

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Mulugeta Biadgo Asress

**УТИЦАЈ ПОПРЕЧНОГ СТРУЈАЊА НА
АЕРОДИНАМИЧКА ОПТЕРЕЋЕЊА
ПУТНИЧКОГ ВОЗА ЗА РАЗЛИЧИТЕ
КОНФИГУРАЦИЈЕ ТЛА**

Докторска дисертација

Београд, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Mulugeta Biadgo Asress

**THE IMPACT OF STRONG CROSSWIND ON THE
AERODYNAMIC LOADS OF A PASSENGER
TRAIN FOR DIFFERENT GROUND
CONFIGURATIONS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

Посвећено мојим родитељима и учитељима

**ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ ЗА
ПРЕГЛЕД И ОДБРАНУ:**

Ментор: **др Александар Симоновић, ванредни професор**
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије: **др Слободан Ступар, редовни професор**
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Иван Костић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Војкан Лучанин, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Слободан Гвозденовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

Датум одбране: _____ 2015.

ЗАХВАЛНИЦА

Велику захвалност дугујем мом ментору др Александру Симоновићу за његове савете и помоћ у академској сфери као и за охрабрење и подршку приликом израде ове дисертације. Такође овом приликом бих му се срдечно захвалио на бризи и ангажовању ван оквира истраживања током целокупног мог боравка у Србији. Такође, желео бих да се захвалим и професору др Слободану Ступару на његовој искреној подршци.

Специјалну захвалност дугујем особљу Катедре за ваздухопловство на Машинском факултету у Београду за њихову помоћ и доброту.

Коначно, задовољство ми је да изразим захвалност члановима моје породице за њихову континуирану подршку и помоћ.

Аутор

Утицај попречног струјања на аеродинамичка оптерећења путничког воза за различите конфигурације тла

Резиме

Јаки бочни ветрови могу утицати на стабилност воза приликом кретања и у појединим случајевима могу довести до превртања воза услед појачаних аеродинамичких сила и момената. Ризик од превртања узрокованог дејством ветра зависи како од аеродинамичких карактеристика возила тако и од инфраструктуре железничког коридора по коме воз саобраћа. Са инфраструктурне стране, места са високим насипима могу да доведу до повећања аеродинамичких коефицијената док се са стране возила појава превртања услед јаких бочних ветрова везује за осетљивост облика воза на дејство бочног ветра.

У оквиру ове докторске тезе извршена је симулација струјања турбулентног бочног ветра око водећег вагона DF4D путничког воза за различите вредности угла скретања у случајевима статичког равног терена и насипа висине 6m. Будући да је аеродинамички аспект проблема блиско повезан са струјањем ваздуха око воза, ово струјање је разматрано као нестишљиво па је прорачун вршен коришћењем нестационарних Навије-Стоксових једначина осредњених Рејнолдсовом статистиком (RANS) у спрези са остваривим k-ε турбулентним моделом. Свих шест аеродинамичких коефицијената (бочне силе, силе отпора, силе узгона, момента ваљања, момента пропињања и момента скретања) срачунати су за углове скретања у интервалу од 0° до 90°. Резултати су показали да свих шест аеродинамичких коефицијената имају више вредности у случају терена са насипом у компарацији са кретањем по равном терену. Срачунате вредности најзначајнијих аеродинамичких коефицијената, као што је аеродинамички коефицијент момента ваљања, монотонно расту са повећањем угла скретања до вредности угла скретања од 60° (у случају равног терена) односно

45° (у случају насипа) пре него што почну да опадају и/или показују асимптотско понашање.

Такође, у оквиру дисертације разматрана је и зависност структуре струјања од угла скретања. Природа струјања и његова структура визуелизоване су графичким приказом струјница и вектора брзине као и контурним приказом јачине вртложности, статичког притиска и тоталног притиска по попречном пресеку воза за различите вредности угла скретања. У оба случаја, резултати указују на повећање величине ротирајућих вртлога на страни воза у заветрини са повећањем угла скретања што доводи до стварања области ниског притиска на страни воза у заветрини односно до појаве високе бочне силе и момента ваљања. За исти угао скретања, величина ротирајућих вртлога на страни воза у заветрини је већа у сличају постојања насипа него у случају равног терена. У оквиру истраживања разматрана је и расподела коефицијента притиска по обиму попречног пресека воза за углове скретања у интервалу од 0° до 90° на различитим локацијама по дужини воза. Коначно, извршен је прорачун критичне брзине ветра за превртање (v_{w-int}), односно брзине ветра која доводи до стопроцентног растерећења точкава на шини у заветрини воза, коришћењем коефицијента аеродинамичког момента ваљања око шине у заветрини добијеног нумеричким (CFD) прорачуном.

Циљ ове студије је скретање пажње Етиопијске железничке корпорације на значај утицаја бочног ветра на стабилност возила, односно на неопходност његовог разматрања у смислу безбедности и укључивање у националне стандарде.

Кључне речи: Бочни ветар, Аеродинамика шинских возила, Прорачунска динамика флуида (CFD), Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистиком (RANS), k-ε турбулентни модел, Нумеричка анализа, Критична брзине ветра за превртање

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Ваздухопловство, Железничко машинство

УДК: 629.4.017:533.013.12(043.3) / 629.4.017:532.51(043.3)

The impact of strong crosswind on the aerodynamic loads of a passenger train for different ground configurations

Abstract

Strong crosswinds may affect the running stability of trains and cause the train to overturn via the amplified aerodynamic forces and moments. The risk of crosswind induced overturning depends on both the line infrastructure and the vehicles' aerodynamic characteristics. On the infrastructure side, sites with high embankments may amplify the aerodynamic forces. On the vehicles side, the topic of train overturning due to cross wind exposure is closely linked to the crosswind sensitivity of the external shape of the train.

In this doctoral thesis , a simulation of turbulent crosswind flows over the leading car of DF4D passenger train was performed at different yaw angles in static flat ground and 6m high embankment scenarios. The flow around the train was considered as incompressible and has been obtained by solving the incompressible form of the unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations combined with the realizable k-epsilon turbulence model. All the six aerodynamic coefficients such as the side force, drag force, lift force, rolling moment, pitching moment and yaw moment coefficients were calculated for yaw angles ranging from 0° to 90°. The result shows that higher value for all the six aerodynamic coefficients were found in case of embankment compared to the flat ground case. The computed value of the most critical aerodynamic coefficients, such as the rolling moment coefficient increase steadily with yaw angle till about 60° (in flat ground case) and 42.5° (in embankment case) before starting to fall and/or exhibit an asymptotic behavior.

The dependence of the flow structure on yaw angle has been also presented. The nature of the flow field and its structure depicted by streamline patterns, velocity vectors, contours of vorticity magnitude, contours of static pressure and total pressure

along the train's cross-sections were presented for different yaw angles. In both cases, the results showed that magnitude of rotating vortex in the leeward side increased with increasing yaw angle which leads to the creation of a low pressure region in the leeward side of the train causing high side force and roll moment. For the same yaw angle, the magnitude of rotating vortex in the leeward side in case of embankment is higher than the flat ground case. In addition, the pressure coefficient around the circumference of the train at different locations along its length was computed for yaw angles of 0° to 90° . Finally, the intrinsic roll-over wind speed (v_{w-int}) for the vehicle, which is a wind speed just sufficient to cause 100% unloading of the wheels on the windward side of the vehicle, has been determined using the CFD calculated aerodynamic rolling moment coefficient about the lee rail. The purpose of this doctoral thesis is to encourage the Ethiopian railway corporation to recognize the crosswind stability for rail vehicles as a safety relevant topic and have a standard which prescribes design and maintenance requirements for railway vehicles to ensure acceptable resistance against overturning in extreme wind conditions.

Keywords: Crosswind, Aerodynamics of trains, Computational Fluid Dynamics, Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, k-epsilon turbulence model, Numerical analysis, Intrinsic roll-over wind speed.

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific sub-discipline: Aerospace engineering, Railway mechanical engineering

UDC: 629.4.017:533.013.12(043.3) / 629.4.017:532.51(043.3)

Садржај

1	Увод	1
1.1	Железничка мрежа и њен значај и распрострањеност.....	1
1.2	Искуство Етиопије.....	4
1.3	Бочна стабилност железничких возила.....	8
1.4	Предмет и циљ истраживања и структура рада.....	10
2	Преглед литературе	12
3	Основне једначине механике флуида	20
3.1	Увод.....	20
3.2	Једначина континуитета.....	21
3.3	Закон одржања количине кретања.....	22
3.4	Једначина енергије.....	25
3.5	Турбуленција.....	29
3.5.1	Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистиком.....	29
3.5.2	Турбулентни модели.....	31
3.5.3	Гранични слој.....	33
4	Методe нумеричке симулације	37
4.1	Увод.....	37
4.2	Координатни систем и аеродинамички коефицијенти.....	38
4.3	Опис геометрије модела.....	40
4.4	Прорачунски домен и мрежа.....	42
4.5	Гранични услови.....	44
5	Резултати и дискусија	45
5.1	Увод.....	45
5.2	Коефицијент бочне силе.....	46
5.3	Коефицијент силе отпора.....	47

5.4	Коефицијент силе узгона.....	47
5.5	Коефицијент момента ваљања.....	48
5.6	Коефицијент момента пропињања.....	49
5.7	Коефицијент момента скретања.....	49
5.8	Структура струјања.....	53
6	Прорачун критичне брзине ветра за превртање	106
6.1	Увод.....	106
6.2	Методологија прорачуна критичне брзине ветра за превртање.....	107
7	Закључак	113
	Литература	118

НОМЕНКЛАТУРА

\vec{u}	Вектор брзине
V	Запремина
ρ	густина
T	време
u	Пројекција вектора брзине на x правац
v	Пројекција вектора брзине на y правац
w	Пројекција вектора брзине на z правац
\vec{F}	Вектор силе
\vec{a}	Убрзање
P	Притисак
\vec{f}	Вектор запреминске силе по јединици масе
k	Топлотна проводљивост
\dot{q}	Вектор топлотног флукса
T	Температура
e	Унутрашња енергија по јединици масе
R	Специфична гасна константа
C_v	Специфична топлота при константној запремини
\bar{u}_i	Осредњена вредност брзине
u'_i	Флукуациона компонента брзине
\bar{p}_i	Временски осредњена вредност притиска
p'_i	Флукуациона компонента притиска
\bar{f}_i	Временски осредњена запреминска сила по јединици масе
\tilde{f}_i	Флукуациона компонента запреминске силе по јединици масе
k	Кинетичка енергија турбуленције
F_D	Сила отпора
F_S	Бочна сила
F_L	Сила узгона
M_{rol}	Момент превртања

M_p	Момент пропињања
M_z	Момент скретања
v_w	Брзина ветра
v_{rel}	Релативна брзина ветра
v_{tr}	Максимална дозвољена брзина воза
C_D	Коефицијент силе отпора
C_S	Коефицијент бочне силе
C_L	Коефицијент силе узгона
$C_{M,rol}$	Коефицијент момента превртања
C_p	Коефицијент момента пропињања
C_z	Коефицијент момента скретања
v_{w-int}	Критична брзина ветра
M_G	Момент услед силе тежине
$M_{rol,lee}$	Момент услед аеродинамичке силе
A	Површина попречног пресека
H	Средња висина
$C_{M,lee}$	Коефицијент момента превртања услед аеродинамичке силе
m	Укупна маса возила
g	Убрзање Земљине теже
z_{cg}	z-координата тежишта
b_A	полуразмах точка у односу на тачку контакта са шинама
M_o	Момент превртања услед латералних и радијалних померања тачке вешања под дејством оптерећења од ветра узимајући у обзир и евентуалну тежинску асиметрију возила
m_o	Неовешена маса
y_o	Латерално померање неовешене масе
m_1	Примарна овешена маса
y_1	Латерално померање примарне овешене масе у односу на осу шина
m_2	Секундарна овешена маса

y_2 Латерално померање секундарне овешене масе услед било које удаљености тежишта због ваљања и/или асиметрије у односу на осу шина

Грчке ознаке

\emptyset	Нападни угао
β	Угао скретања (резултујуће брзине у односу на раван симетрије воза)
ε	Брзина дисипације кинетичке енергије турбуленције
μ	Коефицијент вискозности
λ	Други коефицијент вискозности
τ_{ij}	Тензор тангенцијалних напона
τ'_{ij}	Тензор турбулентних напона
μ_t	Динамичка турбулентна вискозност
ν_t	Кинематска турбулентна вискозност

Глава 1

Увод

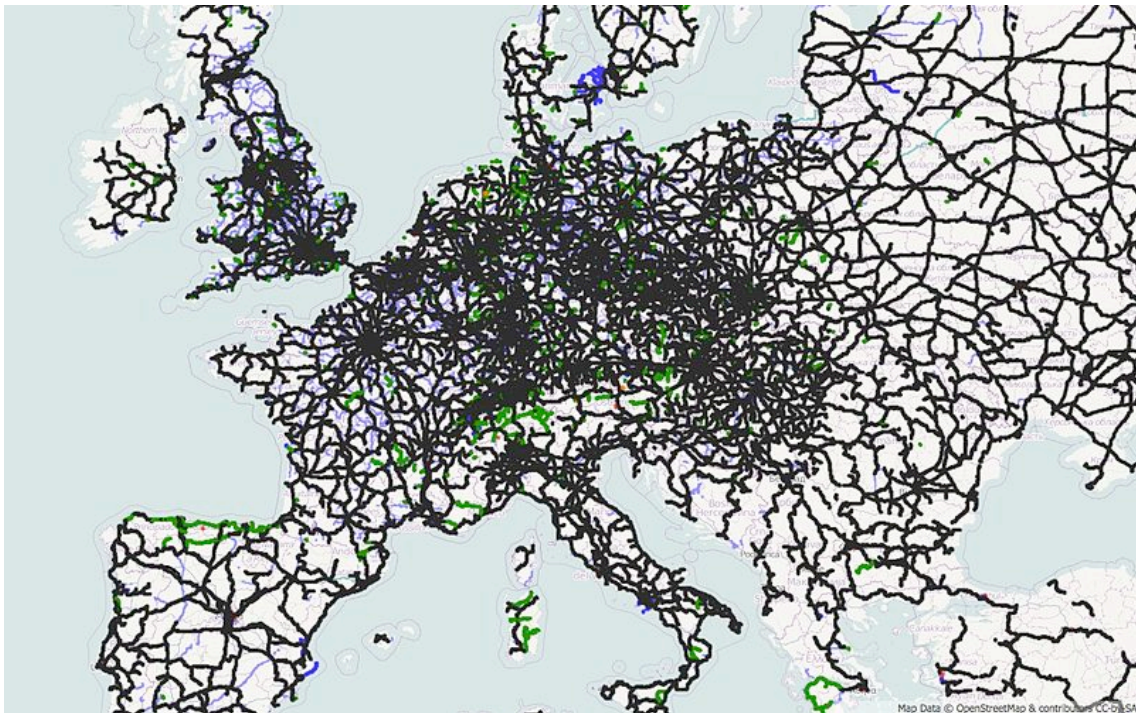
1.1 Железничка мрежа и њен значај и распрострањеност

Железнички саобраћај подразумева превоз путника и робе возилима која се крећу по сталној металној подлози - шинама. Насупрот моторним возилима, код шинских возила трење котрљања је генерално мање па је могуће повезати већи број вагона у композицију. Основне делатности железничких компанија подразумевају обављање промета роба и путника, вучу возова и одржавање вучних јединица и пруге. Снага потребна за вучу може бити електрична (из железничке електричне мреже) или механичка (локомотива са мотором). Железнички саобраћај је најсигурнији облик копненог саобраћаја. Такође је и један од најефикаснијих, јер омогућава превоз великог броја путника. Са друге стране, кад су у питању дуже деонице, мање је флексибилан и захтева значајно виша почетна улагања од саобраћајне мреже за моторна возила.

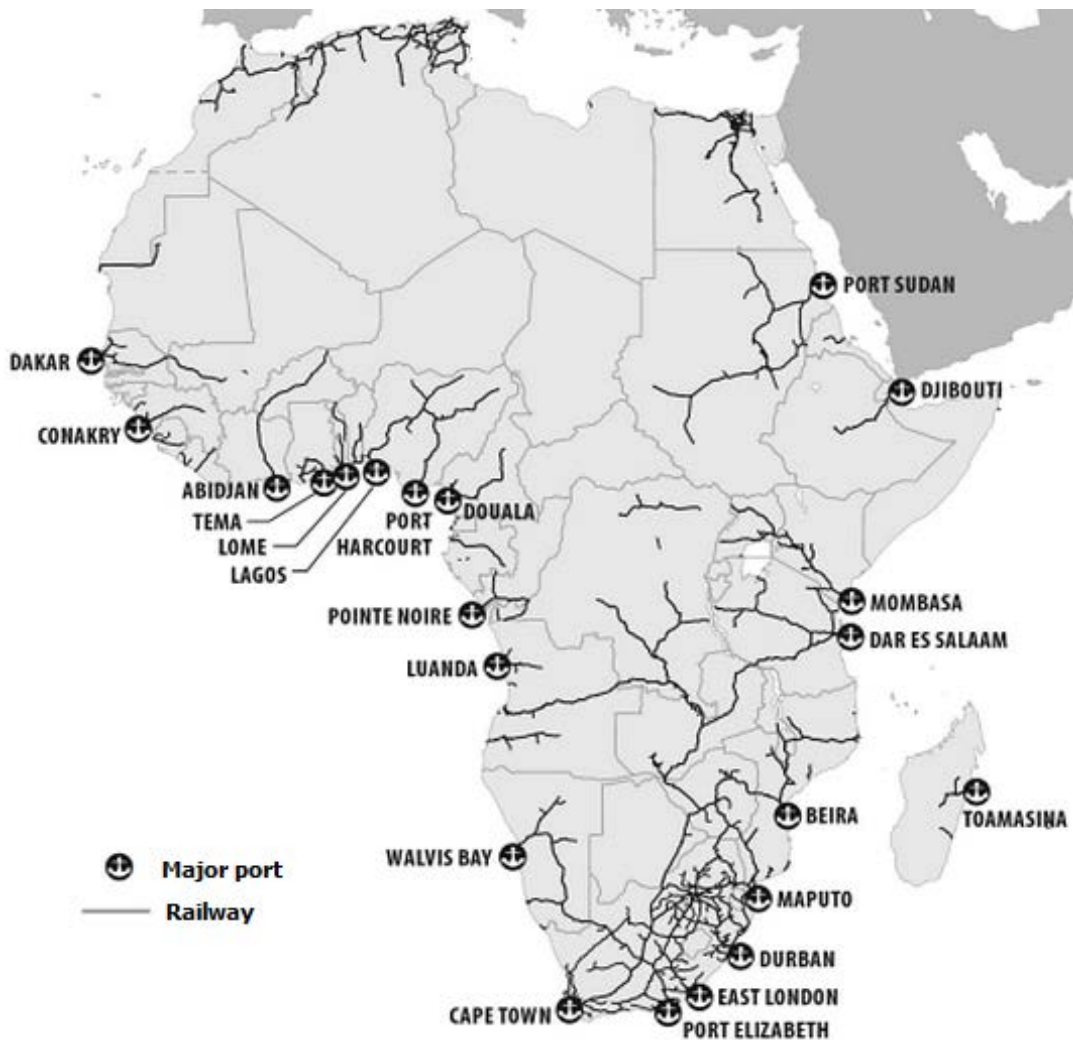
Трагови најстарије железнице на људски погон воде до 6 в.п.н.е и Периандера, једног од грчких мудраца, коме се приписује њен изум [1]. Изум парне машине од стране Британаца, као основног извора снаге у 18. и 19. веку, води ка убрзаном развоју железница [2]. Уз помоћ парних мотора омогућена је изградња главних копнених железничких пруга што је један од кључних предуслова за индустријску револуцију. Осамдесетих година 19. века појављују се први електрични возови и трамваји. Од 40-их година 20. века, у свим земљама света, већина парних локомотива је замењена локомотивама са дизел моторима. Тај процес је скоро потпуно завршен до 2000. године. Средином 60-их година, електрична брза

железница почиње да се користи у Јапану и неколицини других земаља [3]. Други видови нестандардног шинског саобраћаја, као што је једношинска пруга или маглев, постоје али још увек нису заступљени.

Железничка мрежа је изузетно корисна јер омогућава приступ и мобилност које су неопходне за економски развој модерних друштава [4]. Због својих погодности, железница представља један од основних видова путничког и теретног саобраћаја у многим земљама. Веома је распрострањена у Европи, где је скоро цели континент прекривен пругом. Западни део Европе је регион најгушће железничке мреже на свету. У Индији, Кини, Јужној Кореји и Јапану милиони путника користе железницу свакодневно. У Северној Америци ситуација је нешто другачија. Док се железница обилно користи за превоз робе и терета, путнички превоз је релативно незаступљен јер се већи број путника опредељује за друге видове саобраћаја, као што су аутомобили и авиони [5]. Такође, у Аустралији је железничка мрежа генерално ретка услед слабе густине насељености, мада је у одређеним зонама веома развијена, нарочито на југоистоку континента. У Јужној Америци неке земље, као Аргентина, поседују развијени систем пруга.



Слика 1.1. Железничка мрежа у Европи. Главне оперативне линије су обележене црном, историјске линије зеленом, а бивше линије плавом бојом



Слика 1.2. Железничка мрежа у Африци. Главне оперативне линије су обележене црном, историјске линије зеленом, а бивше линије плавом бојом

Железница почиње да мења изглед афричког континента крајем 19. и почетком 20. века када су направљени стратешки коридори ка унутрашњости за експлоатацију минерала и других ресурса [6]. Међутим, већина линија је остала изолована и неповезана. Прва пруга јужно од Сахаре изграђена је 60-их и 70-их година 19. века. Водила је од лука у Кејп Тауну и Дурбану ка унутрашњости континента. Почетком 20. века започиње развој велике железничке мреже и у другим областима [6]. У већини случајева у питању су изоловане линије које воде од трговинског центра до рудника, са понеком, касније додатом, помоћном линијом. Једине праве интернационалне линије постоје у Јужној Африци и северно од Зимбабвеа, Замбије и Демократске републике Конго. У нешто мањем

обиму, постоји и стара источно-афричка железница у Кенији, Танзанији и Уганди, слика 1.2. У последњих 80 година, сем у Јужној Африци и њеној непосредној околини, изузетно мало километара пруге је изграђено. С обзиром на скромни технички стандард по коме су направљене, железничке пруге не могу се поредити са копненим друмским превозом у већини афричких држава. Такође, расположива новчана средства нису довољна за обнову и унапређење пруга.

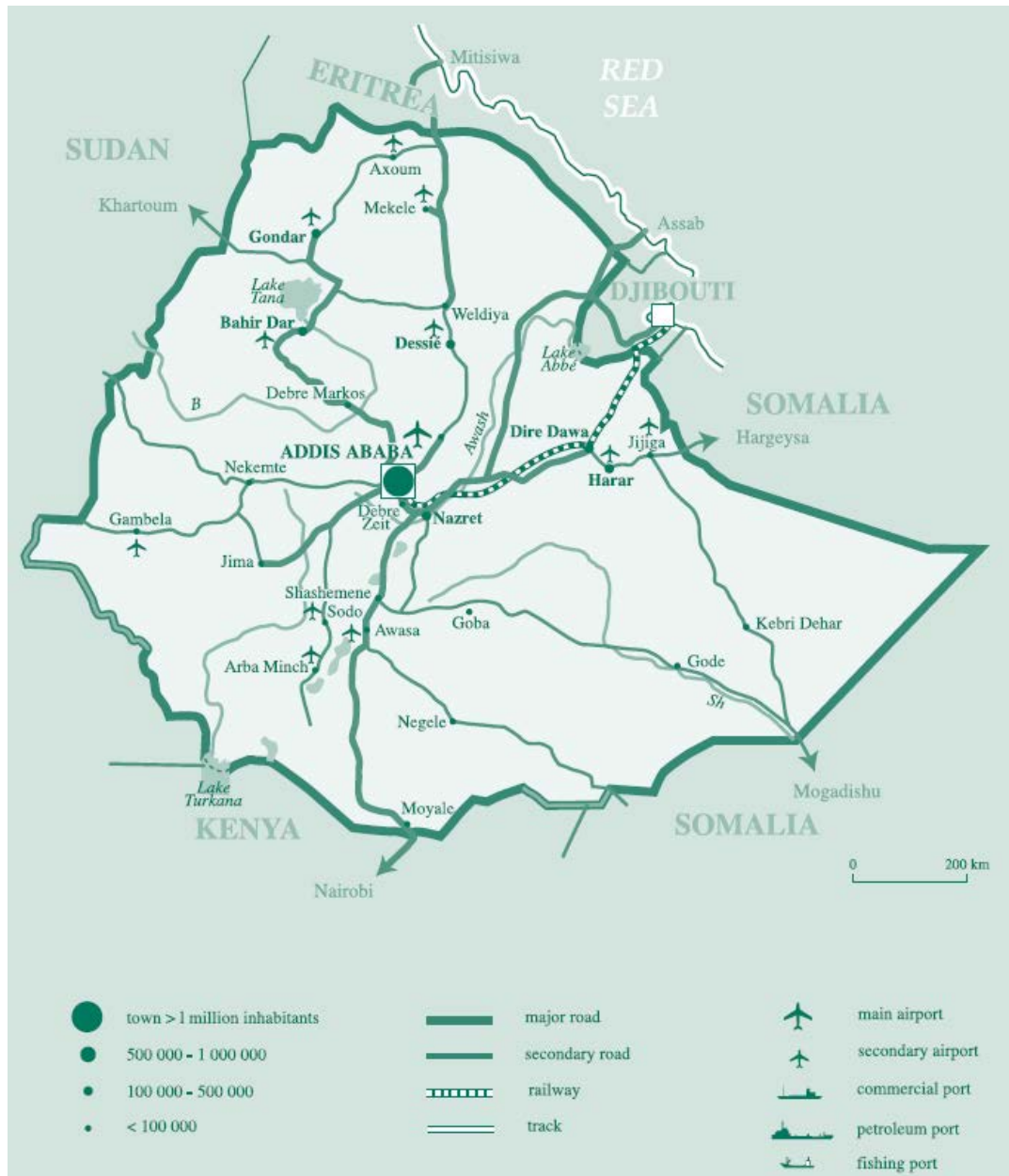
Железница у Африци је ниске густине, хетерогена и неповезана. У Јужној Африци је део железничке мреже највеће густине (16km пруге на 1000km²), док се у осталим афричким земљама густина пруге налази у опсегу 1 до 16km пруге на 1000km² [6]. Иако се и у Аустралији, Канади, Кини и Русији могу наћи огромне неразвијене и ненасељене области, густина железничке мреже износи у овим земљама износи 5 - 7km пруге на 1000km², док се у Европи ова величина креће у границама 20 - 100km пруге на 1000km². Са друге стране, око 14 афричких земаља не поседује функционалну железницу [7]. У Африци, јужноафричка железничка мрежа је далеко најразвијенија и сви већи градови су повезани.

У глобалном логистичком ланцу Африке, железница и пратеће делатности имају потенцијал да играју значајну улогу у будућем развоју целог континента. С обзиром на величину афричког континента и на све предности железничког саобраћаја у односу на друмски, као што су нижа цена и мања потреба за горивом, претходна изјава се нарочито односи на дугачке деонице пруге као и на превоз терета, уколико се железничка мрежа правилно пројектује, изради и користи [7]. Даље примене подразумевају превоз великог броја путника у главним градским центрима као и међуградски саобраћај средње дужине.

