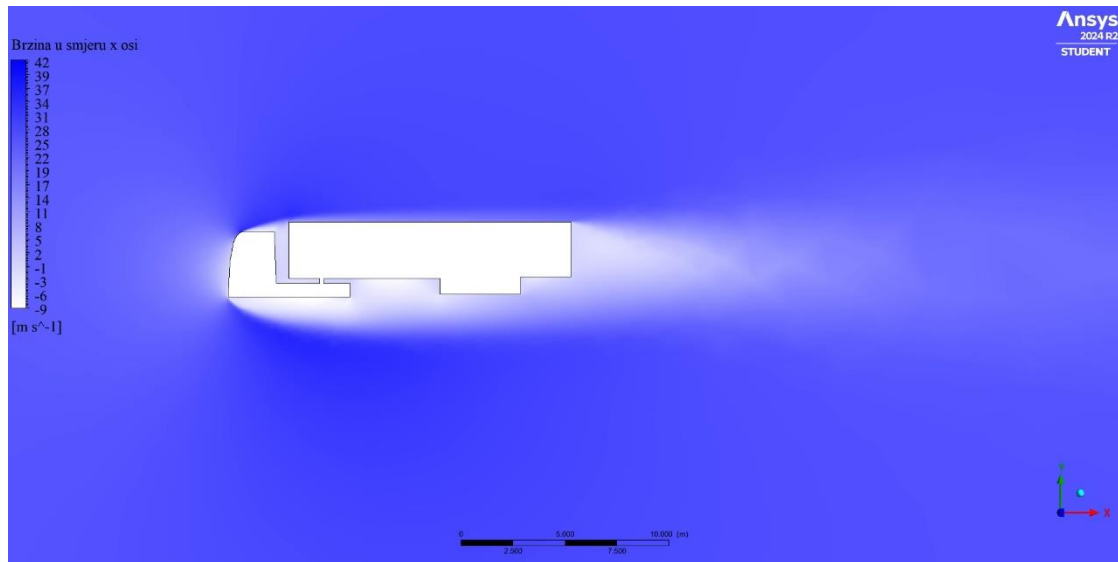
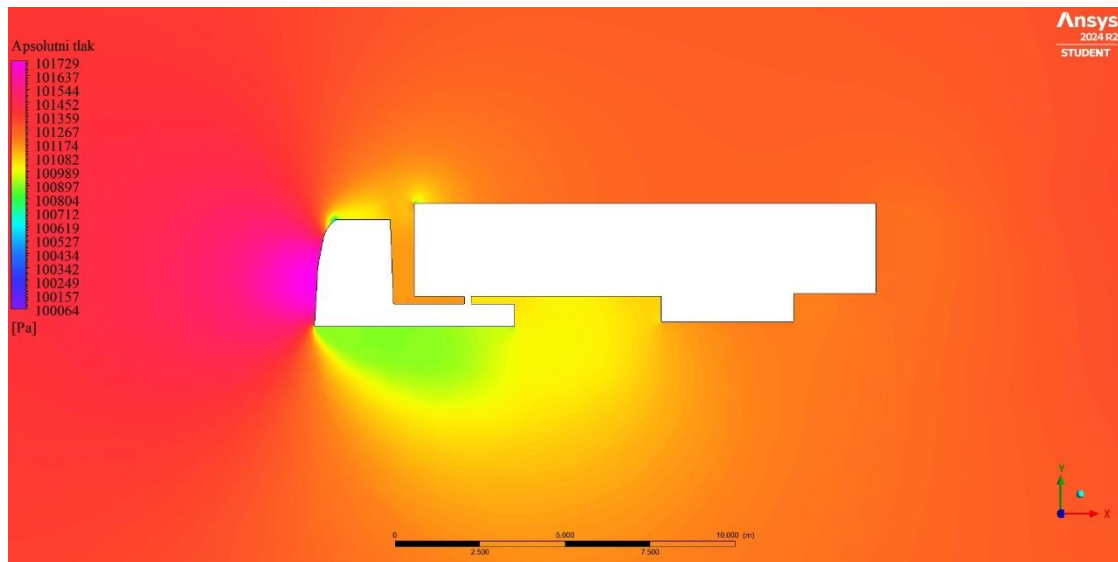
Maksimalan broj elemenata koji se analizirao je 493926 za ovaj oblik okoliša. Ta količina elemenata postigla se veličinom elemenata uz vozilo jednakoj visini prvog podsloja inflacijskog sloja – 0,005 m. Daljnjim smanjivanjem veličine elemenata ispod visine prvog podsloja inflacijskog sloja rezultiralo bi narušavanjem kvalitete mreže te nadalje narušavanjem konvergencije rješenja (upitno dobivanje bilo kakve konvergencije). Provedenom simulacijom sa spomenutim slučajem nije postignuta konvergencija rješenja, odnosno graf konvergencije se nije ustabilio.

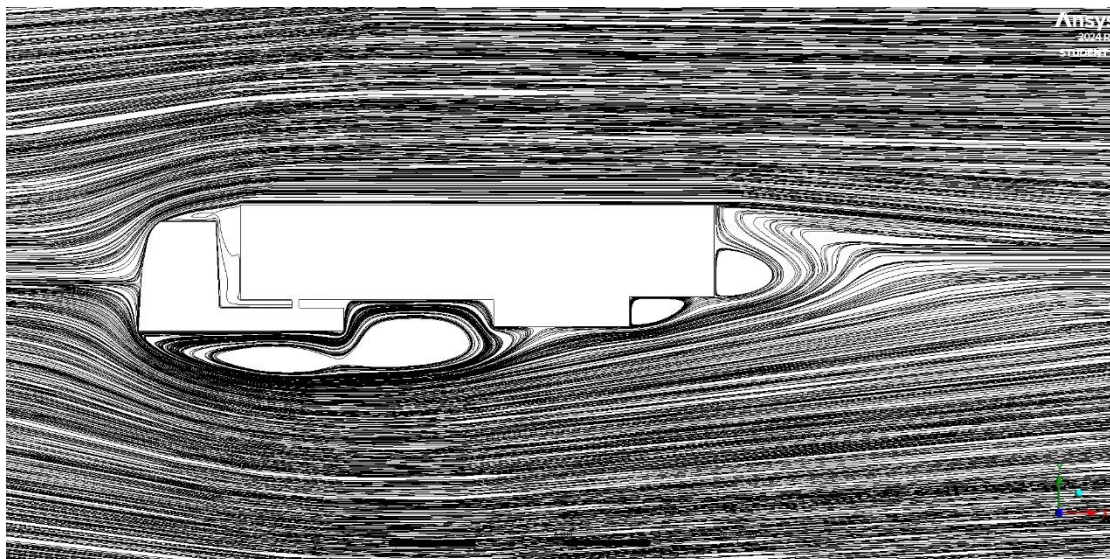
Analizom tablice 1 i grafa na slici 44 može se zaključiti da povećavanjem veličine elemenata uz vozilo (smanjenjem ukupnog broja elemenata) konačno rješenje raste po apsolutnoj vrijednosti. Razlog tomu (objašnjeno u podnaslovu 5.2 Kreiranje mreže) je lošija kvaliteta mreže koja ima direktan utjecaj na povećanje netočnosti rješenja. S druge strane rješenje ostaje nepromijenjeno (mala razlika u trećoj decimali) za broj elemenata od 270000 do 493926. Relativna promjena rješenja korištenjem velikih elemenata do onih koji će se koristiti u radu iznosi 10,92%. Stoga se za slučajeve analize 2D strujanja koristila mreža s parametrima pri kojima se osnovnom geometrijom vozila dobiva 493926 elemenata, odnosno veličina

elemenata uz vozilo iznosi 0,005 m. Za analizu ostalih slučajeva samo će se mijenjati (ubacivati umjesto prethodne geometrije) geometrija vozila bez promjene odabranih parametara mreže.

6.1.1 2D analiza polazne geometrije bez nadogradnih elemenata

Na sljedećim slikama prikazane su vrijednosti apsolutnog tlaka okoliša oko vozila, polja brzine u smjeru strujanja oko vozila i strujnice za slučaj 2D strujanja.





Slika 46. Gore prema dolje: Apsolutni tlak okoliša oko vozila, polja brzine u smjeru strujanja osi x i strujnice oko vozila polazne geometrije za 2D slučaj

Prikaz okolišnog tlaka oko vozila ukazuje na zonu višeg tlaka na prednjoj površini tegljača uslijed nalijetanja plohe okomito na samo strujanje. Zrak se odbija od prednje plohe iznad i ispod kabine tegljača gdje dolazi do stvaranja vrtloga uslijed zona s različitim tlakovima. Zanimljivo je za primijetiti da zatvaranjem zone između kabine i poluprikolice stavljanjem klina kao zida ne dolazi do stvaranja turbulentne regije već regije ustaljenog tlaka i niskih povratnih strujanja, odnosno mirne zone. Tomu je uzrok analiza 2D strujanja, u nastavku će se pokazati primjer i za situaciju 3D strujanja gdje turbulencije stvara struja zraka koja prolazi oko klina i omogućava strujanje zraka u tom području. Velike zone povratnih strujanja i vrtloženja stvaraju se ispod i iza vozila kao posljedica regija različitih iznosa tlakova.

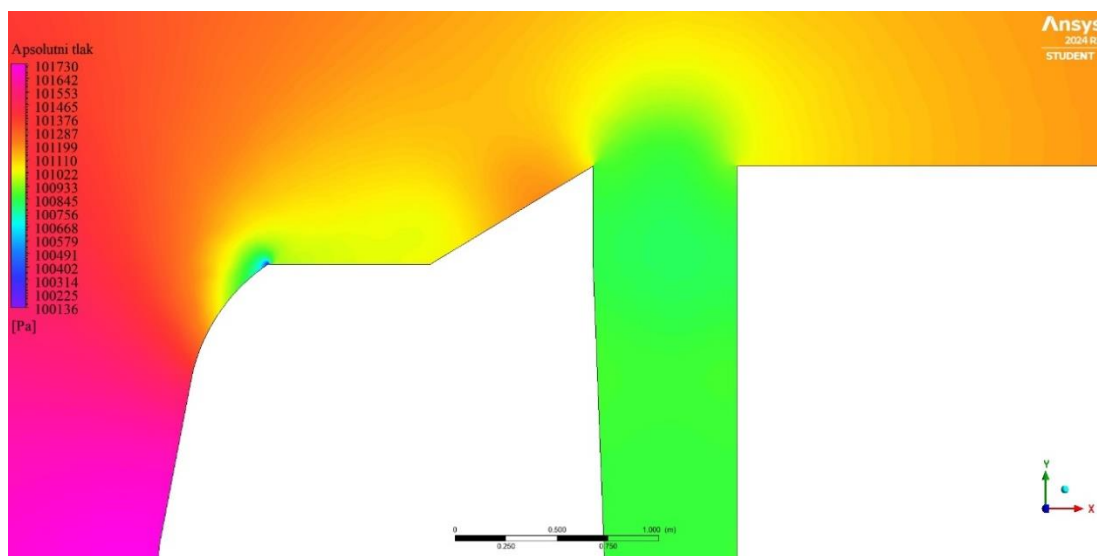
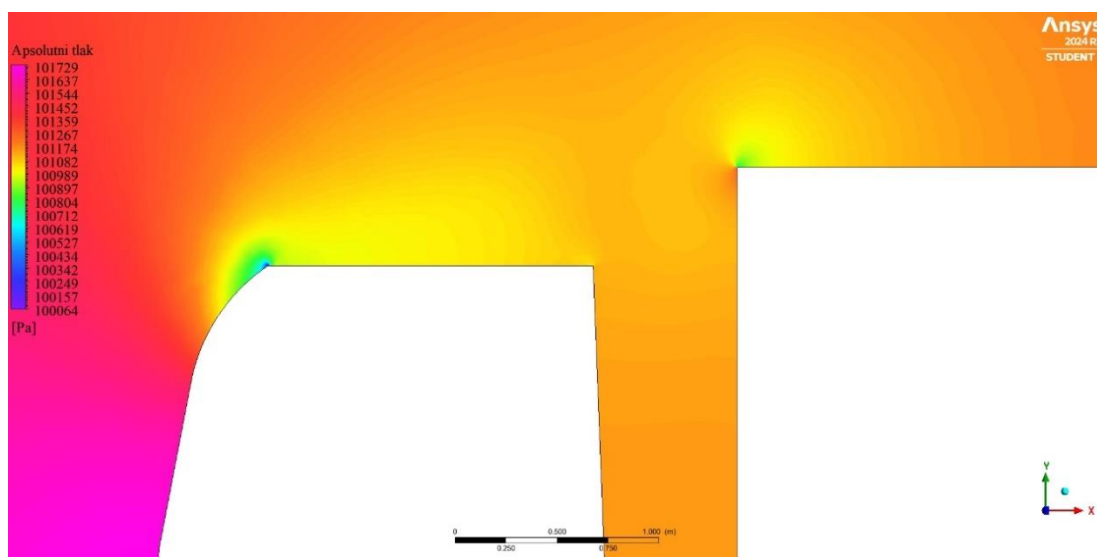
6.1.2 2D analiza utjecaja nadogradnje krovnog spojlera tegljača (2D-A)

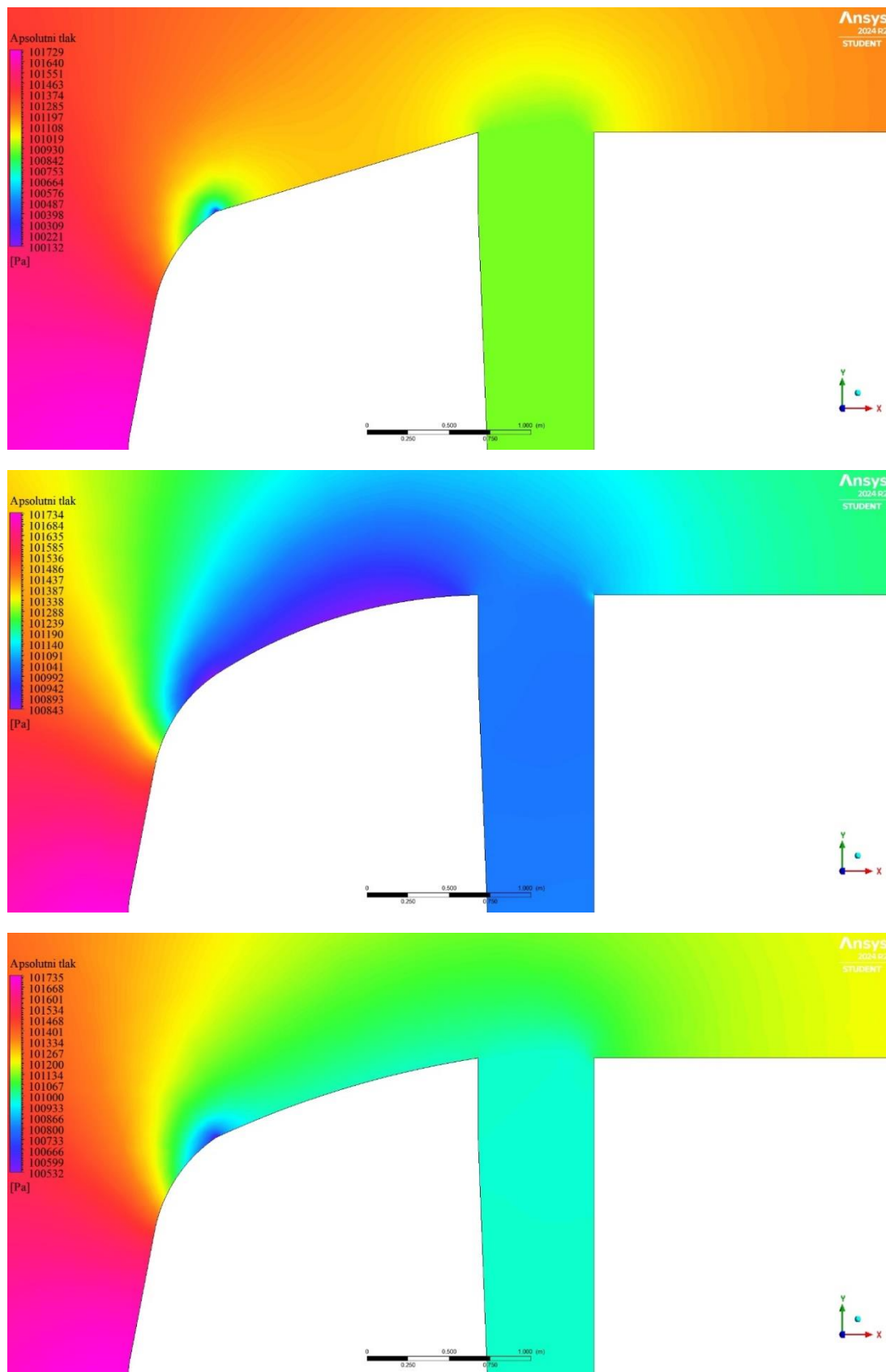
Tablica 2. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike krovnog spojlera tegljača u slučaju 2D strujanja

Model	C_d	Model	C_d	Model	C_d	Model	C_d
2D-A1	0,821	2D-A3	0,778	2D-A3-4000	0,758	2D-A3-6000	0,766
2D-A2	0,790	2D-A3-3000	0,750	2D-A3-5000	0,61		

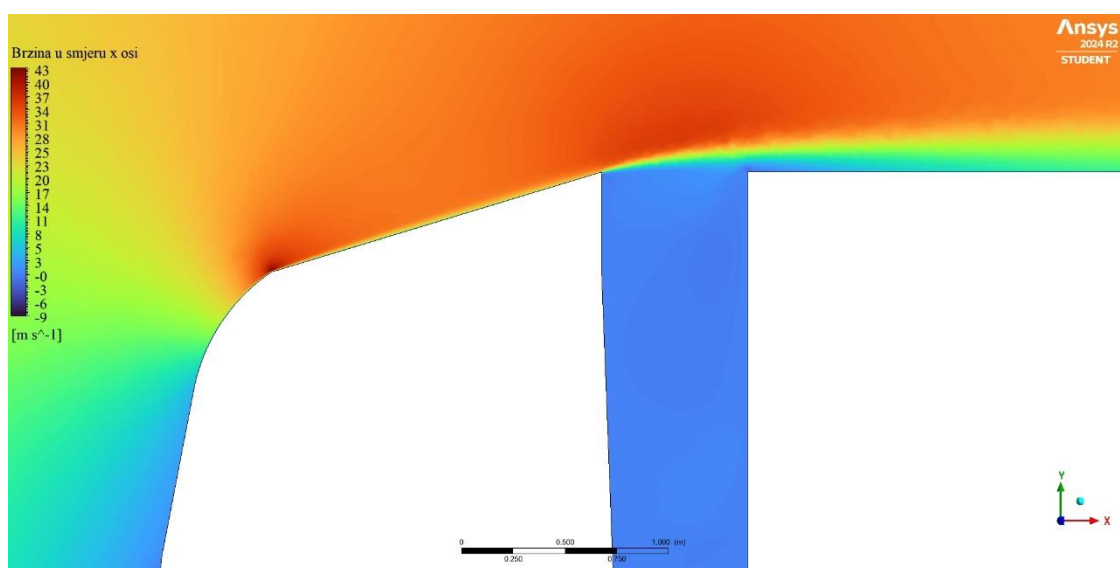
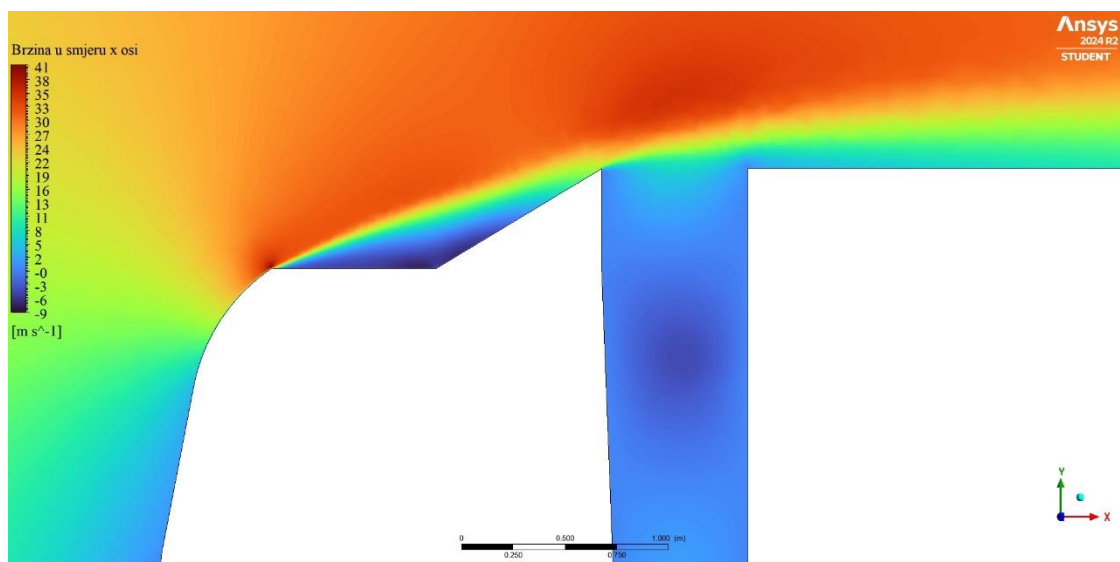
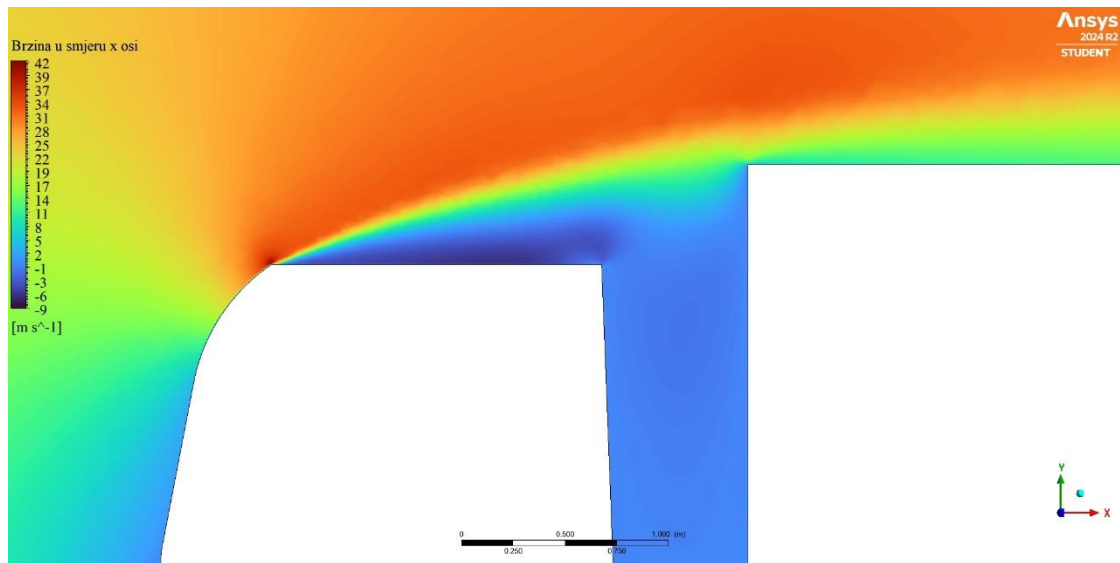
Dodavanjem spojlera na krov kabine tegljača omogućava se rano prijanjanje strujanja na krov poluprikolice. Iako se u slučajevima nadogradnje stvara regija nižeg tlaka između kabine i

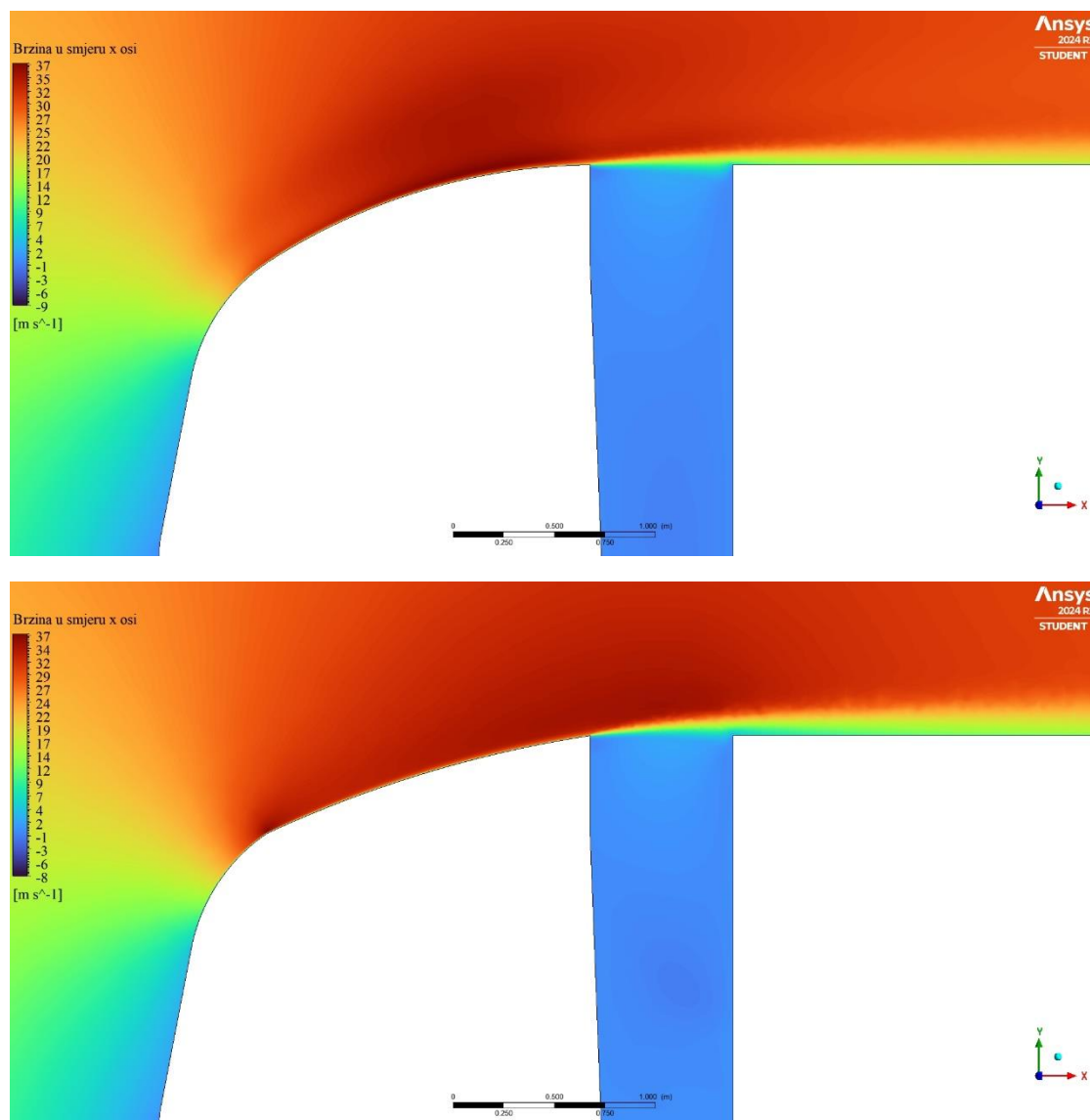
poluprikolice (jer nema bočnih strujanja zraka) kojoj se apsolutni iznos smanjuje (odnosno raste apsolutni iznos podtlaka) u odnosu na polaznu geometriju, negativni utjecaj podtlaka ne uspijeva povući fluid u zonu između kabine i prikolice već strujnice prestrujavaju rupu i nastavljaju dalje uz stijenku vozila. Samo vrtloženje nije u potpunosti kontrolirano ili spriječeno, ali je manje u odnosu na geometriju bez krovnog spojlera. Također, kako ćemo vidjeti u nastavku rada, za primjer 2D strujanja relativno smanjenje faktora otpora za modele vrste A je puno manje nego za modele u 3D strujanju. Relativno smanjenje faktora otpora zraka uspoređujući polaznu geometriju i slučaj geometrije 2D-A s kojim se postigao najniži iznos faktora iznosi 7,18%. Na idućim slikama će biti prikazana polja apsolutnog tlaka u regiji između kabine i poluprikolice, a zatim polja brzine strujanja u smjeru x.