1.2 Искуство Етиопије

Железничка компанија Краљевине Етиопије - Imperial Railway Company of Ethiopia (ERC) започела је изградњу прве железничке мреже 1896. године за време владавине цара Менелика II. Званично отварање пруге од Џибутија до Адис Абебе дуге 784km било је 1917. године од стране француско-етиопијске железничке компаније [8-9]. До данашњег дана, ово је и даље једина пруга која

спаја главни град са Џибутијем и тренутно је само део пруге до Дире Даве функционалан (слика 1.3).

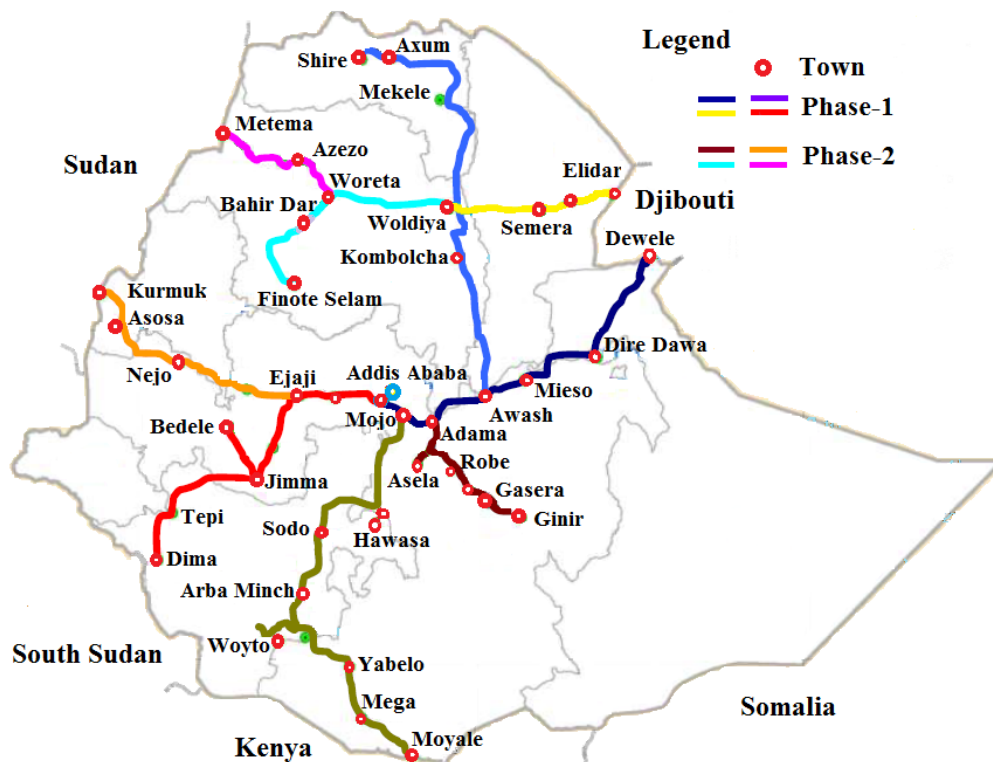


Слика 1.3. Постојећи путеви и пруге Етиопије

Етиопија, као копнена држава без већих пловних река и веома слабом железничком инфраструктуром, превасходно је окренута друмском саобраћају за превоз путника и робе [10]. Држава је копнена од сецесије Еритреје 1993. године па се међународна трговина већински одвија преко мање и значајно скупље луке у Џибутију.

Слабо развијена инфраструктура и високе цене превоза се најчешће наводе као главне препреке индустријском развоју неразвијених за маља као што је Етиопија [10]. Међутим, надавно је Влада Етиопије донела одлуку да се спор и скуп друмски превоз замени железничким системом те је Железницама Етиопије (ERC) задат пројекат развоја националне железничке мреже [11]. Влада Етиопије разматра пројекат изградње 8 железничких коридора, слика 1.4, укупне дужине 4744km, са циљем да створи мрежу кључних трговинских линија које би водиле до суседних држава: Кеније, Јужног Судана, Судана и Џибутија. Изградња железничке мреже је једна од основних ставки плана Владе Етиопије којим би се подстакао економски развитак и побољшала интеграција са суседним државама.

Стара француска пруга је тренутно под реконструкцијом и треба да буде замењена стандардном електрификованом пругом. Извођач радова је Кина. Према Железницама Етиопије (ERC), нови електрични возови служиће за превоз робе (максималне брзине 100km/h) и путника (максималне брзине 145km/h). Воз намењен превозу путника је кинески DF4D (слика 1.5). DF4D локомотива је дизел-електричног типа са Со-Со распоредом точкова. Дужина, ширина и висина локомотиве редом износе 21.1m, 3.309m и 4.755m.



Слика 1.4. Планирана и тренутна железничка мрежа у Етиопији

Етиопију називају кровом Африке услед неравног терена [12]. Етиопијска висораван је изразито неправилна и стрма. У таквим планинским пределима, пруга (или њен део) подразумева деонице променљиве висине, насипе и вијадукте који су отворени и изложени снажним ветровима. Овакав сценарио води ка повећаној брзи о стабилности возова, нарочито када путују преко високих насипа при снажним и изненадним налетима бочног ветра (буре). Из тог разлога, а да би се избегле несреће као што је превртање воза, веома је важно тачно и детаљно анализирати поменуте појаве.



Слика 1.5. DF4D локомотива произведена од стране CNR Dalian Locomotive & Rolling Stock

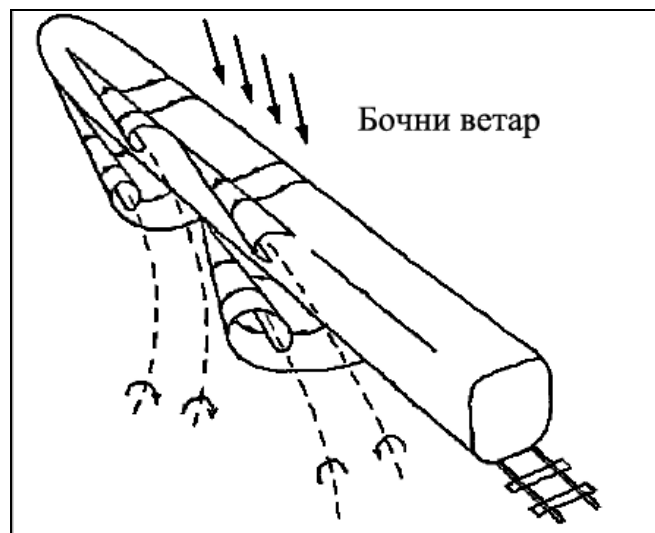
Произвођачи и оператери шинских возила би требало да утврде стандарде и критеријуме сигурности којима би били дефинисани конструктивни захтеви и процедуре одржавања да би се обезбедила захтевана отпорност воза на превртање при бури. Критеријуми сигурности зависе од аеродинамичког облика возила, расподеле маса, система вешања, брзине воза, режима рада и расподеле брзине ветра. Први корак у успостављању критеријума сигурности је аеродинамичка анализа возова.

У овој дисертацији спроведена је аеродинамичка анализа путничког воза DF4D. Нумерички прорачуни снажних, нестационарних, аеродинамичких бочних сила изведени су решавањем Навије-Стоксових једначина осредњених Рејнолдсовом

статистиком и затворених $k-\epsilon$ турбулентним моделом. Разматране су две врсте подлоге: равна и насип висине b_m . Основни циљ истраживања је процена утицаја конфигурације тла на аеродинамичке карактеристике воза.

1.3 Бочна стабилност железничких возила

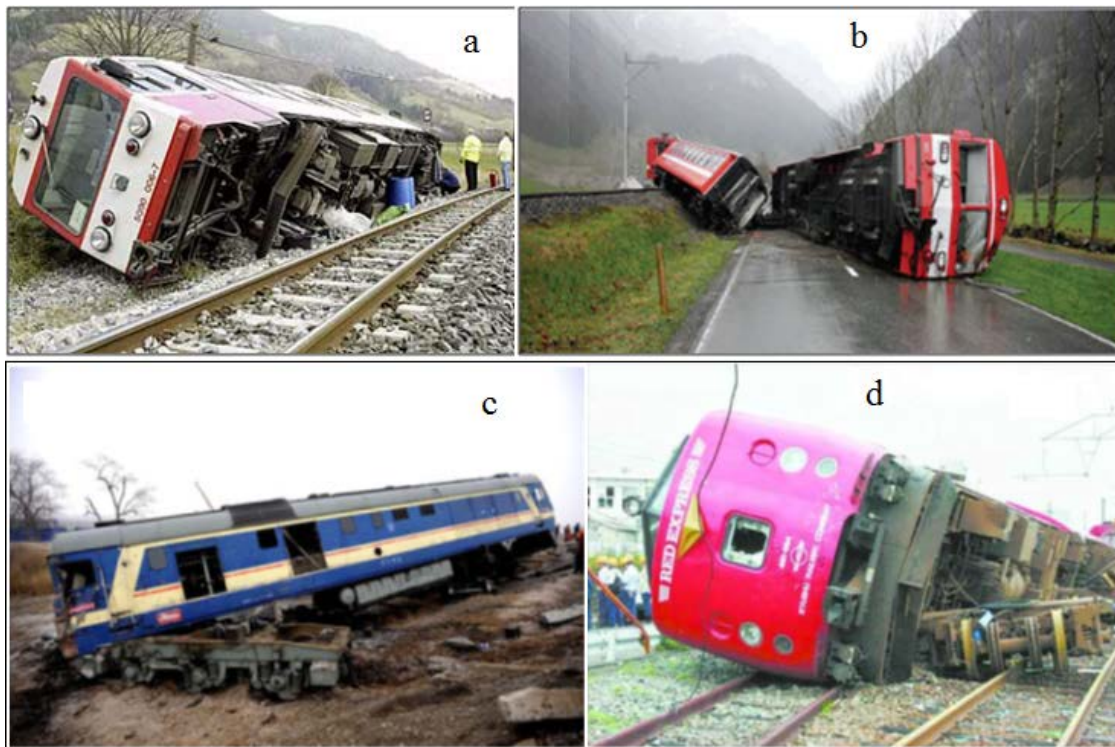
Могућност превртања воза при бочном ветру зависи како од пруге тако и од аеродинамичких карактеристика воза [13]. Са стране инфраструктуре, деонице преко високих вијадукта и насипа су ризичне. Што се тиче возова, питање превртања је блиско везано за бочну стабилност локомотиве која представља најосетљивији сегмент воза из разлога што је предњи део водећег вагона изложен највећим подужним аеродинамичким силама [14-15]. Бочна стабилност је једна од основних конструктивних захтева возова великих брзина који мора бити задовољен и прилично је испитивана како експериментално тако и нумерички [16-23]. Експериментално мерење пружа поузданије апсолутне вредности аеродинамичких сила док нумерички приступ омогућава детаљнији увид у струјно поље око возила.



Слика 1.6. Опструјавање воза при налету бочног ветра

Нагли пораст аеродинамичких сила и момената услед налета бочног ветра умањује сигурност рада воза и може довести до његовог превртања. Бочна стабилност воза се детаљно разматра у државама које поседују брзе пруге [24],

нарочито у последњих пар деценија услед саобраћајних несрећа које су се догодиле, слика 1.7. Од оснивања железничке мреже 1872. године у Јапану се догодило 29 несрећа проузрокованих налетима ветра. Највећи део ових несрећа догодио се на пругама ужим од стандардних (ширине 1067 mm) [25]. Овакве чињенице воде ка закључку да питање бочне стабилности железничких возила треба да буде детаљно размотрено у свакој држави. Од недавно, аеродинамика возова и питање бочних ветрова појављују се као значајна сигурносна питања у британским стандардима [26], као и италијанским [27], немачким [28] и уопште стандардима и нормативима Европске Уније [29-30]. Слика 1.7 приказује неке од саобраћајних несрећа које су се догодиле у различитим земљама света [31-33].



Слика 1.7. Саобраћајне несреће проузроковане бочним ветровима, у Аустрији (а), Швајцарској (b), Кини (c) и Јапану (d) [31-33]

Шинска возила треба да буду конструисана и одржавана тако да, када се крећу шинама стандардних димензија и при уобичајеним радним режимима, не дође до превртања услед буре [34]. Критеријуми сигурности зависе од аеродинамичког облика возила, расподеле маса, система вешања, брзине воза, режима рада и

расподеле брзине ветра. Први корак у успостављању критеријума сигурности је аеродинамичка анализа возова [35].

Основни алати при проучавању аеродинамике возова су испитивања у раду, испитивања у аеротунелу и нумеричка испитивања (прорачунска динамика флуида), као што је случај и код других области аеродинамике. Прорачунским методама могуће је наћи приближно решење основних једначина кретања флуида као и стећи увид у интеракцију флуида и чврстих тела. Највећи део струјања која се проучавају је турбулентан [36]. Тренутно, као најчешће примењене технологије за симулацију турбулентног струјања могу се издвојити: стационарне и нестационарне Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистиком, методе великих вртлога (LES) и методе одвојених вртлога (DES). У овом истраживању коришћене су нестационарне Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистиком јер не захтевају превелике прорачунске ресурсе и могуће их је решити и на обичном персоналном рачунару.

1.4 Предмет и циљ истраживања и структура рада

Спроведено истраживање односи се на описивање и дефинисање аеродинамичких карактеристика путничког воза DF4D. Предмет истраживања је оцена утицаја различитих конфигурација тла (равна површина или насип висине b_m) на аеродинамичке карактеристике воза под дејством снажних бочних ветрова. Циљ истраживања је подстицање Железница Етиопије да препознају значај бочне стабилности шинских возила при дефинисању критеријума сигурности који би били наведени у националним стандардима и такође, подстицање даљег развоја сличних истраживачких пројеката који би допринели бољем разумевању бочне стабилности шинских возила у Етиопији.

Струјно поље око путничког воза DF4D при дејству бочних ветрова моделирано је нестационарним Навије-Стоксове једначинама осредњеним Рејнолдсовом статистиком. За затварање система једначина коришћена је варијанта $k-\epsilon$ турбулентног модела. Дужина, ширина и висина локомотиве редом износе 21.1m, 3.309m и 4.755m. Нумеричка поставка подразумева стационарни модел воза изложен бочном ветру константне брзине 40m/s и варијабилном

нападном углу који може узети вредност у опсегу од 0° до 90° за обе конфигурације тла. Симулације и прорачуни извршени у оквиру ове дисертације односе се на случај композиције постављене на равном тлу и на узвишењу (насипу) без нагиба. Рејнолдсов број израчунат из брзине ветра и ширине модела воза износи 1.33×10^7 .

Рад је структуриран тако да је у другој глави дат преглед и извођење основних једначина струјања. Како се прорачунска динамика флуида бави приближним решавањем ових израза, важно их је продискутовати на почетку, пре примене на реалан инжењерски проблем.

У глави три детаљно је описана процедура нумеричког прорачуна као и поступак формирања прорачунског домена, мреже и дефинисања граничних услова.

У глави четири приказани су резултати извршених прорачуна. Свих шест аеродинамичких коефицијената као и зависност струјних структура од нападног угла бочног ветра детаљно су изложени за обе разматране конфигурације тла.

У глави пет израчуната је критична брзина превртања возила v_{w-int} , дефинисана као брзина при којој је резултујући момент (сума момената гравитационе и аеродинамичке силе по точковима изложеним ветру) у односу на осу дуж правца ниструјних шина једнак 0, за обе разматране конфигурације тла.

Коначно, у глави шест сумирани су најзначајнији закључци изведени током истраживања и дате су препоруке за даљи рад.

Глава 2

Преглед литературе

Већ много година уврежено је мишљење да се одговарајућим дизајном крајњих вагона воза и смањењем аеродинамичког отпора може значајно смањити потрошња горива и омогућити постизање већих брзина [37]. Међутим, смањење отпора је само један од неколико значајних проблема које треба решити при аеродинамичкој анализи воза. Друго питање које треба разматрати је стабилност воза при јаким бочним ветровима. Бројни истраживачи [14, 19, 20, 21, 23, 24, 35, 37, 38, 39] су спроводили нумеричка и/или експериментална испитивања аеродинамичких карактеристика возова у оваквим режимима на равној и уздигнутој подлози. У овој глави дат је преглед најзначајних закључака и препорука изведених по питању бочне стабилности возова као и заштите од превртања.

У [14] аутор Дидрих Б. изложио је нумеричке и експерименталне резултате испитивања бочне стабилности водеће јединице класе 808 немачког брзог воза Deutsche Bahn AG Inter-City Express 2 на равној подлози. Ширина, дужина и висина испитиваног модела су редом 3.020m, 26.56m и 3.856m. Прорачун аеродинамичких коефицијената спроведен је у комерцијалном програмском пакету STAR-CD користећи неструктурирану мрежу састављену из полиедара при Рејнолдсовом броју 1.4×10^6 и неколико различитих вредности угла скретања: 20°, 30°, 40°, 50° и 60°. Резултати прорачуна се врло добро (а у неким случајевима чак одлично) поклапају са измереним вредностима. Међутим, у поређењу са експериментом, добијене нумеричке вредности бочне силе су више, док су вредности силе узгона ниже од очекиваних за распон бочних углова од 30° до 60°.

Међу истраживачима који су спроводили експериментална испитивања, Орелано А. и Шобер М. [19] извршили су аеротунелско испитивање аеродинамичких перформанси стандардног модела брзог воза. Модел је израђен по узору на ICE-2 воз са и без точкова у размери 1:10 и познат је под називом Aerodynamic Train Model (ATM). Експеримент је подразумевао примену

стационарног аеродинамичког оптерећења на први вагон стандардног модела који је мировао на равној подлози у распону углова скретања од -30° до 60° . У радном делу аеротунела брзина ваздуха износила је између 30 и 70m/s, чиме су постизани Рејнолдсови бројеви у распону од 0.6 до 1.4×10^6 израчунати преко приближне ширине модела воза (0.3m). Резултати су представљени у облику аеродинамичких коефицијената. Извршена су поређења измерених вредности при различитим Рејнолдсовим бројевима и у случајевима геометрија различите сложености (са и без точкова и спојлера). Један од закључака овог испитивања је да, у овом опсегу Рејнолдсових бројева, аеродинамички коефицијенти који највише доприносе превртању воза (коефицијент момента ваљања, бочне силе и силе узгона) веома мало зависе од Рејнолдсовог броја. Највећа зависност од Рејнолдсовог броја примећена је код момента пропињања који за ово истраживање бочне стабилности возова није значајан јер је његова вредност занемарљиво мала. Опет, што се тиче различите геометријске сложености разматраних модела, установљено је да се коефицијенти који доминантно утичу на превртање (момента ваљања и бочне силе) не мењају значајно. Сложенија геометрија модела највише утиче на момент скретања и силу узгона. Додатак точкова и предњих спојлера знатно утиче на коефицијент узгона.

У [20] аутори Кели Ф. и др. мерили су аеродинамичке коефицијенте воза ETR500 у аеротунелу у стандардним окружењима (на равној подлози и узвишењу висине 6m) као и на типичном италијанском вијадукту. Испитивања су спроведена на моделима воза ETR500 размере 1:10 и 1:20 за углове скретања у опсегу од 0° до 90° . За мерење аеродинамичких сила које делују на локомотиву и први пратећи вагон оба модела различите размере вршене су појединачне припреме експеримента. Резултати су међусобно поређени да би се боље разумело како окружење утиче на аеродинамичка оптерећења. За углове скретања од 0° до приближно 45° добијене су више вредности коефицијента момента ваљања у случају узвишења у односу на равну подлогу.

Аутори Кели Ф. и др. [21] су такође извршили процену аеродинамичких сила које делују на први вагон воза Ansaldo Breda EMUV250 на основу комбинације аеротунелских испитивања одговарајућег модела размере 1:10 и нумеричких прорачуна вршених при различитим Рејнолдсовим бројевима и угловима

скретања. Гранични услови у нумеричким прорачунима дефинисани су у складу са експериментално измереним вредностима: брзине ваздуха од 10m/s што одговара Рејнолдсовом броју од 1.4×10^5 израженом преко висине модела. Прорачуни су подразумевали решавање Навије-Стоксових једначина осредњених Рејнолдсовом статистиком и затворених варијантом $k-\varepsilon$ турбулентног модела (чиме је омогућено адекватно моделирање струјања у близини зидова и одређивање тангенцијалних напона по површини воза). Приказани резултати потврђују да су коефицијенти бочне силе и момента скретања независни од Рејнолдсовог броја у разматраном опсегу струјних величина. Коефицијент момента ваљања зависи у малој мери од Рејнолдсовог броја, и то за Рејнолдсове бројеве више од 1.4×10^5 и при углу скретања од 30° . Највећа зависност од Рејнолдсовог броја примећена је код коефицијента узгона. Праћени аеродинамички коефицијенти: бочне силе, силе узгона, момента ваљања и момента скретања линеарно расту са повећањем нападног угла до неких 40° где достижу своје највеће или најмање вредности. Након достизања критичне вредности а са даљим повећањем нападног угла, коефицијенти силе узгона, бочне силе и момента ваљања остају приближно константни док коефицијент момента скретања нагло опада до нулте вредности. Постигнуто је задовољавајуће поклапање измерених и прорачунатих вредности коефицијената узгона и момента скретања при свим разматраним угловима скретања, док се разлике у експерименталним и нумеричким вредностима осталих аеродинамичких коефицијената повећавају са повећањем нападног угла.

У [23] Гилмино Е. и др. изложили су нумерички прорачун опструјавања путничког воза користећи метод коначних запремина и директну нумеричку симулацију. Воз је моделиран без оштрих ивица на предњој страни и са квадратном основом да би се олакшала анализа одвајања струјања на страни воза у заветрини и у близини тла. Нападни угао (у односу на уздужни правац модела) вариран је у опсегу од 0° до 30° . Резултати су упоређени са претходно извршеним нумеричким прорачунима Навије-Стоксових једначина осредњених Рејнолдсовом статистиком и експерименталним подацима добијеним при Рејнолдсовом броју $Re=0.9 \times 10^5$. Изведен је закључак да се резултати директне нумеричке симулације

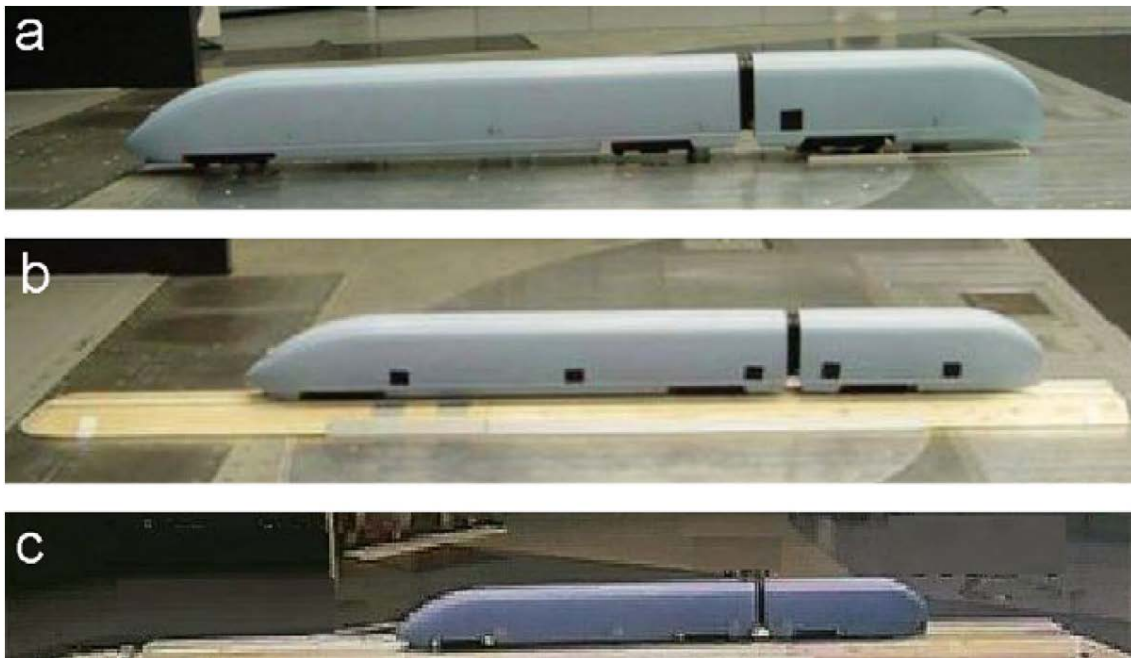
боље поклапају са експериментално добијеним вредностима, нарочито при већим вредностима угла скретања.

Бејкер С.Ц. [24] је вршио мерења и временски осредњених и нестационарних аеродинамичких сила и момената који делују на моделе воза Mark 3 размере 1:1 на терену и 1:30 у аеротунелу у условима дејства бочних ветрова. Резултати показују задовољавајуће поклапање као средњих тако и екстремних вредности аеродинамичких сила и момената на оба модела. Међутим, како је и наглашено у раду, највеће разлике су примећене при поређењу вредности коефицијента узгона, што се највероватније може образложити неравномерном храпавошћу зидова и близином модела, чиме су проузроковане велике варијације у струјању око и испод основе модела.

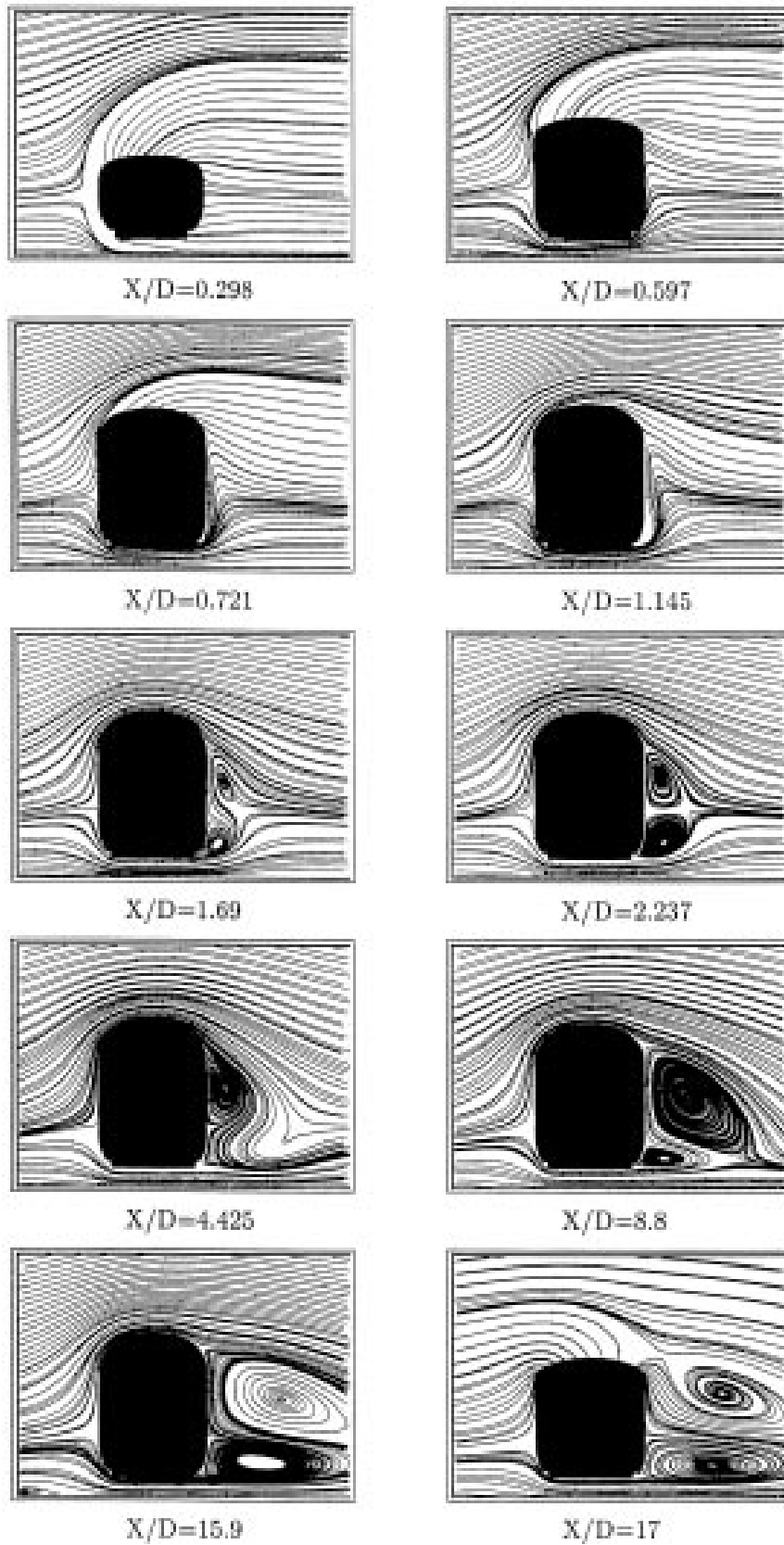
У [35] Боћолоне М. и др. извршили су обимна и детаљна аеротунелска испитивања и нумеричке симулације различитих модела возова размере 1:20 у различитим окружењима не би ли проучили аеродинамичке карактеристике разматраних возила. Резултати показују да се знак коефицијента отпора мења при приближном углу скретања од 40° што се намеће као општи закључак јер је запажено код свих разматраних модела. Аеродинамички коефицијент момента пропињања у највећој мери зависи од расподеле притиска по горњим и доњим површинама модела возова, док коефицијент момента скретања превасходно зависи од расподеле притиска по бочним површинама модела возова. Праћењем и анализом аеродинамичких коефицијената, запажено је да сви достижу своје максималне вредности при нападном углу у распону од 45° до 50° .

Кер В. и др. [38] спровели су нумеричка испитивања струјања око упрошћених модела возова при различитим угловима скретања и за високе вредности Рејнолдсовог броја 3.67×10^6 . Да би разрешили различите просторне струјне структуре, Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистичком и затворене $k-\varepsilon$ турбулентним моделом се решене на структурираним прорачунским мрежама састављеним из већег броја блокова и применом метода коначних запремина. Прорачуни поља притиска и брзина извршени су коришћењем SIMPLE алгоритма. Проучена је зависност струјних структура од угла скретања. Резултати истраживања показују да се одвајање струјања догађа и у доњем и у горњем делу стране воза у заветрини (слика 2.2). Структуре вртлога, међутим,

веома зависе од угла скретања. Није запажено одвајање струјања на страни воза у правцу ветра. У одређеној дужини ниструјно од почетка воза струјне структуре су квалитативно сличне. Распон у ком се дешавају највеће варијације струјања зависи од угла скретања. Правац ветра највише утиче на формирање струјних структура у задњем делу воза. Када не постоји бочни ветар (угао скретања једнак 0°) два симетрична вртлога стварају се на доњој површини основе воза и распршују се полако идући ниструјно ка крају воза. Повећање угла скретања резултује ранијим стварањем и растварањем вртлога. При малим вредностима угла скретања велике варијације у притиску дешавају се по нападним и излазним површинама воза. Велики градијент притиска може се приметити у подужном правцу, што проурокује подужне варијације аеродинамичких сила и момената. Са повећањем угла скретања, струјање постаје квалитативно равномерно дуж воза.



Слика 2.1. Модел воза у аеротунелу [40]

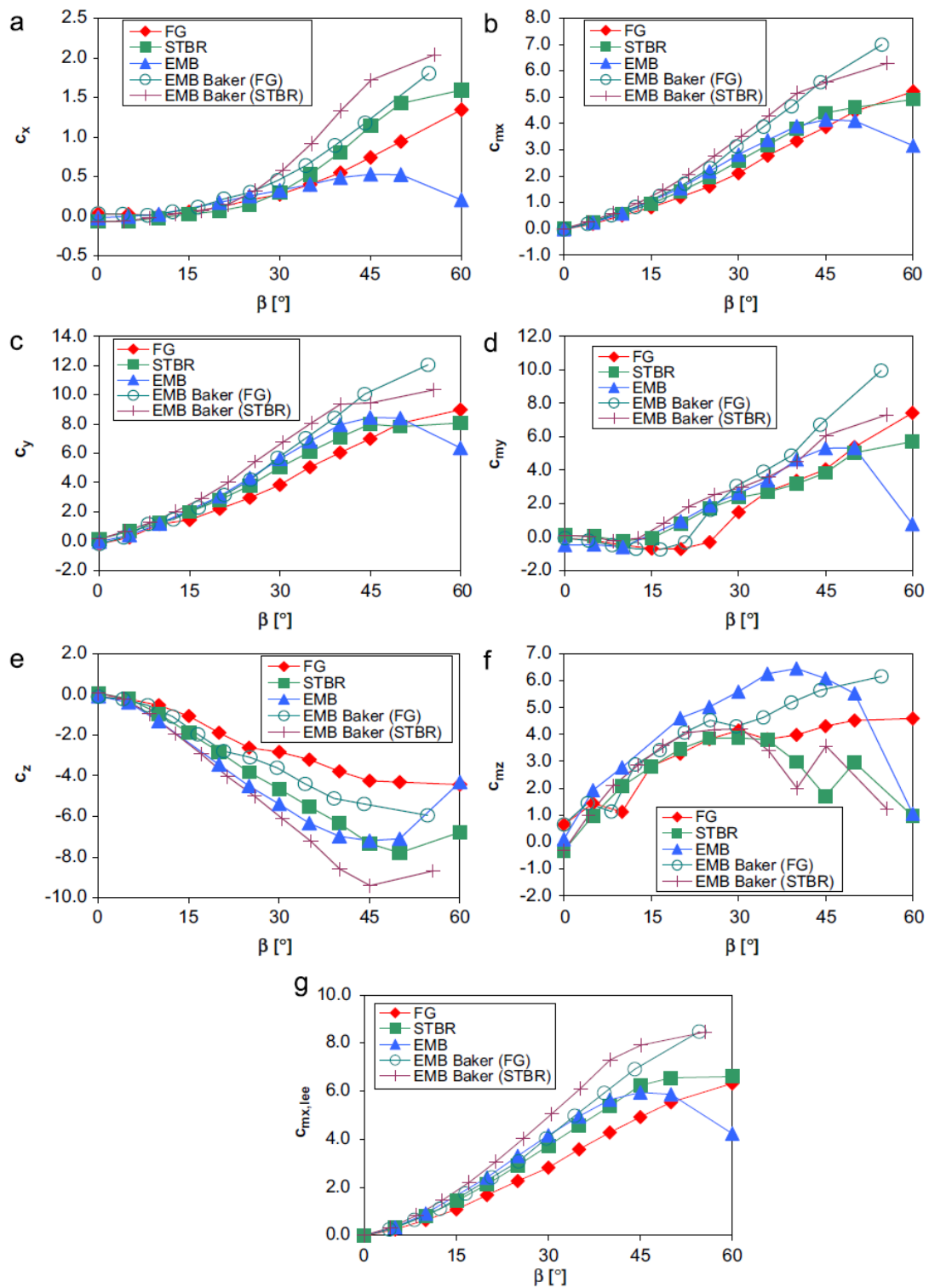


Слика 2.2. Струјнице у различитим попречним пресецима при углу скретања 20°

У [39] Хан Ј. и др. описали су поставку експеримента у аеротунелу чији је циљ био одређивање аеродинамичких карактеристика возила и мостова при различитим условима опструјавања. На основу резултата мерења разматрани су утицаји турбуленције, брзине ветра и интерференције возила на аеродинамичке коефицијенте возила као и утицаји возила на статичке аеродинамичке карактеристике мостова. Потврђено је да турбуленција и интерференција возила значајно утичу на аеродинамичке карактеристике возила. Са друге стране, утицај брзине ветра је занемарљив. Постојање возила такође значајно утиче на статичке аеродинамичке карактеристике мостова.

Шобер М. и др. [40] спровели су аеротунелска испитивања на моделу последњег вагона воза ICE 3 израђеног у размери 1:15 за три различите конфигурације тла као што су: потпуно равна подлога, подлога за шине и узвишење висине 6m (слика 2.1). Током експеримента, максимална брзина у радном делу аеротунела износила је 78m/s што одговара Рејнолдсовом броју од 1×10^6 , израженом преко карактеристичне дужине 2.95m. Интензитет турбуленције слободне струје ваздуха био је 0.3%. Резултати показују да коефицијенти аеродинамичке силе и момента веома зависе од конфигурације тла, и да су при постојању узвишења добијене највеће вредности измерених коефицијената. Аеродинамички коефицијенти се очигледно могу представити као функције угла скретања. Коефицијент отпора (c_x) показује тренд иницијалног смањења, а затим повећања са повећањем угла скретања, док коефицијент бочне силе (c_y) расте до приближне вредности угла скретања од 50° да би се потом смањивао са даљим повећањем угла скретања. Коефицијент узгона (c_z) на почетку расте, а затим опада са повећањем угла скретања. Коефицијенти момента ваљања (c_{mx} and $c_{mx, lee}$) понашају се слично коефицијенту бочне силе, док се коефицијент момента пропињања (c_{my}) прво смањује, затим повећава да би потом поново опадао са порастом угла скретања. Коначно, коефицијент момента скретања (c_{mz}) прво расте, а потом опада са порастом угла скретања. Величина која је најзначајнија за бочну стабилност воза је коефицијент момента ваљања око осе шине у заветрини. Може се приметити да су резултати добијени за воз на равној подлози значајно нижи од оних добијених за воз на узвишењу при опсегу углова скретања од 0° до приближно 50° . Пошто је вршено поређење ових и ауторових резултата у

каснијим главама рада, овде су приказане измерене вредности аеродинамичких коефицијената воза на равној подлози (FG) и на узвишењу (EMB), слика 2.3.



Слика 2.3. Аеродинамички коефицијенти модела воза ICE 3 на различитим конфигурацијама тла [40]

Глава 3

Основне једначине механике флуида

3.1 Увод

Темељ прорачунске механике флуида чине основне, полазне једначине механике флуида. Како се прорачунска динамика флуида бави приближним решавањем ових израза, важно их је продискутовати на почетку, пре примене на реалан инжењерски проблем. Једначине којима описујемо кретање флуида у простору су једначина континуитета, Навије-Стоксове једначине, једначина одржања енергије и једначине стања. Оне представљају математички запис основних физичких закона одржања масе, количине кретања и енергије [41-42].

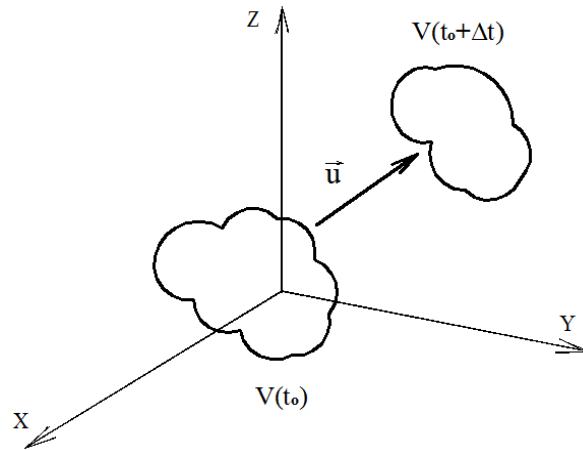
Циљ овог дела рада је извођење временских и просторних извода величина које се појављују у основним једначинама механике флуида применом физичких принципа и уз увођење одговарајућих појмова и модела као што су контролна запремина и флуидни делић. Модели коначне контролне запремине и/или флуидног делића могу се посматрати и као непомерљиви у простору и као да се померају са струјом флуида [43].

Нарочито значајне за проблем који је разматран, опструјавање воза, су једначина континуитета и Навије-Стоксове једначине. Флуид се може сматрати нестишљивим, док је струјање турбулентно. Из тих разлога, изрази за једначину континуитета и Навије-Стоксове једначине дати у овој глави важе за нестишљив флуид. Већина струјања у реалности може се сматрати турбулентним. Опструјавања лопатица ветротурбина као и других возила као што су аутомобили, возови, авиони, бродови и подморнице само су примери турбулентних струјања. Тренутно, као најчешће примењене технологије за симулацију турбулентног

струјања могу се издвојити: стационарне и нестационарне Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистиком, методе великих вртлога (LES) и методе одвојених вртлога (DES). У овом истраживању коришћене су нестационарне Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистиком јер не захтевају превелике прорачунске ресурсе и могуће их је решити и на обичном персоналном рачунару.

3.2 Једначина континуитета

Посматрајмо део флуида одређене масе и произвољне запремине V (слика 3.1). Током кретања, величина и облик посматраног дела флуида могу се мењати, али ће његова маса остати константна. Тада се може тврдити да је промена масе флуида у времену током његовог кретања једнака 0.



Слика 3.1. Произвољна материјална запремина у временским тренуцима t и $t + \Delta t$

$$\frac{D}{Dt} \int \rho dV = 0 \quad (3.1)$$

где ρ и t представљају густину флуида и време. Применом Рејнолдсове транспортне једначине [40] и теореме о дивергенцији на претходни израз добија се:

$$\int \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) \right] dV = 0 \quad (3.2)$$

где $\vec{u}(u, v, w)$ представља вектор брзине. Како је запремина V произвољно изабрана, једини начин да се обезбеди општост израза (3.2) је уколико је интегранд једнак 0. Тада је једначину континуитета могуће записати у облику:

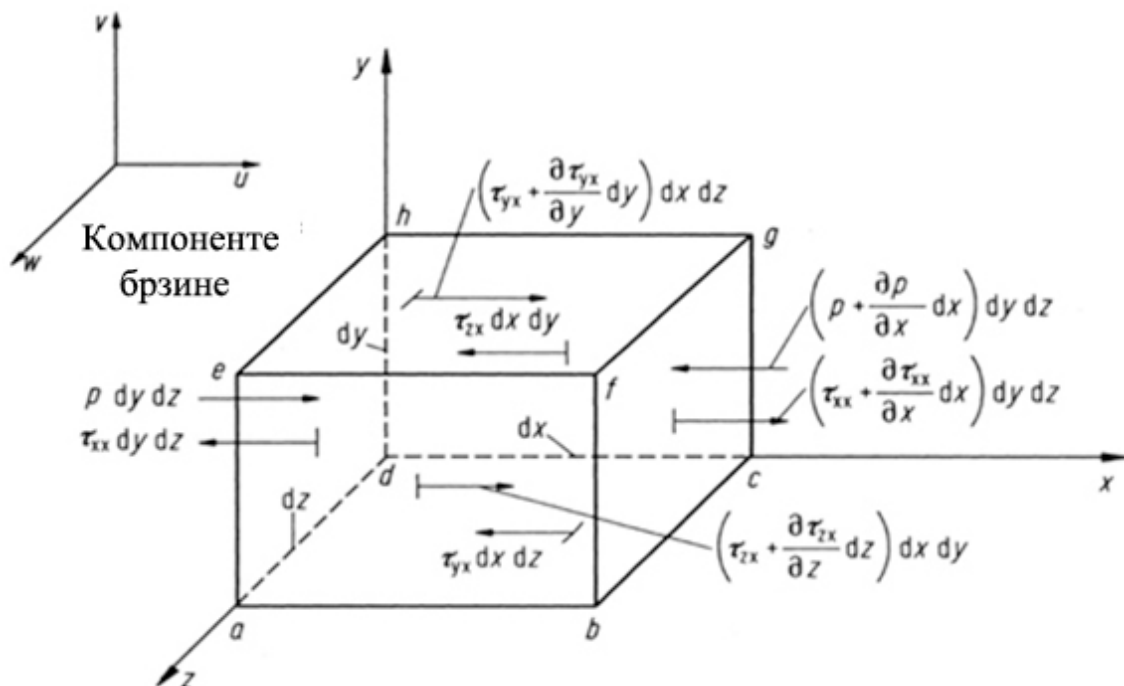
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.3)$$

Једначина (3.3) представља диференцијални облик једначине континуитета за стишљив флуид.

3.3 Закон одржања количине кретања

Посматрајмо само компоненте силе по x -правцу које делују на флуидни делић који се креће (слика 3.2). Други Њутнов закон примењен на флуидни делић који се креће гласи: сума сила које делују на флуидни делић једнака је производу масе и убрзања флуидног делића, $F = ma$. Ово је векторска релација, и може се представити преко три пројекције на x , y и z -правац.

Силе које делују на флуидни делић можемо поделити на запреминске и површинске. Запреминске силе делују по читавој запремини флуидног делића. Неки примери су гравитациона, електрична и магнетна сила. Са друге стране, површинске силе делују само по површини флуидног делића и узроковане су: (а) расподелом притиска по површини делића, услед околног флуида, и (б) расподелом тангенцијалног напона по површини, такође услед околног флуида који “се таре” о површину делића услед трења.



Слика 3.2. Флуидни делић

Ако запреминску силу по јединици масе означимо са \vec{f} , f_x њену x-компоненту и запремину флуидног делића са $(dx dy dz)$, пројекција запреминске силе која делује на флуидни делић на x-правац биће $\rho f_x (dx dy dz)$. Сумирањем свих пројекција површинских сила на x-правац, приказаних на слици 3.2, и пројекције запреминске силе добија се укупна компонента силе по x-правцу, F_x :

$$F_x = \left[\left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho f_x \right] dx dy dz \quad (3.4)$$

Маса флуидног делића је непроменљива и једнака $\rho(dx dy dz)$, док је пројекција убрзања флуидног делића на x-правац једнака промени пројекције брзине у времену, $(a_x = Du/Dt)$. Сада, применом другог Њутновог закона ($F_x = ma_x$), закон одржања количине кретања за вискозан флуид пројектован на x-правац гласи:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.5)$$

Аналогно се могу записати једначине одржања количине кретања по y и z-правцу:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.6)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.7)$$

Једначине (3.5-7) представљају скаларни облик Навије-Стоксових једначина. Такође их је могуће записати у диференцијалном облику.

Лева страна једначине (3.5) представља материјални извод [41]:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla u \quad (3.8)$$

По дефиницији извода производа добија се

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.9)$$

Такође, дивергенција производа скалара и вектора може се записати као:

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{u}) = u \nabla \cdot (\rho \vec{u}) + (\rho \vec{u}) \cdot \nabla u \quad (3.10)$$

Комбинацијом једначина (3.8-10) добија се:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) \right) + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) \quad (3.11)$$

Како израз у загради на десној страни једначине (3.11) представља леву страну једначине континуитета означену са (3.3) једнак је 0. Тако се једначина (3.11) своди на:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) \quad (3.12)$$

Након увршћења (3.12) у (3.5) и спровођења наведених трансформација и над једначинама (3.6) и (3.7), Навије-Стоксове једначине у диференцијалном облику гласе:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.15)$$

У већини практичних проблема аеродинамике може се претпоставити да је флуид Нутновски (тангенцијални напон је сразмеран брзини деформације флуида). Тада се тензор тангенцијалног напона може записати као [41]:

$$\tau_{ij} = -\rho \begin{bmatrix} \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

где је μ први, а λ други коефицијент вискозности. Према Стоксовој хипотези $\lambda = -2\mu/3$. Заменом тензора тангенцијалног напона (3.16) у једначине (3.13-15), добија се пуни запис Навије-Стоксових једначина за вискозан и стишљив флуид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) + \rho f_x \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \rho f_y \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \rho f_y \end{aligned} \quad (3.19)$$

Једначине (3.17-19) могу се записати и преко општег индекса j (у Ајнштајновој нотацији) као:

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho f_j \quad (3.20)$$

3.4 Једначина енергије

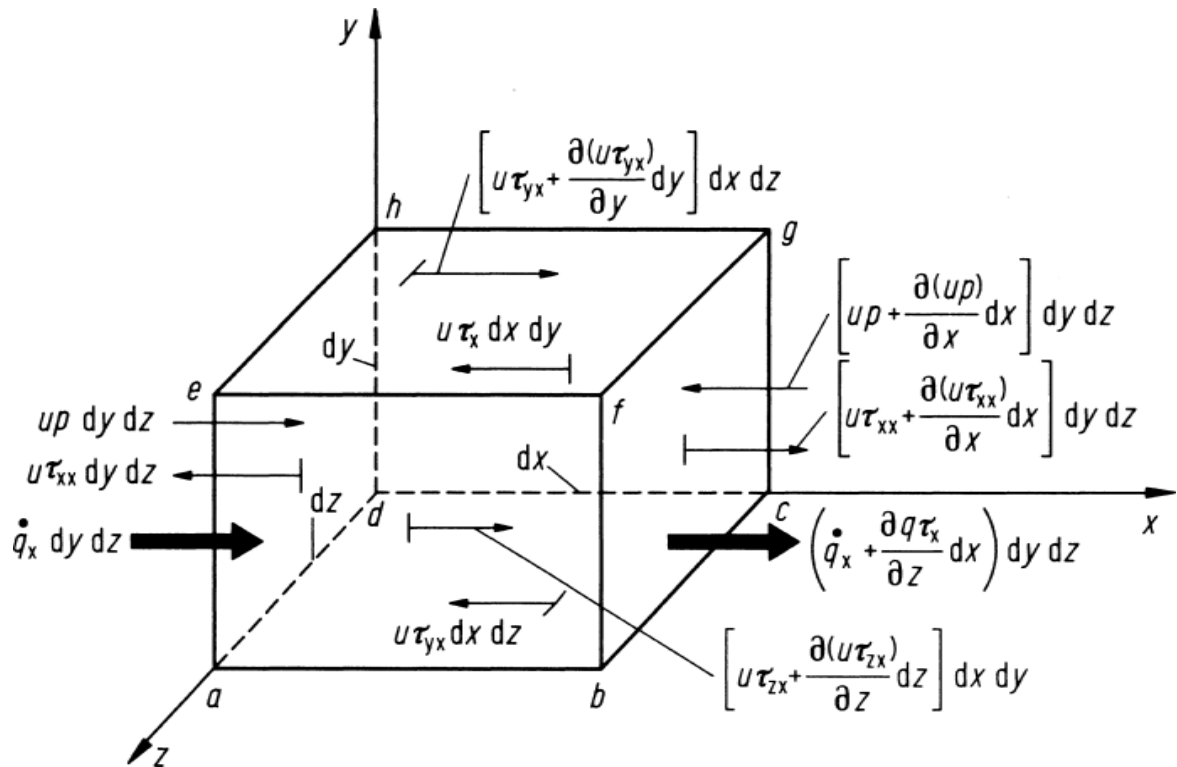
У овом одељку изведена је једначина енергије помоћу модела флуидног делића који се креће. Први закон термодинамике примењен на материјалну запремину може бити формулисан као: брзина промене укупне енергије флуидног делића (А) једнака је збиру енергије размењене са околином у јединици времена (В) и снаге свих сила који на њега делују (С), односно:

$$A = B + C \quad (3.21)$$

Снага запреминске или површинске силе која делује на флуидни делић једнака је производу интензитета те силе и пројекције брзине на правац силе. Тако се снага запреминске силе \vec{f} која делује на флуидни делић који се креће брзином \vec{u} може представити као:

$$\rho \vec{f} \cdot \vec{u} (dx dy dz) \quad (3.22)$$

За анализу површинских сила разматраћемо само силе које делују у x -правцу, као што је скицирано на слици 3.3.



Слика 3.3. Флуидни делић који размењује енергију са околином

Снага површинских сила (услед притиска и смицајних напона) које делују на материјалну запремину у x -правцу једнака је производу x -компоненте брзине и x -компоненте укупне силе, што се може записати као:

$$\left[-\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (3.23)$$

На сличан начин се могу формирати изрази за друга два правца:

$$\left[-\frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (3.24)$$

$$\left[-\frac{\partial(wp)}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (3.25)$$

Укупна снага површинских и запреминских сила (C) које делују на флуидни делић представља збир свих наведених сабирака:

$$C = \left[-\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{u} \right] dx dy dz \quad (3.26)$$

Размена енергије са околином у јединици времена (B) проузрокована је: (1) радијативним преносом топлоте који делује на целу запремину и изражава се као

производ масе флуидног делића и брзине размене топлоте по јединици запремине ($\rho \dot{q} dx dy dz$), и (2) кондукцијом, преносом топлоте кроз површину делића услед температурних разлика. Укупна топлота пренесена кондукцијом у x-правцу представља разлику топлота пренесених из околине у елемент и обрнуто, што се може записати као $(-\partial \dot{q} / \partial x) dx dy dz$. Узимајући у обзир пренос топлоте кондукцијом и у друга два правца, добија се:

$$B = \left[\rho \dot{q} - \left(\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (3.27)$$

Како је пренос топлоте кондукцијом сразмеран градијенту температуре:

$$\dot{q}_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} ; \dot{q}_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} ; \dot{q}_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.28)$$

где је k топлотна проводљивост. Тако се израз (3.27) може записати као:

$$B = \left[\rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (3.29)$$

Конечно, у једначини (3.21) члан A означава брзину промене укупне енергије флуидног делића. Укупна енергија по јединици масе представља суму унутрашње енергије по јединици масе, e, и кинетичке енергије по јединици масе, $\bar{u}^2/2$. Тако је укупна енергија по јединици масе једнака $(e + \bar{u}^2/2)$. Како је посматрана материјална запремина, брзина промене енергије изражава се материјалним изводом. Маса флуидног делића је $\rho dx dy dz$, одакле

$$A = \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{\bar{u}^2}{2} \right) dx dy dz \quad (3.30)$$

Коначни облик једначине енергије добија се уврштавањем израза (3.26) и (3.28-9) у (3.21). Изражавањем вискозних напона τ_{xy} , τ_{xz} , итд. по изразу (3.16) једначина енергије може се потпуно изразити преко величина поља. Како је $\bar{u}^2 = u^2 + v^2 + w^2$ и $\rho \vec{f} \cdot \vec{u} = \rho (uf_x + vf_y + wf_z)$ једначина енергије може се изразити и преко брзине промене унутрашње енергије:

$$\begin{aligned} \rho \frac{De}{Dt} = & \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ & + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 2\mu \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) \\ & + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.31)$$

Лева страна једначине (3.30) може се, помоћу израза (3.12), изразити у диференцијалном облику:

$$\rho \frac{De}{Dt} = \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{u}) \quad (3.32)$$

Комбинацијом једначина (3.30) и (3.31) једначина енергије може се записати и у Ајнштајновој нотацији:

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial e}{\partial x_k} = -p \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \lambda \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.33)$$

Једначина континуитета (3.3), Навије-Стоксове једначине (3.20) и једначина енергије (3.32) заједно чине систем пет скаларних једначина са шест непознатих величина поља ρ , p , u , v , w , e . Једначина којом се овај систем затвара је једначина стања. Може бити представљена у неком од следећих облика:

$$p = p(\rho, T) \quad (3.34)$$

$$e = e(\rho, T) \quad (3.35)$$

У аеродинамици најчешће се може претпоставити да је гас идеалан (да се међумолекуларне силе могу занемарити). Једначина стања идеалног гаса може се изразити као $p = \rho RT$ где R представља специфичну гасну константу, док за калоријски идеалан гас (константне специфичне топлоте) ова релација гласи $e = c_v T$ где c_v представља специфичну топлоту при константној запремини [41].