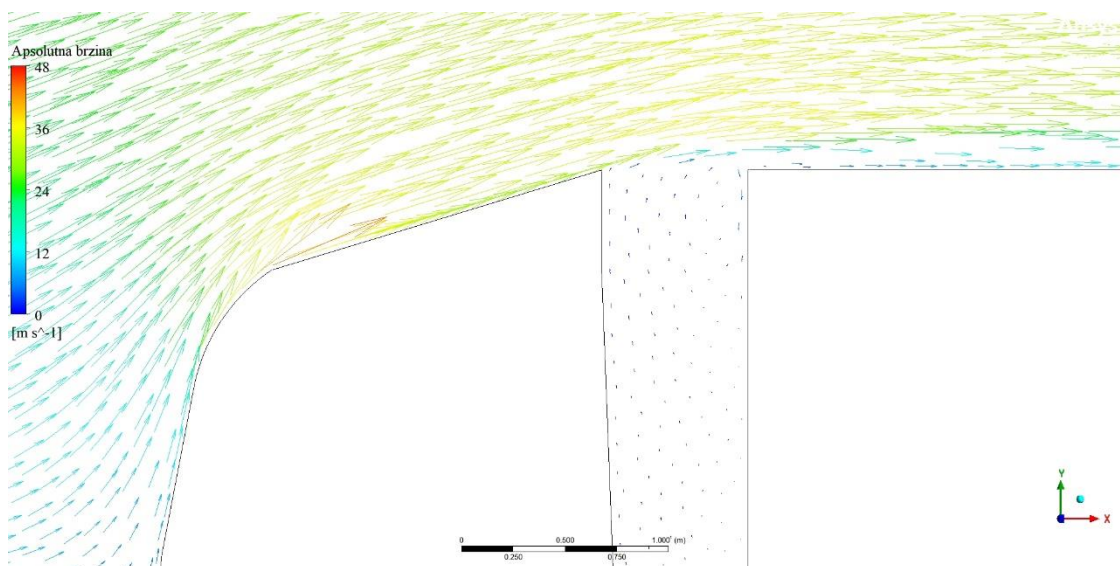
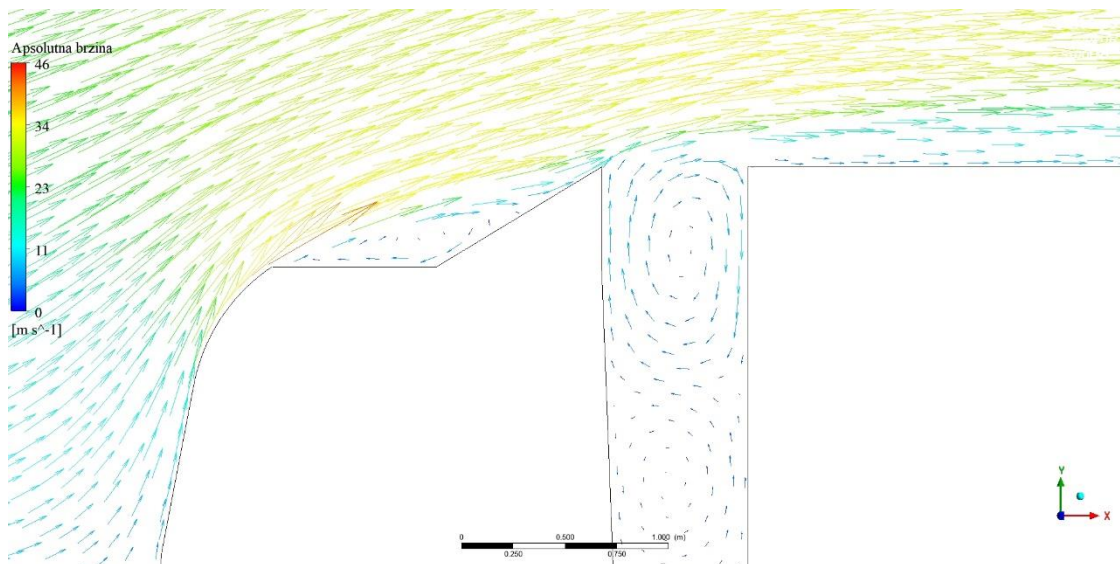
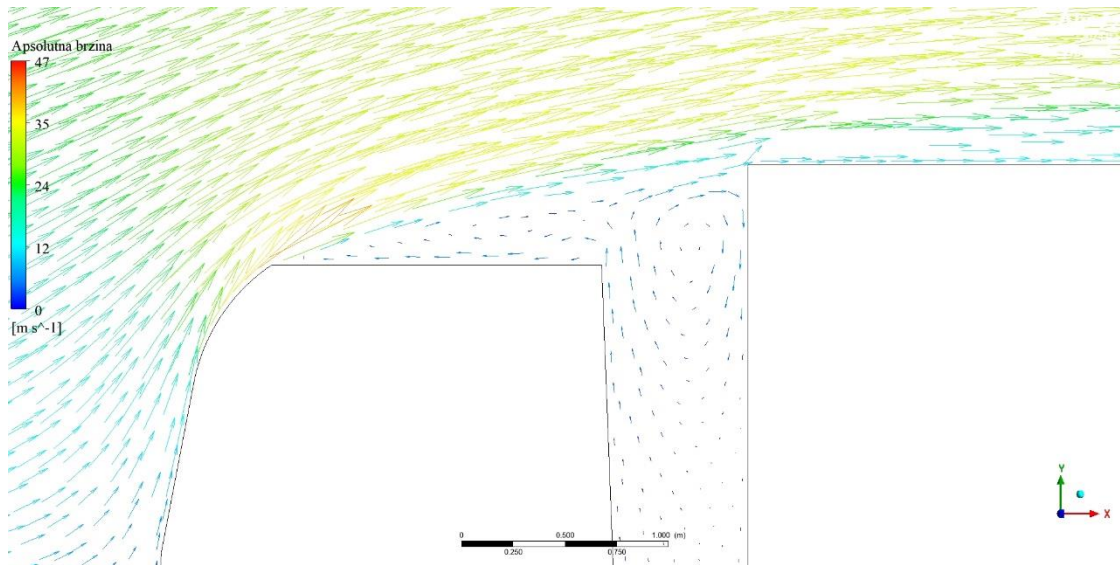
Slika 47. Promjena polja lokalnog tlaka u ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 2D slučaj; od gore prema dolje: 2D-polazna geometrija, 2D-A1, 2D-A3, 2D-A3-3000, 2D-A3-6000

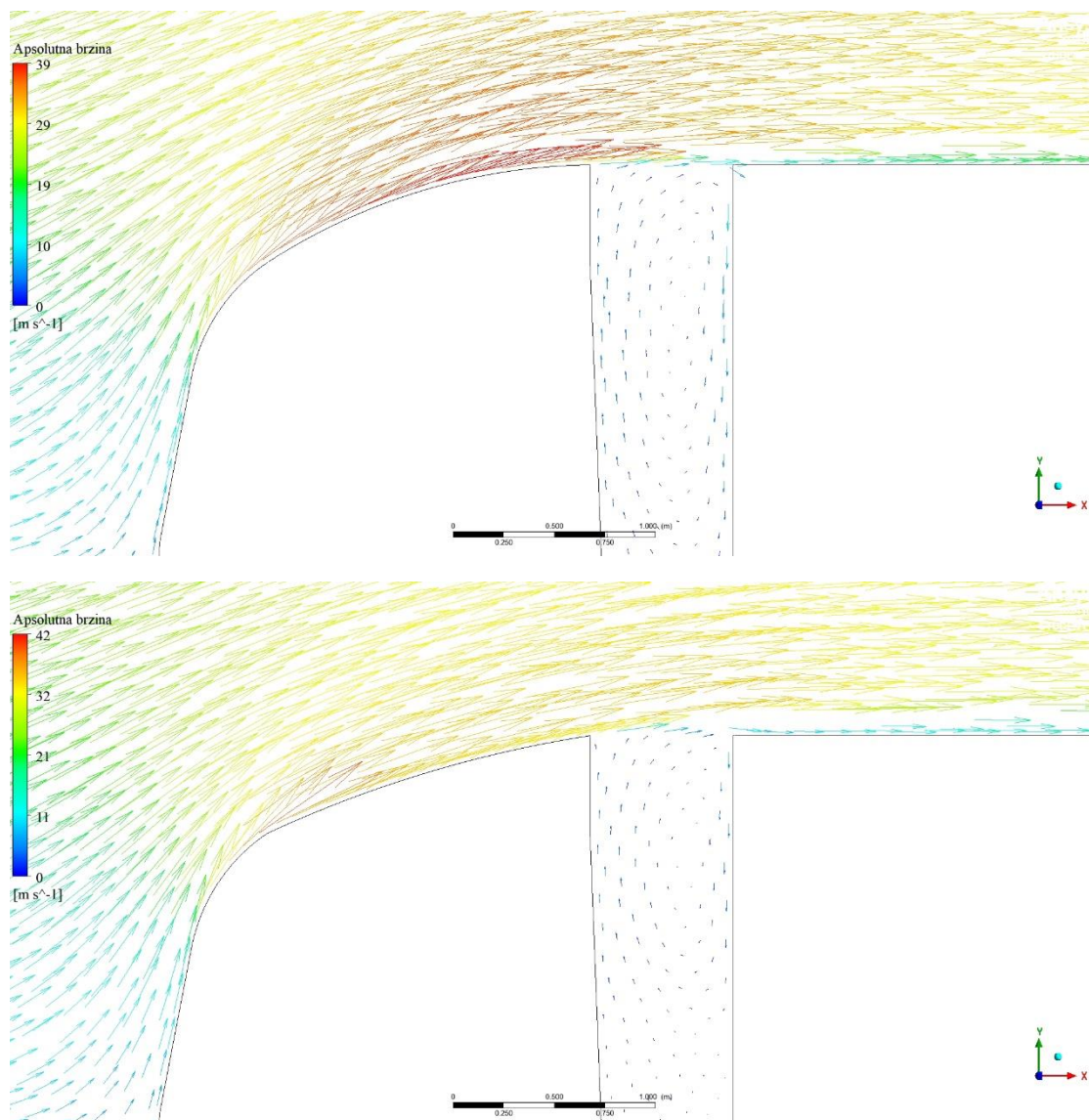




Slika 48. Promjena polja lokalne brzine u smjeru osi x ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 2D slučaj; od gore prema dolje: 2D-polazna geometrija, 2D-A1, 2D-A3, 2D-A3-3000, 2D-A3-6000

Kako je i spomenuto, dodavanjem spojlera stvara se regija nižeg tlaka iza kabine vozila, ali povratna strujanja postaju manja te tok iznad vozila postaje ujednačeniji. Uspoređivanjem primjera 2D-A3-3000 s ostalima jasno se vidi jednoličnost slojeva brzine iznad poluprikolice što je posljedica ranog prijanjanja strujanja i pravilnog strujanja bez turbulencija uz samu stijenku poluprikolice. Smjerovi vektora brzina i njihov iznos koji će se prikazati na idućim slikama jasno će predočiti utjecaj spojlera na usmjeravanje strujanja u ispravnom smjeru, odnosno mogućnost upravljanja strujanjem u analiziranim regijama.





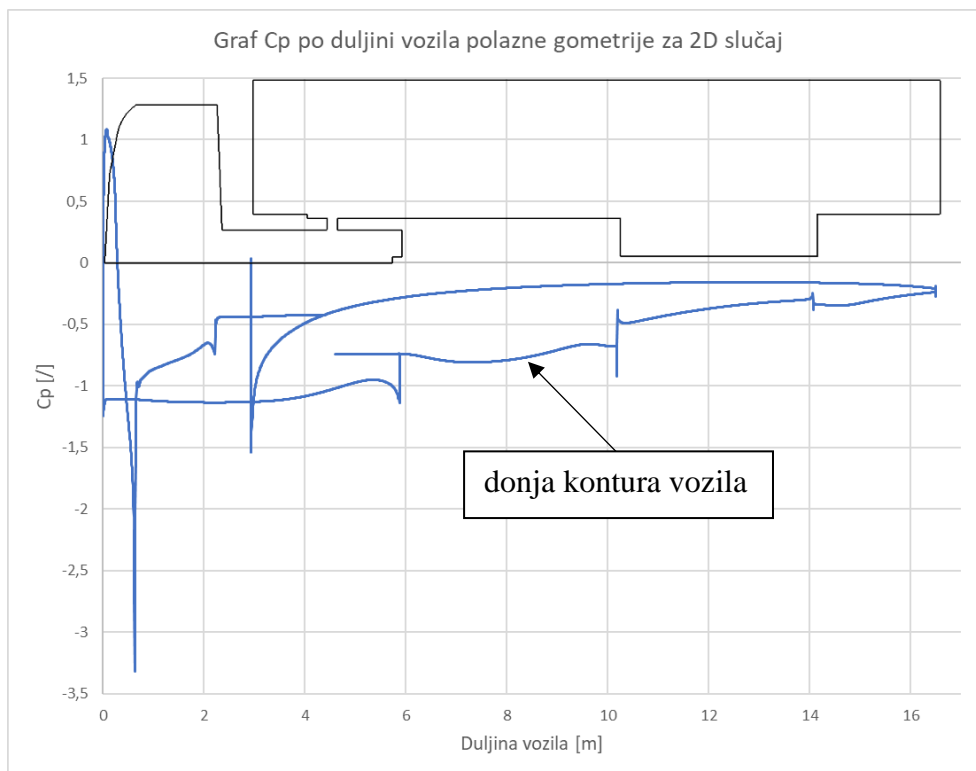
Slika 49. Promjena vektora brzine ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 2D slučaj; od gore prema dolje: 2D-polazna geometrija, 2D-A1, 2D-A3, 2D-A3-3000, 2D-A3-6000

Zanimljivo je za primijetiti efekt koji se pojavljuje na geometriji sa spojlerom najmanjeg radijusa zakrivljenosti. Naglijom promjenom visine spojlera dolazi do tlačenja struje zraka kojoj se povećava brzina i smanjuje tlak. Negativan efekt se ne može postići jer vrtloženje kreće na početku poluprikolice, stoga se stabilizira na njezinoj površini.

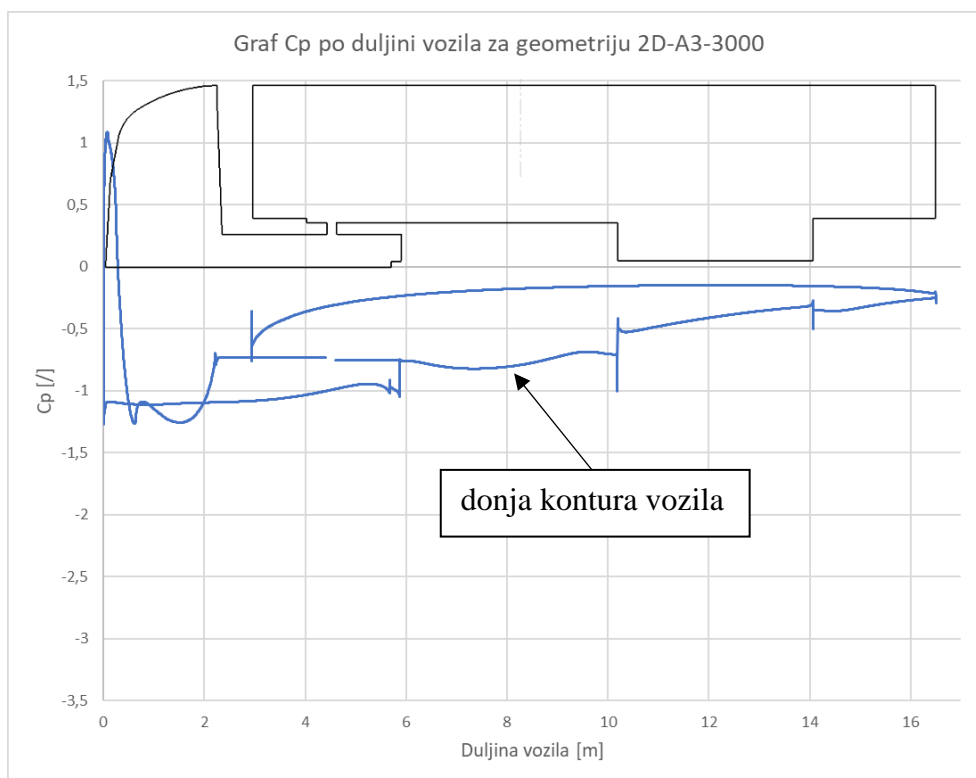
6.1.3 Koeficijent tlaka C_p po konturi vozila za 2D slučaj

Na idućim slikama prikazani su grafovi koeficijenta tlaka u svakoj točki konture vozila. Grafovi su generirani na konturama vozila polazne geometrije 2D slučaja i za model 2D-A3-3000.

Mjesta koja se promatraju su kontura kabine, praznina između kabine i poluprikolice i početak poluprikolice (od 0 m do ~ 3 m).



Slika 50. Raspodjela koeficijenta tlaka po konturi vozila polazne geometrije za 2D slučaj



Slika 51. Raspodjela koeficijenta tlaka po konturi vozila modela 2D-A3-3000

Analizom grafova sa slika može se utvrditi da postoje dvije spojene krivulje, jedna prikazuje koeficijente tlakova na gornjoj konturi vozila, a druga na donjoj. Jedna od linija je skoro nepromijenjena stoga se može zaključiti da je to linija koja predstavlja vrijednosti s donje konture. Analizirati će se samo linija koja predstavlja vrijednosti s gornje konture jer je tu jedino i došlo do promjene.

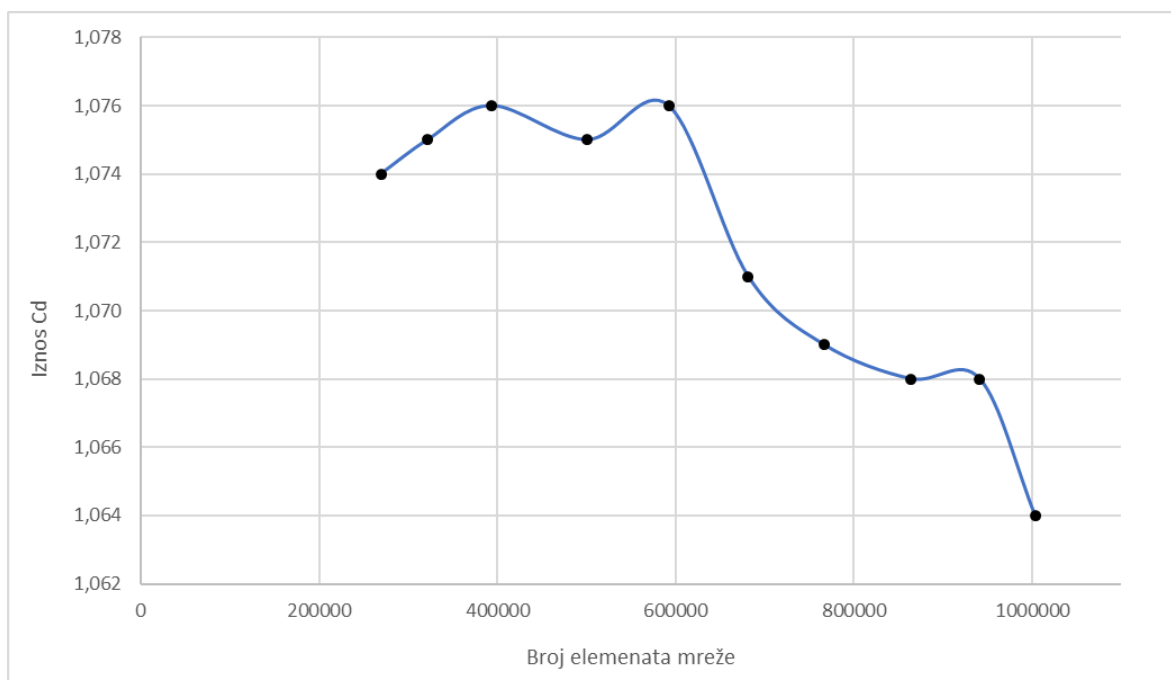
Na početku vozila ($x = 0$ m) vidljiv je nagli porast vrijednosti C_p gdje on doseže svoj maksimum. Ta vrijednost predstavlja stagnacijsku točku gdje strujanje nailazi na vozilo i brzina se smanjuje gotovo na nulu, posljedično tome tlak naglo raste. Ova regija je nepromijenjena uspoređujući modele. Do naglog pada koeficijenta tlaka dolazi u oštrom rubu prelaza prednje strane kabine na krov. U polaznoj geometriji C_p pada drastično. Na modelu 2D-A3-3000 pad koeficijenta je ublažen zbog blažeg prijelaza jednog ruba na drugi te nakon ruba, na konturi spojlera koeficijent ostaje relativno stabilan u odnosu na polaznu geometriju. Iduća točka drastične promjene koeficijenta tlaka je na prednjem rubu poluprikolice ($x = 3$ m) gdje zbog velikih turbulencija dolazi do neravnomjernog strujanja i fluktuacija u poljima tlaka. To je ublaženo dodavanjem spojlera te je ujednačena brzina strujanja preko kabine i omogućeno normalno prijanjanje strujanja na vrh prikolice.

6.2 Rezultati 3D analize strujanja

Kao što je za 2D slučaj provedena analiza ovisnosti rezultata o veličini elemenata uz vozilo, to je učinjeno i za 3D slučaj. Analiza će uvelike pomoći pri shvaćanju visokih vrijednosti rezultata (u stvarnosti nerealnih) koji su se dobili s ranije spomenutim postavkama mreže. Dobivene vrijednosti su prikazane u tablici 3, a na slici 51 su isti rezultati prikazani pomoću grafa.

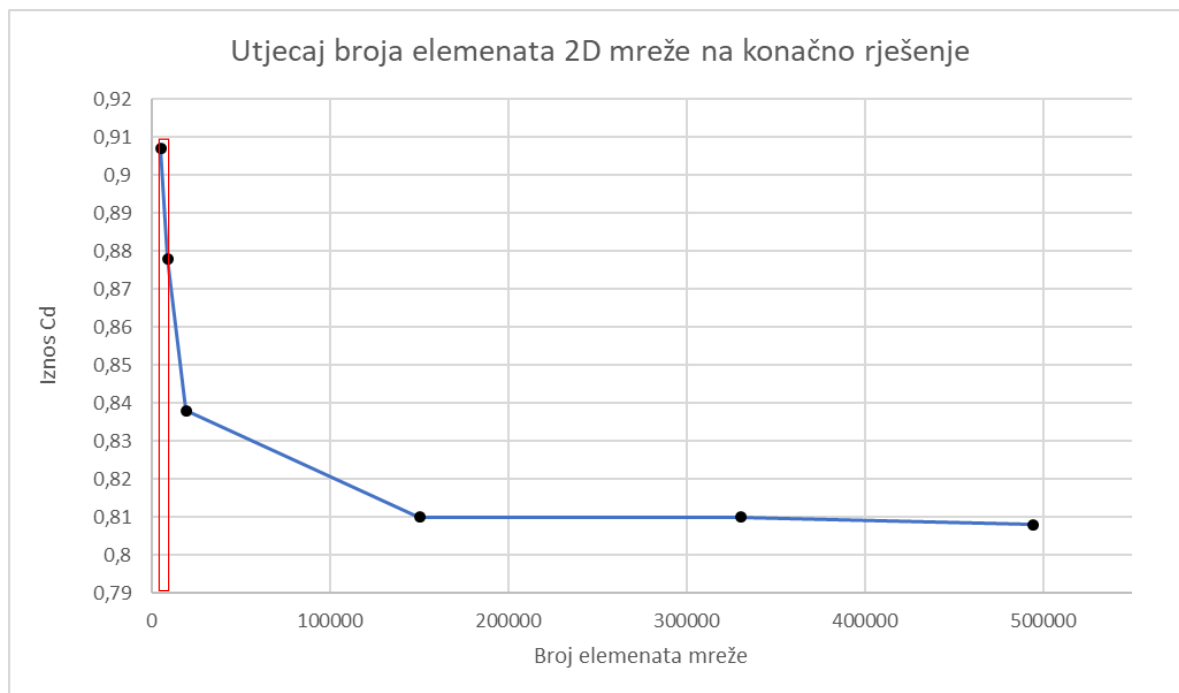
Tablica 3. Ovisnost iznosa faktora otpora C_d za polaznu geometriju o broju elemenata 3D mreže

Broj elemenata	269594	322027	393621	500979	592232	681606	766589	863862	941304	1003429
C_d polazne geometrije	1,074	1,075	1,076	1,075	1,076	1,071	1,069	1,068	1,068	1,064



Slika 52. Graf promjene vrijednosti faktora otpora zraka C_d za polaznu geometriju u odnosu na povećanje/smanjenje veličine elemenata uz vozilo (povećanje/smanjenje broja elemenata u mreži), 3D slučaj

Primjenom analize može se zaključiti mala varijabilnost u iznosu faktora otpora u ovisnosti o broju elemenata mreže za početnu geometriju 3D modela. S veličinom elemenata uz vozilo od 0,11 m postiže se približno maksimalan dopušten broj elemenata studentskom dozvolom – 1003429. Smanjenjem broja elemenata, odnosno povećanjem veličine elementa uz vozilo na 1 m mreža je generirana od 269594 elementa. Povećanjem veličine od skoro 10 puta u odnosu na veličinu s kojom se postiže približan maksimum studentske dozvole programa, promjena iznosa faktora otpora za početnu geometriju mjeri se u drugoj decimali (promjena za 0,01). Grafički se to može objasniti položajem rezultata 3D analize na grafu rezultata 2D analize gdje se rezultati 3D analize nalaze na samom lijevom rubu grafa na slici 52 te variranjem broja elemenata ne pomiču se značajno po x osi (položaj rezultata označen crvenim kvadratom na slici 52).