На крају, основне једначине нестационарног, просторног струјања стишљивог, вискозног флуида могу бити записане и у следећем облику:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tilde{\tau} \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{u}) = -p \nabla \cdot \vec{u} + k \nabla \cdot \nabla T + (\nabla \cdot \tilde{\tau}) \cdot \vec{u} \quad (3.38)$$

где $\tilde{\tau}$ представља тензор вискозних напона. За Њутновски флуид, вискозни напони рачунају се по (3.16).

3.5 Турбуленција

Турбулентно струјање је нерегуларно, хаотично, нестационарно, просторно и дисипативно услед постојања великих флукуација притиска и брзине у простору и времену [41-42].

Решавање основних једначина механике флуида наведених у претходном поглављу није превише компликовано у случају невискозног флуида или ламинарног струјања. Са друге стране, симулација турбулентног струјања носи са собом бројне проблеме. Упркос могућностима данашњих суперкомпјутера, директна нумеричка симулација нестационарних турбулентних струјања (DNS) спроводи се само на примерима једноставне геометрије при ниским вредностима Рејнолдсовог броја [43].

3.5.1 Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистиком

Рејнолдс је, 1895. године, предложио модел којим се турбулентно струјање посматра као суперпозиција осредњених и флукуационих компоненти. Овај приступ је заснован на разлагању нестационарне величине поља на просечну, осредњену вредност, и на флукуациону вредност. Осредњавање је могуће вршити по времену или по ансамблу. У случају променљиве густине, препоручљиво је вршити Фаврову декомпозицију компоненти брзине [41].

Како се при опструјавању воза обрађеном у овом раду флуид може сматрати нестишљивим, у наставку је дат тензорски запис једначине континуитета и Навије-Стоксових једначина за нестишљив флуид. Индекс i може имати вредности 1, 2, 3 (што одговара x , y и z -правцу у Декартовом координатном систему):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.39)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho f_i \quad (3.40)$$

Једначине (3.38) и (3.39) чине систем четири једначине са четири непознате: три компоненте брзине u_i и притисак p . У питању су нелинеарне, парцијалне диференцијалне једначине што значи да не постоји аналитичко решење за

произвољне граничне услове. Из тог разлога, једначине које описују опструјавање воза решене су нумерички. У зависности од струјања, могуће је користити различите моделе. Струјање око воза прелази у турбулентно већ на удаљености од неколико сантиметара од предњег дела. У директној нумеричкој симулацији (DNS) турбулентног струјања потребно је користити веома fine мреже и мале временске кораке да би се успешно разрешиле и најситније турбулентне структуре као и најбрже флукуације. Иако овај приступ не захтева употребу додатних модела и најпоузданији је, решавање једначина струјања при високим Рејнолсовим бројевима и око сложених геометрија захтева огромне прорачунске ресурсе. Да би се то избегло уобичајена је употреба одређених турбулентних модела. Тренутно, као најчешће примењене технологије за симулацију турбулентног струјања могу се издвојити: стационарне и нестационарне Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистиком, методе великих вртлога (LES) и методе одвојених вртлога (DES). У овом истраживању коришћене су нестационарне Навије-Стоксове једначине осредњене Рејнолдсовом статистиком јер не захтевају превелике прорачунске ресурсе и могуће их је решити и на обичном персоналном рачунару.

Заменом разложених компоненти брзине $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ и притиска $p_i = \bar{p}_i + p'_i$ у изразима (3.38-39) добија се:

$$\frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial t} + (\bar{u}_j + u'_j) \frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p}_i + p'_i)}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_j} \right) \right) + (\bar{f}_i + f'_i) \quad (3.42)$$

Временским осредњавањем претходних једначина:

$$\frac{\partial \overline{(\bar{u}_i + u'_i)}}{\partial x_i} = 0 \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial \overline{(\bar{u}_i + u'_i)}}{\partial t} + \overline{(\bar{u}_j + u'_j)} \frac{\partial \overline{(\bar{u}_i + u'_i)}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{(\bar{p}_i + p'_i)}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \overline{(\bar{u}_i + u'_i)}}{\partial x_j} \right) + \overline{(\bar{f}_i + f'_i)} \quad (3.44)$$

Дефиниција временски осредњене величине има за последицу да су временски осредњене вредности флукуационог дела једнаке нули. Занемаривањем гравитационе силе, једначине се свде на облик:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (3.46)$$

Последњи нелинеарни члан у (3.45) је тензор турбулентних напона који се записује као:

$$\tau'_{ij} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'^2} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Турбулентни модели нуде додатне релације којима је могуће израчунати компоненте овог тензора. У проблему који је разматран у овом раду коришћен је један од стандардних двоједначинских турбулентних модела заснованих на Бусинесковој хипотези, односно једна варијанта k-ε модела турбуленције.

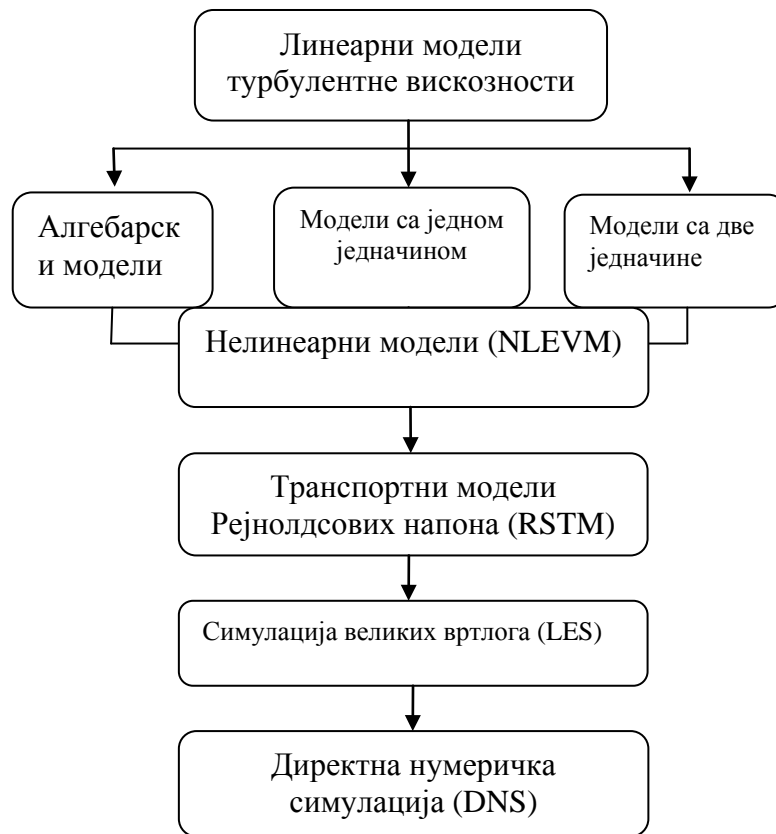
3.5.2 Турбулентни модели

Рад на побољшању турбулентних модела је интензивирао у последњој деценији услед технолошких захтева модерних аеродинамичких система и напретка у могућностима рачунара и нумеричких симулација. Турбулентно струјање може бити прорачунато користећи неколико различитих приступа, као што су решавање Рејнолдсових једначина које су затворене одговарајућим турбулентним моделом или директним нумеричким решавањем Навије-Стоксових једначина.

Главни изазов везан за прорачунске методе на којима се базирају методе пројектовања аеродинамичних конструкција односи се на тачност, односно могућности турбулентних модела да симулирају сложена турбулентна струјања. Да би турбулентни модел био употребљив потребно је да има релативно широку област примене, прихватљиву тачност, да је релативно једноставан за имплементацију и прорачунски ефикасан. Различити приступи нумеричком решавању турбулентних струјања приказани су на слици 3.4.

Код линеарних модела турбулентне вискозности претпоставља се да је турбулентни напон пропорционалан средњој брзини деформација, слично као за вискозни напон [44-46]. Тада се за тангенвијалне напоне може написати:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.48)$$



Слика 3.4. Различити приступи одређивања турбулентног струјног поља применом рачунара

где је μ_t вртложна, тј. турбулентна вискозност (својство које варира са током флуида). Такође се може дефинисати кинематска турбулентна вискозност $\nu_t = \mu_t/\rho$. Једначина 47 се може изразити у уопштијем облику:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} - \rho k \right) \quad (3.49)$$

где је k средња кинетичка енергија турбуленције.

Код линеарних турбулентних модела, турбулентна вискозност се изводи из турбулентних транспортних једначина. К-епсион турбулентни модел је најчешће коришћен у прорачунској динамици флуида за симулирање турбулентни услова струјања. Робустност, ефикасност са становишта извршавања на рачунару и прихватљива тачност за широк дијапазон турбулентних струјања у инжењерској пракси објашњавају његову популарност за различите симулације струјања.

Стандардни к-епсион модел је полуемпиријски модел, чије се извођење делом заснива на разматрању феномена турбулентног струјања и емпирији. Једначина за кинетичку енергију турбуленције може се извести директно из Навије-Стоксових

једначина, док се „епсион једначина“ може извести подражавањем претходно поменуте једначине. Како су предности и мане основног к-епсион модела постале познате, предлагана су побољшања у циљу постизања бољих резултата за одређене класе проблема. Две од често коришћених модификација основног модела су РНГ к-епсион модел и „оствариви“ к-епсион модел [47-49]. Генерално, к-епсион модел је предвиђен за развијена турбулентна струјања при великим Рејнолдсовим бројевима, што чини велики део инжењерских проблема.

За потребе прорачуна приказаних у дисертацији коришћен је „оствариви“ к-епсион модел. У овом моделу турбулентна вискозност се представља као $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$. Члан C_μ је константа (вредности обично 0.09), k је кинетичка енергија турбуленције и ε је дисипација кинетичке енергије турбуленције. Транспортне једначине за „оствариви“ к-епсион модел се могу изразити у следећем облику [44-49]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.50)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (3.51)$$

$$P_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}; C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right); \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.52)$$

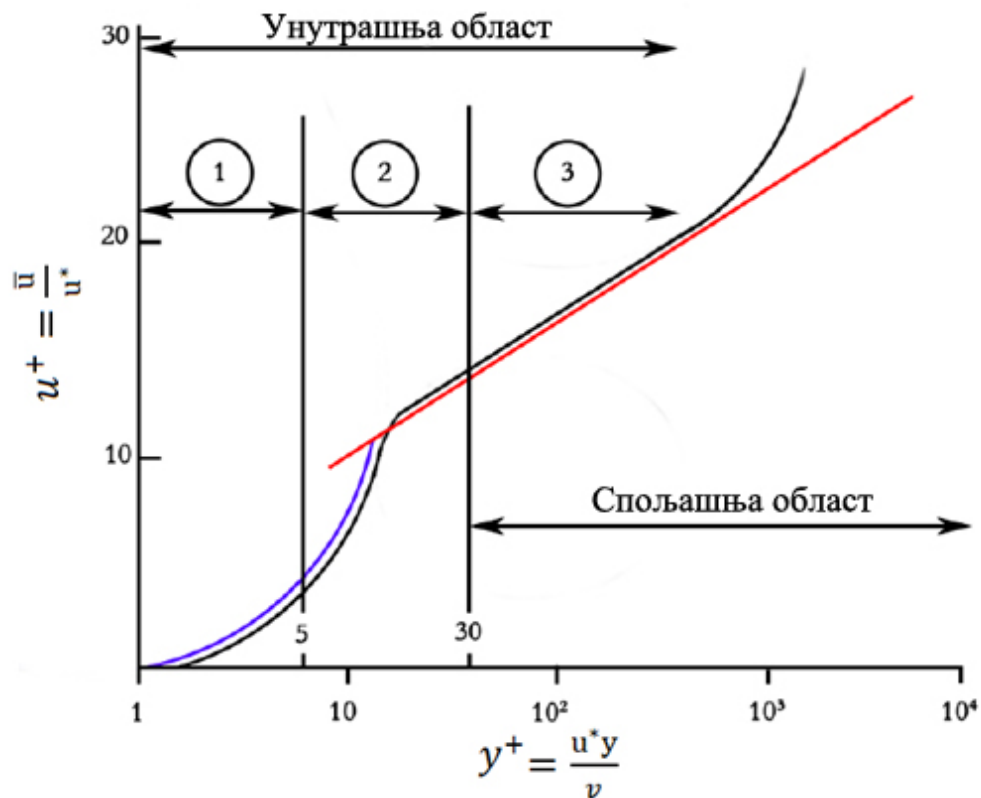
$$S = \sqrt{2 S_{i,j} S_{i,j}}; S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.53)$$

Чланови на левим странама једначина 49 и 50 представљају локалне и конвективне промене кинетичке енергије и дисипације турбуленције, док чланови на десним странама поменутих једначина престављају транспорт дифузијом, продукцију и деструкцију поменутих транспортних величина. Константе модела (којима се затварају једначине) су $C_\mu=0.09$, $C_2=1.9$, $\sigma_k=1.0$ и $\sigma_\varepsilon=1.2$.

3.5.3 Гранични слој

Један од најчешћих инжењерских проблема је прорачун турбулентног струјања у присуству зида, односно струјање у граничном слоју. Флуид на зиду је у стању мировања, тако да се брзина струјања мења у граничном слоју до достизања брзине слободне струје на одређеној удаљености од зида. Промене брзине су

обично највеће у непосредној близини зида, те се у тој области налазе највећи градијенти брзине [50]. С обзиром да се треће рачуна користећи поменуте градијенте, веома је битно тално одредити ове промене у близини зида. Овај метод се назива интегралним методом, што изискује примену турбулентног модела који је у стању да узме у обзир струјање при малим Рејнолдсовим бројевима. При већим Рејнолдсовим бројевима, област струјања под утицајем зида се смањује. Међутим, пошто је једнако важно тачно одредити градијенте у близини зида, потребан је велики број елемената прорачунске мреже у овој области. Са инжењерског становишта, једноставније је формулисати функцију која описује струјање у области близу зида него вршити прорачун, чиме се битно смањују рачунарски ресурси потребни за прорачун. Претпоставља се да је ово могуће урадити при чему се прави само мања грешка у коначним резултатима. Овај приступ решавању проблема струјања у граничном слоју је познат као метода зидних функција, која се користи код турбулентних модела предвиђених за струјања при великим Рејнолдсовим бројевима [50].



Слика 3.5 Различите зоне у граничном слоју

Гранични слој има различите карактеристике у зависности да ли је струјање ламинарно или турбулентно. У области која је најближа зиду могу се издвојити три зоне, слика 3.5, вискозни подслој, прелазни слој и слој зидне турбуленције. У непосредној близини зида, налази се вискозни подслој ($0 < y^+ < 5$) у коме је утицај трења на струјање преовлађује, при чему је расподела брзина дефинисана изразом [51]:

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u^*} = \frac{u^* y}{\nu} = y^+ \quad (3.54)$$

где је y^+ бездимензиона удаљеност од зида, удаљеност од зида у помножена са брзином трења u^* и подељена са кинематском вискозношћу ν . u^+ је бездимензиона брзина, количник интензитета вектора средње брзине паралелног са зидом која је функција удаљености од зида, и брзине трења. Брзина трења или брзина смицања дефинисана је изразом:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.55)$$

У прелазној области ($5 < y^+ < 30$) вискозне силе су надјачане инерцијалним - турбулентним силама. Аналитички израз за расподелу брзине у овој области се не користи, већ је она пароксимирана изразима добијеним на основу експерименталних испитивања. У области зидне турбуленције може се користити логаритамски закон ($30 < y^+ < 300$), јер је утицај вискозних сила занемарљив. Расподела средње брзине у овој области дата је изразом [51]:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u^* y}{\nu} + C^+ \quad (3.56)$$

где је κ Карманова константа, а C^+ је константа. Вредности ових константи за гладак зид су $\kappa \approx 0.41$ и $C^+ \approx 5.0$ [52].

При моделирању турбулентно струјања потребно је одредити одговарајућу величину ћелија у близини зидова. У случају примене зидних функција потребно је обезбедити да вредности y^+ буду у одређеним границама. У зависности од бездимензионог удаљења од зида примењују се различите технике третирања струјања у близини зидова, те је стога потребно адекватно дефинисати удаљеност прве ћелије од зида и степен промене корака мреже према изабраном турбулентном моделу за прорачун струјања у граничном слоју. Размотрени су различити приступи моделирању као што су стандардне зидне функције,

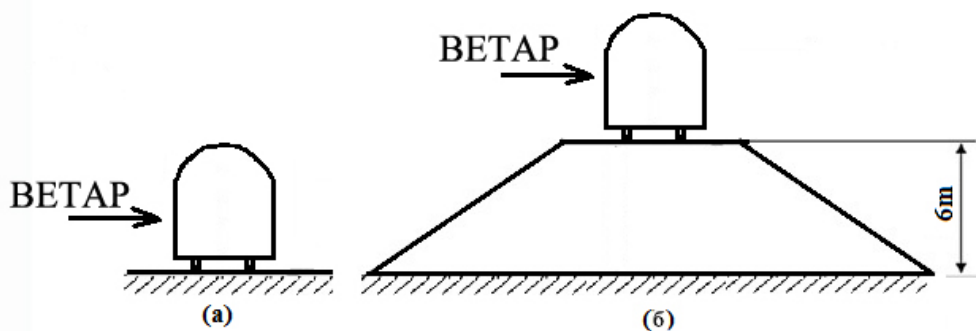
побољшане зидне функције и неравнотежне зидне функције. Стандардне и неравнотежне зидне функције примењене су за $30 < y^+ < 300$ док су побољшане примењене за мреже у којима је прва ћелија мреже од зида постављена на $y^+ \approx 1$.

Глава 4

Методe нумеричке симулације

4.1 Увод

У овом поглављу представљена је методологија симулације струјања око водећег вагона ДФ4Д модела путничког воза при јаком попречном ветру, за различите углове скретања ваздушне струје у односу на воз, при стационарном равном терену и у случају постављања воза на 6m висок насип. Циљ је процена утицаја насипа на аеродинамичке карактеристике возила поређећи резултате са случајем опструјавања на равном терену. Поставка нумеричке симулације састоји се од геометрије локомотиве ДФ4Д модела путничког воза који је изложен ветру константног интензитета од 40 m/s при различитим угловима скретања (β) у односу на уздужну осу модела. у интервалу од 0° до 90° на равnoj подлози и 6m високом насипу, слика 4.1. Рејнолдсов број ($Re = V_{rel}L/\mu$) базиран на улазној брзини струјања у прорачунски домен и ширини модела воза износи 1.33×10^7 .



Слика 4.1. Разматрани случајеви опструјавања модела на (а) равном терену и (б) насипу

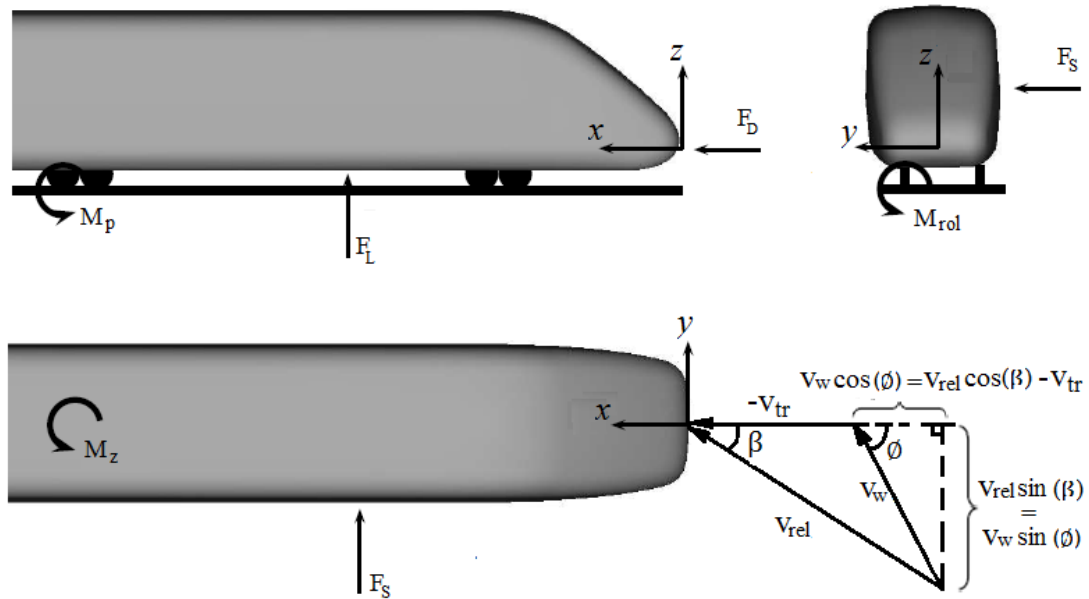
Коефицијенти аеродинамичких сила и момената изразито зависе од конфигурације терена, са највећим вредностима за случај воза на насипу. Предпоставља се да нестационарне Рејнолдсоце једначине (RANS) затворене „остваривим“ k -епсион турбулентним моделом могу да предвиде аеродинамичке коефицијенте возила, као и структуру струјања са задовољавајућом тачношћу [13-14]. С обзиром да је разматрана брзина воза 145 km/h и Махов број 0.3, моделирано је нестишљиво струјање. Навије-Стоксове једначине и једначина континуитета за нестишљиви флуид решаване су користећи FLUENT.

Оствариви k -епсион турбулентни модел са неравнотежним зидним функцијама је коришћен за затварање Рејнолдсових једначина. Имајући у виду могућности поменутих зидних функција да узму у обзир ефекте градијента притиска и нарушавање равнотеже у струјним процесима, оне су изабране за моделирање сложеног струјања са одвајањем и поновним припајањем струје флуида која је изложена јаким градијентима притиска са брзим и наглим променама [57-58]. Прорачунске мреже су уситњене у близини зида воза, са довољним бројем ћелија у правцу нормале на зид, тако да вредности y^+ буду у препорученим границама за разматрано струјање и турбулентни модел. Процедура припреме симулације са детаљима везаним за геометрију проблема, разматрану прорачунску област, прорачунску мрежу и граничне услове је описана у наредним секцијама.

4.2 Координатни систем и аеродинамички коефицијенти

Када се воз креће под утицајем бочног ветра он је изложен додатним аеродинамичким силама и моментима. Аеродинамичке силе су сила отпора, F_D , која се супротставља кретању воза, сила узгона, F_L , која делује навише и има тенденцију да издигне воз из шина и бочна сила, F_S . Аеродинамички моменти који се јављају услед дејства бочног ветра су момент ваљања, M_{roll} , момент пропињања, M_p , и момент скретања, M_z . На слици 4.2 приказане су различите аеродинамичке силе и моменти који делују на воз услед бочног ветра. Однос између правца и интензитета брзине ветра, резултујућег угла у односу на воз (β),

резултујуће брзине у односу на воз (v_{rel}) и брзине кретања воза (v_{tr}) приказани су на слици 4.2.



Слика 4.2 Силе и моменти који дејствују на воз при утицају бочног ветра

Користећи координатни систем приказан на слици 4.2, коефицијенти аеродинамичких сила и момената могу бити израчунати на следећи начин:

$$C_s = \frac{F_s}{0.5\rho AV_{rel}^2} \quad (4.1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho AV_{rel}^2} \quad (4.2)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho AV_{rel}^2} \quad (4.3)$$

$$C_{M,rol} = \frac{M_{rol}}{0.5\rho h AV_{rel}^2} \quad (4.4)$$

$$C_{M,P} = \frac{M_P}{0.5\rho h AV_{rel}^2} \quad (4.5)$$

$$C_{M,z} = \frac{M_z}{0.5\rho h AV_{rel}^2} \quad (4.6)$$

где су F_s бочна сила у y правцу, F_L сила узгона у z правцу, F_D сила отпора у x правцу, M_{rol} момент ваљања око x осе, M_P је момент пропињања око y осе, M_z је момент скретања око z осе, ρ је густина ваздуха, v_{rel} резултујућа брзина осптрујавања воза, A референтна површина и h референтна дужина.

Подесно је изразити расподелу притисака у облику коефицијента притиска C_p , који је дефинисан као [59]:

$$C_p = \frac{p - p_{\infty}}{0.5\rho V_{rel}^2} \quad (4.7)$$

где је p локални статички притисак, V_{rel} брзина слободне струје и p_{∞} је статички притисак слободне струје. Разлика између локалног статичког притиска p и статичког притиска слободне струје, p_{∞} , зависи од динамичког притиска слободне струје, $0.5\rho V_{rel}^2$.

Аеродинамичка оптерећења зависе од Рејнолдсовог броја и облика воза. За одређене режиме струјања, ефекат Рејнолдсовог броја на аеродинамичке коефицијенте може бити веома изражен. Коефицијенти се могу драматично променити у одређеном интервалу Рејнолдсовим бројева, што указује на преображај ламинарног у турбулентни гранични слој. Међутим, за друге режиме струјања, утицај Рејнолдсовог броја је знатно мањи. Стога, сматра се да аеродинамички коефицијенти слабу зависе од Рејнолдсовог броја и представљају функцију угла скретања [59]. За струјања при великим Рејнолдсовим бројевима која су разматрани може се сматрати да је утицај Рејнолдсовог броја мали за аеродинамичке коефицијенте који доприносе могућем превртању воза, тј. моменту ваљања, бочној сили и сили узгона [14].

4.3 Опис геометрије модела

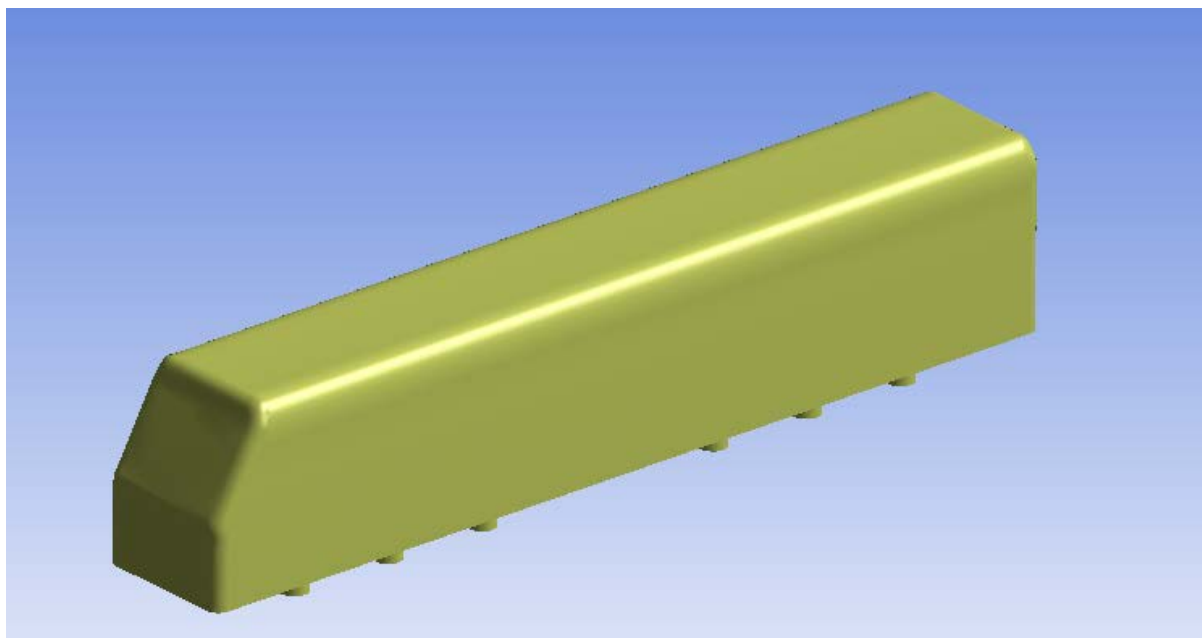
Главна извођења возова, тј. модели у размери 1:1 нису често коришћени за проучавање аеродинамике због своје комплексности, обично се користе поједностављени модели мањих димензија. Извођење нумеричке симулације за комплетан воз дужине 200 m захтева огромне рачунарске ресурсе који нису доступни. Такође, с обзиром да је структура струјања низструјно након одређене удаљености у односу на нос воза (мање од дужине једног вагона) стална, смањење дужине не доприноси губљењу разматраних физичких карактеристика струјања [38].

Коришћени модел одговара стварној локомотиви ДФ4Д путничког воза и састоји се од тела локомотиве и поједностављених ослонаца који представљају тачкове, како је приказано на сликама 4.3 и 4.4. Модел је следећих димензија:

укупна дужина износи 21.1m, ширина износи 3.309m и висина модела износи 4.755m.



Слика 4.3 Локомотива ДФ4Д путничког
воза



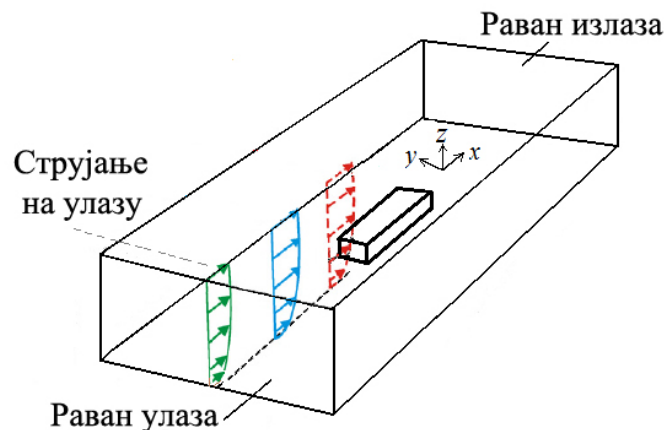
Слика 4.4 Поједностављен модел локомотиве ДФ4Д путничког воза коришћен за
нумеричку симулацију

Референтна тачка за израчунавање момената налази се на нивоу тла на средини дужине модела. Момент око низструјне шине у односу на правац бочног ветра се такође израчунава. Коефицијенти аеродинамичких сила и момената израчунати су

за референтну површину од 14.3911 m^2 , која одговара површини попречног пресека модела воза и референтну дужину од 3.309 m , која представља ширину воза.

4.4 Прорачунски домен и мрежа

После формирања геомерије модела, направљен је прорачунски простор облика паралелопипеда димензија $50 \times 100 \times 150 \text{ m}$. Модел је могуће ротирати у x -у равни за дати угао скретања потребан за симулацију. Удаљеност носа возила од улаза у прорачунски домен је око 50 m што је довољно да је осигура униформност поља притиска и брзина на улазу и да струјање буде развијено на позицији модела. Модел је такође на довољној удаљености од горње и бочних граница домена, тако да оне не утичу на резултате.



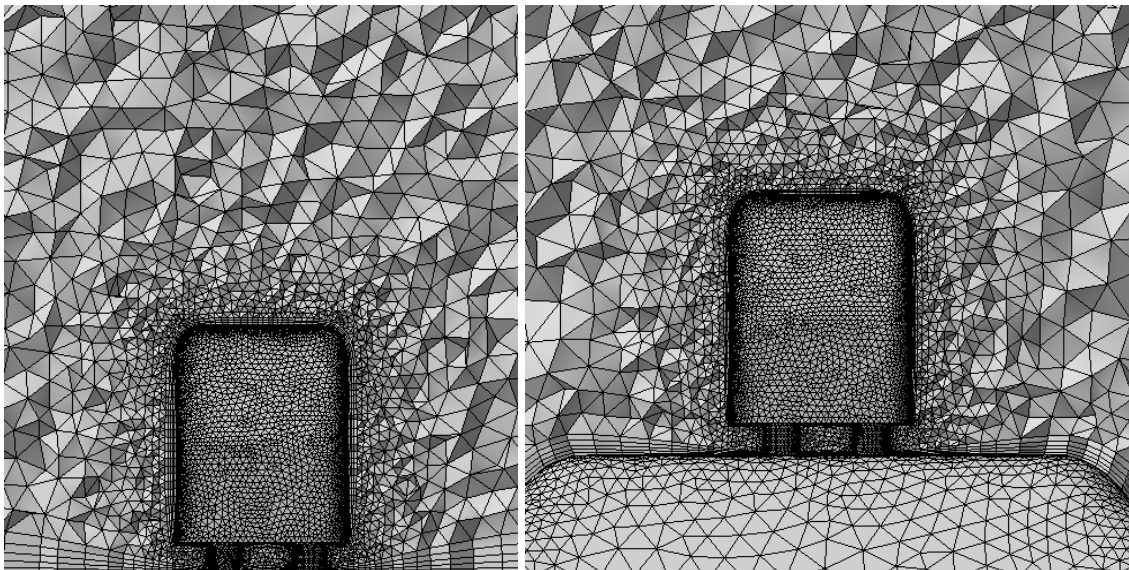
Слика 4.5. Прорачунски домен са моделом воза за нумеричку симулацију

Прорачунску мрежу домена чине тетраедри. У близини површина модела извршено је уситњавање мреже, као и у зонама точкова – ослонаца воза и површима које окружују модел како би се веродостојно репрезентовали геометријски детаљи и боље апроксимирали велики градијенти присутни у овим зонама. Генерисана прорачунска мрежа има $3,100.234$ елемената. Веће ћелије коришћене су у регионима удаљеним од воза где је струјање мање поремећено и где су турбулентни ефекти мање значајни. Резолуција мреже је на зиду веома

важна за примењени турбулентни модел. Да би се користиле зидне функције са поузданошћу потребно је да вредности y^+ буду у одређеном интервалу. Више начина третирања струјања у близини зида је могуће у зависности од ове вредности. Прва апроксимација се може одредити на основу израза:

$$y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \quad (4.8)$$

где је y позиција првог чвора уз зид, ν је кинематска вискозност флуида и u^* је брзина смицања - трења. Пошто брзина смицања никада није већа од брзине слободне струје, она се може користити u^* за прву процену величине ћелије најближе зиду. Правилан третман зидова је дат за одређену вредност y^+ , што доводи до једначина потребних да се израчунају тангентни напони и друге зависне променљиве [60]. За стандардне или неравнотежне зидне функције, сваки центроид ћелије која је суседна са зидом треба да буде у зони прорачуна зидне турбуленције, $30 < y^+ < 300$. За конкретан проблем, направљено је 5 слојева призматичних ћелија непосредно уз зидове модела, а прва ћелија је дефинисана тако да буде испуњен претходно поменут критеријум. Пресеци прорачунских мрежа са уситњеном мрежом на површинама модела и тла за случај равног тла и насипа приказани су на слици 4.6.



Слика 4.6. Пресеци прорачунске мреже са случајеве равног тла и насипа

4.5 Гранични услови

Улазна брзина у прорачунски домен износи 40 m/s. Рејнолдсов број срачунат у односу на брзину флуида на улазу и ширину воза је 1.33×10^7 . На површини воза и тлу брзина флуида је 0 [38]. Гранични услов симетрије је коришћен на горњем и бочним зидовима. На излазу је постављен униформни Нојманов гранични услов, односно градијент притиска једнак је нули. На овај начин је омогућено да струјање пролази кроз излазну границу а да не утиче на узводно струјање, ако је аеродинамички модел који се анализира постављен довољно далеко од излазне границе прорачунског домена.

Интензитет турбуленције на улазу износи 3%, а карактеристична дужина је 0.3 m, док су на излазу коришћене вредности 5% и 1 m. На тлу и другим површинама постављене су неравнотежне зидне функције у циљу одређивања величина везаних за турбулентно струјање у граничном слоју. Сви прорачуни су извршени у нестационарном облику, са временским корако од 0.08 s, што се сматра за довољно малу вредност да би се одредиле флукуације аеродинамичких сила. Конвенционални SIMPLE алгоритам је коришћен за решавање система једначина, при чему је вршено неколико итерација за сваки временски корак у циљу постизања конвергенције решења.

Глава 5

Резултати и дискусија

5.1 Увод

У овом поглављу изложени су резултати извршених прорачуна. Сlike од 5.1 до 5.7 илуструју промене коефицијената сила и момената возила у функцији угла скретања за случај опструјавања модела на равном тлу и на насипу. Свих шест аеродинамичких коефицијената срачунати су за углове скретања у интервалу од 0° to 90° за случај равног тла и насипа. С обзиром да не постоје доступни подаци о експерименталним или нумеричким анализама у претходно објављеним научним и стручним радовима за ДФ4Д путнички воз, није било могуће поредити прорачунате аеродинамичке коефицијенте са раније објављеним резултатима. Међутим, поређењем резултата са другим моделима возова који су упоредиви [14, 19, 20, 21, 23, 24, 35, 38, 39, 40], може се приметити добра корелација за све аеродинамичке коефицијенте за случајеве опструјавања на равном тлу и насипу.

Познато је да геометрија инфраструктуре утиче на аеродинамички одзив шинског возила [20]. Поредиши аеродинамичке коефицијенте прорачунате за услове равног терена и 6 m високог насипа, могуће је приметити да су максималне вредности за све аеродинамичке коефицијенте веће у случају опструјавања модела на насипу. Најбитнији параметар у погледу попречне – бочне стабилности је коефицијент момента ваљања око шине која се налази низструјно у односу на смер бочног ветра ($C_{m,rol,lee}$), слика 5.5. Може се приметити да су резултати за равном тлу знатно испод вредности које су добијене за случај опструјава са насипом. Измерени коефицијенти на насипу су већи од оних у случају равног тла за углове скретања мање од 50° . При већим угловима скретања коефицијенти за

случај насипа падају знатно испод коефицијената добијених у случају равног тла. Сличан тренд је запажен у литератури [40] и приказан је на слици 2.2.

Зависност структуре струјања од угла скретања такође је приказан. Природа струјног поља и структура приказани су контурама струјница, векторима брзина, контурама интензитета вртложности, статичког притиска и тоталног притиска дуж пресека воза за оба разматрана случаја – на равном тлу и на насипу. Као што је очекивано, за велике углове скретања, јављају се велике зоне одвајања струје и стога постоји област ниског притиска на страни воза која се налази у заветрини. Интензитет вртлога у тој зони се повећава са повећањем угла скретања. Ово доводи до појаве ниског притиска на низструјној страни воза и великих бочних сила и момента ваљања. Овај тренд забележен је у сличним случајевима у литератури [38] и приказан је на слици 2.1.

5.2 Коефицијент бочне силе

Као што је приказано на слици 5.1, коефицијент бочне силе континуално расте са порастом угла скретања до 50° (у случају равног тла) и 40° (у случају насипа) пре него што почне да опада и има асимптотско понашање. Овакав тренд је сличан онима који се налазе у литератури [14, 19, 20, 21, 24, 25, 35, 39 и 40]. На слици 5.1, може се видети да је максимална вредност коефицијента бочне силе постигнута за случај постојања насипа и при углу скретања од 40° , што је у сагласности са [40]. У поређењу са случајем опструјавања модела на равном тлу, постоји повећање максималног коефицијента бочне силе од 10% услед ефеката насипа. Бочна сила је највећим делом изазвана разликом притисака на две стране воза. Бочна сила повећава контактну оптерећење точка и шине на низструјној страни воза. Велике бочне силе појачавају хабање точка и шина, што може изазвати искакање из шина или чак превртање. Резултати прорачуна упоређени су са експерименталним резултатима [40] добијеним испитивањем сличне композиције. Као што је приказано на слици 5.1., добијене вредности коефицијента бочне силе прате тренд експерименталних резултата објављених у [40]. Композиција испитивана у референци [40] је сличног облика и јако блиске висине и ширине возу који је предмет ове дисертације али је двоструко веће

дужине, па је и вредност коефицијента бочне силе двоструко већа него вредност добијена прорачуном у оквиру ове дисертације.

5.3 Коефицијент силе отпора

На слици 5.2 приказан је дијаграм коефицијента отпора у зависности од угла скретања. Може се приметити да се коефицијент отпора прво повећава са повећањем угла скретања до приближно 20° . Затим се за углове скретања преко 25° коефицијент отпора смањује са даљим повећањем угла скретања. Веће вредности отпора се примећују за углове скретања од око 15° и 75° за оба случаја геометрије, што је у сагласности са [20, 21, 23, 35, 38, and 39]. Разлози за већи отпор при малим угловима скретања је мањи ефекат аеропрофила у носном пределу модела што резултује вечим притиском. За углове скретања преко 60° отпор има тенденцију пораста поново (са локалним максимумом при 75°) у супротном смеру, што може да буде последица цилиндричних ослонаца воза који су део геометрије, а који су осетљиви на промену угла скретања. У поређењу са раним тлом, постоји повећање коефицијента отпора од 28.5% за случај осптрујавања модела воза на насипу.

Иако коефицијент отпора није најбитнији параметар за попречну стабилност воза, када се ради о разматрању енергетских ефеката коефицијент отпора је најбитнији. Облик главе воза има велики утицај на силу отпора. Аеродинамички отпор је доминантан у односу на отпор на превртање модерних брзих возова при брзинама већим од 250 km/h за више од 80%. Глава воза учествује са око 10% у укупној сили аеродинамичког отпора [61].

5.4 Коефицијент силе узгона

На слици 5.3 приказан је дијаграм коефицијента узгона у зависности од угла скретања. Може се приметити да је коефицијент силе узгона позитиван (сила узгона оријентисана вертикално навише) и повећава се са повећањем угла скретања до око 60° , када почиње да се понаша асимптотски. Слична запажања могу се наћи у експерименталним и/или нумеричким истраживањима [14, 19, 20,

21, 24, 35, 39]. С обзиром да геометријски модел локомотиве не обухвата носећи склоп точкова и спојлере може постојати могућност да се стварно струјно поље у области испод модела разликује од прорачуна, те да вредности прорачунатих коефицијената узгона буду различите у односу на реалну конструкцију. Показано је да мало повећање растојања модела локомотиве од тла има јак утицај на силу узгона, али врло мали утицај на бочну силу и момент ваљања [19]. Уопште, сила узгона која дејствује наниже повећава оптерећења осовина и вратила, и утиче на хабање шина и точкова, док сила узгона усмерена вертикално навише може довести од одвајања точкова воза од шина и искакања из шина.

5.5 Коефицијент момента ваљања

На сликама 5.4 и 5.5 приказан је коефицијент момента ваљања око x осе (оса симетрије пруге) и низструјне шине. Као што се може видети, коефицијенти момента ваљања се мењају на врло сличан начин као бочна сила, што се објашњава чињеницом да је момент ваљања резултат дејства силе узгона и бочне силе, при чему бочна сила даје већи допринос. На слици 5.5 може се уочити да се коефицијент момента ваљања око ниструјне шине повећава са углом скретања до око 60° (за случај равног терена) и 45° (за случај насипа) пре него што почне да опада и/или почне да се понаша асимптотски. Овакво понашање је у сагласности са [14, 19, 20, 21, 24, 31, 35, 40]. У поређењу са случајем струјања на равном тлу постоји повећање од 8.8% коефицијента момента ваљања око низструјне шине за случај струјања са насипом. Уопштено, момент ваљања је одговоран за преоптерећење точка и шине на низструјној страни модела и представља један од најбитнијих аеродинамичких коефицијената за стабилност при бочном – попречном ветру. Ови резултати су такође у доброј корелацији са експерименталним резултатима добијеним испитивањем сличне композиције двоструко веће дужине објављеним у референци [40]. Будући да је експериментално испитивана композиција двоструко веће дужине, референтна површина потребна за израчунавање коефицијента момента ваљања је такође двоструко већа па је на тај начин могуће образложити и двоструко већу вредност коефицијента момента ваљања у односу на резултате добијене у оквиру ове

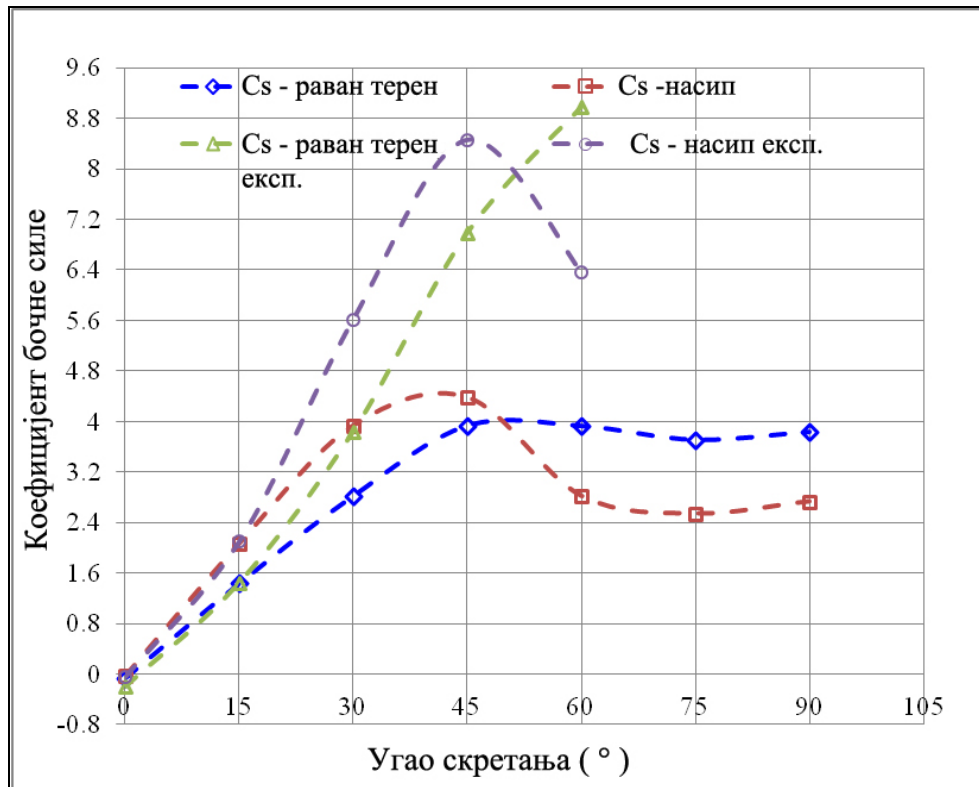
дисертације што је и јасно видљиво на слици 5.5. Може се приметити да добијени резултати прате тренд објављених експерименталних резултата.

5.6 Коефицијент момента пропињања

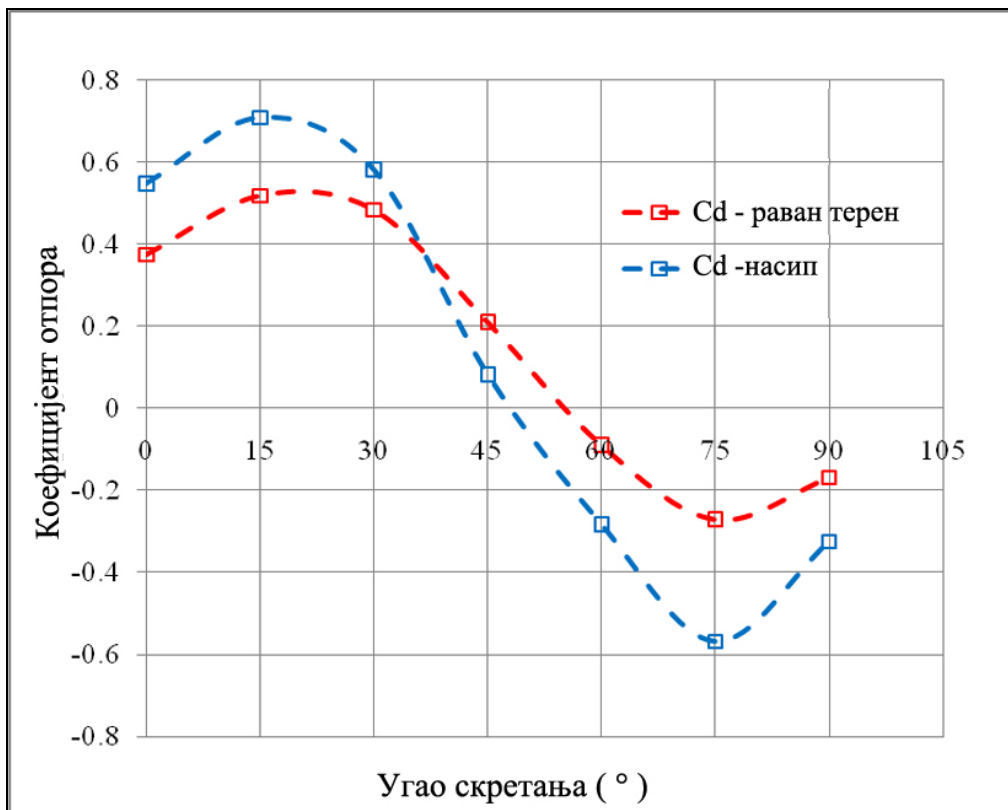
Други важан параметар за безбедност воза је момент пропињања, који утиче на издизање и спуштање воза и углавном утиче на комфор путника. Сила отпора је главни узрок момента пропињања. Као што се види на слици 5.6, момент пропињања се мења од позитивног до негативног са повећањем угла скретања. Такав тренд се може запазити и у доступној литератури [19,20,39]. Може се извести општи закључак да момент пропињања утиче на расподелу оптерећења предњег и задњег склопа носача точкова возила. Међутим, пошто су вредности релативно ниске, утицај на укупне аеродинамичке перформансе везане за превртање је мали.

5.7 Коефицијент момента скретања

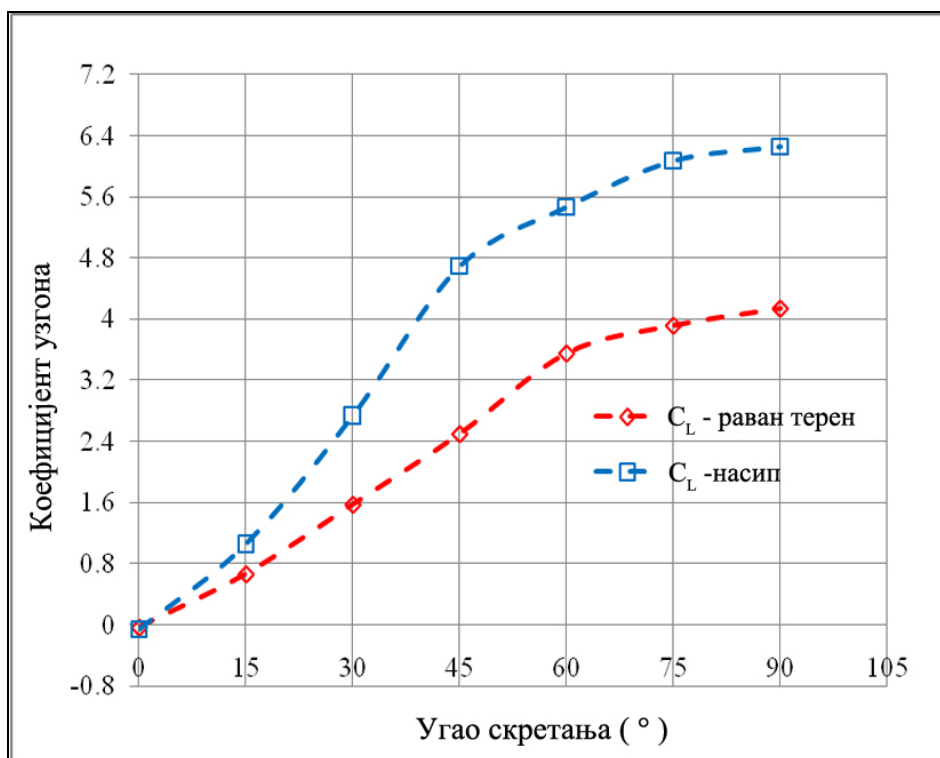
На слици 5.7 приказан је момент скретања. Коефицијент момента скретања се повећава а затим смањује са повећањем угла скретања и достиже максималну вредност за угао скретања око 40° за оба разматрана случаја (равно тло и насип). Сличан тренд је примећен у литератури [20,35,39,40]. Момент скретања утиче на љуљање воза око осе и повећава тенденцију ка испадању из колосека. Позитиван момент скретања и момент пропињања доприносе растерећењу скупа точкова на предњем носачу који је директно изложен струјању бочног ветра. Стога је овај сет точкова критичан у погледу стабилности воза под утицајем бочног ветра, са равномерном расподелом тежине по дужини. Поред тога, воз је изложен дејству повремених налета ветра, те велики momenti скретања могу проузроковати вибрације воза и погоршати комфор путника.