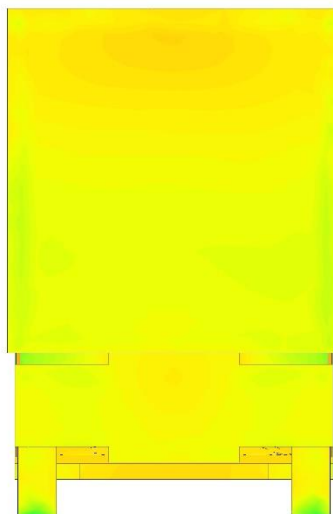
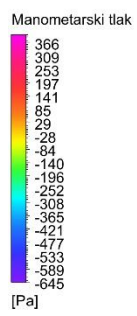
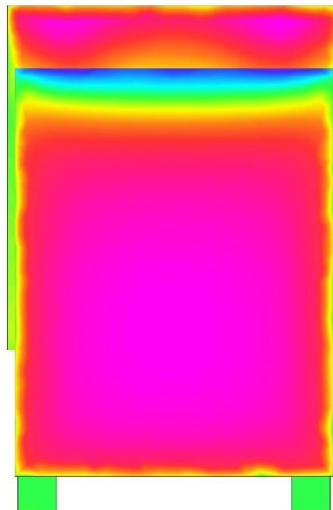
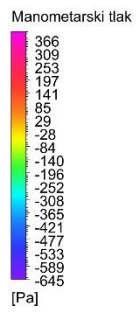
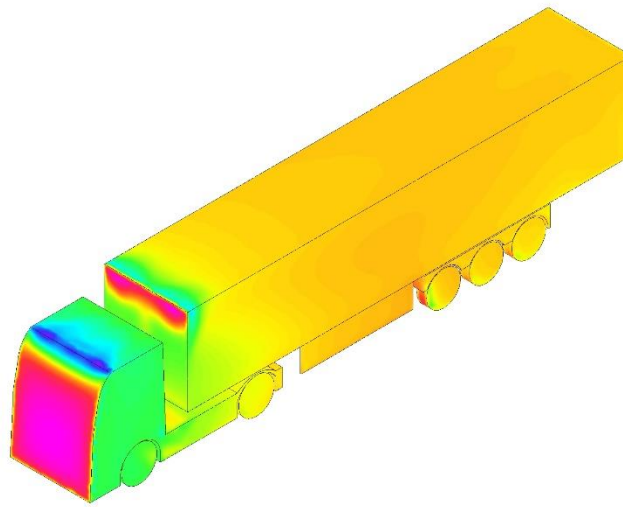
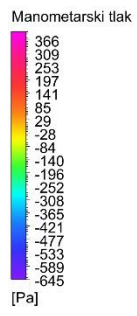


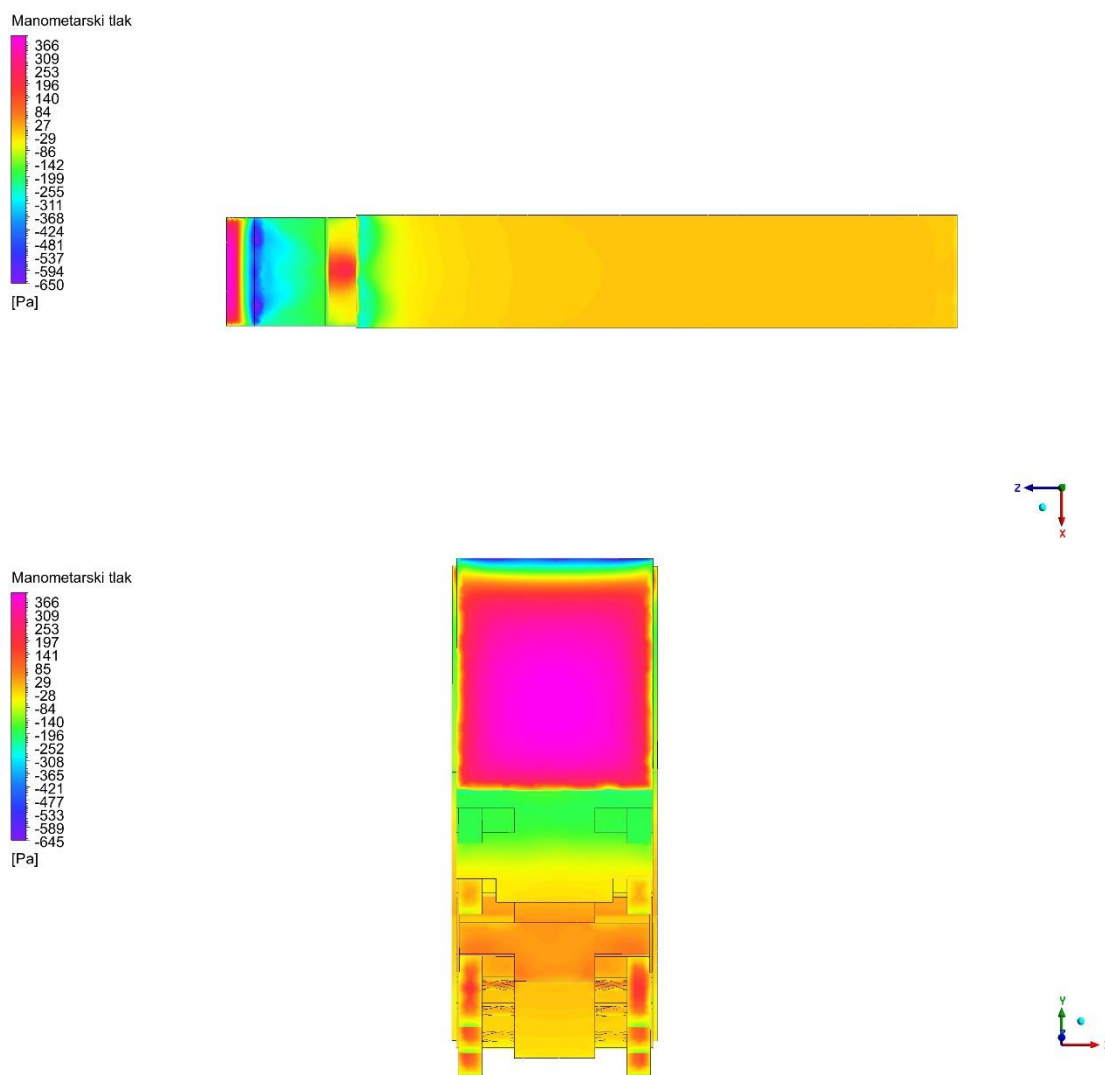
Slika 53. Položaj rezultata 3D analize (crveni kvadrat) na grafu rezultata 2D analize

Rezultat faktora otpora od 1,064 nije vjerodostojan realnog faktora otpora za ovu vrstu vozila, ali uzimajući u obzir nemogućnost kreiranja bolje i finije mreže kojom bi se zasigurno smanjio iznos faktora, taj rezultat je validan. Uspoređujući rezultate analize utjecaja broja elemenata mreže na iznos faktora otpora u slučaju 2D strujanja gdje je relativno smanjenje iznosa C_d od malog broja elemenata prema većem 10,92%, može se zaključiti da bi se omogućavanjem kreiranja finije mreže faktor za 3D slučaj drastično snizio (računajući s 10,92% relativnog smanjenja iz 2D slučaja za 3D slučaj bi faktor iznosio 0,948). Uz to u slučaju 2D analize strujanja koristili su se elementi veličine 0,005 m koji su 22 puta manji od onih u 3D analizi. Umjesto oslanjanja na apsolutne vrijednosti faktora otpora zraka dobivene u ovom istraživanju, analiza će se fokusirati na relativne promjene uzrokovane implementacijom aerodinamičkih dodataka na tegljač s poluprikolicom, čime će se dokazati njihova učinkovitost u smanjenju koeficijenta otpora zraka C_d .

6.2.1 3D analiza polazne geometrije bez nadogradnih elemenata

Na sljedećim slikama prikazati će se vrijednosti manometarskog tlaka po površini početne geometrije vozila.

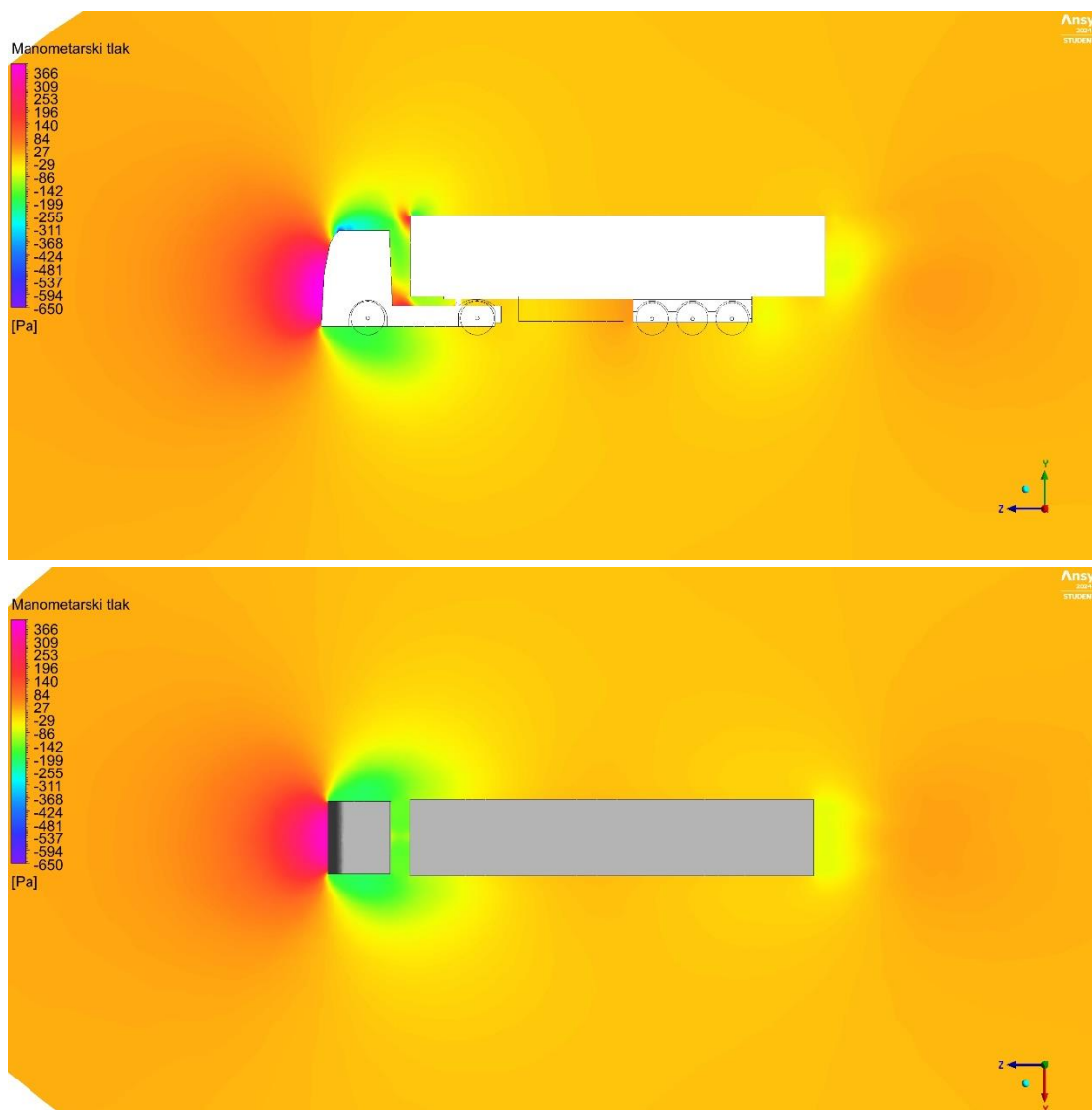




Slika 54. Manometarski tlak po površini vozila za slučaj polazne geometrije vozila za 3D slučaj

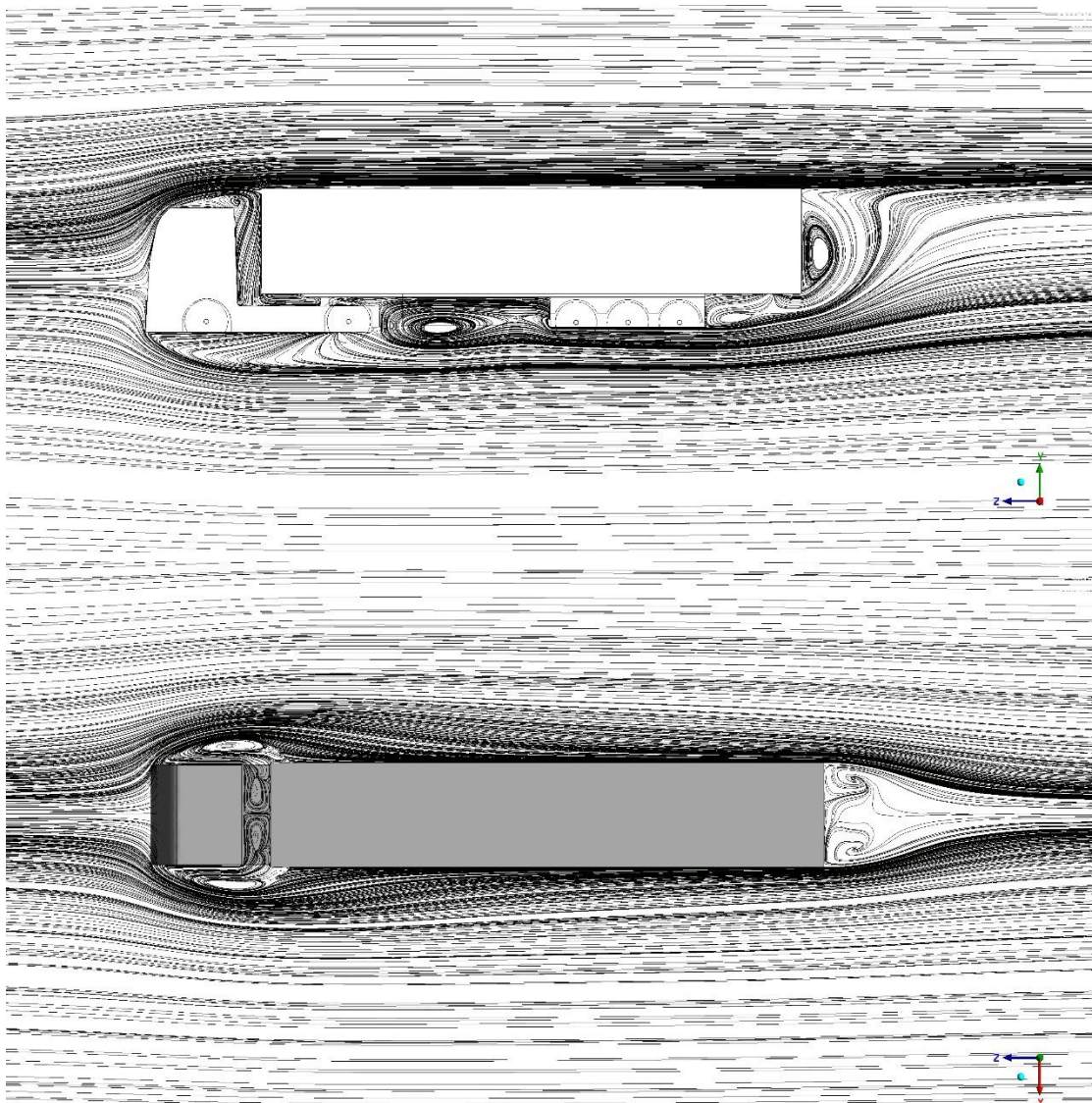
Pregledom površine vozila s označenim regijama manometarskog tlaka može se zaključiti povećani tlak na napadnim površinama, pogotovo prednjoj strani tegljača, gornjem dijelu prednje strane poluprikolice gdje zrak nastrujava nakon odbijanja od prednje površine tegljača, prednjeg dijela sedlenog segmenta tegljača (pogled s gornje strane) gdje se zrak nakon odbijanja od prednje površine poluprikolice usmjerava u to područje (na sljedećim slikama pokazati će se strujnice koje imaju tu putanju) i prednji dijelovi kotača poluprikolice. Zone podtlaka se nalaze na gornjoj i bočnim stranama kabine tegljača, gornja strana nakon prednjeg gornjeg ruba poluprikolice gdje je s jedne strane zona visokog tlaka, a nakon prijelaza ruba zona nižeg tlaka koja se polako ujednačava sa normalnim tlakom po dužini poluprikolice, podvozje tegljača, površine unutar praznine između tegljača i poluprikolice (osim onih dijelova na kojima struja zraka nalijeće na vozilo), te stražnja površina poluprikolice na kojoj se očitava

blagi podtlak. Sukladno tome prikazom manometarskog tlaka okoliša na sljedećim slikama potvrđuju se mjesta nižeg/višeg tlaka na modelu. Tlak okoliša prikazan je na dvije ravnine: prva ravnina je zy ravnina i presijeca vozilo po sredini u uzdužnom smjeru, a druga ravnina je horizontalna xz ravnina na visini od 2,5 m od gazne točke kotača. To je prikazano na slici 54.



Slika 55. Manometarski tlak okoliša oko polazne geometrije vozila za 3D slučaj

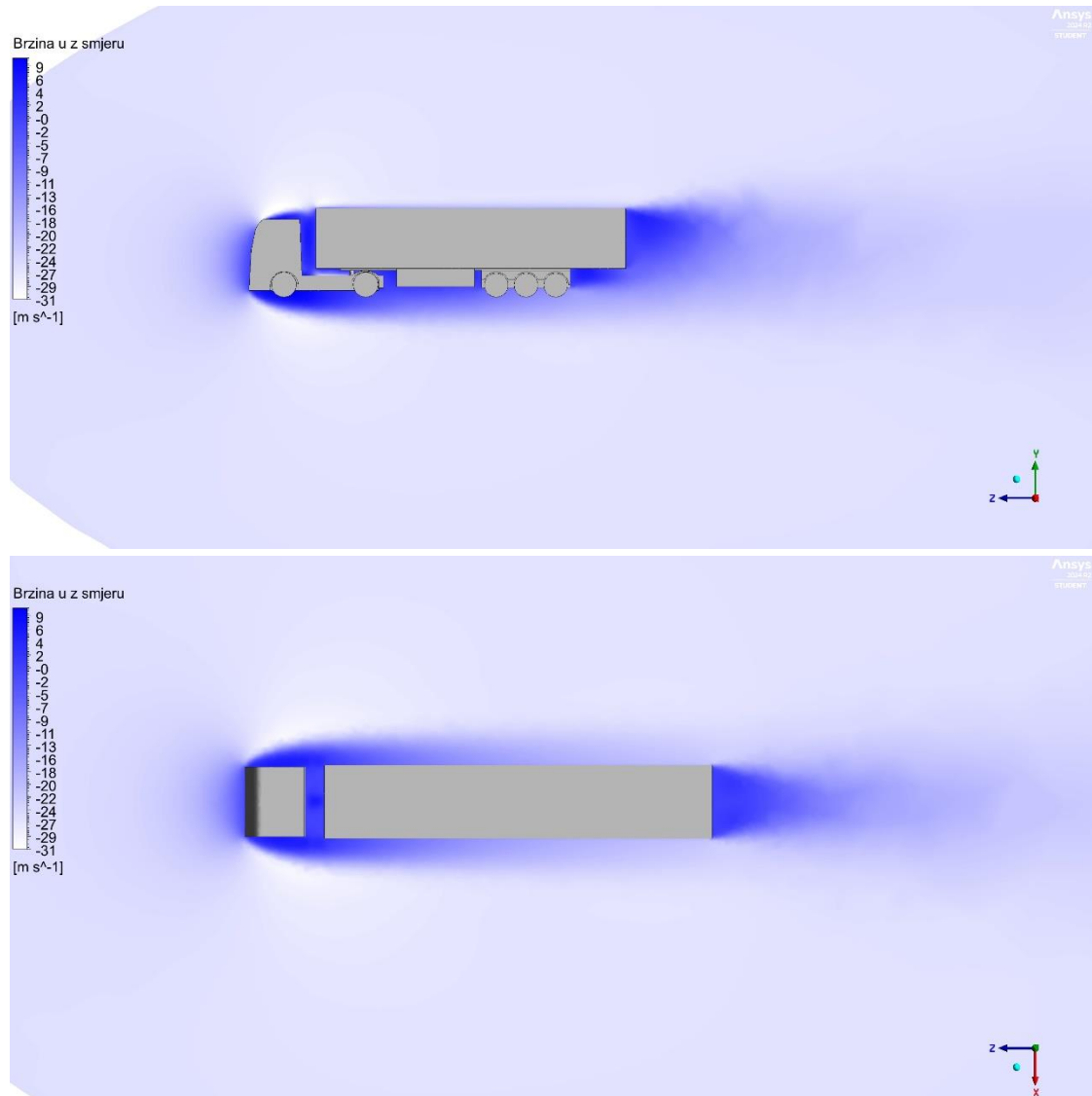
Na sljedećim slikama prikazane su strujnice u dvije ravnine na kojima je prikazan manometarski tlak okoliša. Prikaz uzdužnih strujnica ne sadrži puni model vozila, već njegov kostur, kako bi se mogla vidjeti regija ispod vozila u kojoj dolazi do velikih vrtloženja.



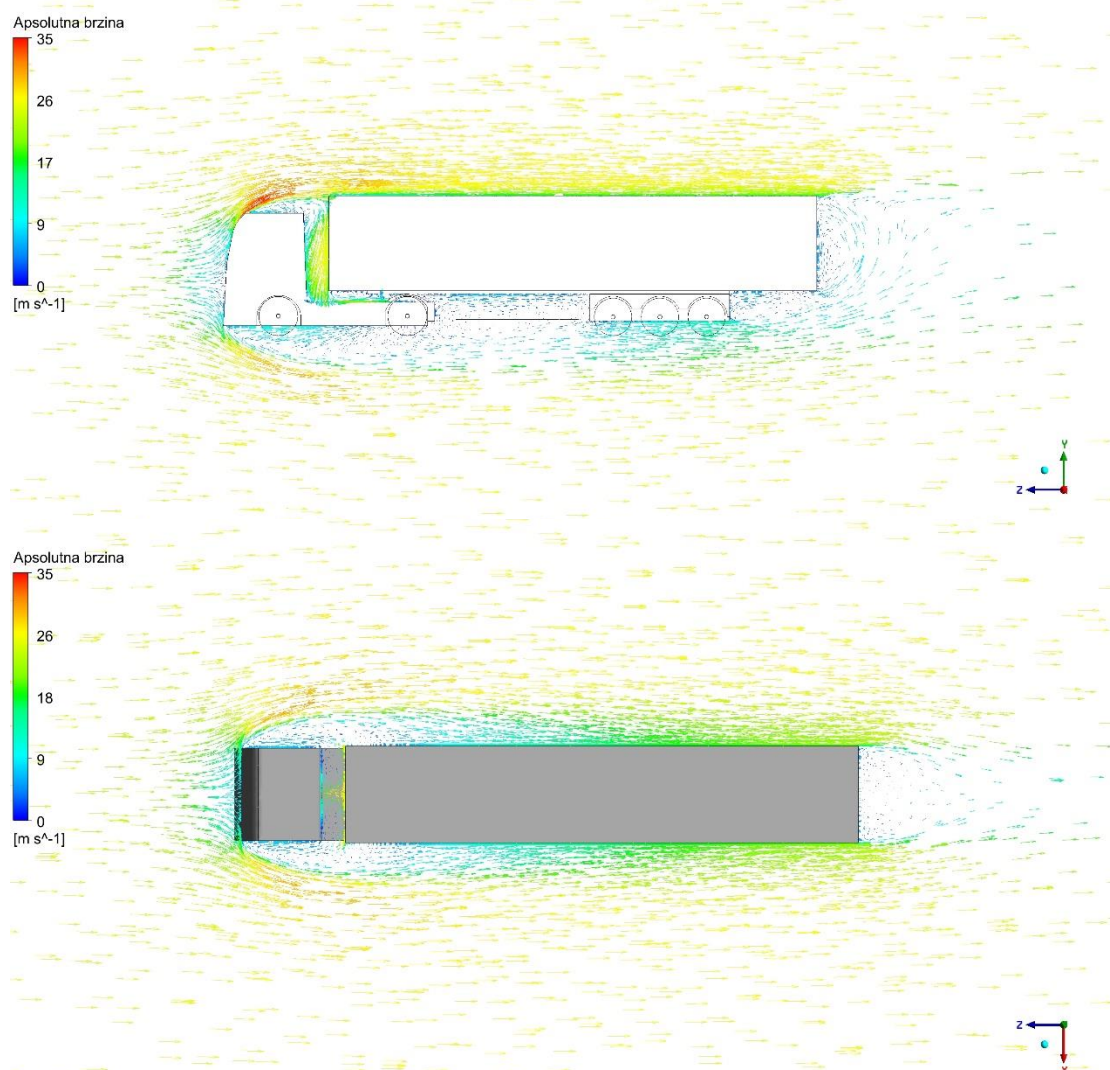
Slika 56. Strujnice oko polazne geometrije vozila za 3D slučaj

Na slici 55 vidljivo je nekoliko zona vrtloženja. Velika vrtloženja se stvaraju primarno oko kabine tegljača, ispod podvozja poluprikolice i na samom kraju poluprikolice.

Na sljedećim slikama prikazano je polje brzine fluida u smjeru z osi i vektori apsolutnog smjera brzine oko vozila. Za kazalo na slikama polja brzine fluida u smjeru z osi prikazuje negativne vrijednosti u većoj amplitudi od pozitivnih zato što je strujanje zraka u smjeru -z. Ova opaska vrijedi za sve iduće analizirane slučajeve polja brzina (u ovom poglavlju i u idućima). Stoga pozitivni iznosi polja brzine označavaju regije s povratnim strujanjem uzrokovanim vrtloženjem što će se i dokazati na slikama s vektorima brzine apsolutnog iznosa. Također će se vektorima brzina detaljnije ukazati na područja vrtloženja sa slike 55. Vrijednosti će biti prikazane na istim ravninama kao i prethodni prikazi.



Slika 57. Polja brzine fluida u smjeru z osi oko polazne geometrije za 3D slučaj



Slika 58. Vektori apsolutne brzine fluida oko polazne geometrije za 3D slučaj

6.2.2 3D analiza utjecaja nadogradnje krovnog spojlera tegljača (A)

Rezultati analize utjecaja krovnog spojlera za slučaj 3D strujanja prikazani su tablično:

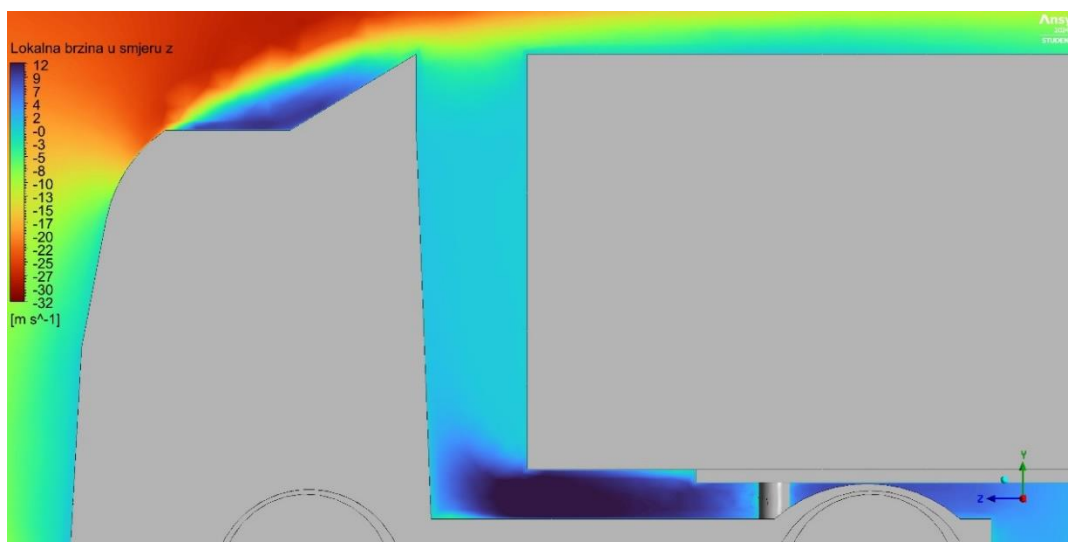
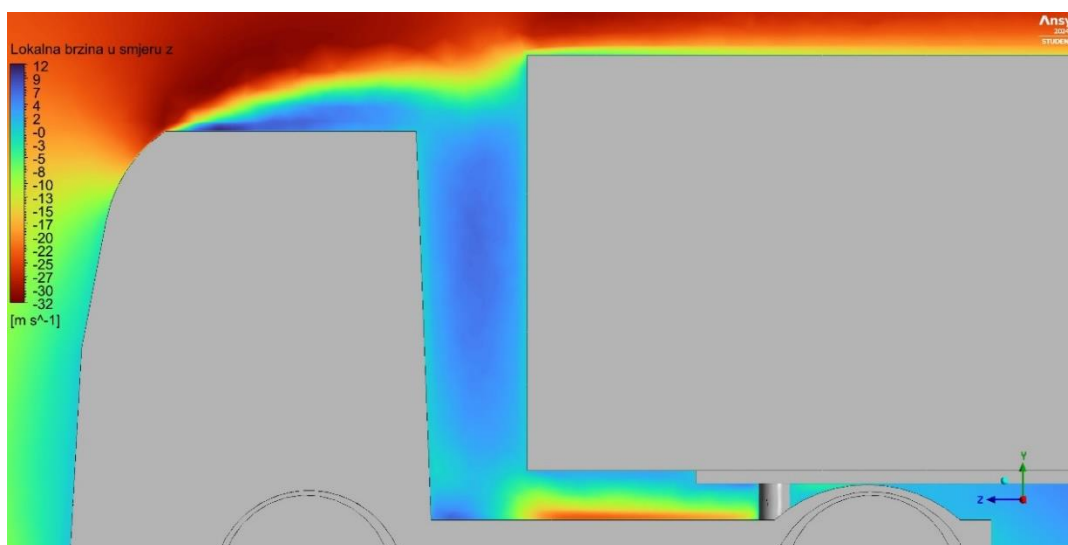
Tablica 4. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike krovnog spojlera tegljača u slučaju 3D strujanja

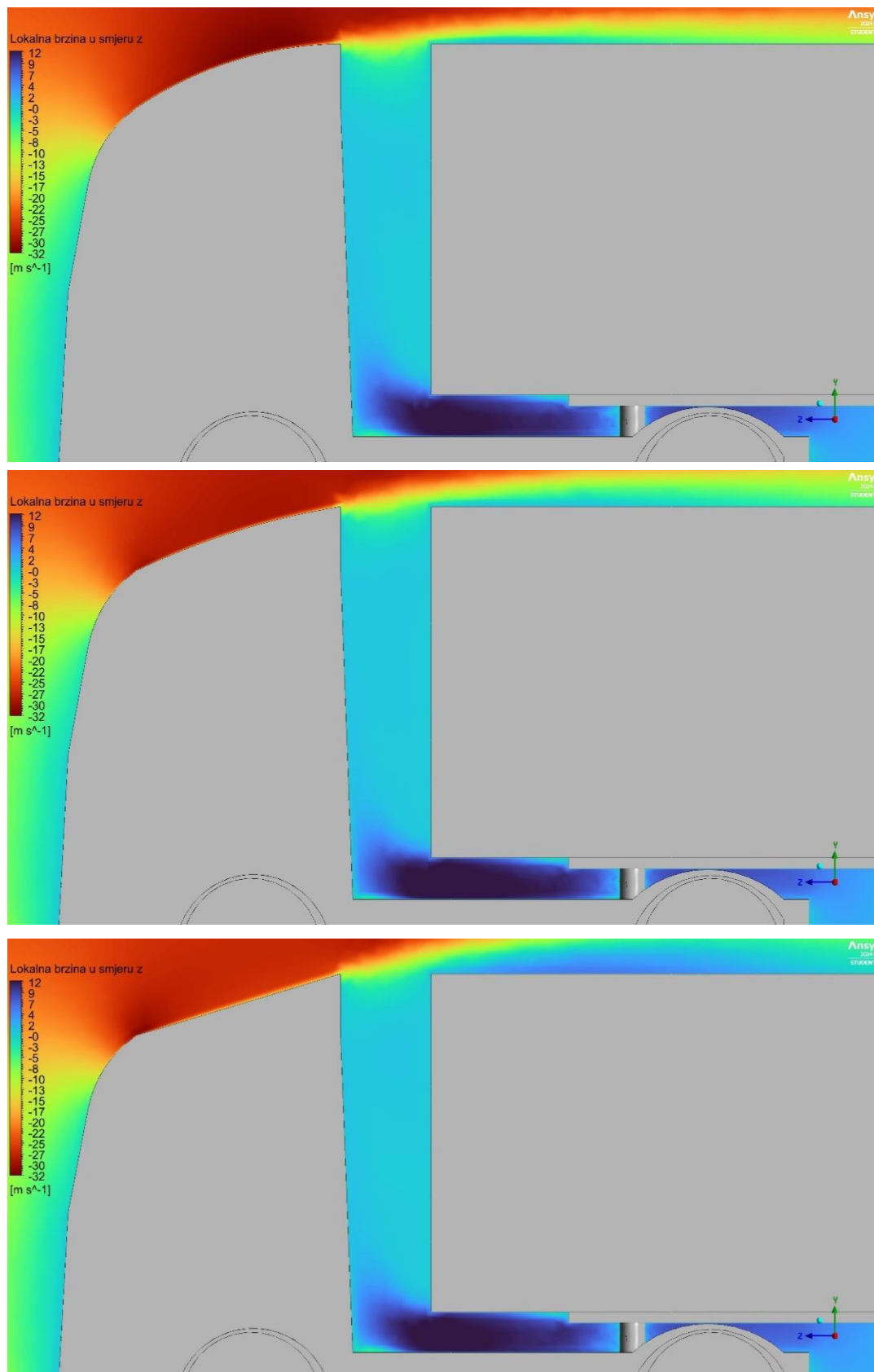
Model	A1	A2	A3	A3-3000	A3-4000	A3-5000	A3-6000
C_d	0,918	0,904	0,896	0,867	0,873	0,875	0,879

Jednako kao i u 2D analizi, u 3D analizi dodavanjem spojlera na tegljač utjecalo se na usmjeravanje zraka preko prednjeg dijela poluprikolice i na smanjivanje velikih razlika u tlaku u području između tegljača i poluprikolice. Također variranjem oblika spojlera ujednačena je brzina strujanja fluida iznad kabine te je smanjen utjecaj vrtloženja zraka i udaranja u stijenke

vozila. Vrtloženje nije spriječeno, već je smanjeno, a u slučaju 3D strujanja to vrtloženje je uzrokovano i poprečnim turbulencijama fluida na stranama vozila, stoga krovni spojler umanjuje samo dio tog efekta. Relativno smanjenje faktora otpora zraka uspoređujući polaznu geometriju i slučaj geometrije A s kojim se postigao najniži iznos faktora iznosi 17,95%.

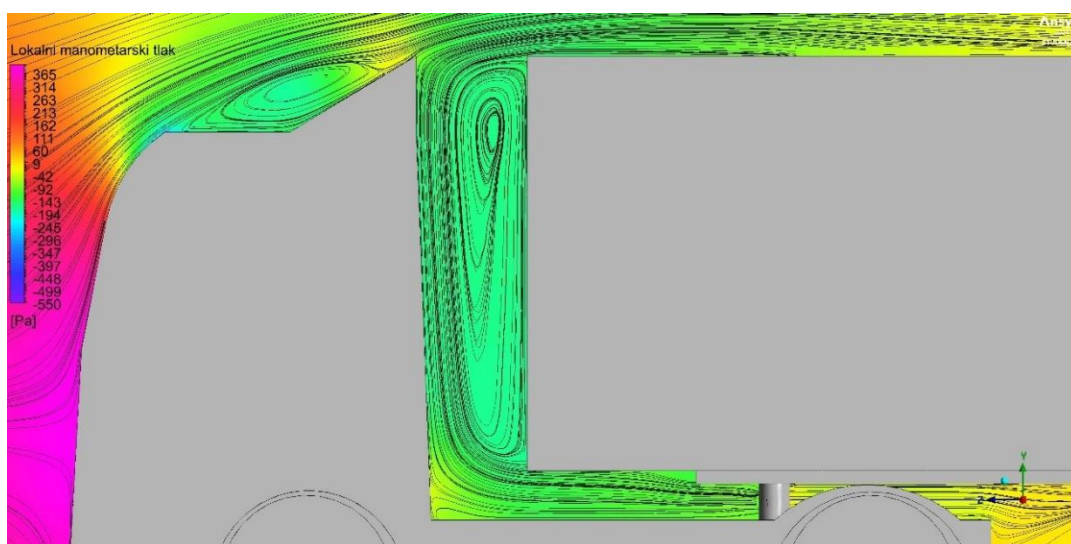
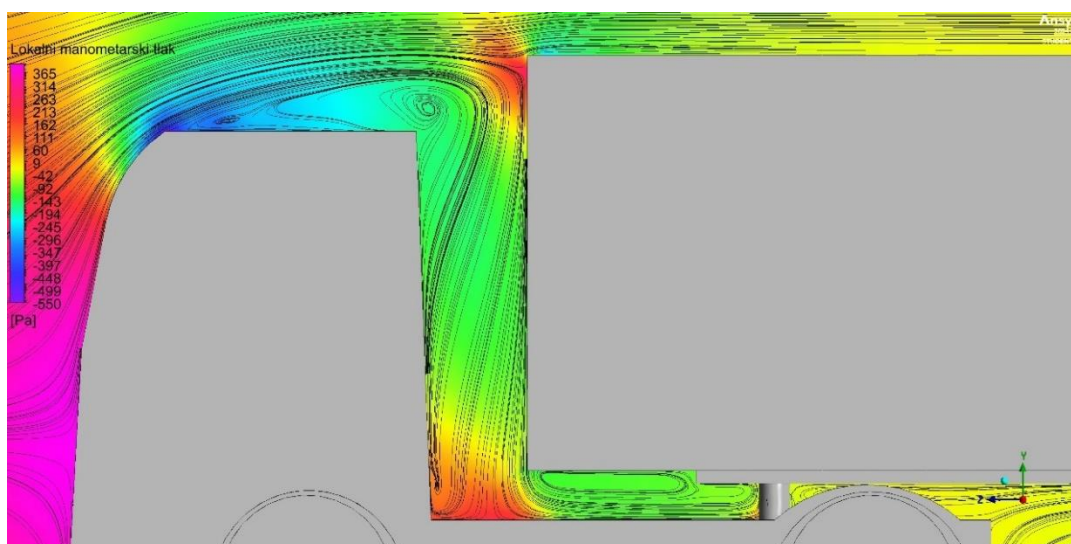
Na idućim slikama prikazano je polje lokalnih brzina u smjeru z osi za različite oblike krovnog spojlera kao (i početna geometrija koja služi kao referenca) i polja lokalnog okolišnog manometarskog tlaka paralelno s ucrtanim strujnicama. Vrijednosti su prikazane na uzdužnoj yz ravnini.

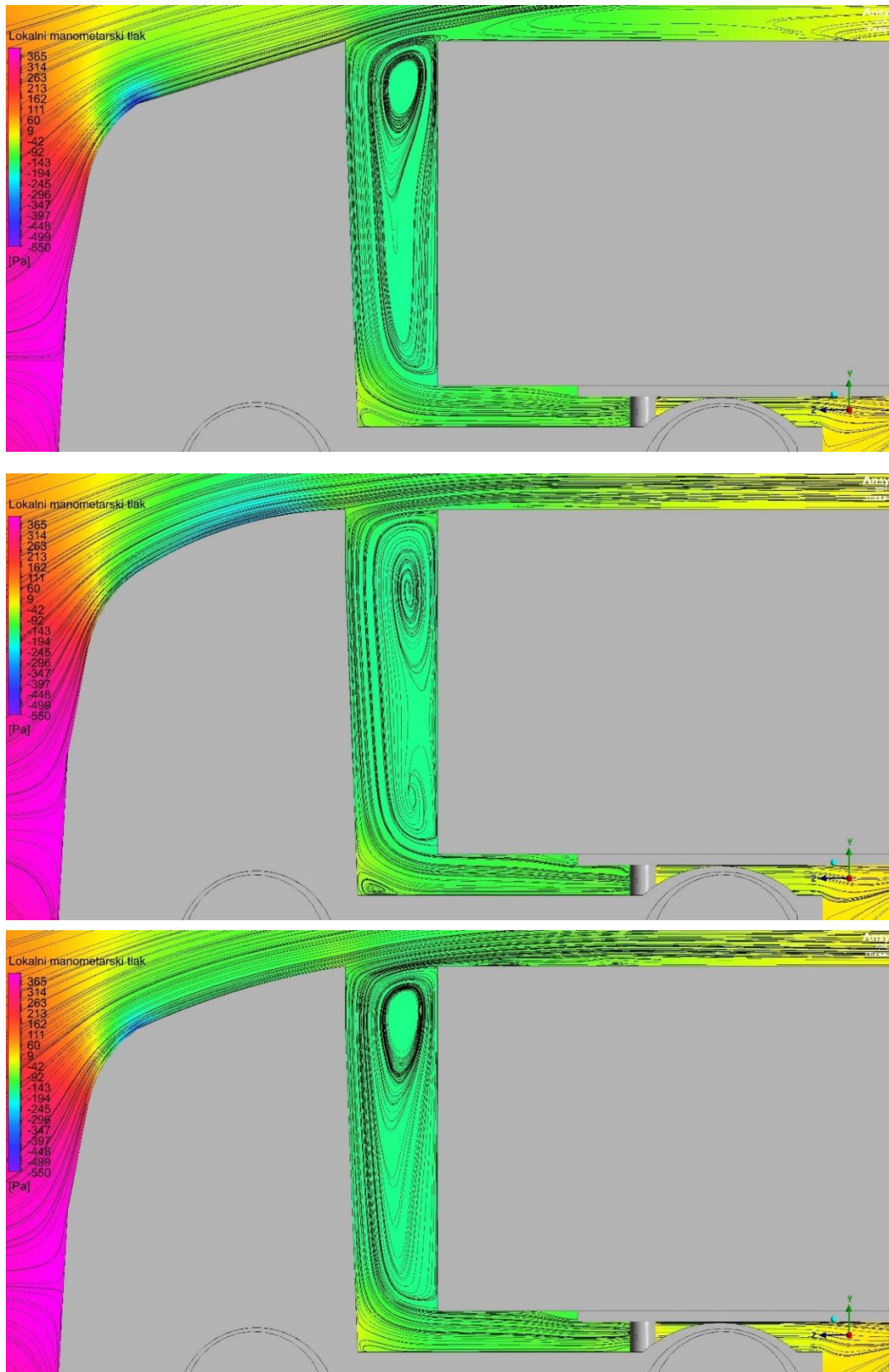




Slika 59. Promjena polja lokalne brzine u smjeru z osi ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, A1, A3, A3-3000, A3-6000

Iako se kod početne geometrije ustaljenost brzine u smjeru osi z postiže već na samom početku poluprikolice, njezin utjecaj je ograničen uslijed prisutnosti visokog pretlaka na prednjem dijelu poluprikolice i intenzivnog vrtloženja iznad i iza kabine, što umanjuje pozitivne efekte ranog prijanjanja strujanja na krov poluprikolice. Ujednačena boja povratnog strujanja na modelima sa spojlerom ukazuje na manju količinu vrtloga u odnosu na polaznu geometriju. Usporedbom modela A3-3000 i A3-6000 primjetno je jednako ubrzanje fluida na napadnoj strani spojlera, ali na modelu A3-3000 može se uočiti brži prijelaz na brzinu u smjeru strujanja što ukazuje na ranije spajanje strujanja na vrh poluprikolice, odnosno zona vrtloženja na početku gornje plohe poluprikolice je manja nego na A3-6000 što je utjecalo na dodatno smanjenje faktora otpora. To će se i potvrditi na sljedećim slikama polja tlaka i strujnica.





Slika 60. Promjena polja lokalnog tlaka i strujnice ovisno o tipu geometrije krovnog spojlera za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, A1, A3, A3-3000, A3-6000

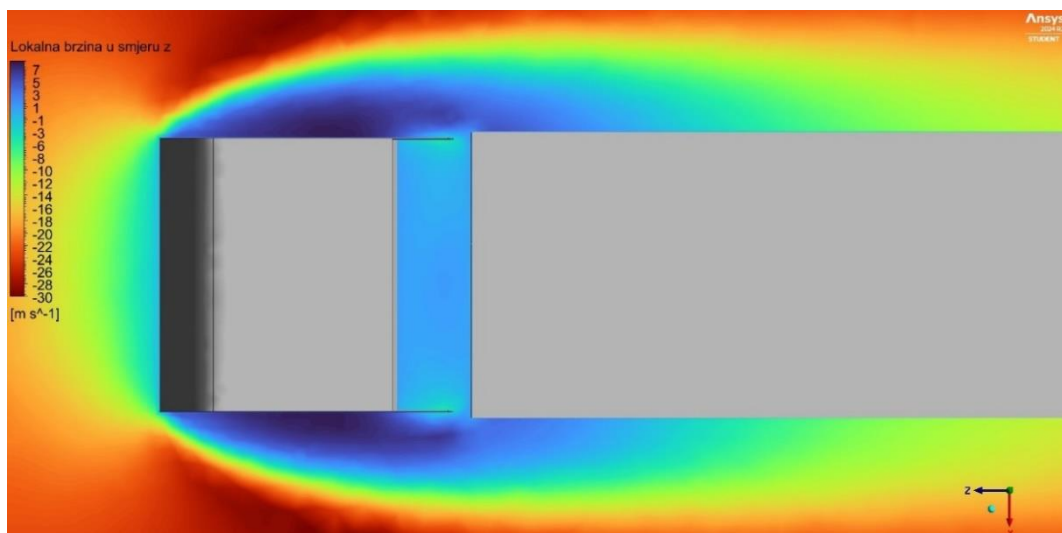
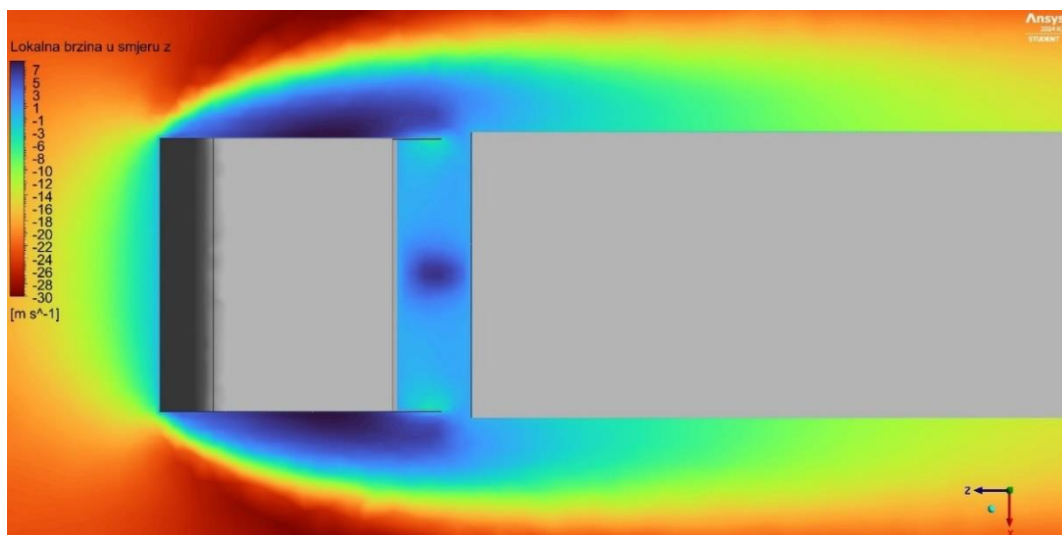
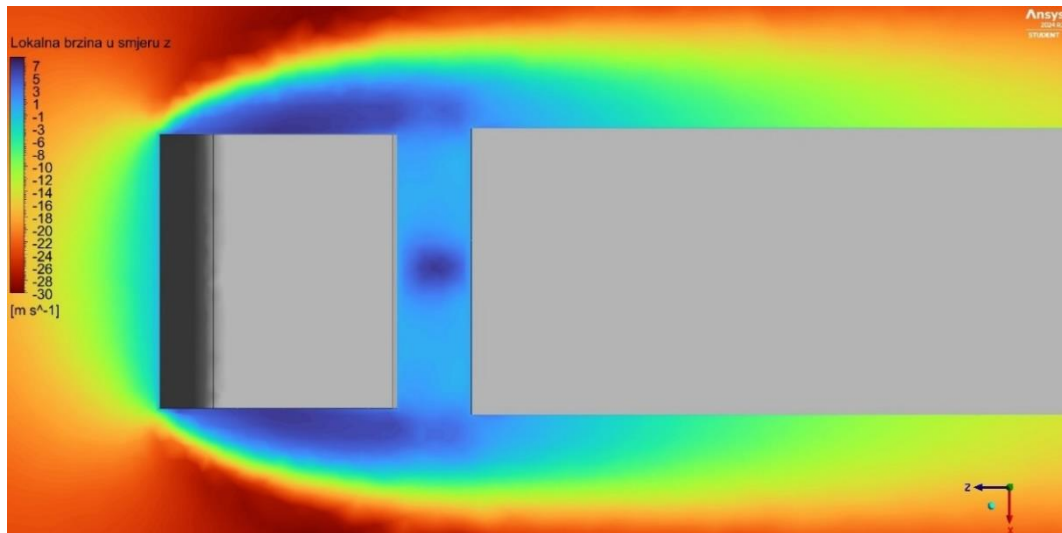
6.2.3 3D analiza utjecaja nadogradnji bočnih oplata kabine (B)

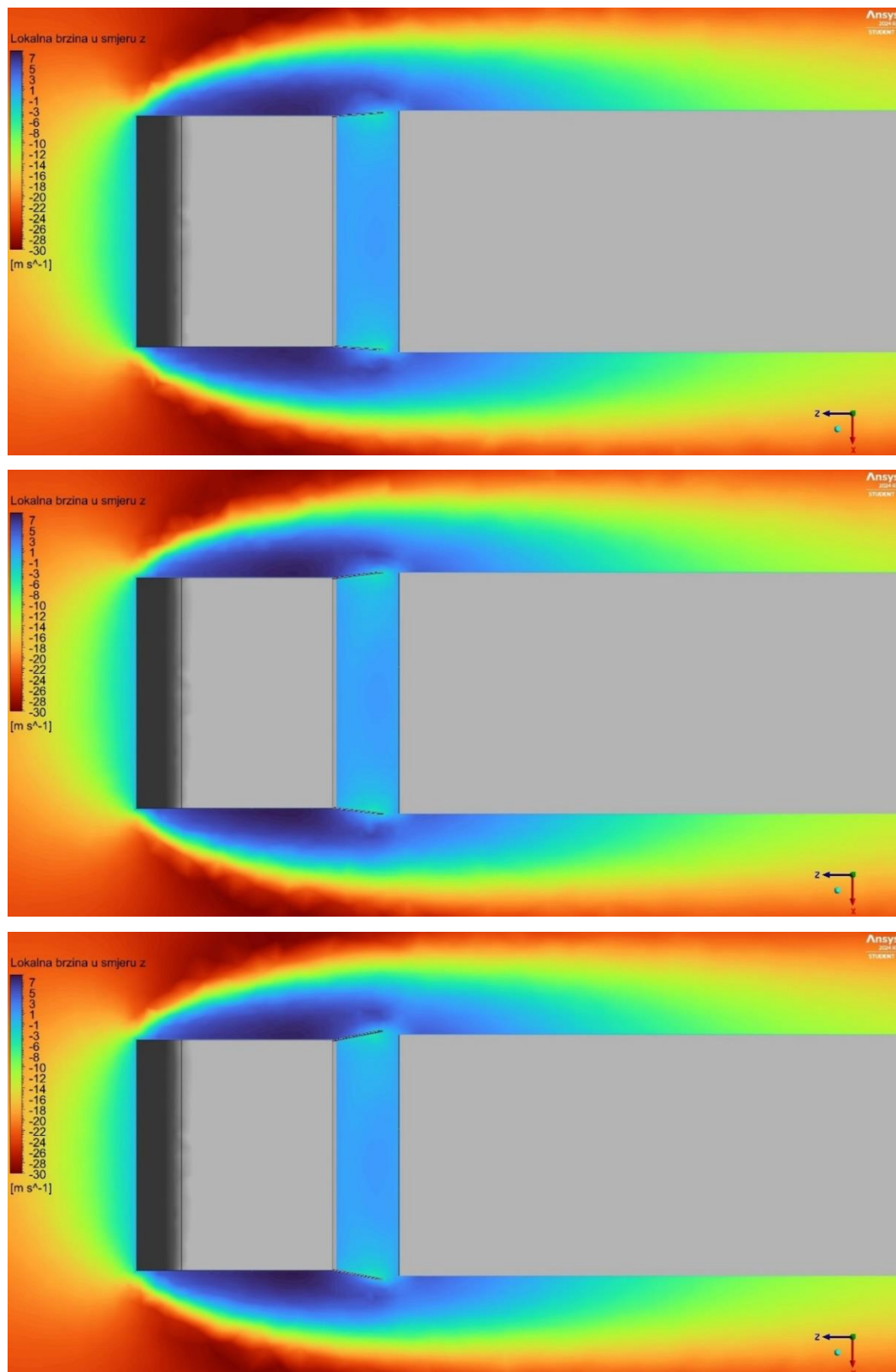
Rezultati analize utjecaja bočnih oplata kabine za slučaj 3D strujanja prikazani su tablično:

Tablica 5. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike bočnih oplata kabine u slučaju 3D strujanja

Model	C_d	Model	C_d	Model	C_d	Model	C_d
B400-0	1,021	B500-3	0,930	B500-8	0,918	B500-13	0,910
B450-0	0,935	B500-4	0,929	B500-9	0,917	B500-14	0,912
B500-0	0,922	B500-5	0,927	B500-10	0,914	B500-15	0,911
B500-1	0,929	B500-6	0,926	B500-11	0,910	B500-20	0,905
B500-2	0,928	B500-7	0,922	B500-12	0,911		