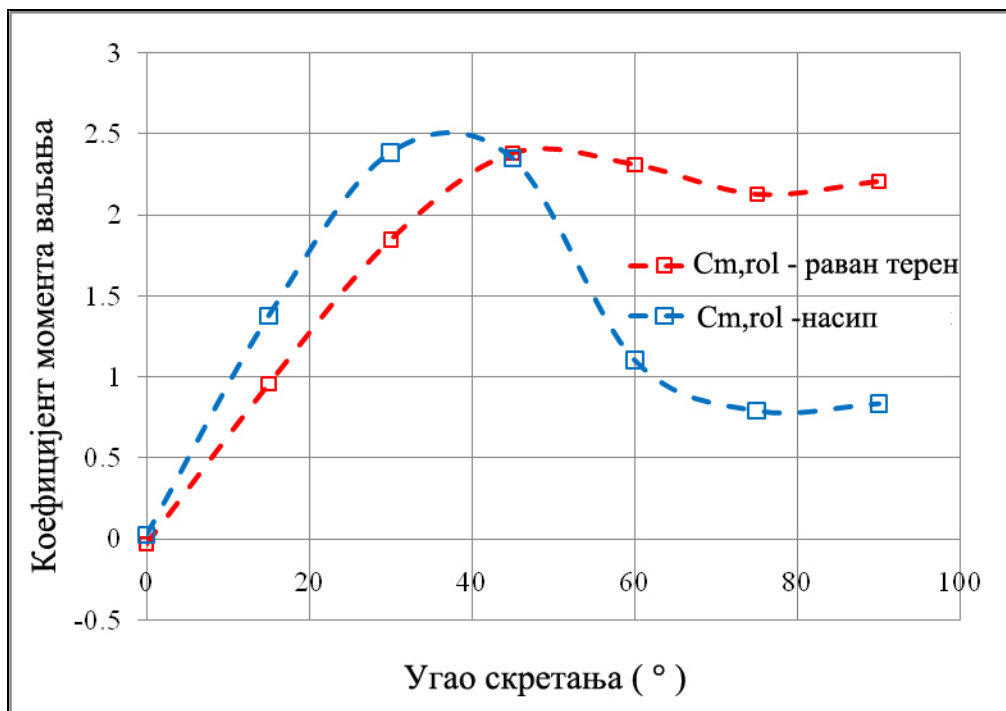
Слика 5.1 Коэффициент бочне силе у зависности од угла скретања



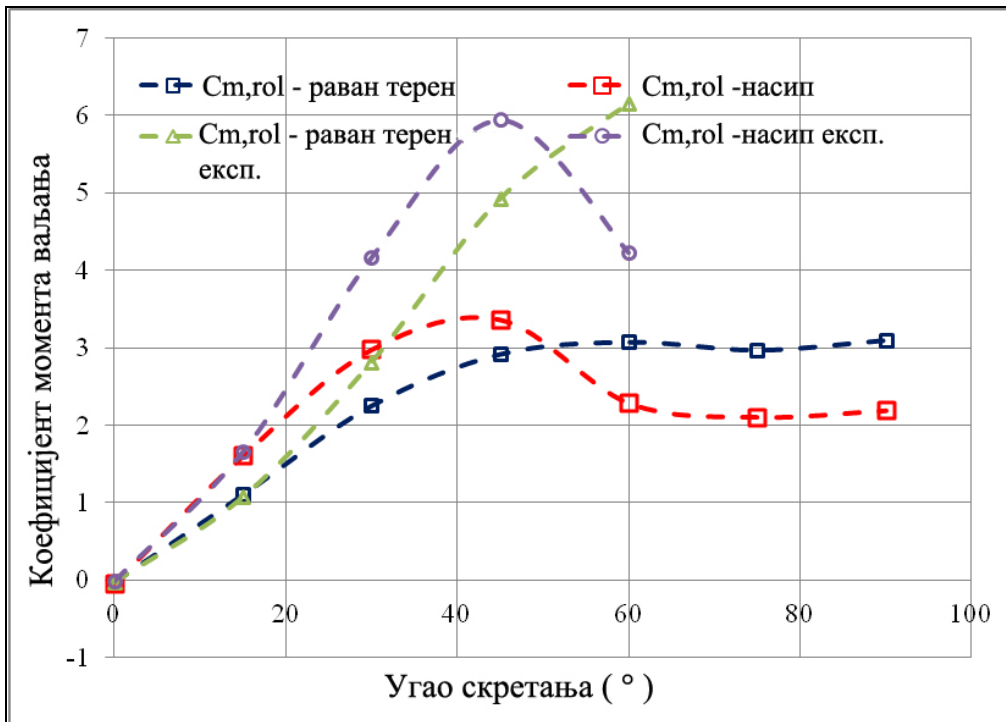
Слика 5.2 Коэффициент силе отпора у зависности од угла скретања



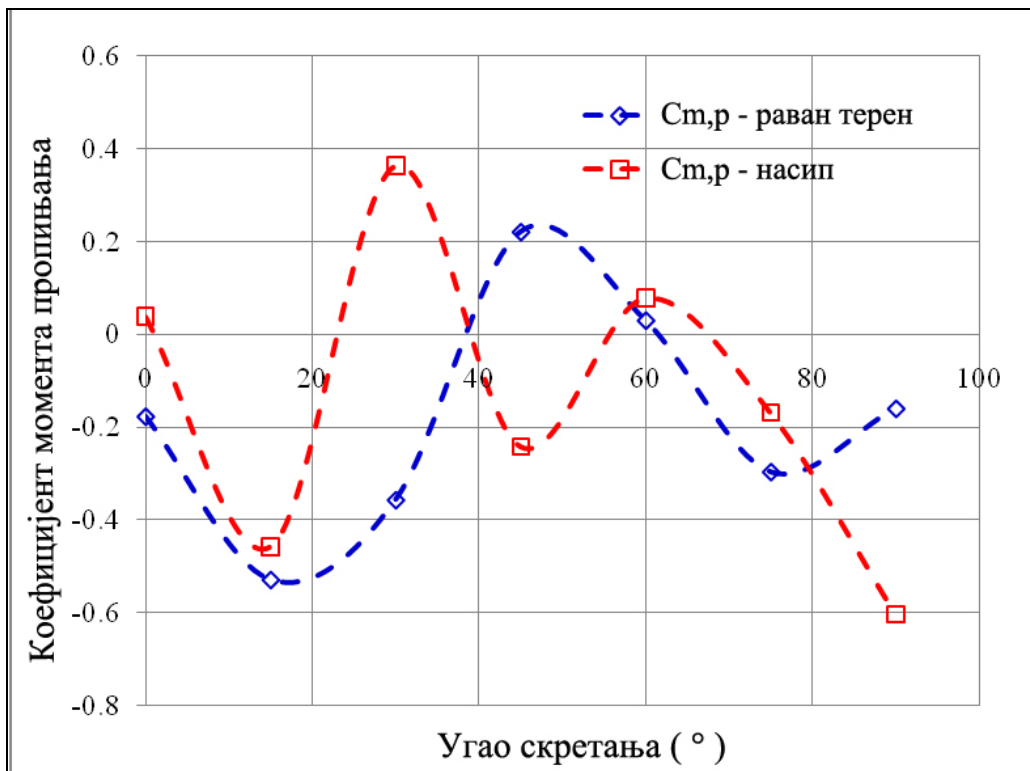
Слика 5.3 Коефицијент силе узгона у зависности од угла скретања



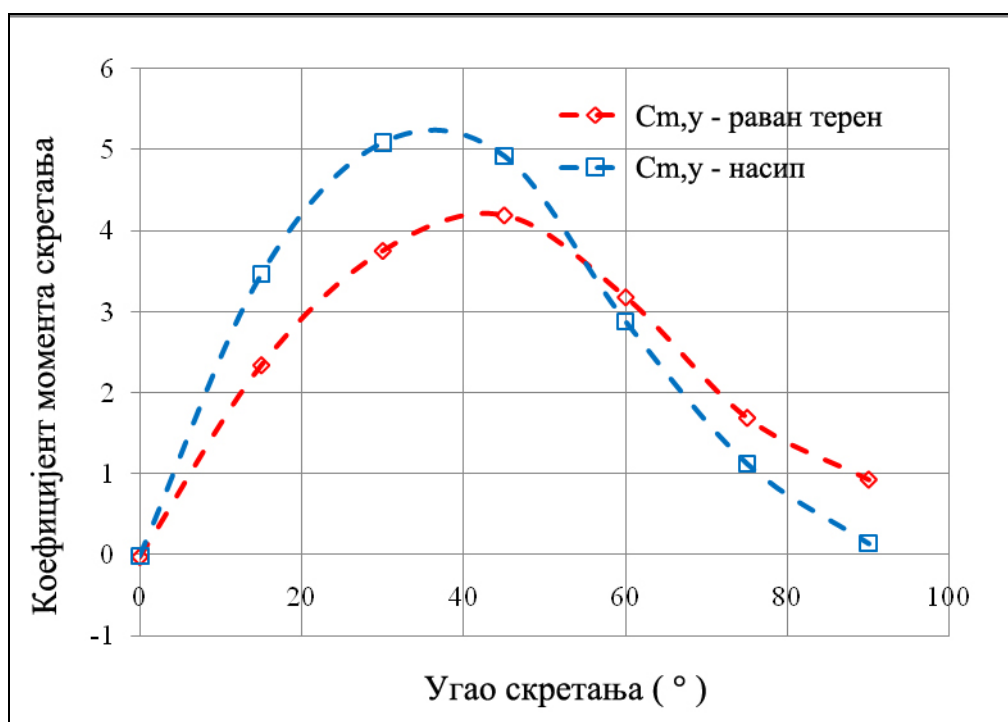
Слика 5.4 Коефицијент момента ваљања у зависности од угла скретања



Слика 5.5 Коефицијент момента ваљања око низструјне шине у зависности од угла скретања



Слика 5.6 Коефицијент момента пропињања у зависности од угла скретања



Слика 5.7 Коэффициент момента скретања у зависности од угла

5.8 Структура струјања

Природа струјања и структуре приказани су на сликама 5.8-5.43 контурама струјница, векторима брзина, контурама интензитета вртложности, статичког притиска и тоталног притиска дуж више пресека модела (5.2, 10.55 и 15.9 m од носа воза). У погледу структуре струјања око воза и насипа, идентификовани су очекивани вртлози дуж стране воза у заветрини за обе геометрије, уз још један вртлог даље низструјно за случај геометрије са насипом. Сличан тренд је примећен у литератури [14,19,21,23,38, 40]. За велике углове скретања јављају се широке зоне одвајања струје и нижег притиска на страни воза која је у заветрини. У одсуству бочног ветра (угао скретања 0°) постоји симетрија струјања око уздужне осе модела. За различите углове скретања појављује се већи број вртлога на низструјној страни воза. Интензитет ротирајућих вртлога се повећава са повећањем угла скретања, што резултује појавом области ниског притиска на страни воза која је у заветрини, те појаву бочне силе и момента ваљања већег интензитета.

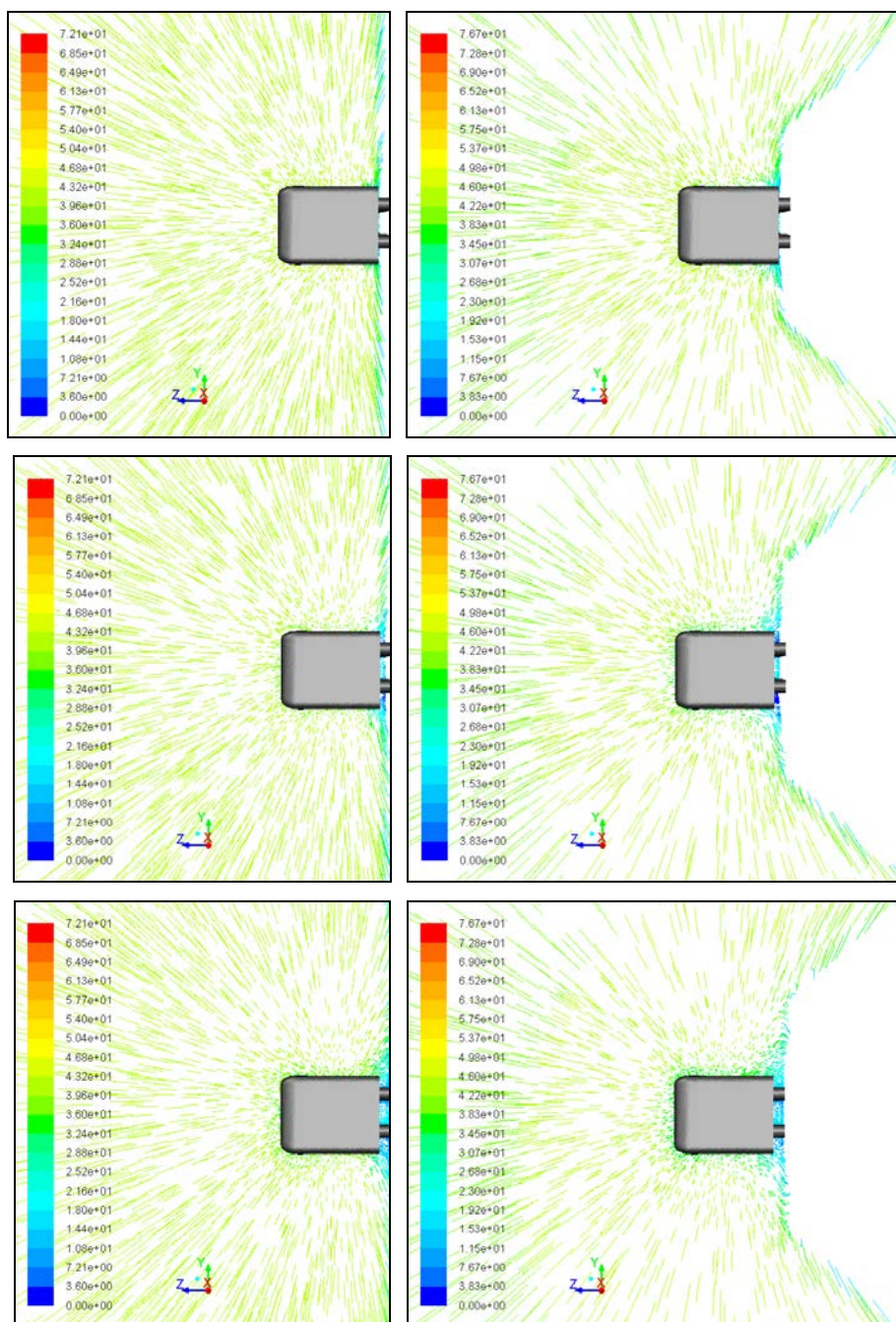
На сликама 5.8 до 5.28 приказане су струјнице у равнима, вектори брзина и контуре јачине вртлога на различитим локацијама дуж пресека воза (5.2, 10.55 и 15.9 m од носа воза) за углове скретања од 0° до 90° за оба случаја геометрије. Може се уочити да се на доњој и горњој ивици стране воза у заветрини формирају вртлози који се постепено повећавају у аксијалном правцу. Расподела вртлога зависи од угла скретања. Повећање угла скретања резултује напредовањем формирања и расипања вртлога, што је у сагласности са сликом 1.6 и сличним резултатима [58]. Област рецикулације изазвана вртложним струјањем почиње непосредно иза зида воза, и споро се одваја од површине како се струјање развија у вртложном трагу. Одвајање струјница се дешава на горњој и доњој ивици воза на страни у заветрини. Вртложење је јаче у случају геометрије са насипом у односу на опструјавање воза на равном тлу.

Према теорији, максимална брзина струје флуида преко насипа би требало да буде већа од брзине слободне струје [61]. У посматраном случају, на основу расподеле брзина по дужини модела (слике 5.15-5.21), може се уочити да постоји релативно велико повећање брзине услед постојања насипа.

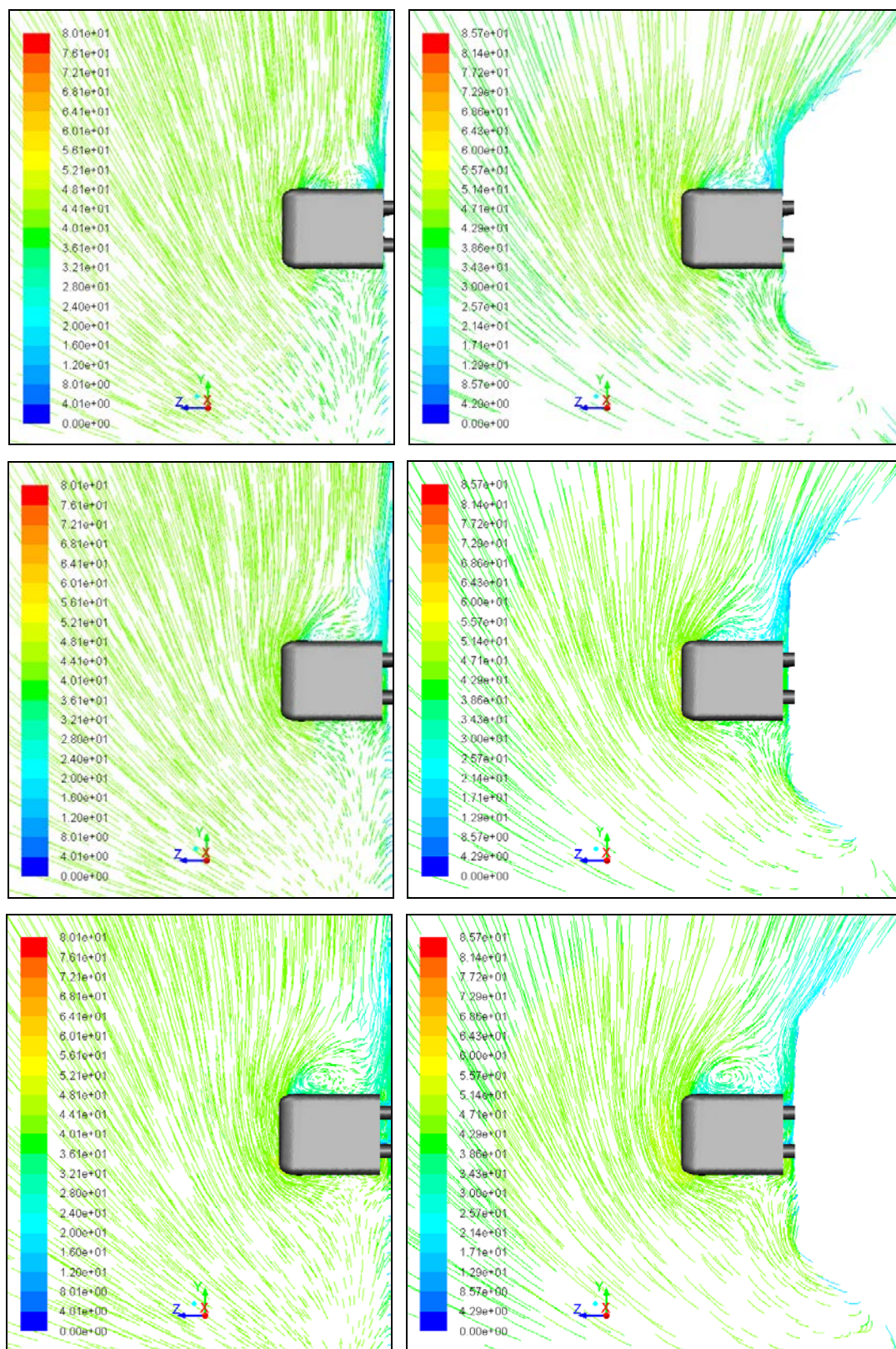
Аеродинамичке силе које дејствују на воз потичу од разлика у притисцима који делује на зидове воза. Да би се добила јаснија слика о структури корисно је извршити анализу расподеле притиска на насипу и возу. На сликама 5.29 – 5.42 приказане су расподеле статичког и тоталног притиска дуж пресека воза (5.2, 10.55 и 15.9 m од носа воза) за углове скретања у интервалу од 0° до 90° . За струјање без скретања расподеле статичког и тоталног притиска на страни воза која је изложена ветру и страни у заветрини су исте, што резултује занемарљивом бочном силом и моментом ваљања за обе разматране геометрије проблема. Са повећањем угла скретања примећује се тишичан вртлог и зона ниског притиска иза модела посматрано правац и смер струјања. Сличан трен је примећен у литератури [38]. На дијаграмима статичког притиска се могу приметити зоне сниженог притиска. На страни воза која је у заветрини примећују се негативне вредности релативног притиска услед ротирајућег вртлога (тзв. делта вртлози). Као што је очекивано, страна изложена ветра је под дејством надпритиска, што у збиру повећава интензитет бочне силе и момента ваљања.

Коефицијент притиска (C_p) по обиму модела на различитим пресецима дуж воза (5.2, 10.55 и 15.9 m од носа воза) је дат за углове скретања у интервалу од 0° до 90° . На сликама 5.50 – 5.56 је приказана зависност расподеле притиска од угла скретања. Међутим, за исти угао скретања, коефицијент притиска има мале промене за различите посматране попречне пресеке, осим у уској области око носа модела, што указује да је расподела притиска око воза за веће углове скретања готово независна од аксијалне позиције. Неки делови воза, посебно ослонци, проузрокују проблеме, пошто се на сликама могу приметити мања неслагања. Претпоставља се да би финална мрежа у овом делу модела довела до побољшања тачности резултата.

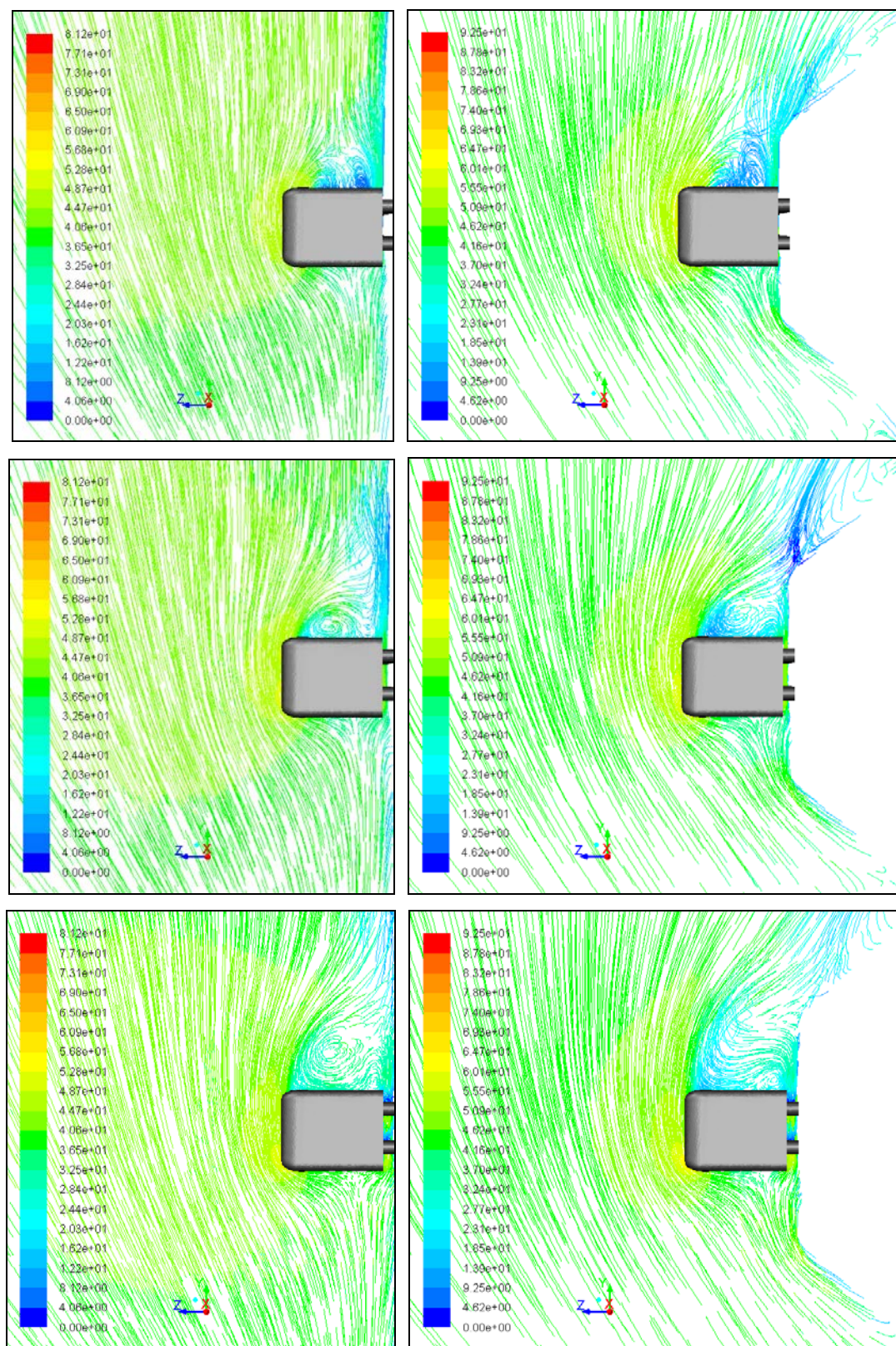
Коначно, параметар y^+ је праћен и анализира према захтевима. На слици 5.57, вредност y^+ на површини воза и граничном слоју је задовољавајуће ниска и налази се у препорученом интервалу, $30 < y^+ > 300$. Извршено је квалитетно уситњавање мреже на површини воза, цилиндричним ослонцима и делу флуидног простора непосредно уз поменуте елементе геометрије. Такође се може приметити да вредност y^+ расте са удаљавањем од зидова, што је очекивано, имајући у виду пораст брзине и величине ћелија са удаљавањем од зидова. Може се закључити да се y^+ често користи да опише колико је ретка или густа мрежа за одређену структуру струјања. Ова величина је важна за моделирање турбулентног струјања и одређивање величине елемената у зони близу зидова у прорачунском простору.