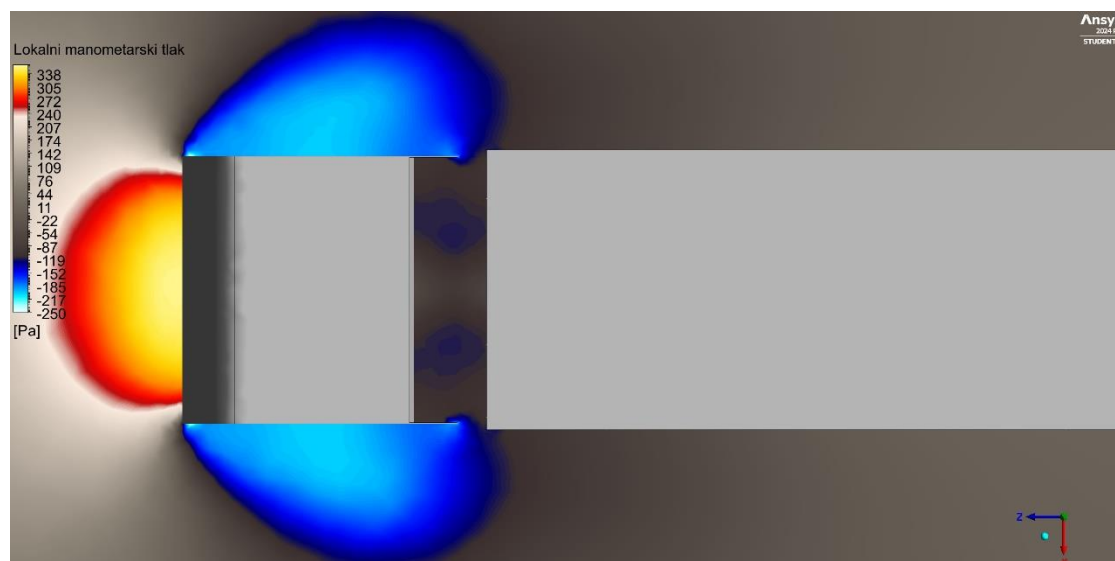
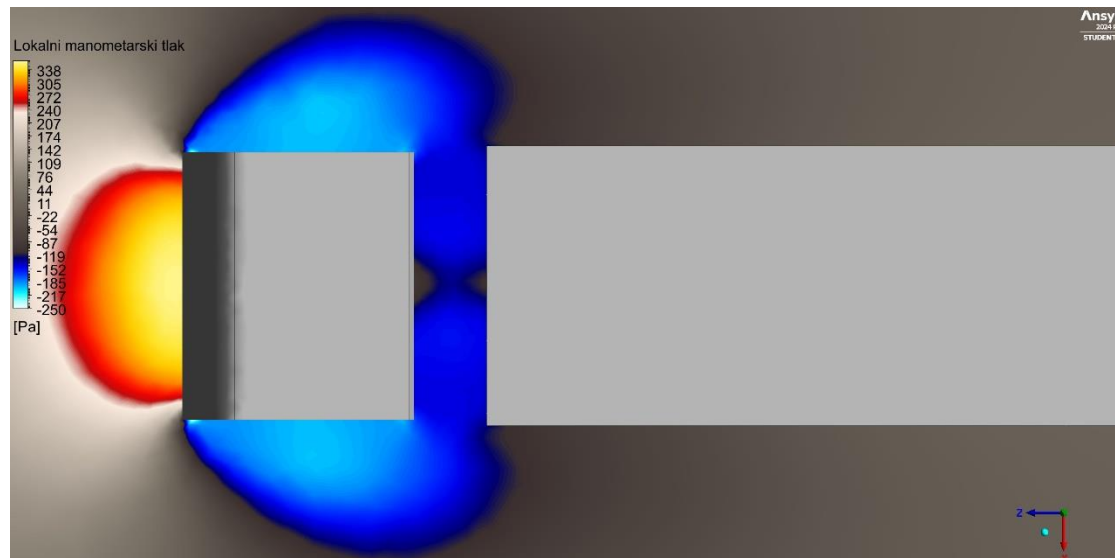
Uz ulogu usmjeravanja zraka preko ruba prednjeg dijela poluprikolice bočne oplata kabine služe za zatvaranje međuprostora između kabine i poluprikolice. Turbulentna područja s velikim vrtlozima koji nastaju na bočnim stranama kabine utječu na stvaranje turbulentne zone (već ranije opisano) na području između kabine i poluprikolice. Produljenjem oplata smanjuje se prolaz za fluid prema tom prostoru, a variranjem kuta prema bočnim stranama vozila usmjeravaju se turbulentni tokovi dalje od međuprostora, odnosno zadržavaju se na površinama bočnih panela. To za posljedicu ima smanjenje podtlaka u području praznine i ujednačenje brzine (makar u povratnom strujanju) na tom području. Opisani rezultati prikazani su na sljedećim slikama. Rezultati prikazuju lokalna polja brzine i lokalna polja tlaka na horizontalnoj xz ravnini opisanoj ranije u analizi. Prema tablici 5 koja sadrži rezultate može se očitati postepeni pad vrijednosti faktora otpora s povećanjem kuta otklona bočnih oplata. Iako faktora opada i nakon kuta od 11° , daljnji kutovi neće biti analizirani zbog neopravdanosti u realnim situacijama (izlaskom iz dozvoljenih gabaritnih dimenzija vozila). Velikim otklonom od 20° (kao i određeni dio kutova prije 20°) predstavljali bi prepreku unutar vidnog polja vozača vozila prema kraju poluprikolice. Relativno smanjenje faktora otpora zraka uspoređujući polaznu geometriju i slučaj geometrije B (B500-20) s kojim se postigao najniži iznos faktora iznosi 14,94%. Ali zbog nerazmatranja slučaja s otklonom od 20° , relativno smanjenje koje će se razmatrati je ono za slučaj B500-11 i iznosi 14,47%.

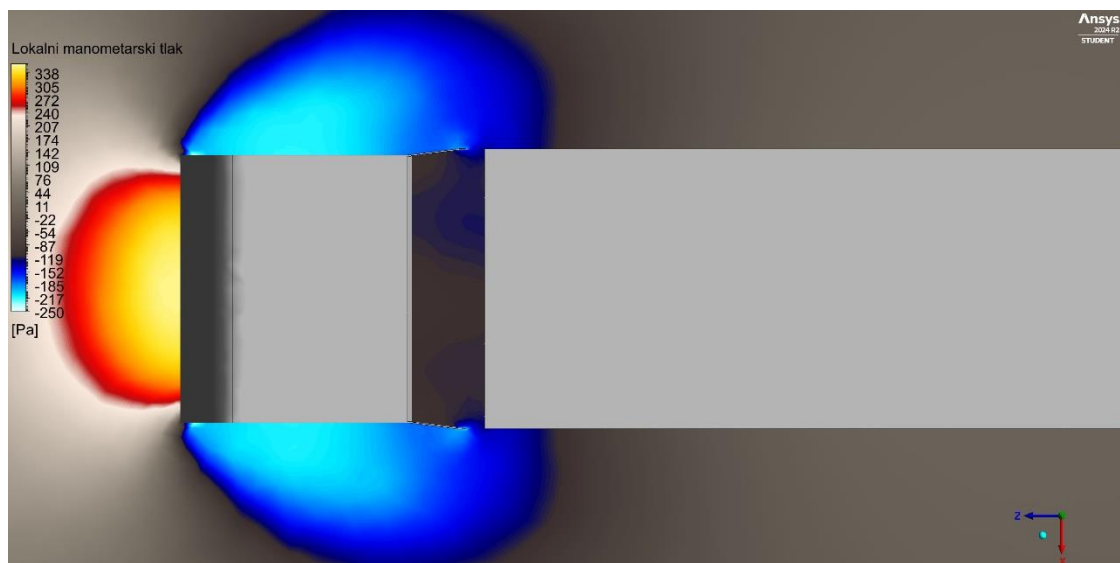
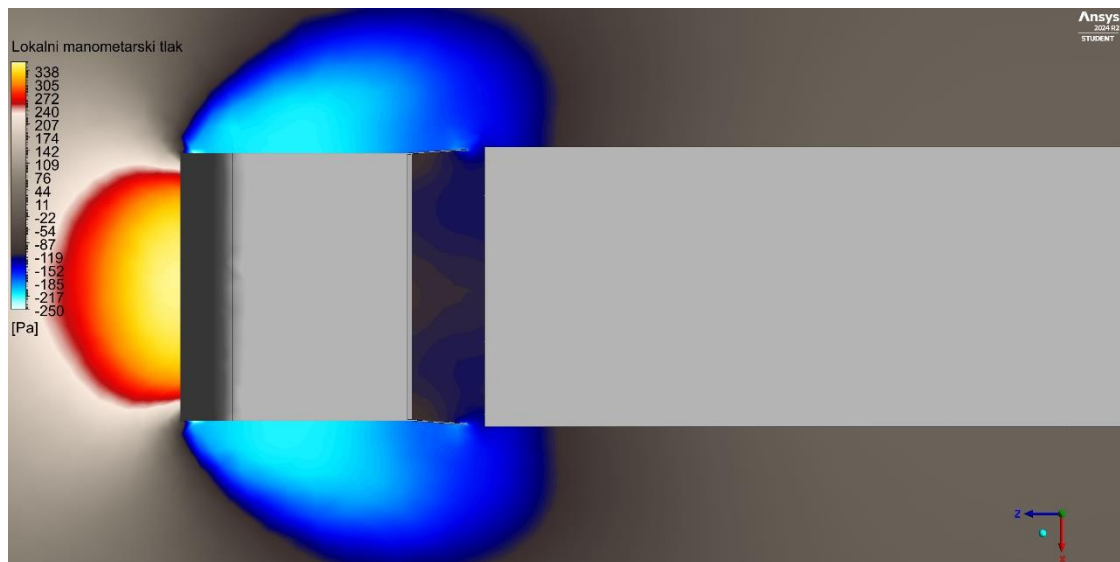
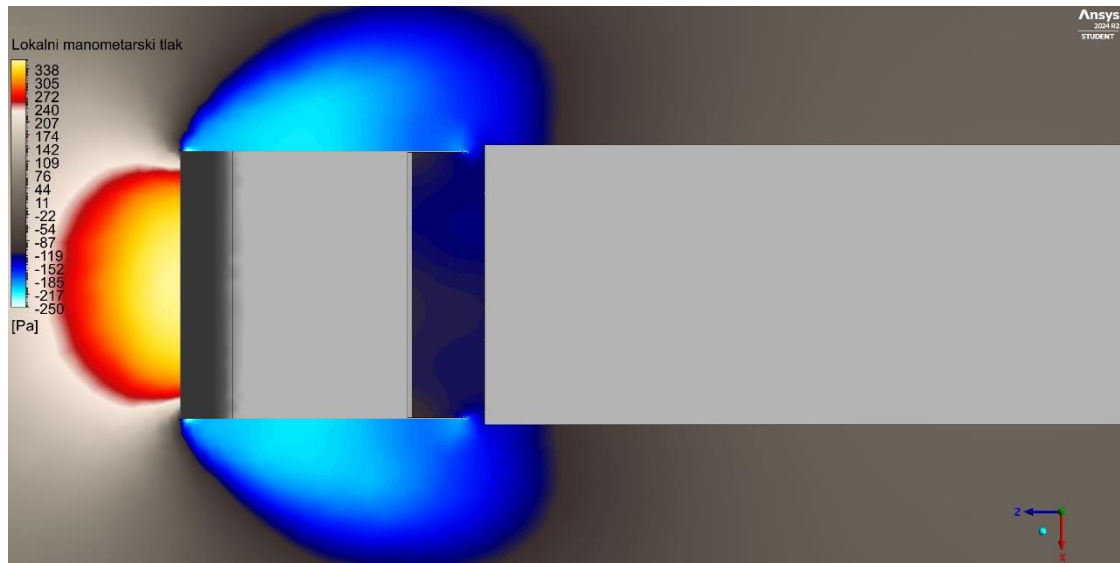


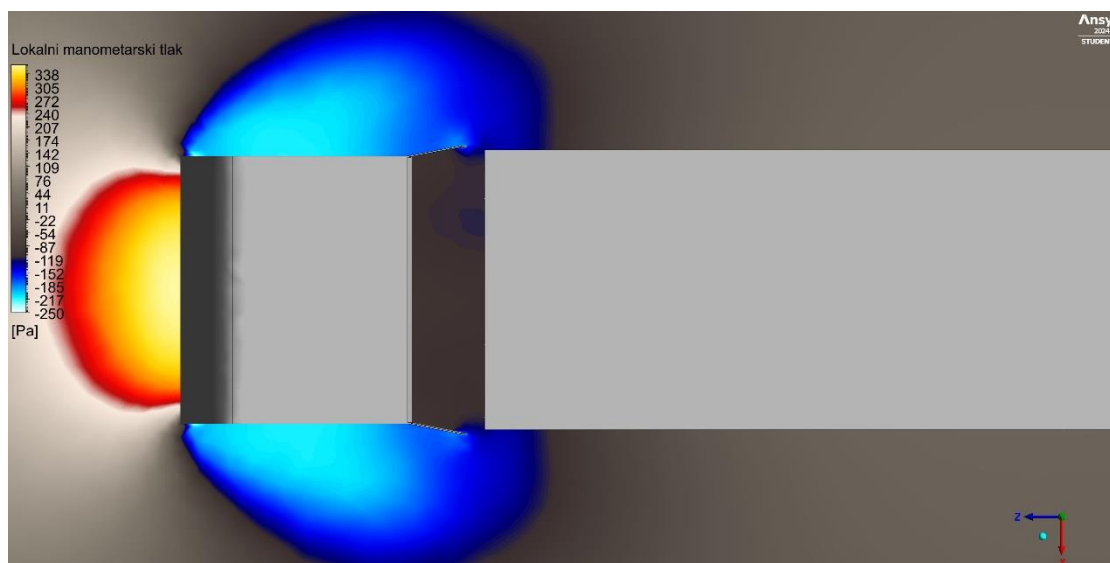


Slika 61. Promjena polja lokalne brzine ovisno o tipu geometrije i kutu zaklona bočnih oplata kabine za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, B400-0, B500-0, B500-4, B500-7, B500-11

Produljivanjem dužina bočnih oplata s 400 mm na 500 mm postiže se ujednačenost brzina na području između kabine i poluprikolice (svijetli središnji dio) u smjeru strujanja. Povećanjem kuta otklona vrtložna polja odmiču se od vozila smanjujući njihov utjecaj na turbulenciju strujanja i ujednačavajući uvjete u spomenutoj regiji.







Slika 62. Promjena polja lokalnog manometrijskog tlaka ovisno o tipu geometrije i kutu zaklona bočnih oplata kabine za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, B400-0, B500-0, B500-4, B500-7, B500-11

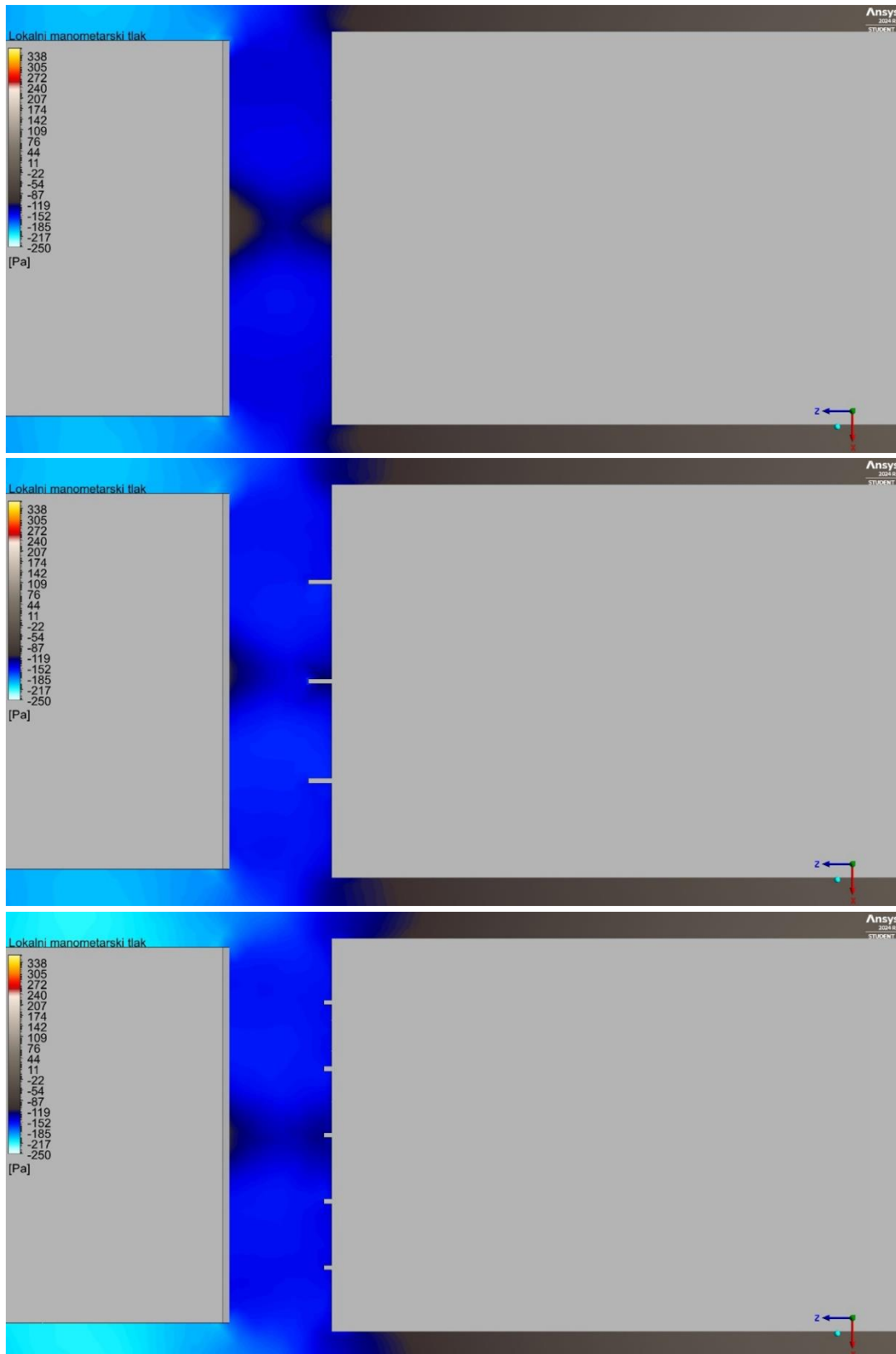
Povećanjem kuta otklona smanjuje se ekstremnija razlika u tlakovima na promatranoj regiji. Polja visokog podtlaka prelaze u polja manjeg podtlaka. To je posljedica ranije spomenutog kontroliranja vrtloženja na bočnim stranama vozila.

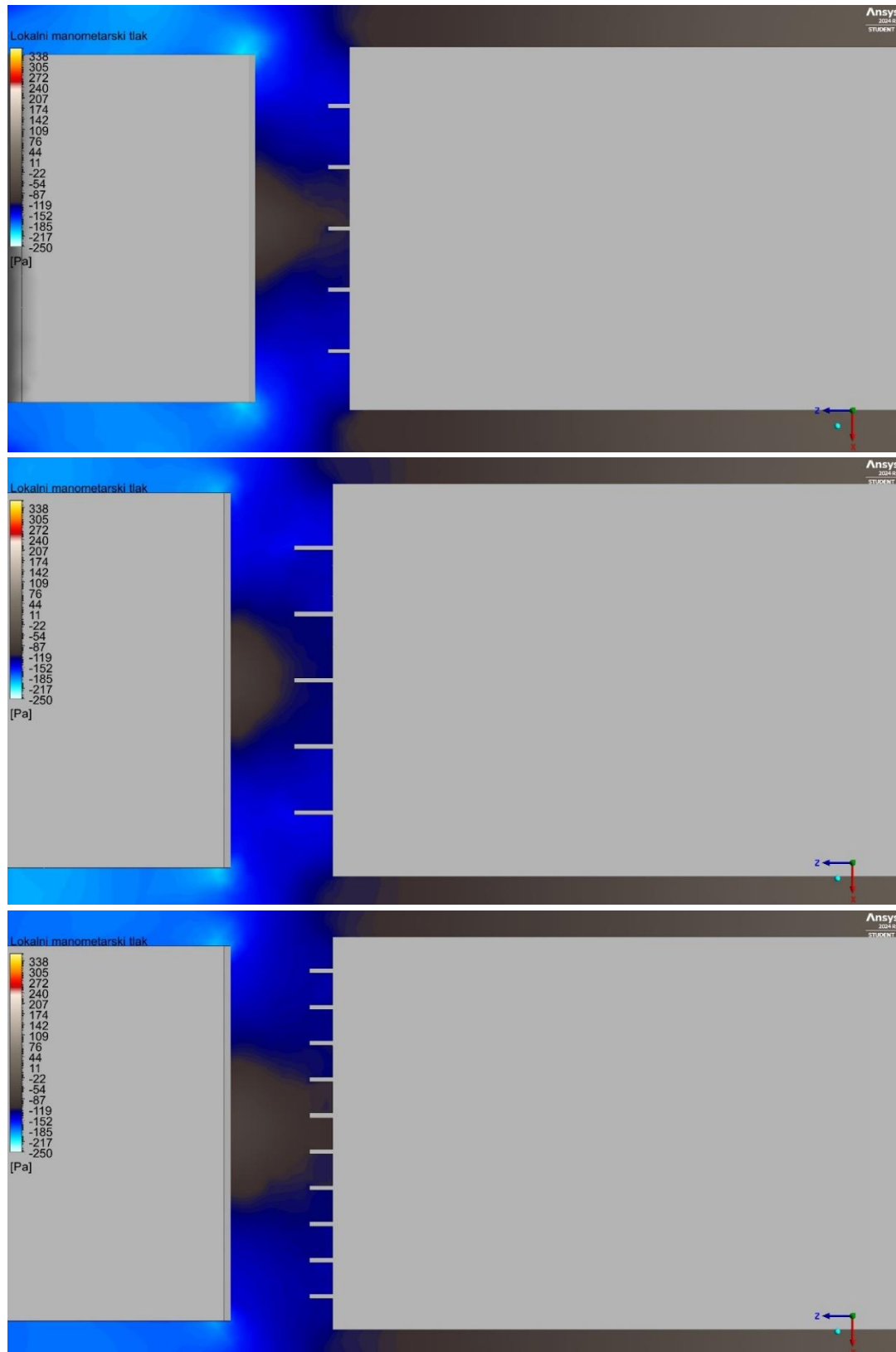
6.2.4 3D analiza utjecaja nadogradnji lokalizatora vrtloženja (C)

Tablica 6. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike lokalizatora vrtloženja u slučaju 3D strujanja

Model	C3-150	C5-150	C7-150	C10-150	C5-50	C5-100	C5-200	C5-250
C_d	1,058	1,033	1,036	1,037	1,068	1,041	1,040	1,044

Promjenom broja ploča lokalizatora postignuto je smanjenje iznosa faktora te pokazan optimalni broj ploča lokalizatora. Variranjem njihove duljine nije postignuto poboljšanje u pogledu smanjenja C_d od početne dužine koja se koristila pri analizi varijacije njihovog broja (150 mm). Relativno smanjenje faktora otpora zraka uspoređujući polaznu geometriju i slučaj geometrije C s kojim se postigao najniži iznos faktora iznosi 2,91%. Prema ranijim opisima načina konstrukcije lokalizatora i njegovog utjecaja na strujanje u praznini kabine i poluprikolice očekivani su takvi rezultati koji će biti prikazani na sljedećim slikama. Vrijednosti lokalnog manometrijskog tlaka i vektora brzine sa strujnicama prikazane su na horizontalnoj xz ravnini.

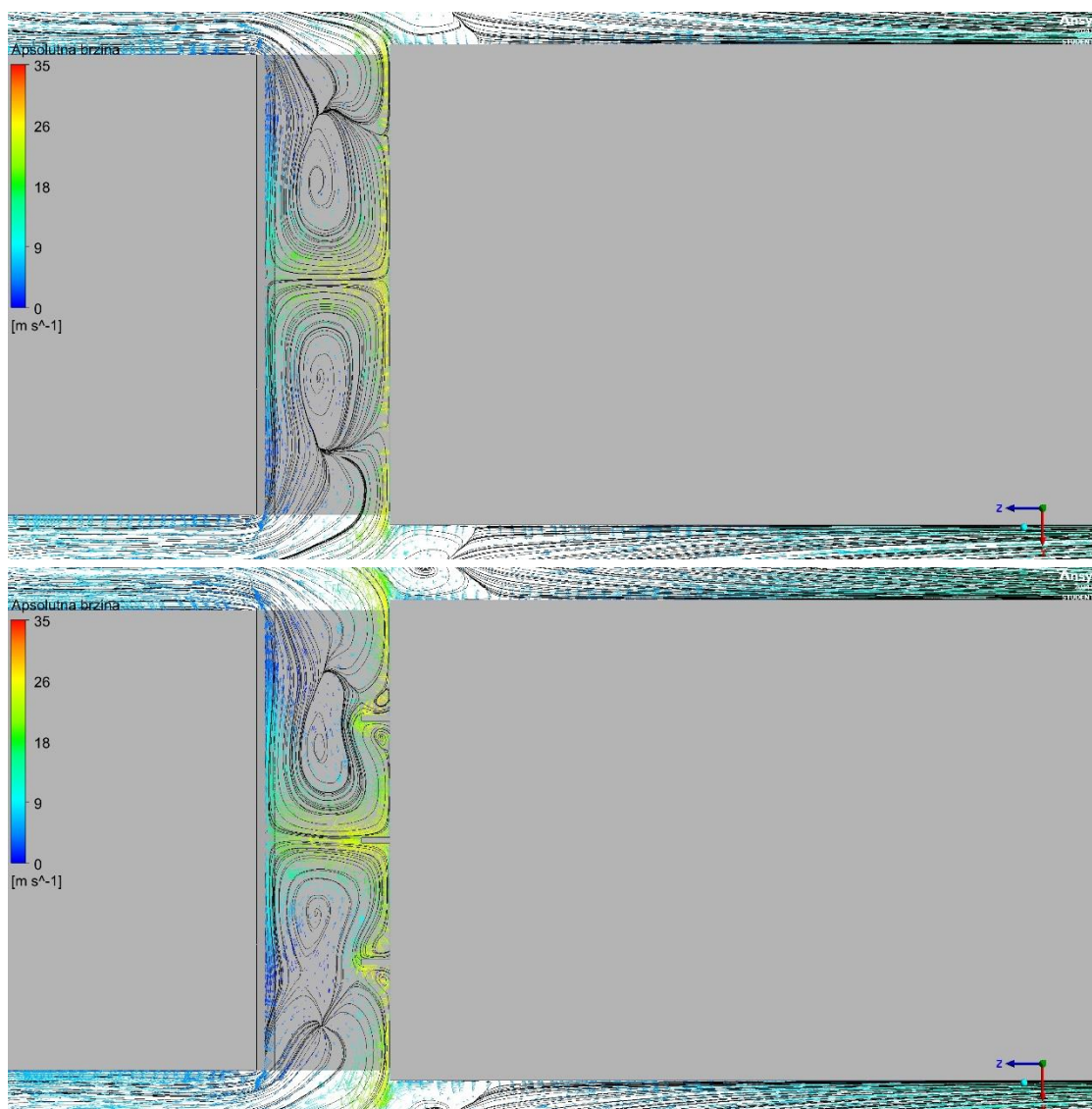


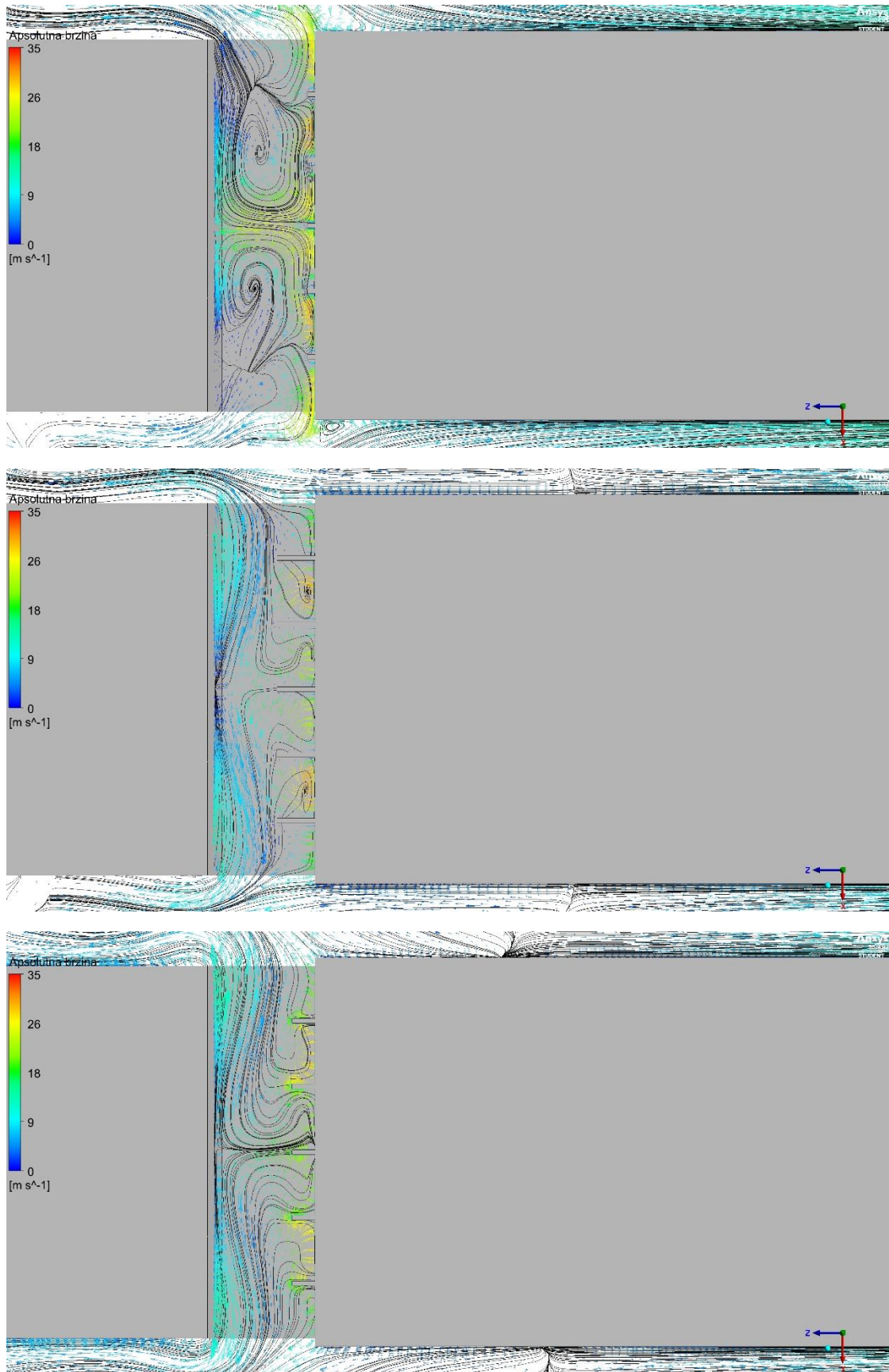


Slika 63. Promjena polja lokalnog manometarskog tlaka ovisno o veličini i broju ploča lokalizatora vrtloženja za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, C3-150, C5-50, C5-150, C5-250, C10-150

Analizom polja lokalnog manometarskog tlaka s prethodnih slika vidljiva je jasna promjena polja tlaka na analiziranom području. Slučaj s 3 ploče lokalizatora pokazuje veću površinu viših iznosa podtlaka, ali sa manjim intenzitetom stoga i faktor otpora nije značajno smanjen u odnosu na polaznu geometriju. Premda model C10-150 pokazuje manju površinu ekstremnijeg podtlaka u odnosu na model C5-150, kod modela C10-150 dolazi do destabilizacije vrtloga na rubnim (vanjskim) pločama koja prelazi na bočne strane vozila. Posljedica tome su veća povratna strujanja na bočnim stranama vozila uz bridove poluprikolice kao i neznatno viši faktor otpora. Taj efekt biti će prikazan na sljedećim slikama strujnica i vektora apsolutnih brzina na horizontalnoj plohi u ravnini xz . Strujnicama je također prikazano razbijanje dva glavna vrtloga u više manjih, ovisno o broju ploča.