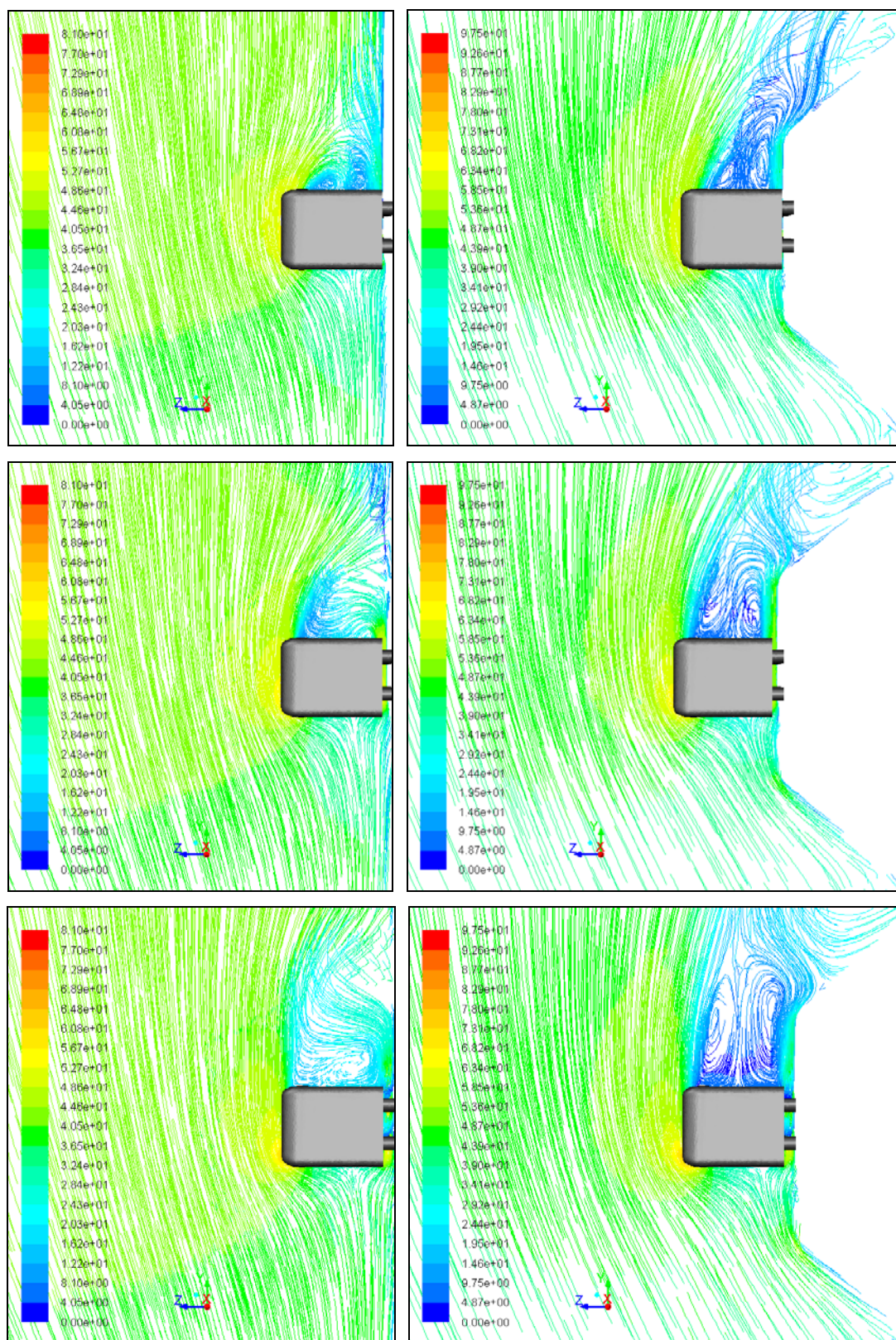
Слика 5.8 Струјнице око воза у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 0° за обе конфигурације тла



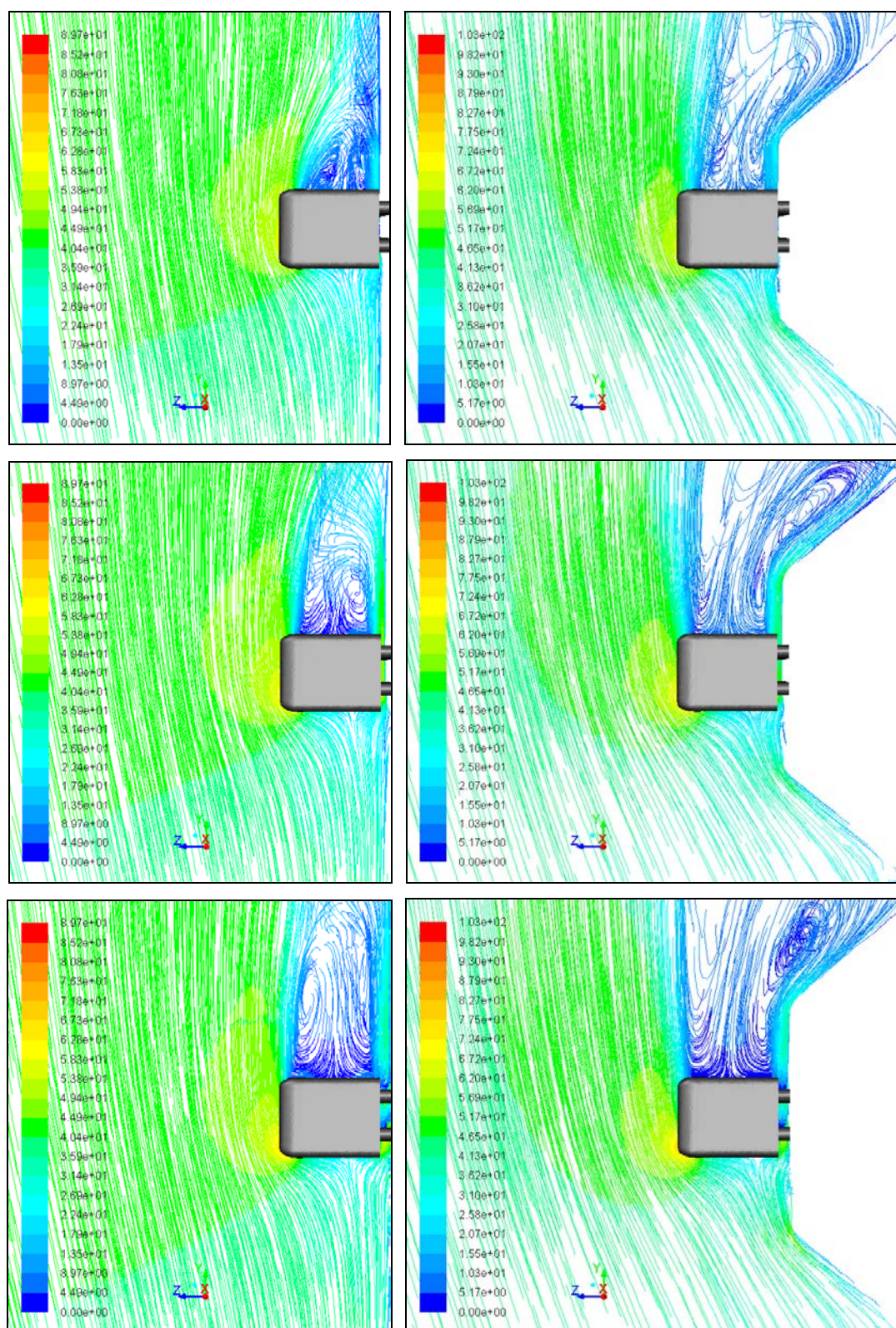
Слика 5.9 Струјнице око воза у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 15° за обе конфигурације тла



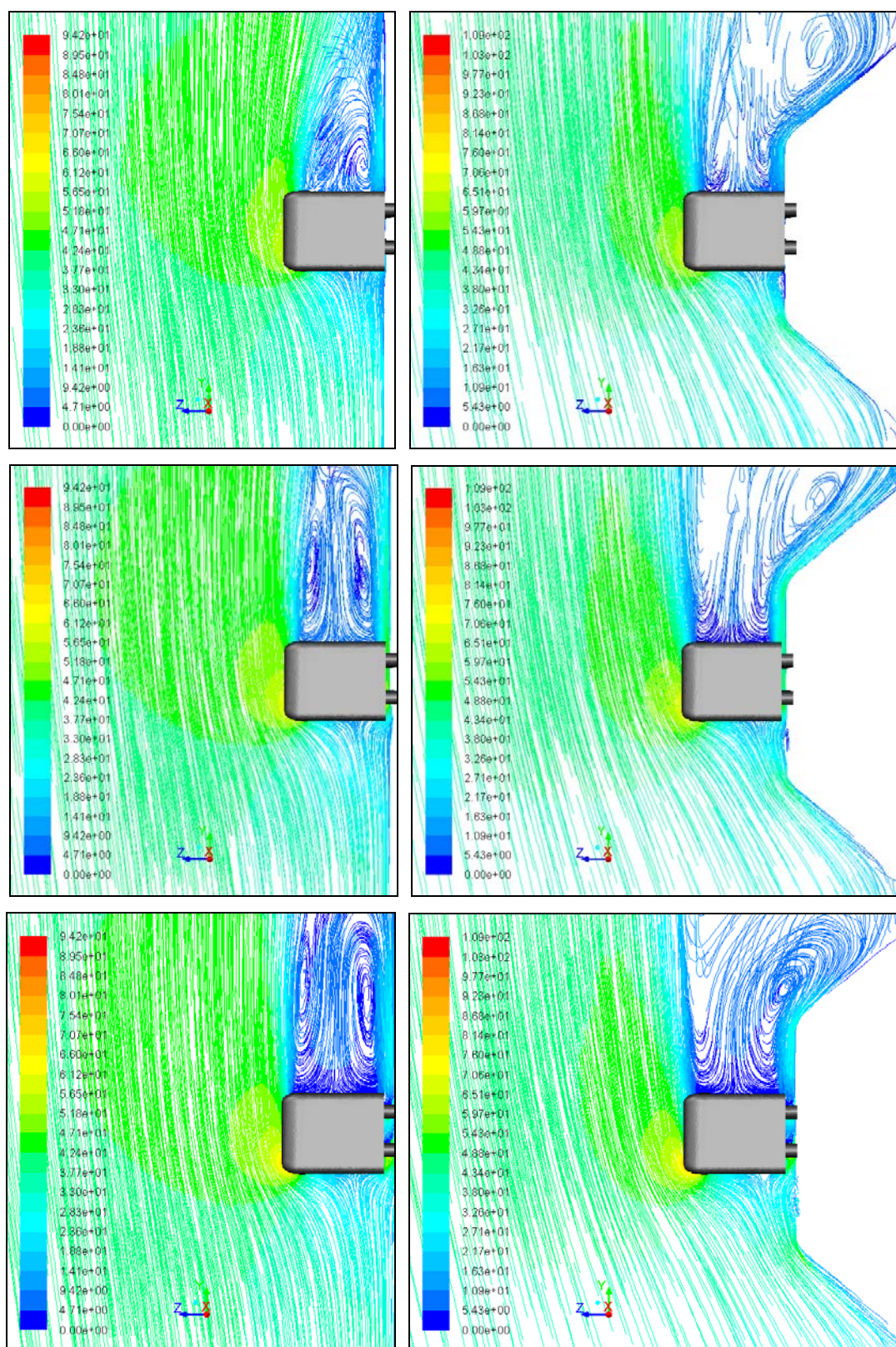
Слика 5.10 Струјнице око воза у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 30° за обе конфигурације тла



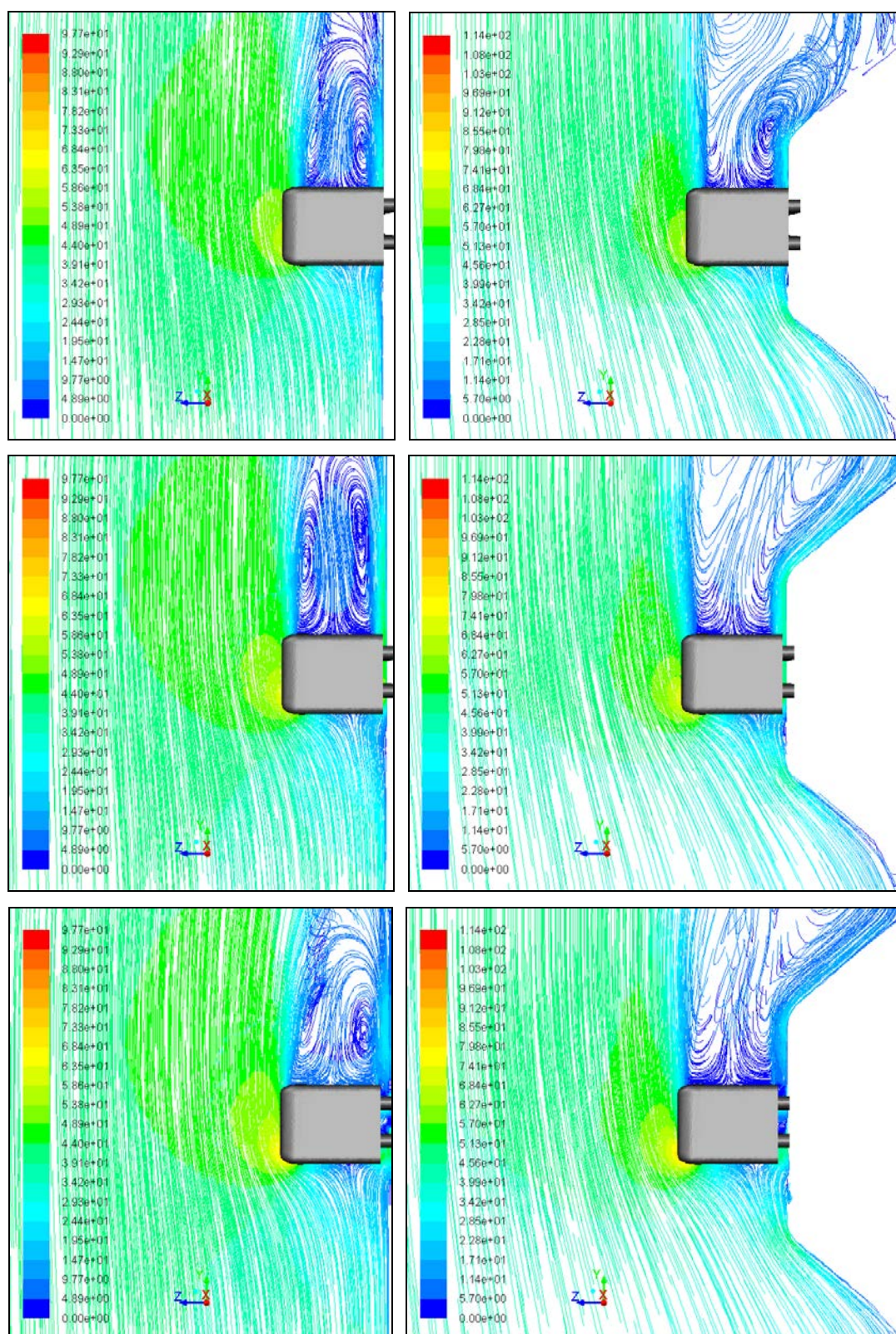
Слика 5.11 Струјнице око воза у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 45° за обе конфигурације тла



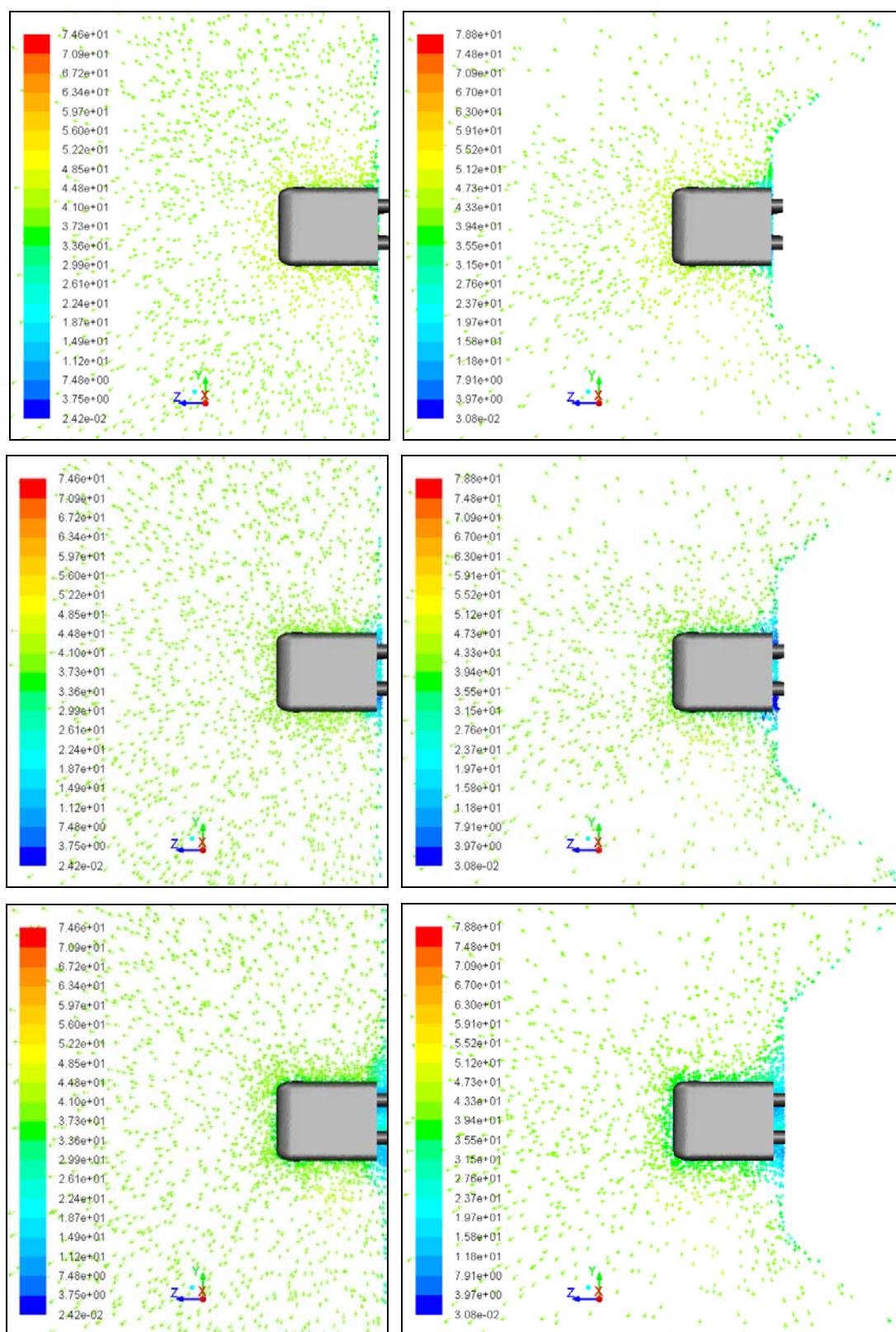
Слика 5.12 Струјнице око воза у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 60° за обе конфигурације тла



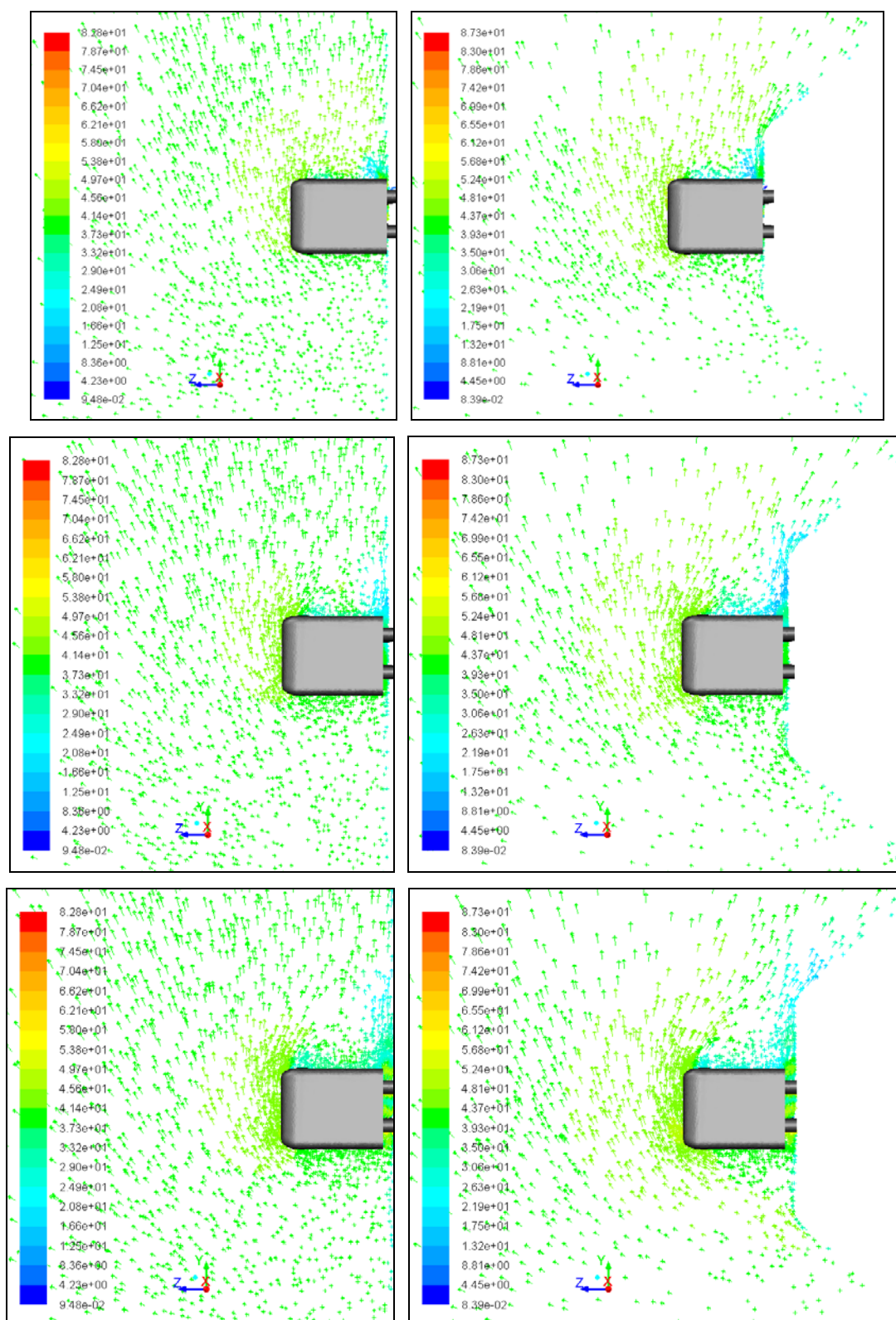
Слика 5.13 Струјнице око воза у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 75° за обе конфигурације гла



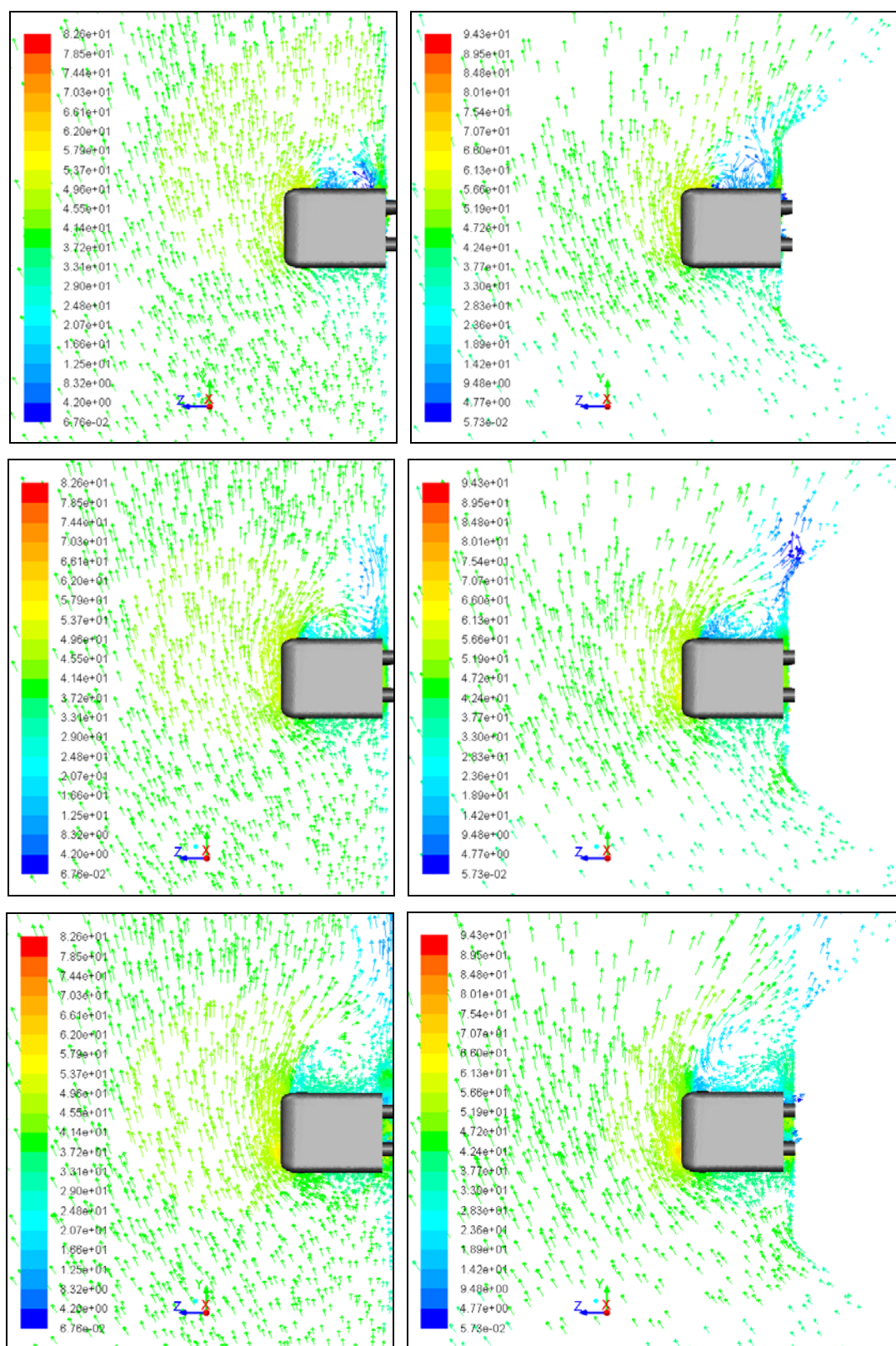
Слика 5.14 Струјнице око воза у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 90° за обе конфигурације тла



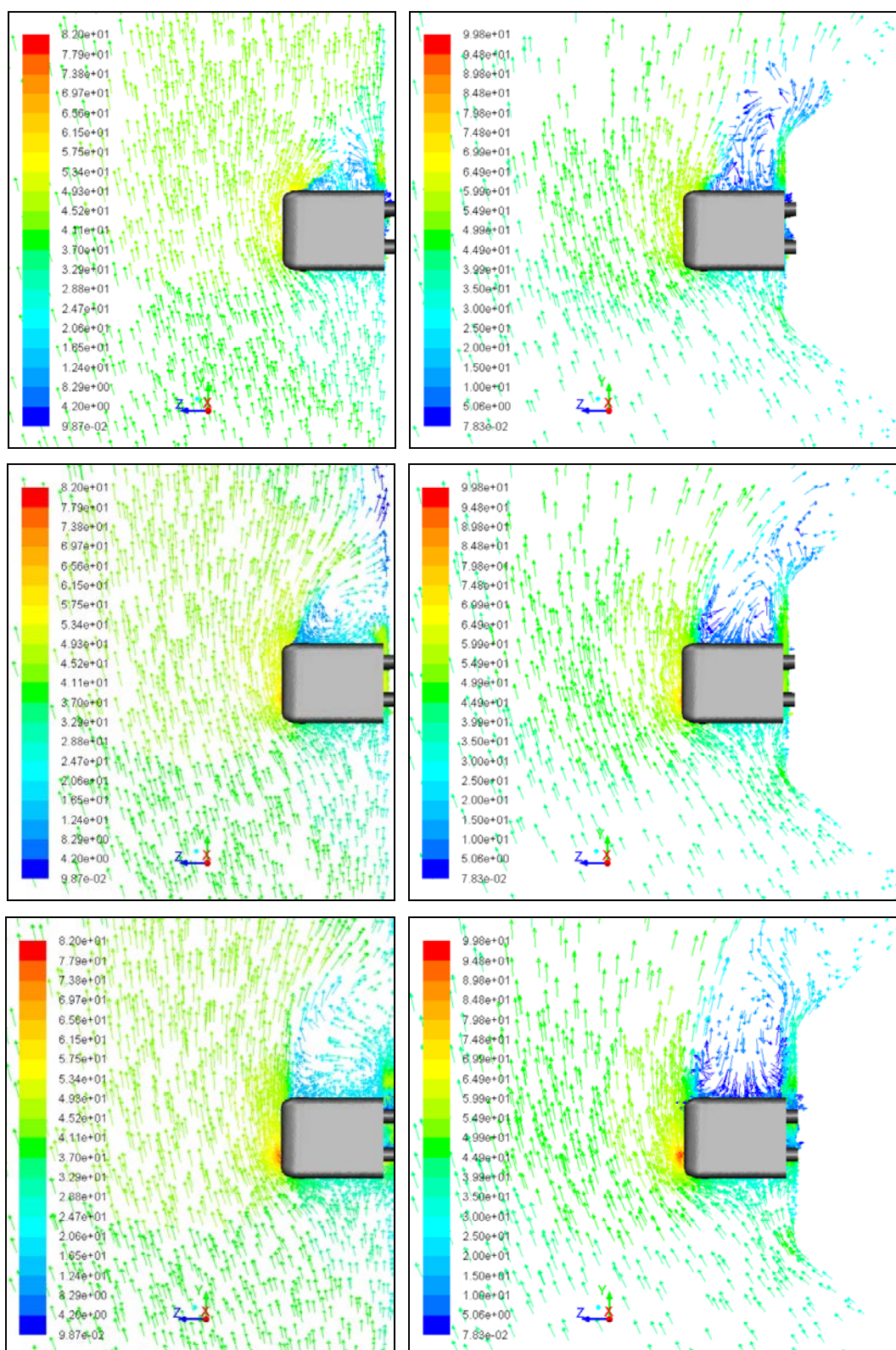
Слика 5.15 Вектори брзине у [m/s] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 0° за обе конфигурације тла