Zanimljivo je primijetiti da oštri rubovi ploča ne stvaraju područja ekstremno niskog tlaka jer se fluid ne ogiba oko njih već se vrtloži.







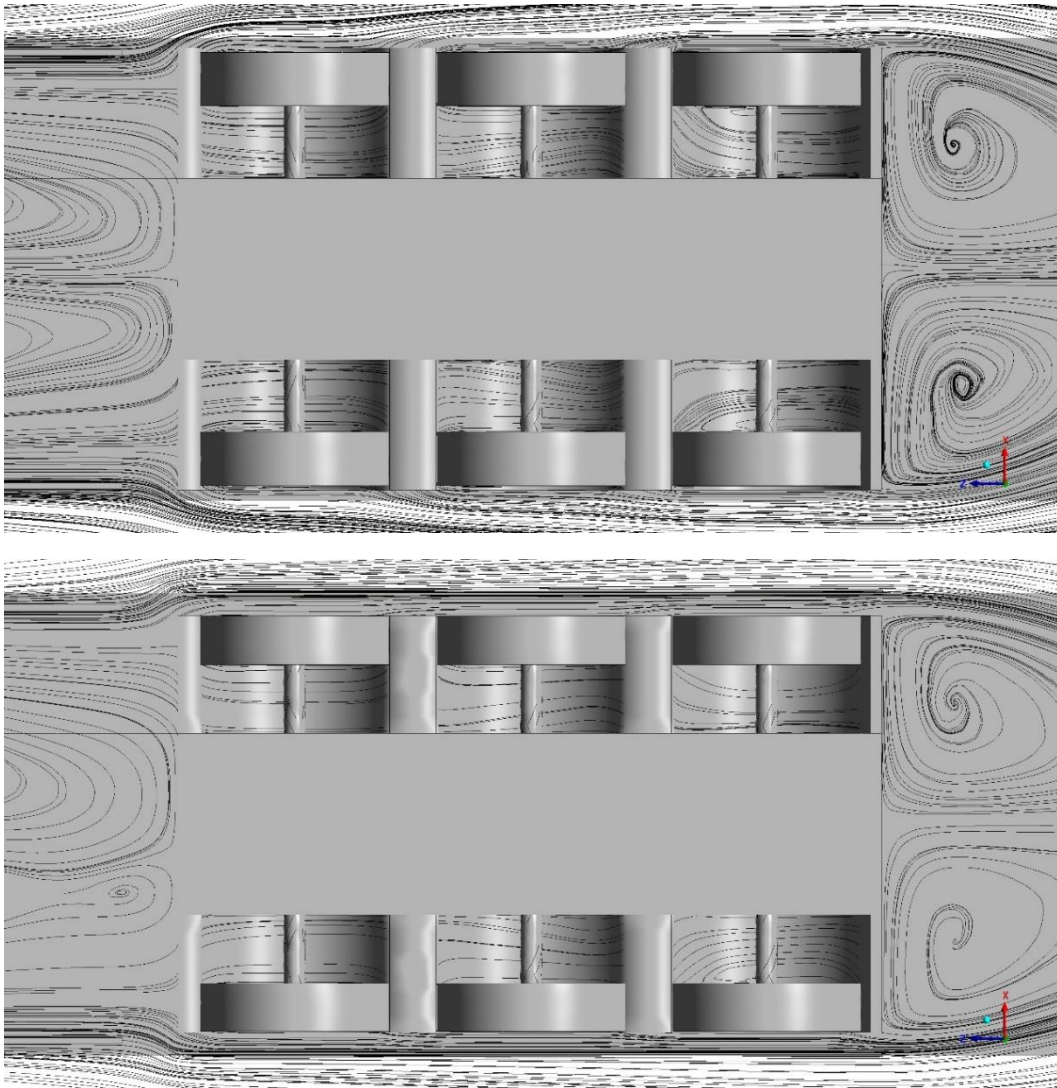
Slika 64. Promjena vektora brzina i strujnica ovisno o veličini i broju ploča lokalizatora vrtloženja za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, C3-150, C5-50, C5-150, C5-250, C10-150

6.2.5 3D analiza utjecaja nadogradnji prekriva kotača – zavjesa (D)

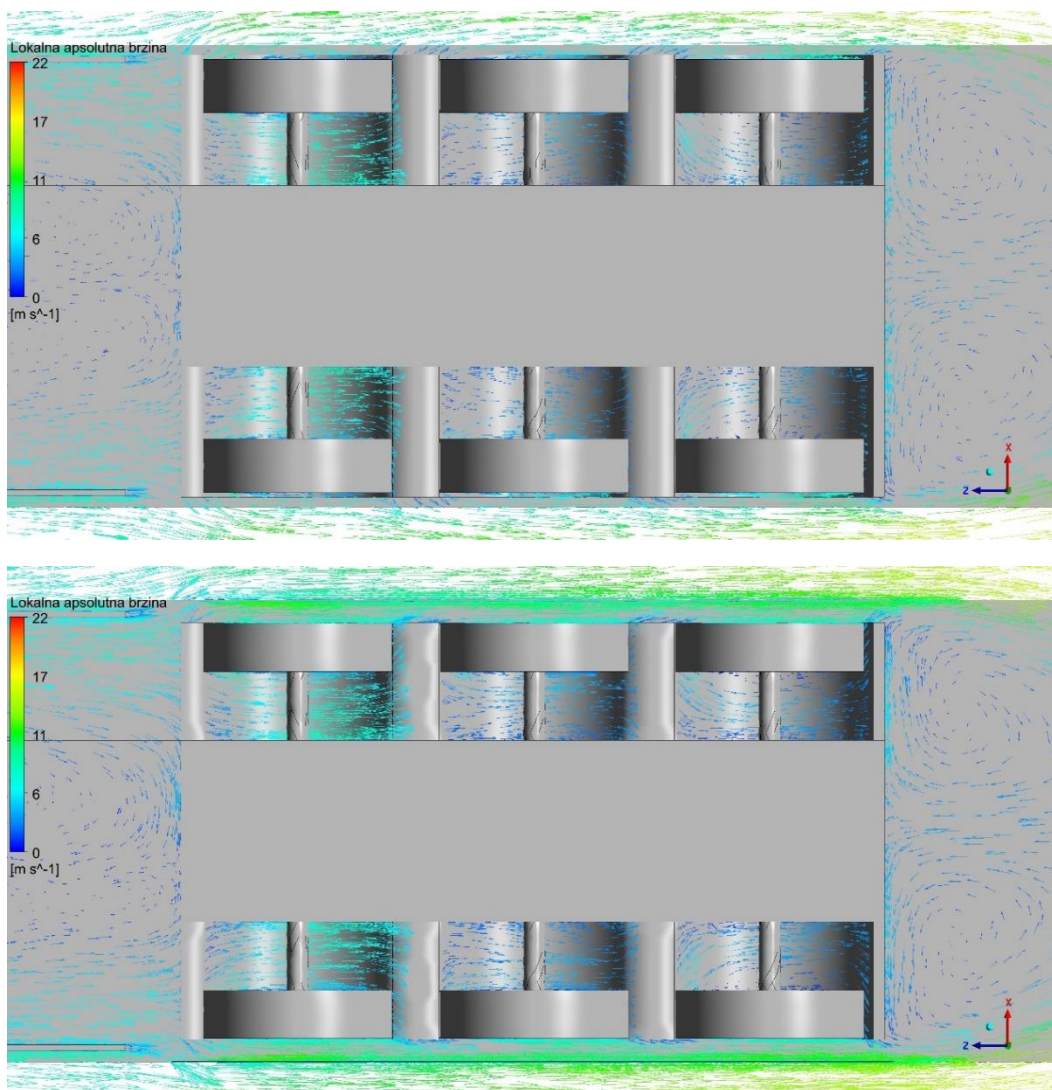
Tablica 7. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane modele promjenjive duljine prekriva kotača u slučaju 3D strujanja

Model	D400	D600	D800	D1100
C_d	1,062	1,062	1,059	1,058

Prekrivanjem kotača nisu postignuta značajna smanjenja faktora otpora fluida. Njihov utjecaj bi bio izraženiji pri bočnim naletima vjetra, odnosno naletavanjem vjetra pod kutom u odnosu na uzdužnu os vozila. U ovom analiziranom slučaju koristili su kao lokalni usmjerivači zraka što je prikazano na sljedećim slikama strujnica i vektora brzina na lokalnoj horizontalnoj plohi u xz ravnini u visini kotača.



Slika 65. Promjena strujnica dodavanjem prekriva kotača za 3D slučaj; gornja slika: polazna geometrija; donja slika sa prekrivom kotača D



Slika 66. Promjena vektora brzina dodavanjem prekriva kotača za 3D slučaj; gornja slika: polazna geometrija; donja slika sa prekrivom kotača D

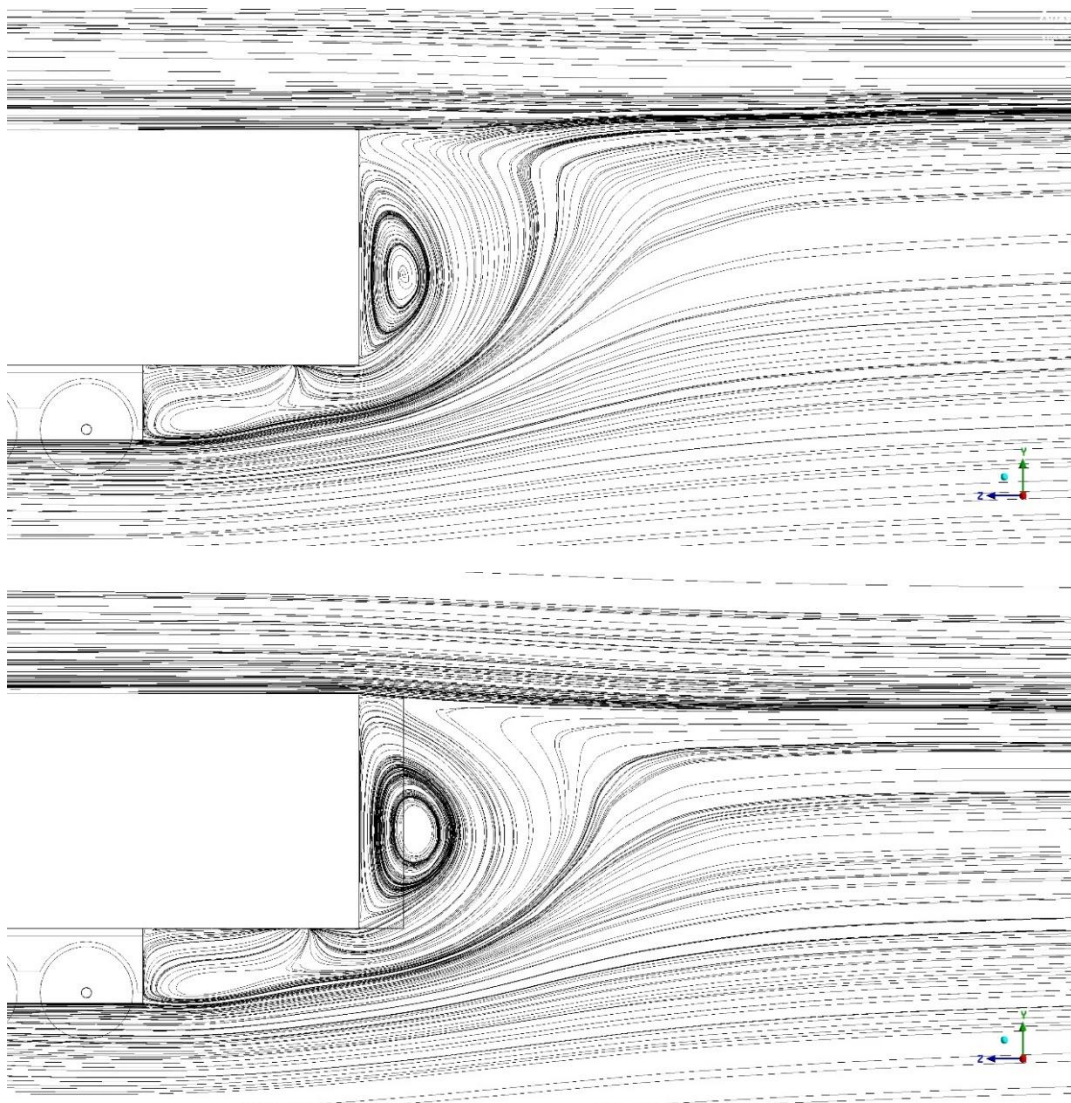
6.2.6 3D analiza stražnjih krilca poluprikolice (E)

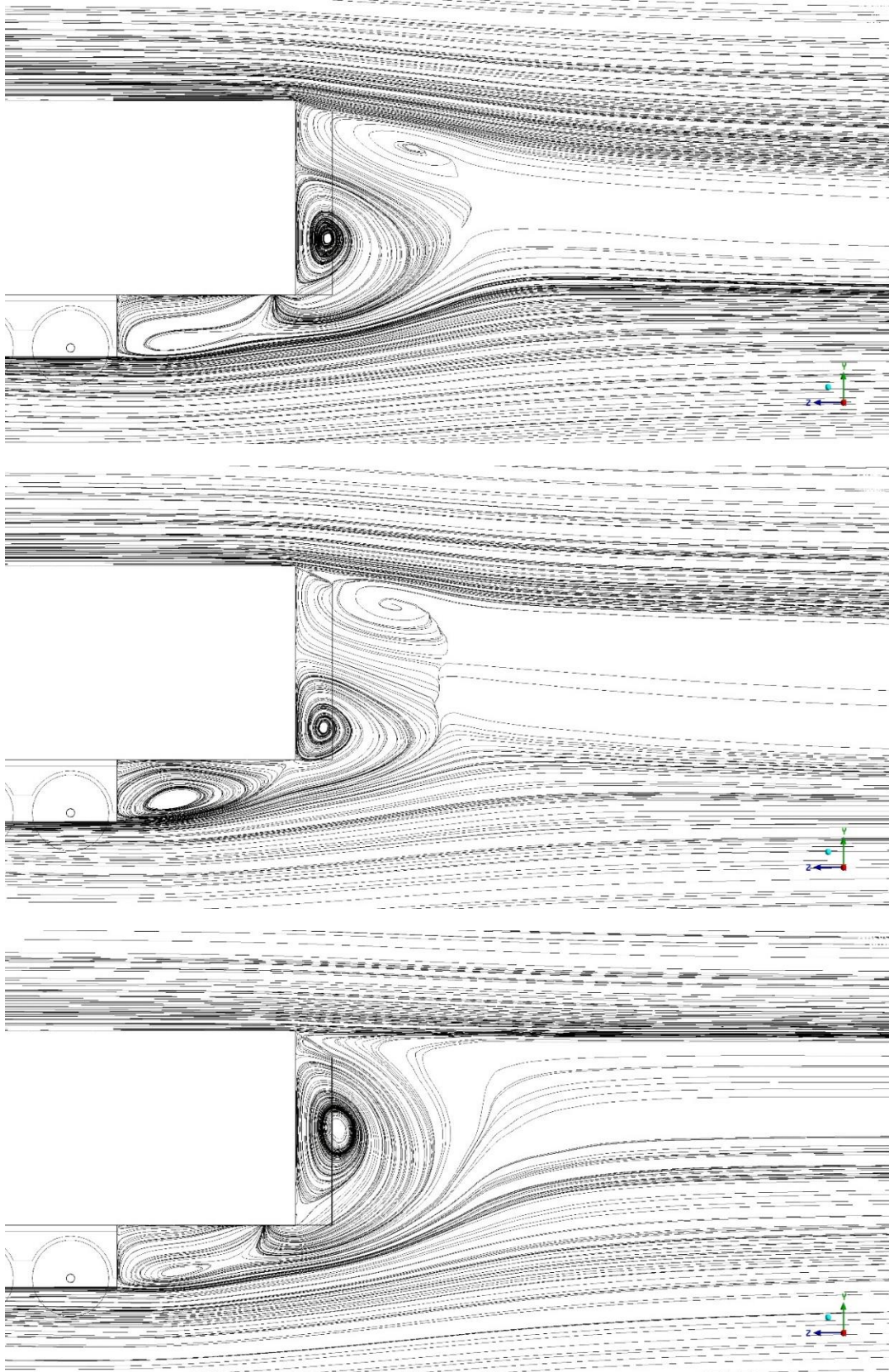
Tablica 8. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike promjene kuta nagiba stražnjih krilca kabine u slučaju 3D strujanja

Model	E5	E10	E15	E20	E25	E30	E35	E40	E45
C_d	1,011	0,990	0,971	0,974	0,984	1,004	1,022	1,032	1,036

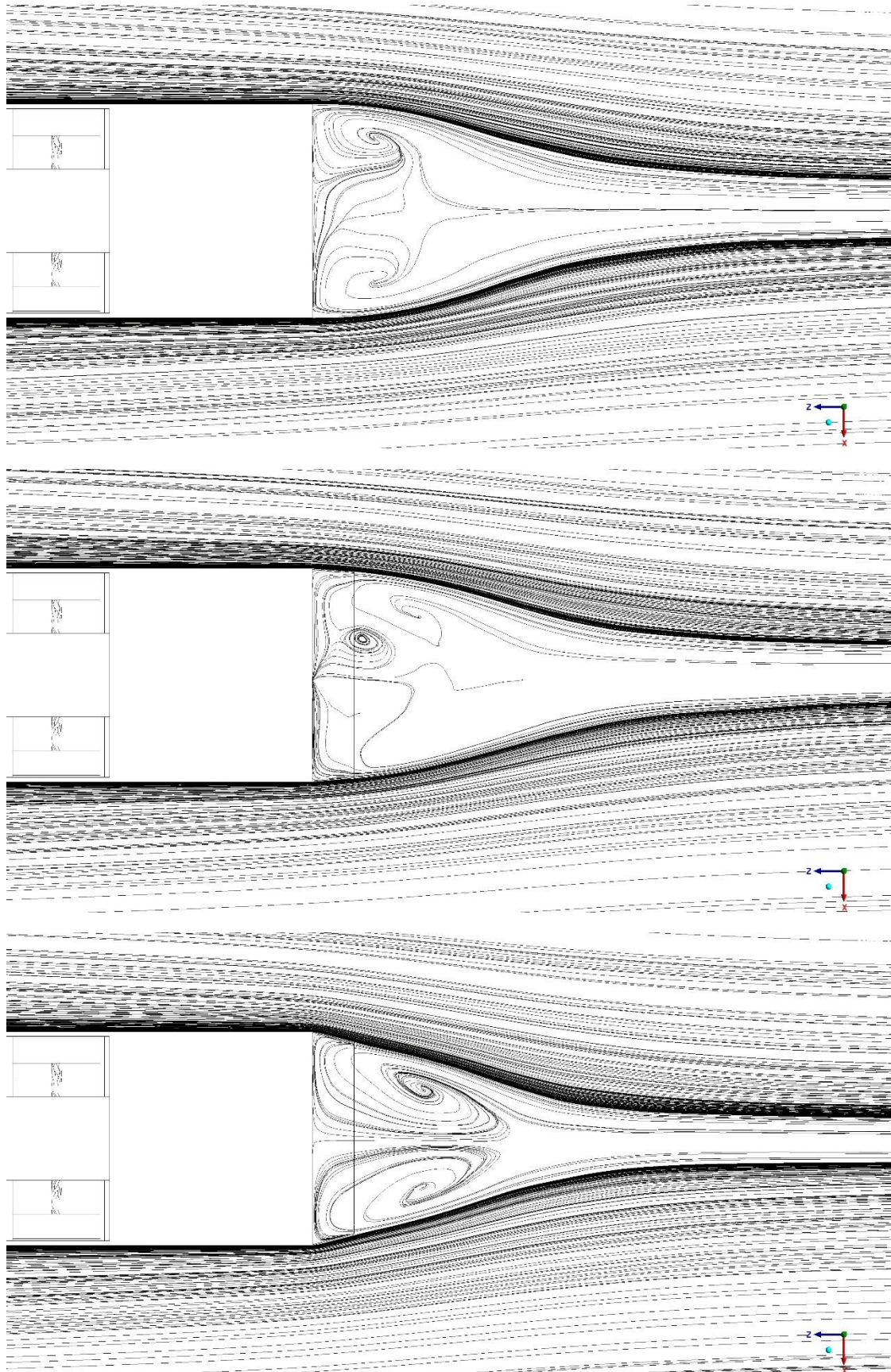
Pregledom podataka analize različitih nagiba stražnjih krilca kabine zaključuje se trend smanjenja faktora otpora do kuta od 15°. Prema [1] nagibanjem stražnje površine stvaraju se vrtlozi koji povećavaju otpor, međutim nizvodno strujanje na koje utječu vrtlozi postaje povezano na središnjem dijelu nagnutih površina što za posljedicu stabiliziranje tlaka, a

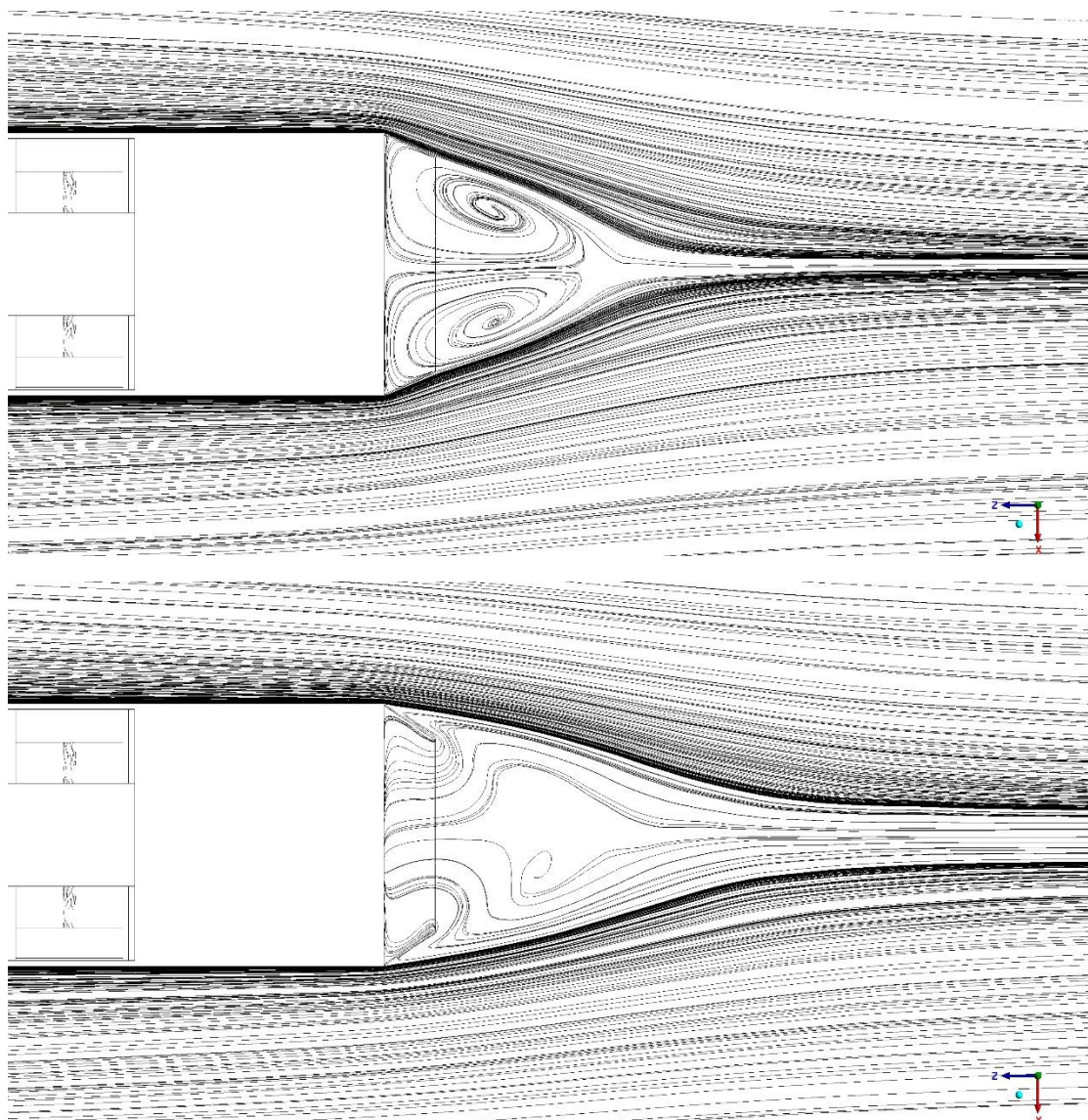
sukladno tomu i smanjenje faktora otpora. Povećavanjem kuta nagiba pojedinačni efekti postaju sve izraženiji, a suma otpora postaje minimalna pri 15° . Daljnjim povećanjem kuta dolazi do porasta otpora u odnosu na minimalni iako je dio toka i dalje „priljubljen“ uz površine. Pri nešto većem kutu (kritičnom kutu) vrtlozi se odvajaju i/ili raspršuju, a inducirani nizvodni tok više nije sposoban održati vezano strujanje na središnjoj liniji. Strujanje se naglo odvaja, a na nagnutoj površini razvija se potpuno odvojeni tok. Iznos faktora otpora pri višim kutovima od kritičnog je približan početnom. Relativno smanjenje faktora otpora zraka uspoređujući polaznu geometriju i slučaj geometrije E s kojim se postigao najniži iznos faktora iznosi 8,74%. Na sljedećim slikama tok će biti prikazan strujnicama u dvije ravnine – xz i yz za različite kutove nagiba i polaznu geometriju.





Slika 67. Promjena strujnica ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj yz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E25, E35

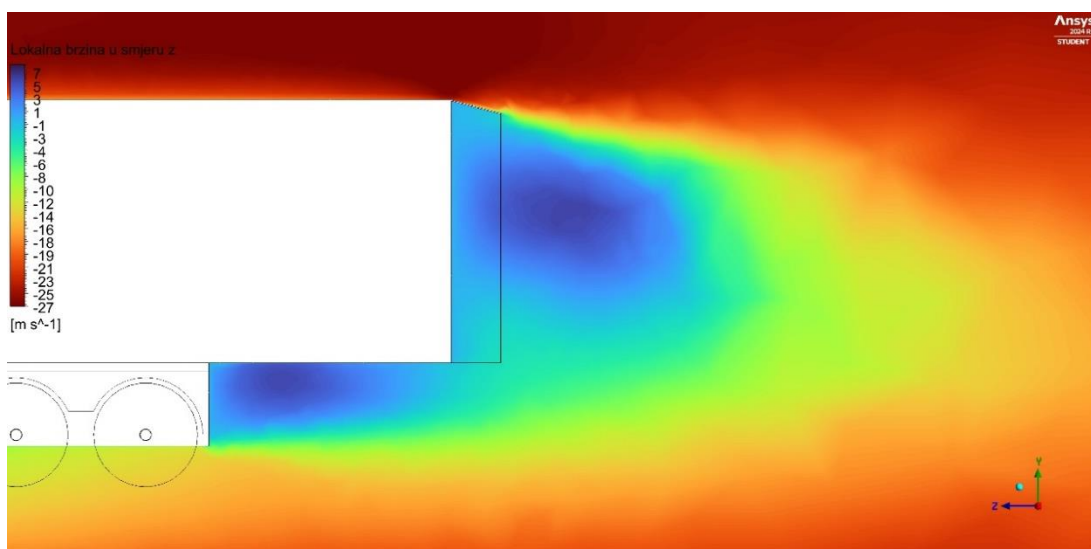
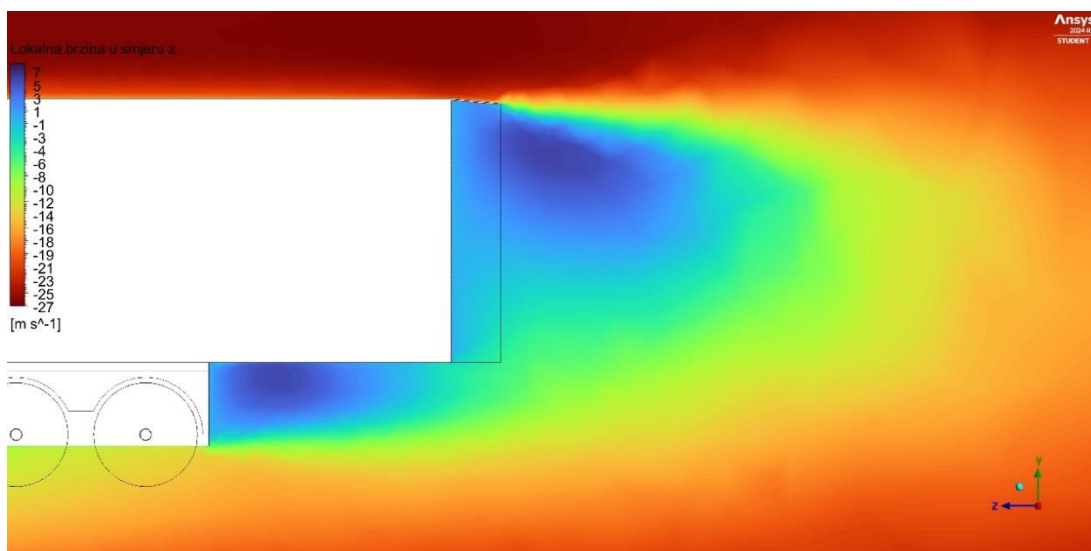
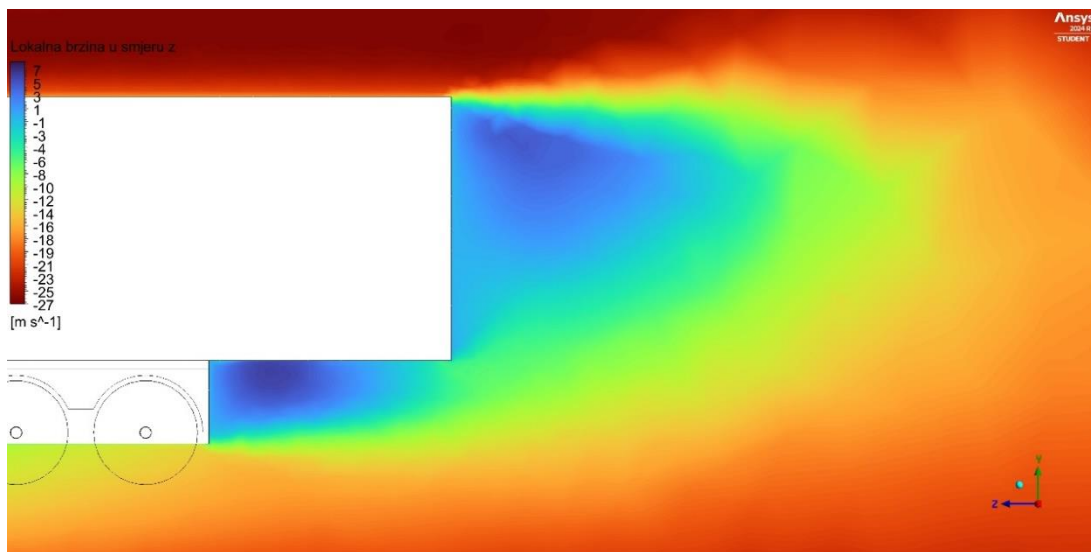


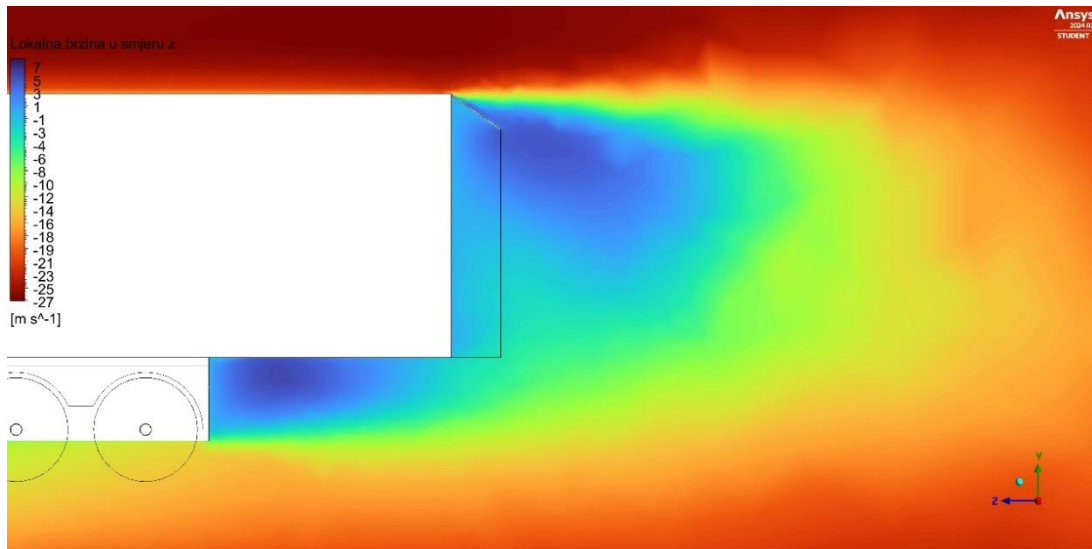


Slika 68. Promjena strujnica ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj xz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E25, E35

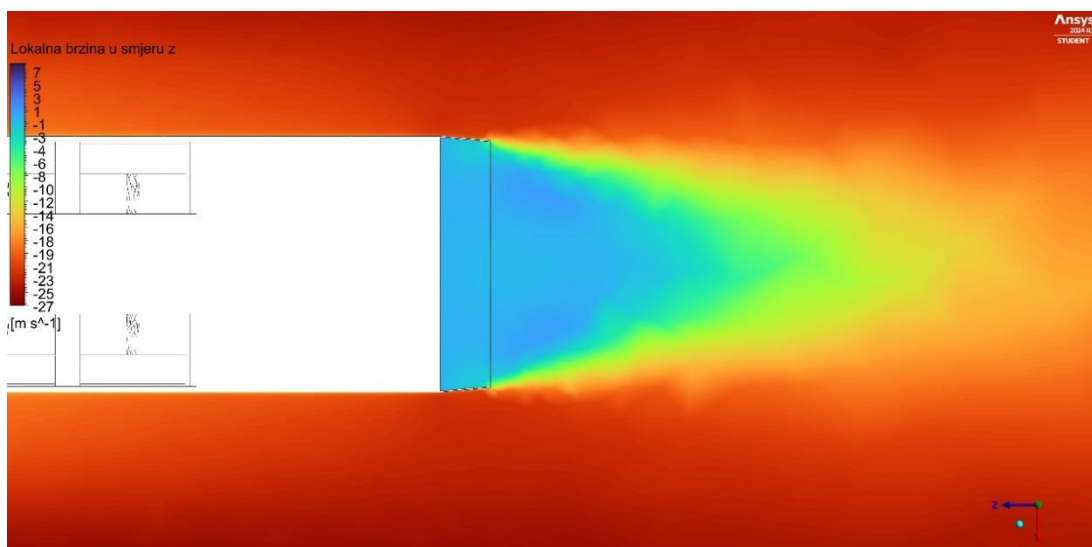
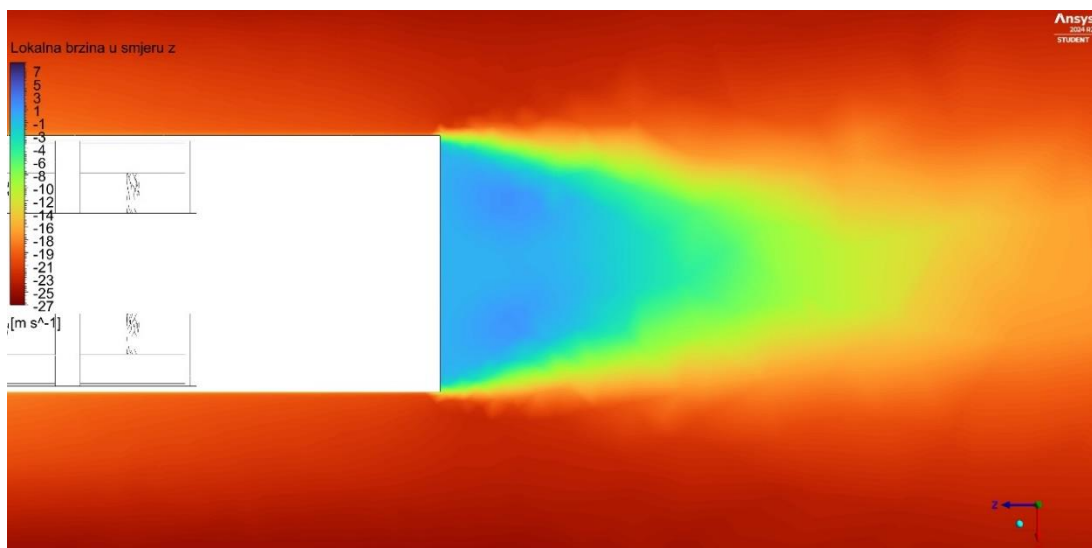
Na slikama 66 i 67 vidljivo je prijanjanje strujanja na plohe pod nagibom te približavanje strujnica koje dolaze s gornje i donje strane vozila prema središnjoj uzdužnoj liniji vozila u yz ravnini i strujnica koje dolaze sa bočnih strana vozila prema središnjoj uzdužnoj liniji vozila u xz ravnini. Odvajanje strujnica od vozila u yz ravnini dolazi već pri 25° nagiba dok se to u xz ravnini događa netom kasnije (ovdje prikazan slučaj za 35° nagiba gdje se odvajanje već dogodilo za neki slučaj manjeg kuta). Prema tablici 8 po vrijednostima iznosa faktora otpora može se zaključiti da se odvajanje dogodilo oko 30° nagiba s obzirom da se za taj slučaj bilježi nagli porast C_d u odnosu na slučaj za 25° nagiba. Kašnjenje odvajanja u horizontalnoj ravnini prikazano je manjim relativnim porastom faktora u odnosu na prethodni slučaj i idući.

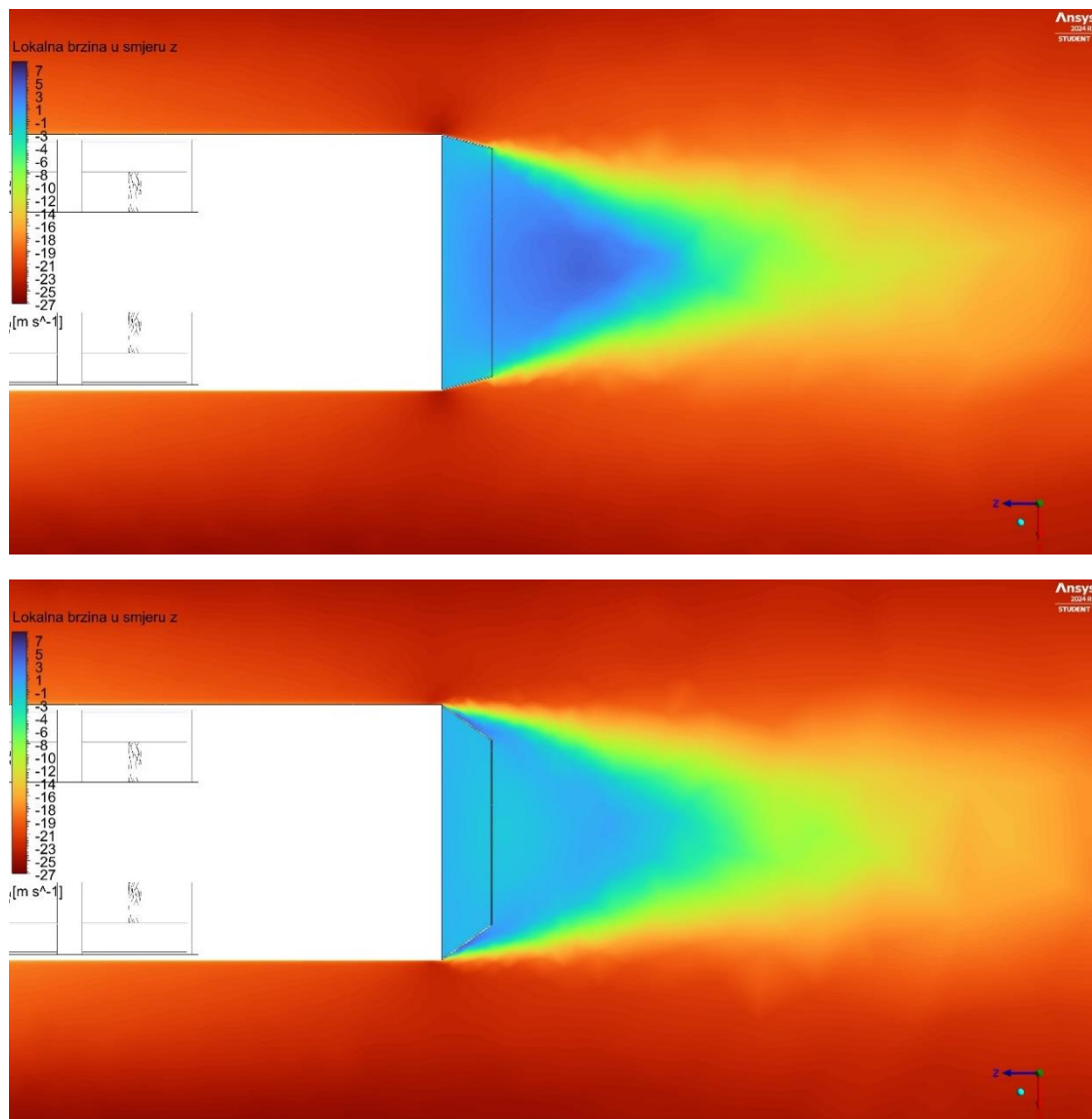
Na sljedećim slikama prikazane su promjene polja brzine za neke od slučajeva u dvije spomenute ravnine.





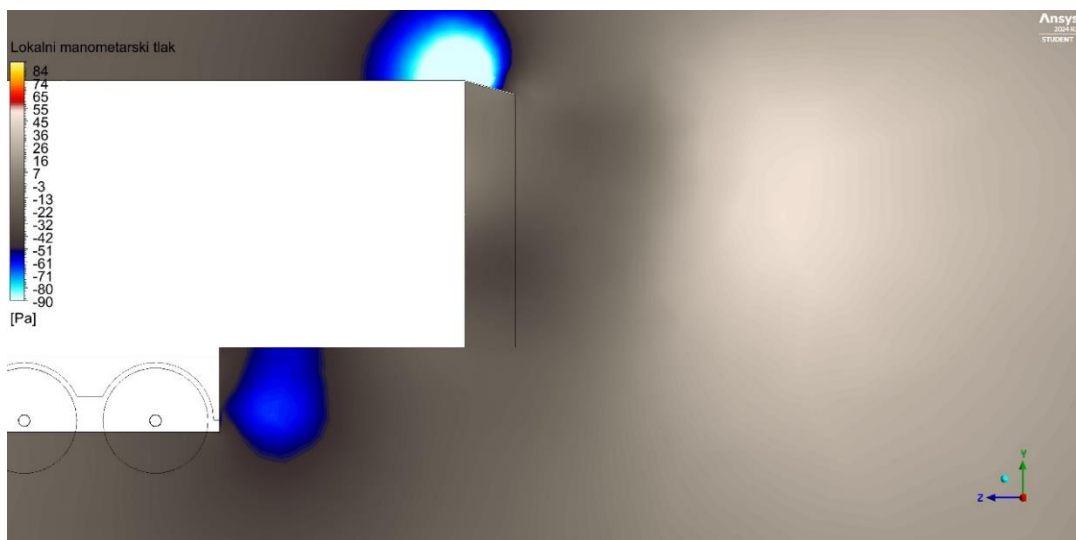
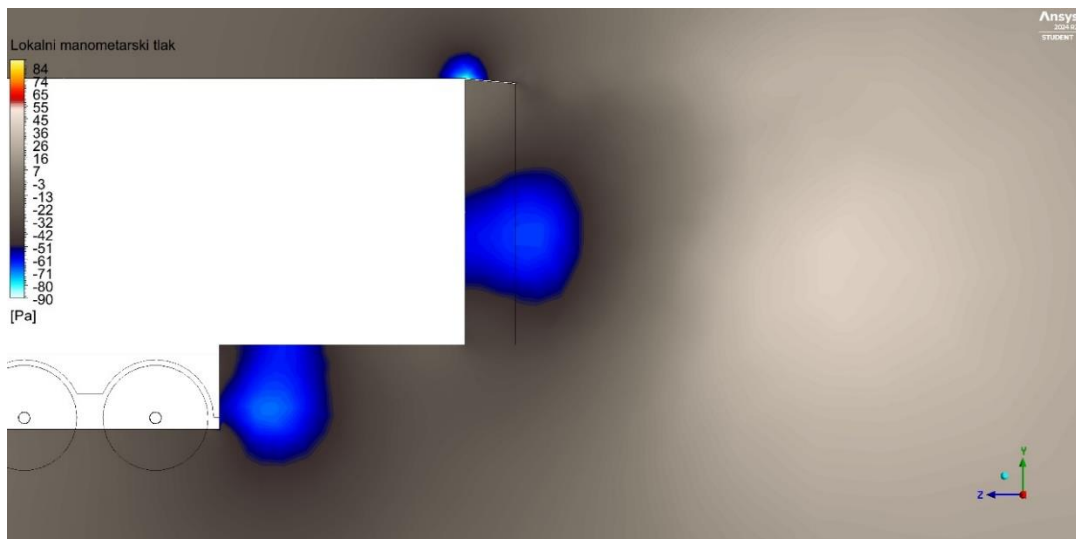
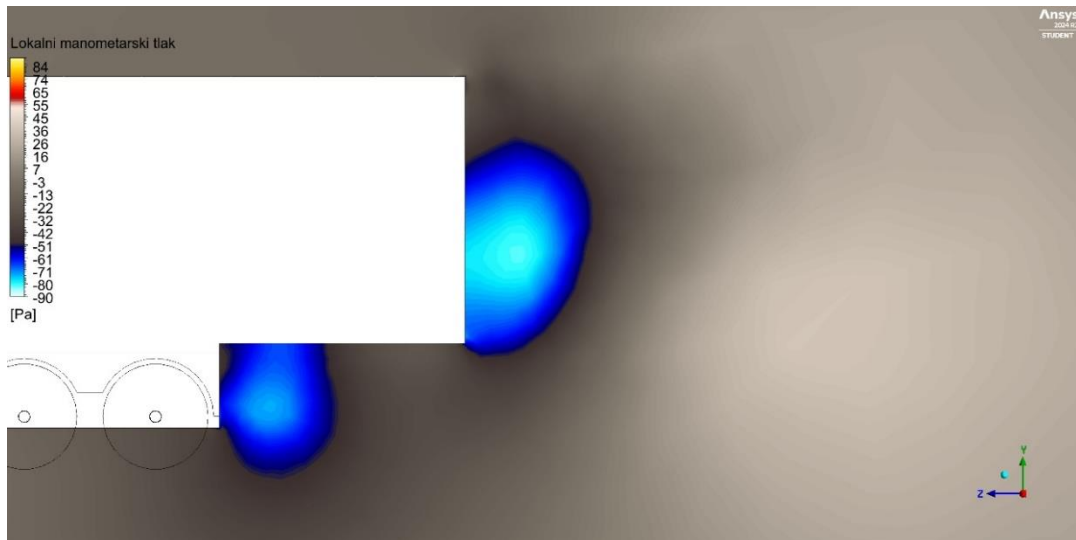
Slika 69. Promjena polja lokalne brzine ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj yz ravni za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E35

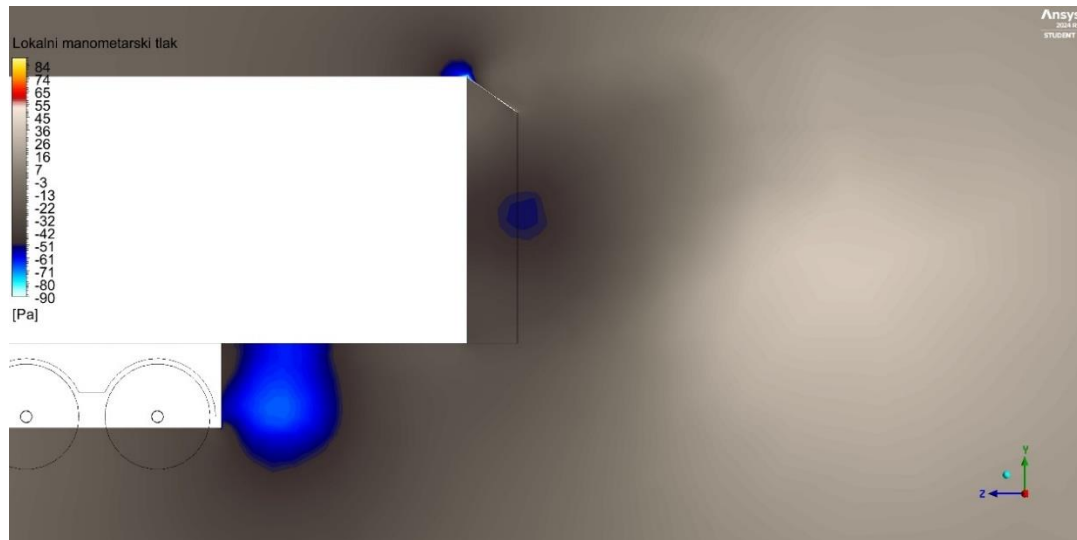




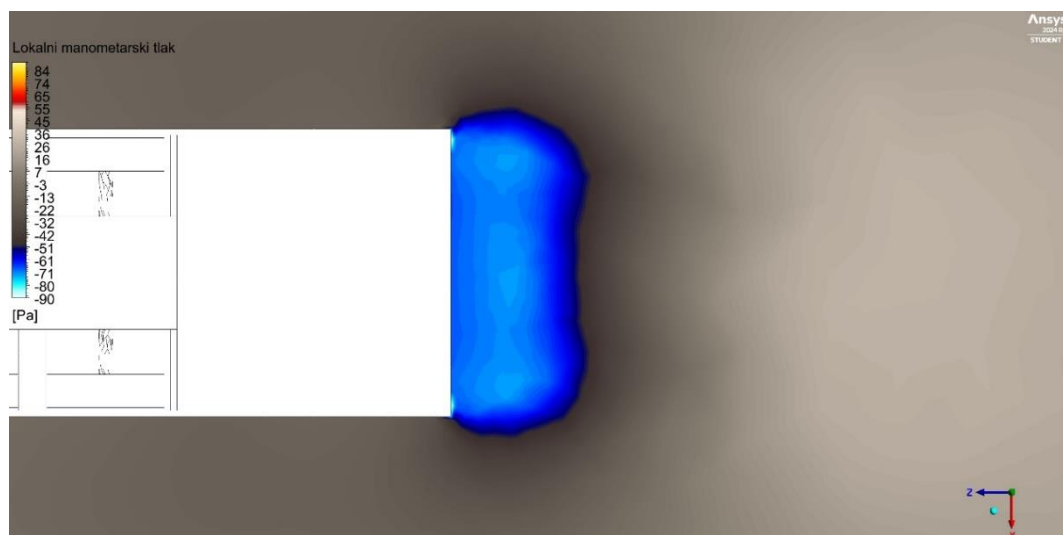
Slika 70. Promjena polja lokalne brzine ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj xz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E35

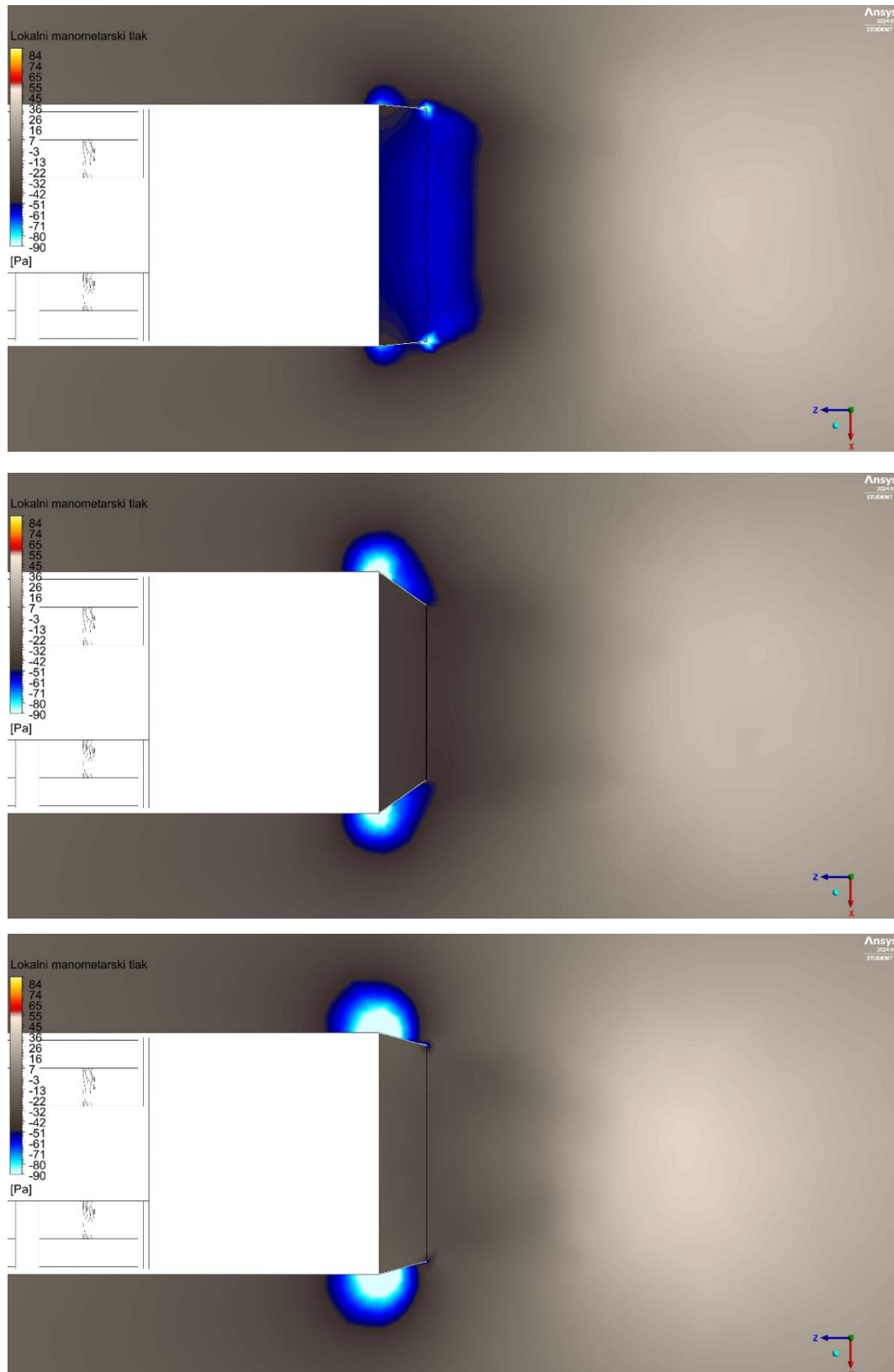
Kao što je objašnjeno i vidljivo na prethodnim slikama, u ovom slučaju veća vrtloženja (tamnije plave regije) u blizini prikolice rezultiraju smanjenjem faktora otpora jer utječu na brže spajanje razdvojenih strujnica oko vozila, a samim time i razlikama u lokalnim tlakovima što će biti prikazano na sljedećim slikama.





Slika 71. Promjena polja lokalnog manometarskog tlaka ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj yz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E35





Slika 72. Promjena polja lokalnog manometarskog tlaka ovisno o kutu nagiba stražnjih krilca poluprikolice u uzdužnoj xz ravnini za 3D slučaj; od gore prema dolje: polazna geometrija, E5, E15, E35

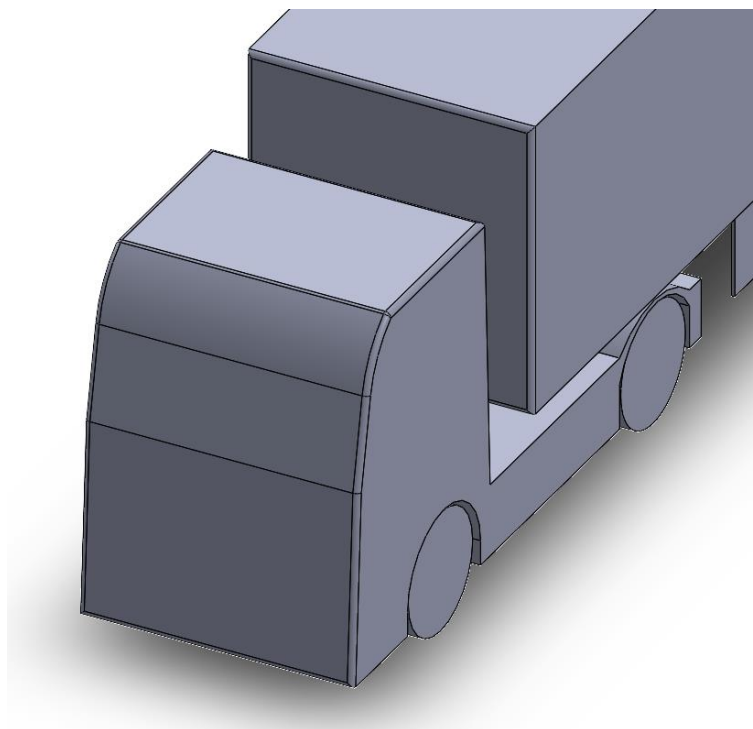
Na slikama analize lokalnog manometarskog tlaka jasno je vidljiva problematika oštih prijelaza nadodane geometrije. Zbog usko lokaliziranih odvajanja strujnica od površine vozila na oštrim prelazima dolazi do naglog pada tlaka. U stvarnosti bi prijelaz bio „blaži“ odnosno rubovi bi bili zaobljeni stoga efekt ne bi bio toliko izražen. Utjecaj generalnog zaobljenja oštih rubova na smanjenje faktora otpora bit će prikazan na jednoj od sljedećih analiza u radu.

6.2.7 3D analiza utjecaja pojedine vrste nadogradnog elementa u skupnom modelu, slučaja s utjecajem ceste, slučajeva s bočnim retrovizorima/kamerama i slučaja sa zaobljenim napadnim kutovima

Tablica 9. Vrijednosti faktora otpora zraka C_d za analizirane oblike postupne implementacije pojedinih vrsti nadogradnji u slučaju 3D strujanja

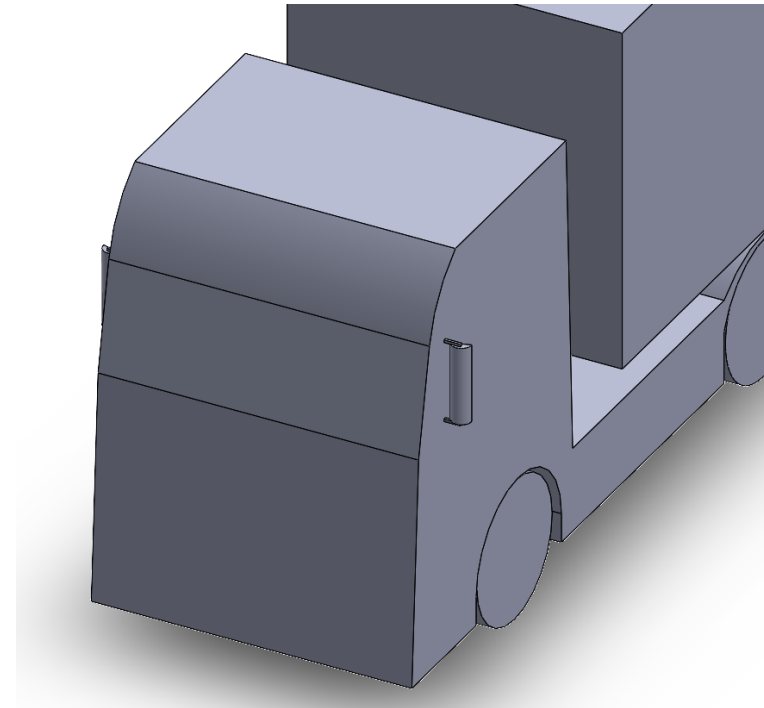
Model	C_d	Model	C_d
polazna geometrija	1,064	A3-3000; D1100; E15	0,838
A3-3000;B11;D1100; E15	0,742	A3-3000; B11; E15	0,746
B11; D1100; E15	0,874	A3-3000; B11; D1100	0,825
bočna zrcala	1,076	polazna geometrija – zaobljeni bridovi	0,931
bočne kamere	1,071	polazna geometrija – s utjecajem ceste	0,973

Zanimljivo je za primijetiti kako se zaobljenjem par napadnih kutova (na kabini i vrhu poluprikolice) postiglo još veće smanjenje faktora otpora. Kroz rad je nekoliko puta bilo spomenuto da oštri rubovi u stvarnosti ne postoje, već su oni blago zaobljeni, a time je i preventirano stvaranje lokalnih polja ekstremno niskog tlaka. Time je dokazana osjetljivost analize na utjecaj nezaobljenih modela koji se promatraju, a njihova zaobljenost utječe na dodatno smanjenje faktora otpora. Simulacije je bilo besmisleno provoditi s optimiranim zaobljenim rubovima jer to zaobljenje zahtjeva veći broj elemenata mreže (nastaje površina umjesto jediničnog brida) te bi se koristila još nekoliko puta grublja mreža od korištene u radu. S dodavanjem radijusa na bridove postiglo se relativno smanjenje u odnosu na polaznu geometriju od 12,50%.

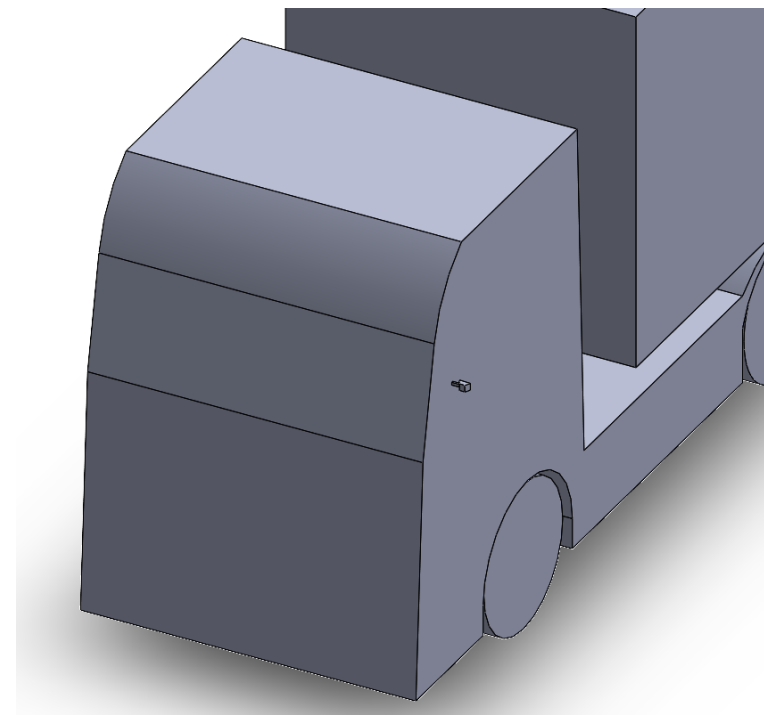


Slika 73. Model polazne geometrije sa zaobljenim napadnim kutovima

Kao dodatak analizama provela se provjera utjecaja jednostavnog oblika bočnih zrcala na utjecaj povišenja/smanjenja faktora otpora zraka. Pretpostavkom da će njihova implementacija imati negativan utjecaj na otpor zraka, provela se i analiza jednostavnog oblika bočnih kamera koje bi zamijenile bočna zrcala. Kamere su manje i profiliranijeg oblika pogodnog za smanjenje otpora strujanja, stoga je analiza pokazala manji iznos faktora otpora u odnosu na rezultat sa zrcalima, ali i dalje veći u odnosu na polaznu geometriju bez ikakvih dodataka za pregled oko vozila. Uzrok tomu je stvaranje dodatne turbulentne regije iza zrcala/kamera koja se nastavlja do površine poluprikolice. Relativno povećanje C_d -a geometrije sa zrcalima iznosilo je 1,13%, a s kamerama 0,66%. Na slikama 73 i 74 prikazani su modeli sa zrcalima i kamerama.



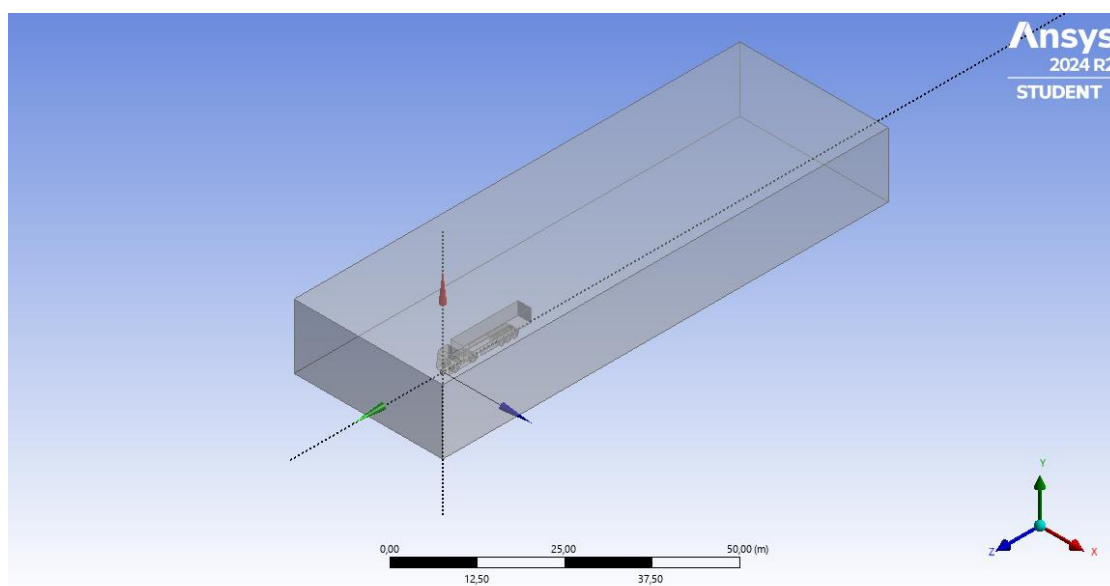
Slika 74. Model polazne geometrije tegljača bočnim zrcalima



Slika 75. Model polazne geometrije tegljača s bočnim kamerama

Naposljetku, provedena je analiza s drugačijim oblikom okoliša i njegovim granicama. Provedena je analiza kako bi se ustanovilo hoće li oblikovanje veličine okoliša utjecati na iznos faktora. Uz promijenjen oblik okoliša promijenjeni su i rubni uvjeti simulacije te je dobiven rezultat s relativnim smanjenjem faktora otpora za taj primjer u odnosu na primjer polazne

geometrije dosada provedenih simulacija za 8,55%. Dodavanjem granice okoliša u točku gazne površine kotača smanjen je obujam okoliša koji se analizira, a samim time je omogućeno korištenje nešto manjih elemenata u zonama blizu promatranog tijela. To je naposljetku vodilo kreiranju finije mreže, a samim time (prema provedenim analizama utjecaja veličine elemenata na konačni rezultat) i smanjenju faktora otpora zraka. Cilj analize je bio pokazati raznolikost promatranih slučajeva i njegovih parametara. Dobio se bolji uvid u strujanja ispod vozila koja priliče realnijim situacijama te nove zone mogućnosti nadogradnje aero elemenata vozila koje su tema za zasebno istraživanje. Na sljedećoj slici prikazan je izgled okoliša za opisani slučaj.



Slika 76. Geometrija okoliša za 3D analizu sa utjecajem vožnje po cesti

Analizom modela koji sadrže više od jedne vrste nadogradnog elementa dobiven je uvid u njihov skupni utjecaj na strujanje oko vozila. Sve regije koje su ključne za stvaranje turbulencija i promjene tlaka oko vozila i na njegovoj površini pokrivene su jednim od elemenata nadogradnje sa ciljem njihovog stabiliziranja. U krajnji model implementirane su one geometrije elemenata koje su pokazale najbolje rezultate za pojedinu skupinu. Iznos faktora otpora zraka se drastično smanjio, sa relativnom promjenom od 30,26%. Iako strujanja na jednom području utječu na strujanja na nekim drugim područjima oko vozila (pozitivno ili negativno), pokazano je da je ipak potrebno implementirati nadogradne elemente na svaku lokaciju kako bi svako pojedino polje bilo stabilizirano na najefektivniji način. Kao referentna vrijednost C_d uzima se najmanja dobivena sa implementiranim svim elementima. Uklanjanjem krovnog spojlera (A) u tom slučaju faktor raste za 17,79%, uklanjanjem bočnih oplata kabine (B) faktor raste za 12,94%, uklanjanjem zavjesa preko kotača raste za nemjerljivih 0,5% i

uklanjanjem stražnjih krilca poluprikolice raste za 11,19%. U grupnu analizu nije uključena geometrija C – lokalizatora vrtloženja jer njenom implementacijom u grupni model postizao se negativan efekt gdje se smirivanjem turbulencija oko vozila (utjecajem spojlera i bočnih oplata kabine) sprječavalo stvaranje velikih vrtloga u zoni između kabine i poluprikolice pa ta vrsta nadogradnog elementa imala kontraefekt. To ne implicira na nevaljanost uređaja s ciljem smanjenja faktora otpora već implicira na nepodržanost za analizirani slučaj. Pretpostavka je da bi u analizi slučajeva nastrujavanja vjetra iz drugih napadnih kutova implementacija tog elementa imala pozitivan utjecaj u grupnoj analizi.

6.3 Utjecaj smanjenja faktora otpora zraka C_d na silu otpora vožnje

Za slučaj pravocrtnog gibanja tegljača s poluprikolicom mase 40 t pri konstantnoj brzini od 90 km/h po ravnoj suhoj podlozi bez protuvjetra iznos ukupne sile otpora gibanju koja djeluje na vozilo računa se prema:

$$F_{og} = F_k + F_z = f_k \cdot G_V + \left(\rho_z \cdot \frac{v^2}{2} \cdot C_d \cdot A \right) [N] \quad 11)$$

Gdje su:

f_k – faktor otpora kotrljanja za maksimalno opterećeno teretno vozilo = 0,008

[<https://business.michelinman.com/>]

G_V – težina vozila = $40000 \cdot 9,81 = 392400$ N

ρ_z – gustoća zraka = $1,225$ kg/m³

v – brzina vožnje = 25 m/s

C_d – faktor otpora zraka = $1,064$ - polazna geometrija

= $0,742$ – geometrija sa implementiranim svim nadogradnim elementima

A – čeona površina vozila = $0,775 \cdot B \cdot H$ (B – širina vozila, [m]; H – visina vozila, [m]) = $0,775 \cdot 2,55 \cdot 3,88 = 7,67$ m²

Stoga, za slučaj polazne geometrije sila otpora gibanja iznosi 6263 N, a za geometriju s najmanjim dobivenim iznosom faktora otpora zraka 5318 N. Relativno smanjenje ukupne sile otpora gibanju na vozilo iznosi 15,09%. Taj iznos se može linearno povezati i sa smanjenjem potrošnje goriva, a samim time i smanjenjem ekološkog utjecaja kojeg vozila imaju na okoliš, uzimajući u obzir broj kilometara koji tegljač prijeđe u svojem radnom vijeku.

7. ZAKLJUČAK

Provedeno istraživanje temeljilo se na aerodinamičkoj analizi tegljača s poluprikolicom, pri čemu su proračuni provedeni korištenjem CFD modela kako bi se istražio utjecaj implementacije različitih nadogradnih elemenata na faktor otpora zraka, a time i na ukupni aerodinamički otpor. Usvojen je sveobuhvatan pristup, počevši s dvodimenzionalnom (2D) analizom toka za generalni uvid u ponašanje struja zraka oko vozila, nakon čega je slijedila detaljnija i svestranija trodimenzionalna (3D) analiza toka kako bi se proučile složene interakcije različitih struja fluida i potvrdila učinkovitost predloženih modifikacija. Rezultati 2D analize pružili su temeljno razumijevanje ponašanja toka, fokusirajući se na ključna područja odvajanja i formiranja poremećenog (engl. *wake*) područja. Provođenje 2D analize bilo je bitno za identificiranje regija koje mogu imati koristi od implementiranja elemenata za smanjenje otpora. Iako je 2D analiza omogućila uvide u strujna ponašanja i početne procjene dizajna, 3D simulacije otkrile su pravu složenost toka oko vozila, uključujući interakcije između poremećenih područja, poprečnih tokova i turbulencija u kritičnim regijama poput dijela iznad i oko kabine tegljača, praznine između kabine i poluprikolice, stražnjeg dijela poluprikolice i podvozja.

Istraženi su različiti uređaji za smanjenje otpora, uključujući konfiguracije usmjerene na optimizaciju toka, minimiziranje zona odvajanja i smanjenje turbulencije u poremećenom području. Implementacija ovih uređaja dovela je do značajnih poboljšanja faktora otpora (smanjenja), čime je potvrđena njihova aerodinamička učinkovitost. Rezultati su pokazali da čak i male promjene u dizajnu, poput zaobljavanja oštih rubova utječu na smanjenje faktora otpora zraka za 12,50%. Dodavanjem aerodinamičkih elemenata, kao što je krovni spojler, faktor se smanjuje za 7,18% u 2D analizi, a 17,59% u 3D analizi. Implementacijom bočnih oplata kabine i povećanjem njihovog nagiba C_d se smanjio za 14,47%, a dodavanjem stražnjih krilaca poluprikolice za 8,74%. Ovim smanjenjima utječe se na značajno smanjenje otpora vožnje što utječe na bolju učinkovitost potrošnje goriva i smanje negativnog utjecaja na okoliš. Odabir postavki simulacije bio je ključan za uspjeh ovog istraživanja. Rješavač temeljen na gustoći pokazao se učinkovitim u simulacijama, unatoč tehnički nestlačivoj prirodi toka, zbog svoje robusnosti u obradi spregnutih jednadžbi i ublažavanju problema konvergencije povezanih sa složenim fenomenima toka. Upotreba SST $k-\omega$ modela turbulencije bila je ključna za razrješavanje ponašanja toka blizu stijenki vozila i obuhvaćanje fenomena odvajanja graničnog sloja, čime je dodatno poboljšana točnost rezultata.

Zaključci ovog rada naglašavaju važnost korištenja naprednih alata za računalnu dinamiku fluida i sustavnog pristupa aerodinamičkoj optimizaciji. Kombinacijom 2D i 3D analiza osiguralo se obuhvaćanje pojednostavljenih trendova i detaljnih interakcija što je omogućilo razumijevanje postignutih aerodinamičkih poboljšanja. U praktičnom smislu, implementacija optimiziranih konstrukcijskih elemenata može dovesti do mjerljivih učinaka za industriju transporta. Smanjenjem faktora otpora, ova poboljšanja nude potencijal za nižu potrošnju goriva, smanjenje emisija stakleničkih plinova i ukupnu uštedu operativnih troškova za prijevoznike korporacije.

Ovo istraživanje naglašava vrijednost integracije računalne dinamike fluida u proces konstruiranja i optimizacije teretnih vozila, pokazujući njezin potencijal za značajan doprinos razvoju održivijih i učinkovitijih rješenja u transportu.

8. LITERATURA

- [1] Hucho, W. H.: Aerodynamics of Road Vehicles, Fourth Edition; 29.11.2023.
- [2] Yasuki Nakayama: Introduction to Fluid Mechanics, Second edition; 2018.
- [3] Z. Lulić, K. Ormuž, G. Šagi: Motorna vozila, Pogon vozila – Otpori vožnje; Zagreb, 2022./2023.
- [4] Johan Malmberg: Improving Aerodynamic Performance of a Truck: a Numerical Based Analysis; 2015.
- [5] Mario Šavar, Zdravko Virag, Ivo Džijan: Mehanika fluida I; Zagreb, 2017.
- [6] Pravilnik o tehničkim uvjetima vozila u prometu na cestama; Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture; izdanje: NN 74/2009; broj dokumenta u izdanju: 1771; datum tiskanog izdanja: 26.6.2009.; ELI:
https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_06_74_1771.html
- [7] Adithya Hariram, Thorsten Koch, Björn Mårdberg, Jan Kyncl : A Study in Options to Improve Aerodynamic Profile of Heavy-Duty Vehicles in Europe
- [8] Man guidelines to fitting bodies, Series TGS/TGX; Edition 2018 V2.0
- [9] Richard M. Wood & Steven X. S. Bauer: Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks; 2003-01-3377
- [10] <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>; 17.9.2024.
- [11] <https://innovationspace.ansys.com/forum/>
- [12] ANSYS, Inc.: ANSYS Fluent Tutorial Guide; Release 18.0, siječanj 2017.
- [13] UREDBA KOMISIJE (EU) od 31.10.2019. o izmjeni Uredbe (EU) br. 1230/2012 u pogledu zahtjeva za homologaciju za određena motorna vozila opremljena izduženim kabinama te za aerodinamične naprave i opremu za motorna vozila i njihove prikolice; Bruxelles; 31.10.2019.
- [14] Javier Jiménez: The Global Geometry of Turbulence; 1991.
- [15] Ostala literatura:
- [16] Aws Al-Akam, Imad Shukri Ali: Improvement of Aerodynamics Characteristic of Heavy Trucks; siječanj 2013.
- [17] Jianmin Xu, Shuiting Zhou: Flow Field Analysis of Trucks and a Design of an Additional Drag Reduction Device; 16.3.2016.

-
- [18] Harvard Lomax, Thomas H. Pulliam, David W. Zingg: Fundamentals of Computational Fluid Dynamics; 6.12.1999.
- [19] Hamidreza Shiri: Aerodynamic Analysis of Drag Reduction Devices on the Simplified Body for Tractor and Trailer by Using CFD; prosinac 2016.
- [20] Harun Chowdhury, Hazim Moria, Abdulkadir Ali, Iftekhar Khan, Firoz Alam and Simon Watkins: A study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck; 2013.
- [21] Thanh-Long Phan, Tien Thua Nguyen, Thi Huyen Trang Nguyen: Optimization of unsteady jet control flow method for aerodynamic drag reduction of heavy truck model; 2.2.2024.
- [22] V. Malviya, R. Mishra, J. Fieldhouse: CFD Investigation of a Novel Fuel-Saving Device for Articulated Tractor-Trailer Combinations; 19.11.2014.
- [23] Tomáš Skrúcaný, Štefánia Semanová, Jozef Gnap, Tomasz Figlus, Jiří Čupera: Drag Reduction of Semi-Trailer Aerodynamic Devices Determined by Two Different Methods; 17.10.2020.