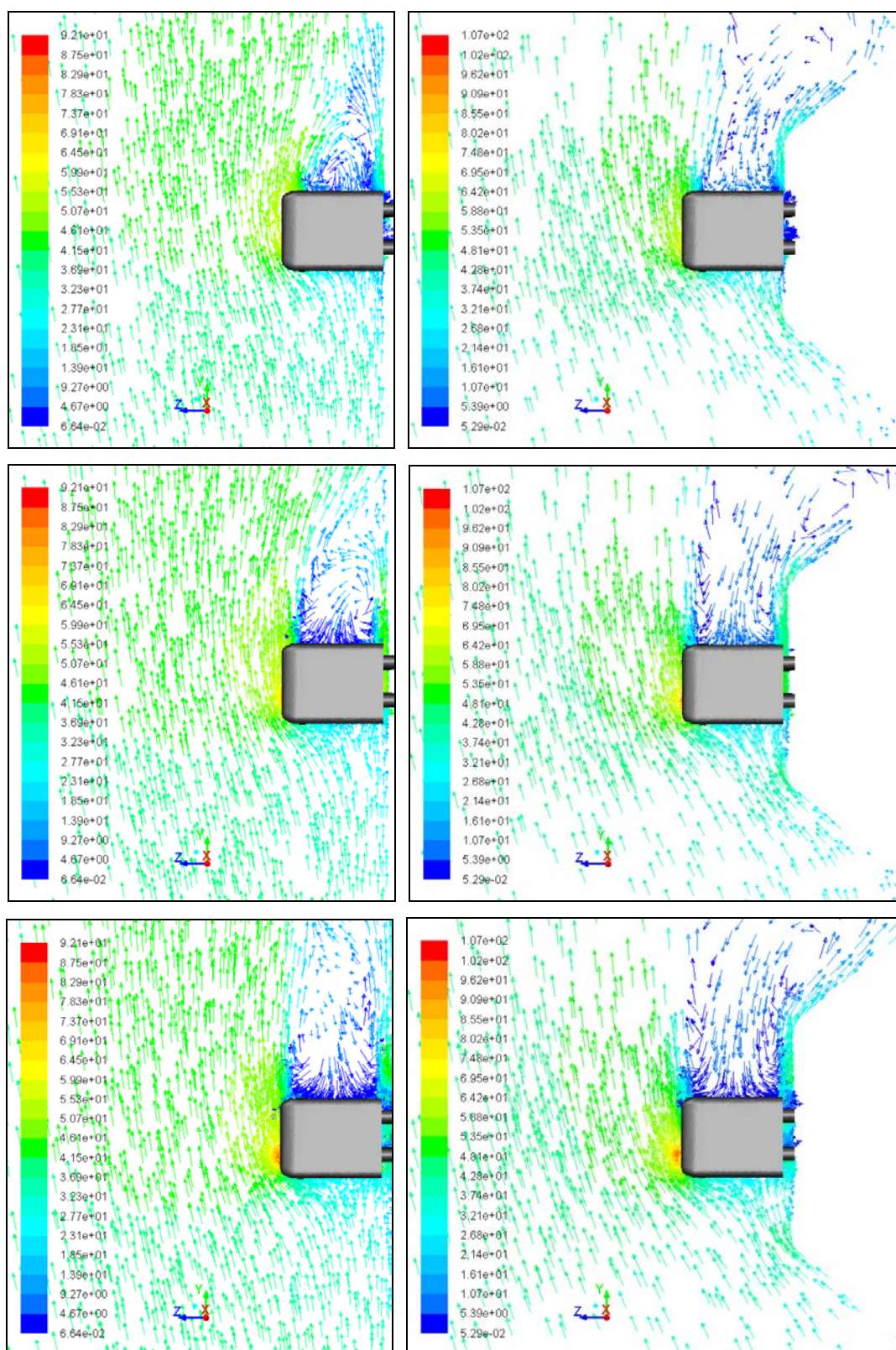
Слика 5.16 Вектори брзине у [m/s] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 15° за обе конфигурације тла



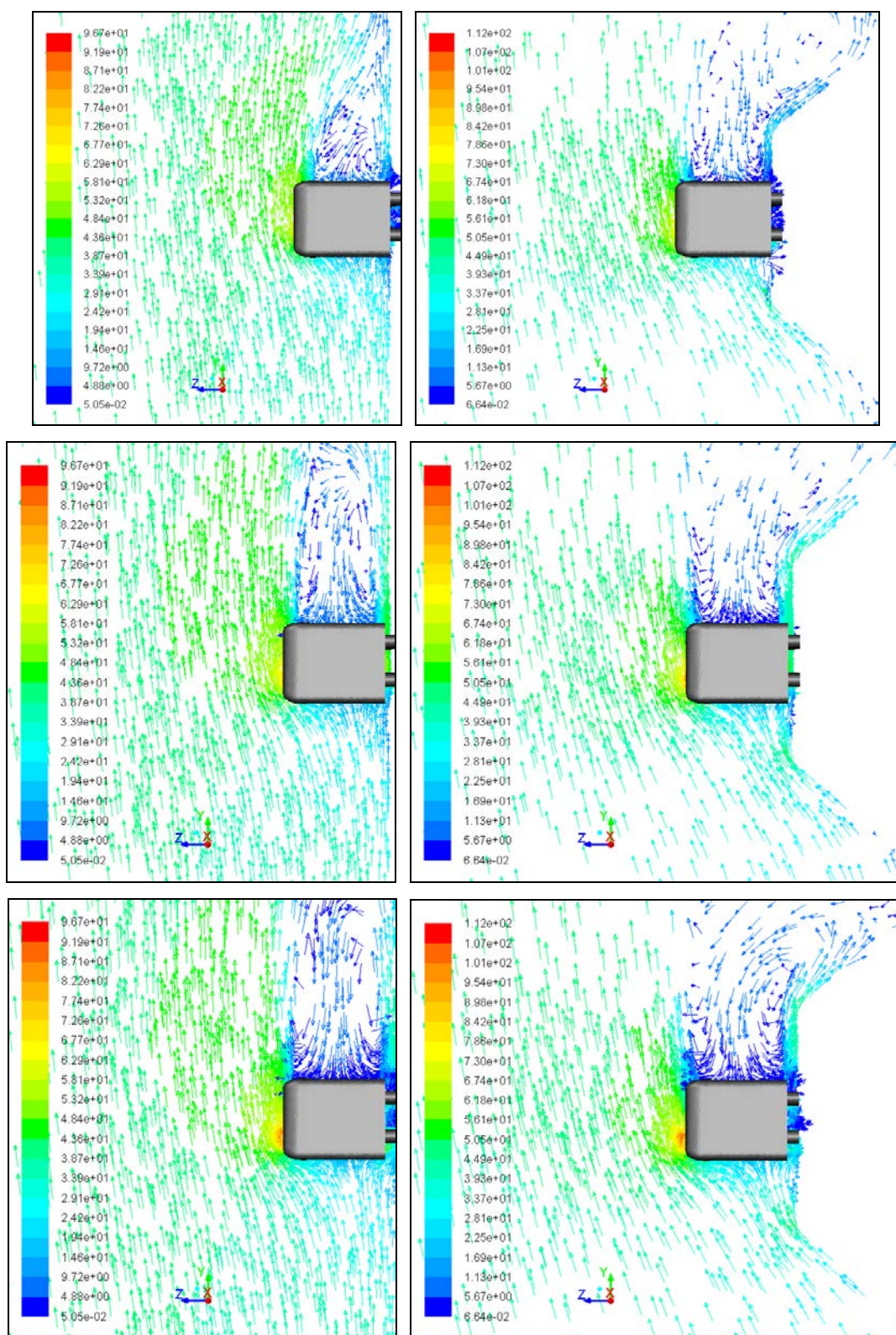
Слика 5.17 Вектори брзине у [m/s] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 30° за обе конфигурације тла



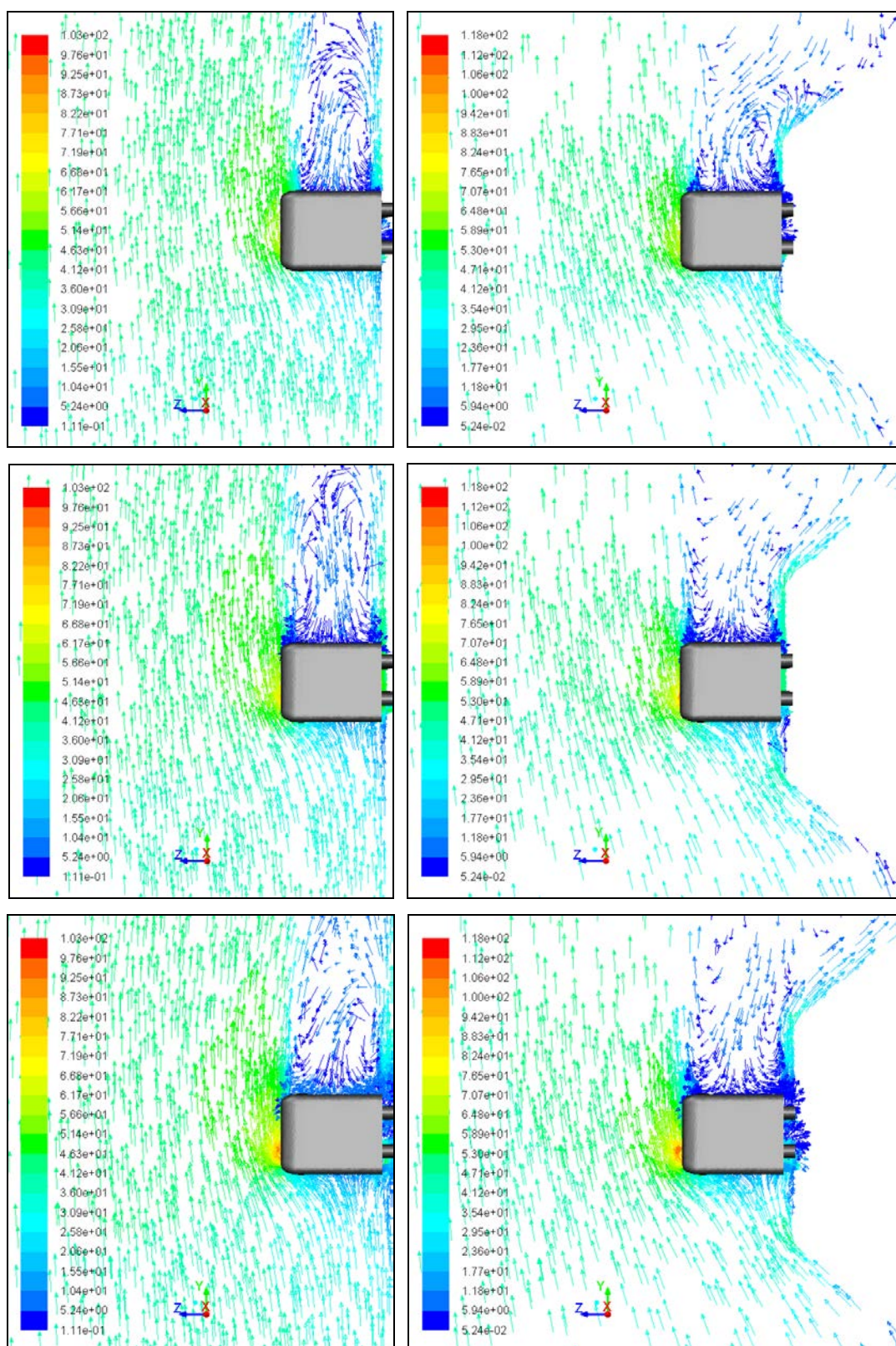
Слика 5.18 Вектори брзине у [m/s] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 45° за обе конфигурације гла



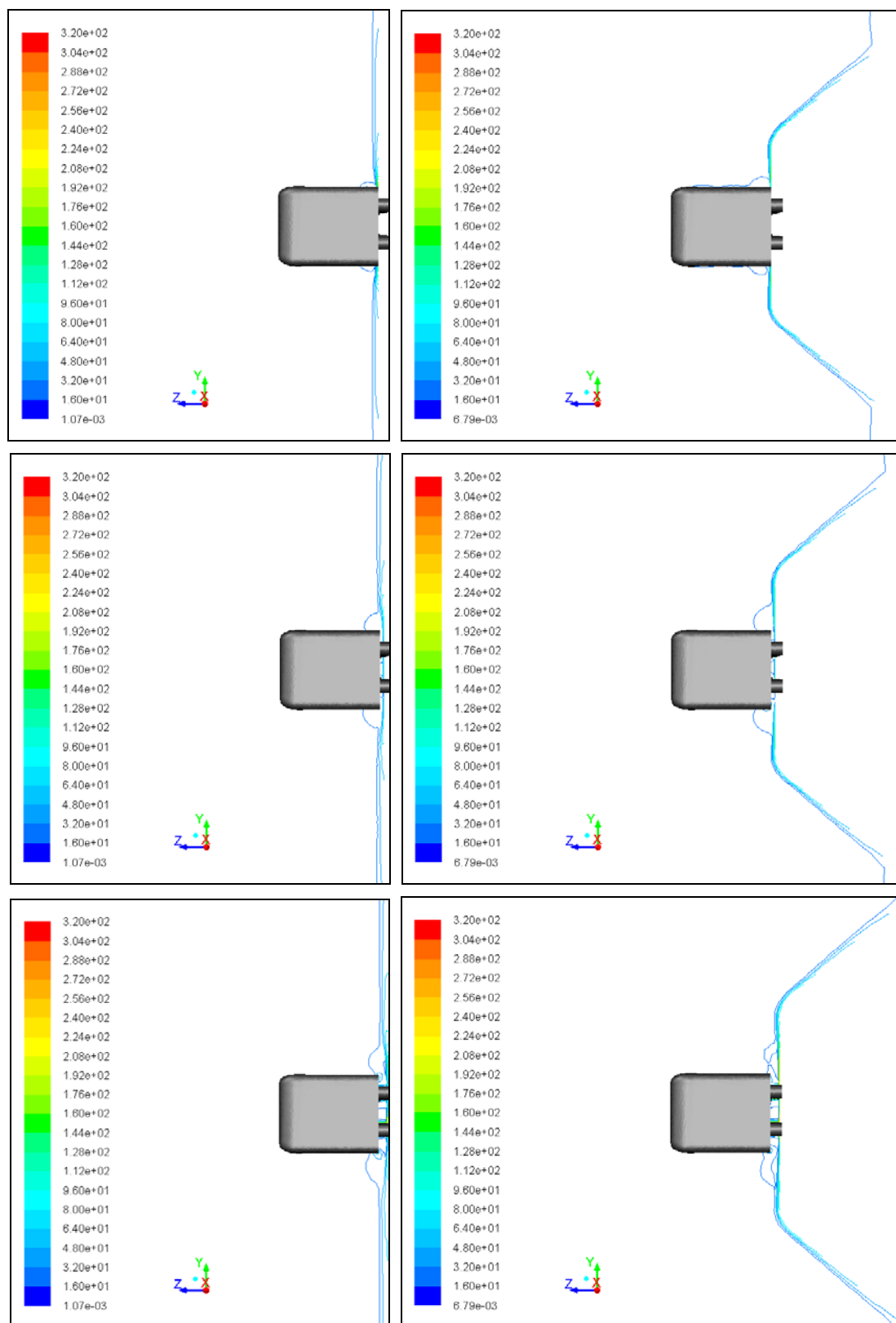
Слика 5.19 Вектори брзине у [m/s] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 60° за обе конфигурације тла



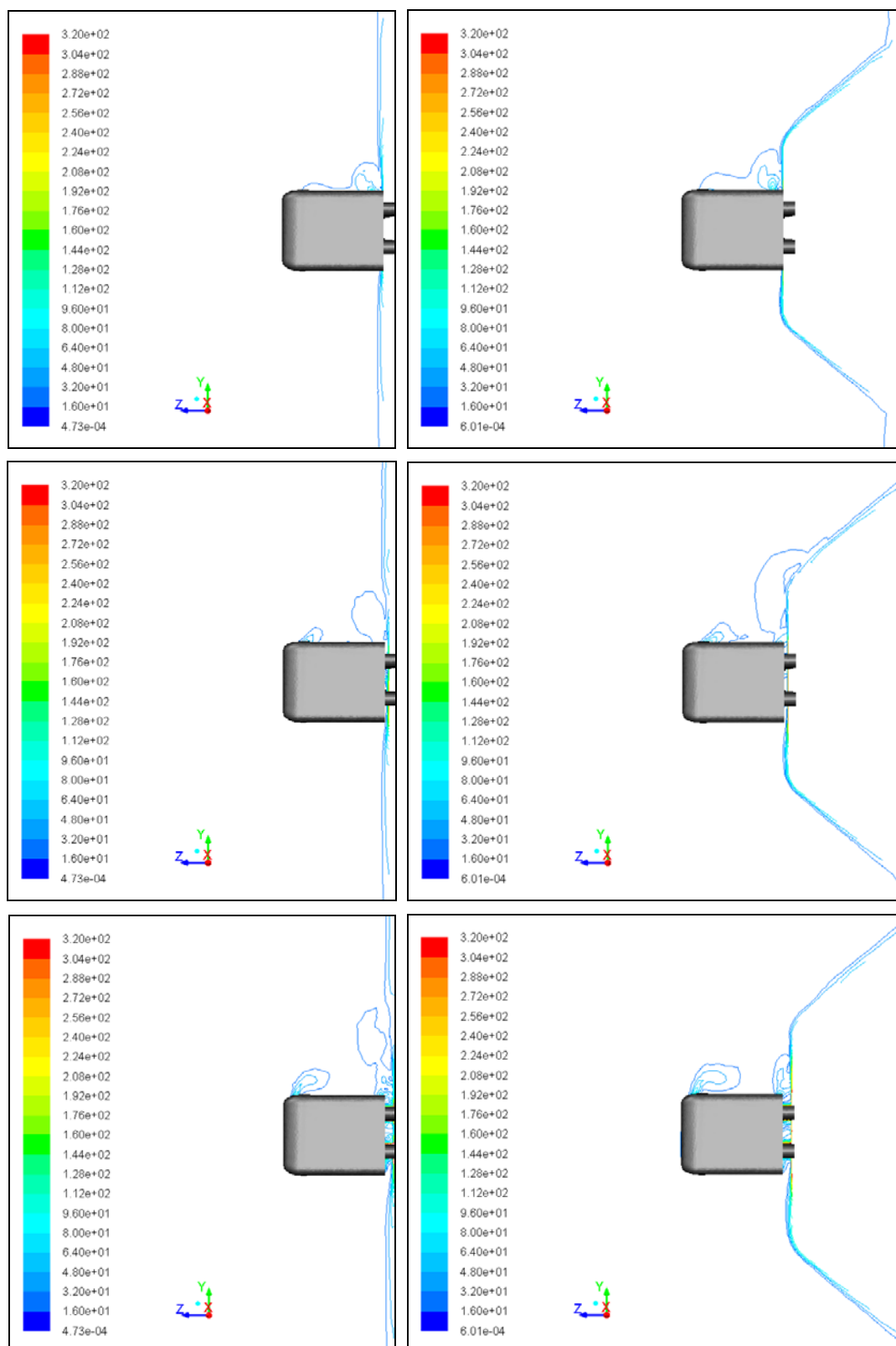
Слика 5.20 Вектори брзине у [m/s] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 75° за обе конфигурације тла



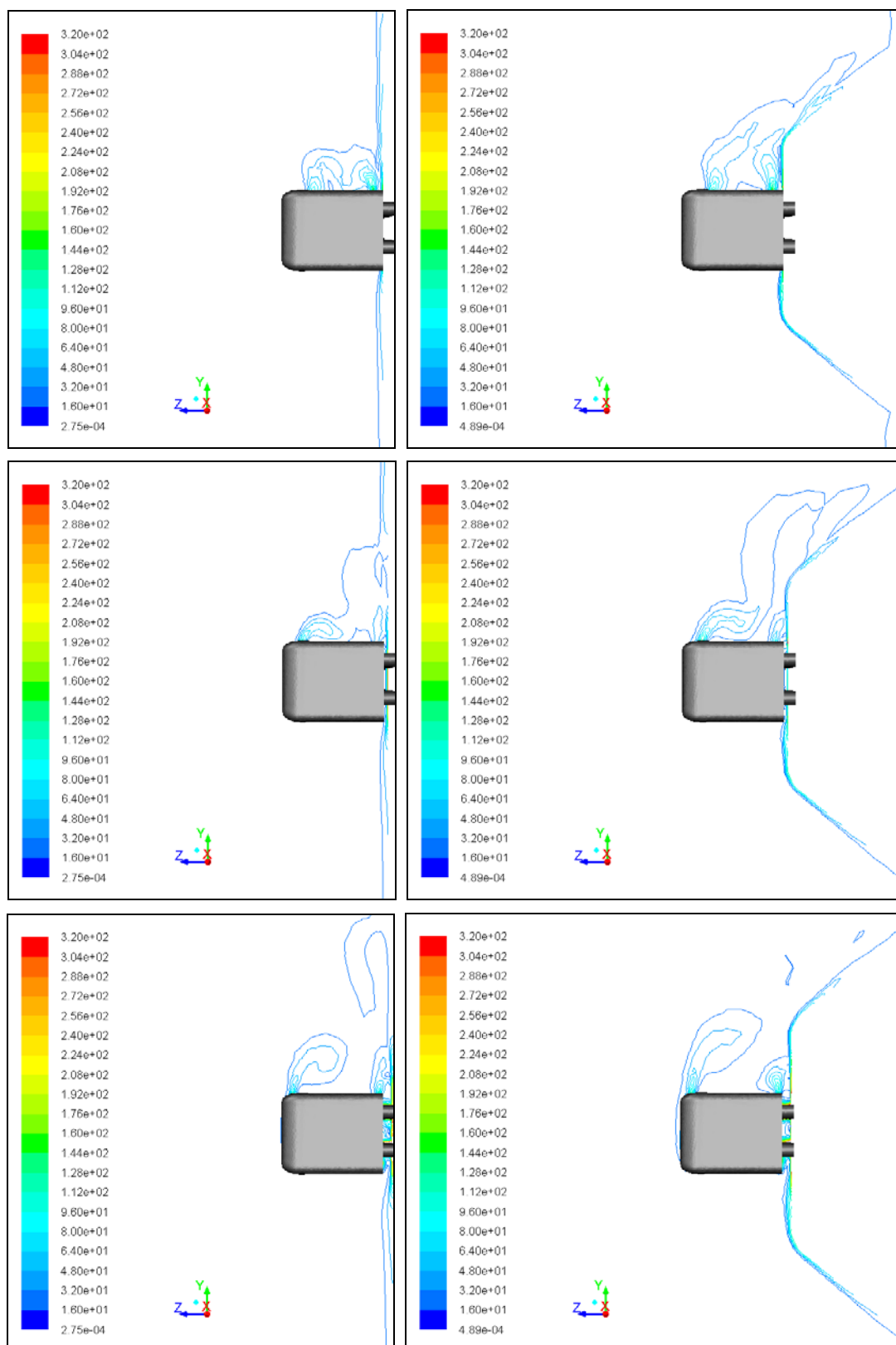
Слика 5.21 Вектори брзине у [m/s] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 90° за обе конфигурације тла



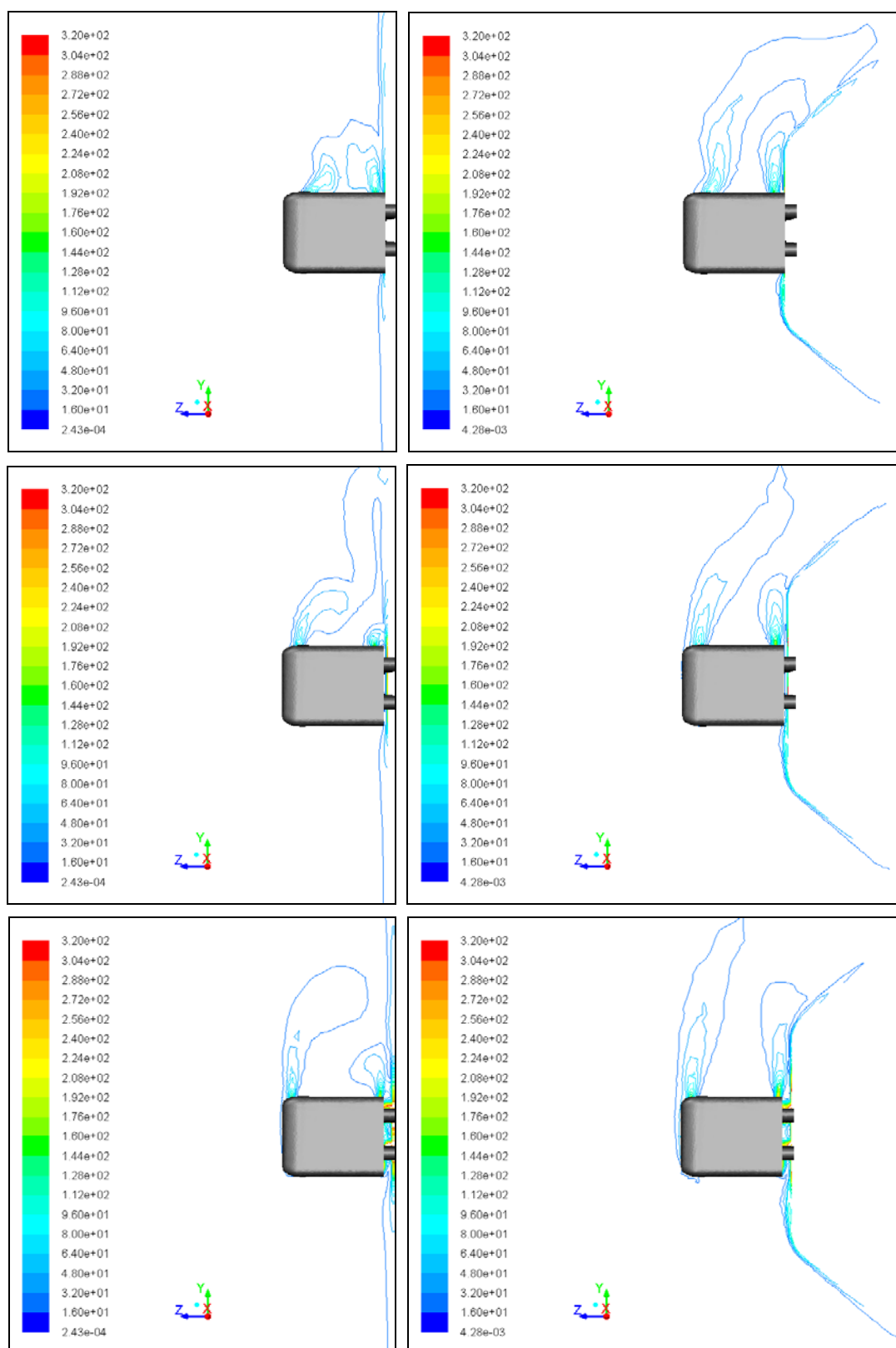
Слика 5.22 Вртложне линије у [1/s] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 0° за обе конфигурације гла



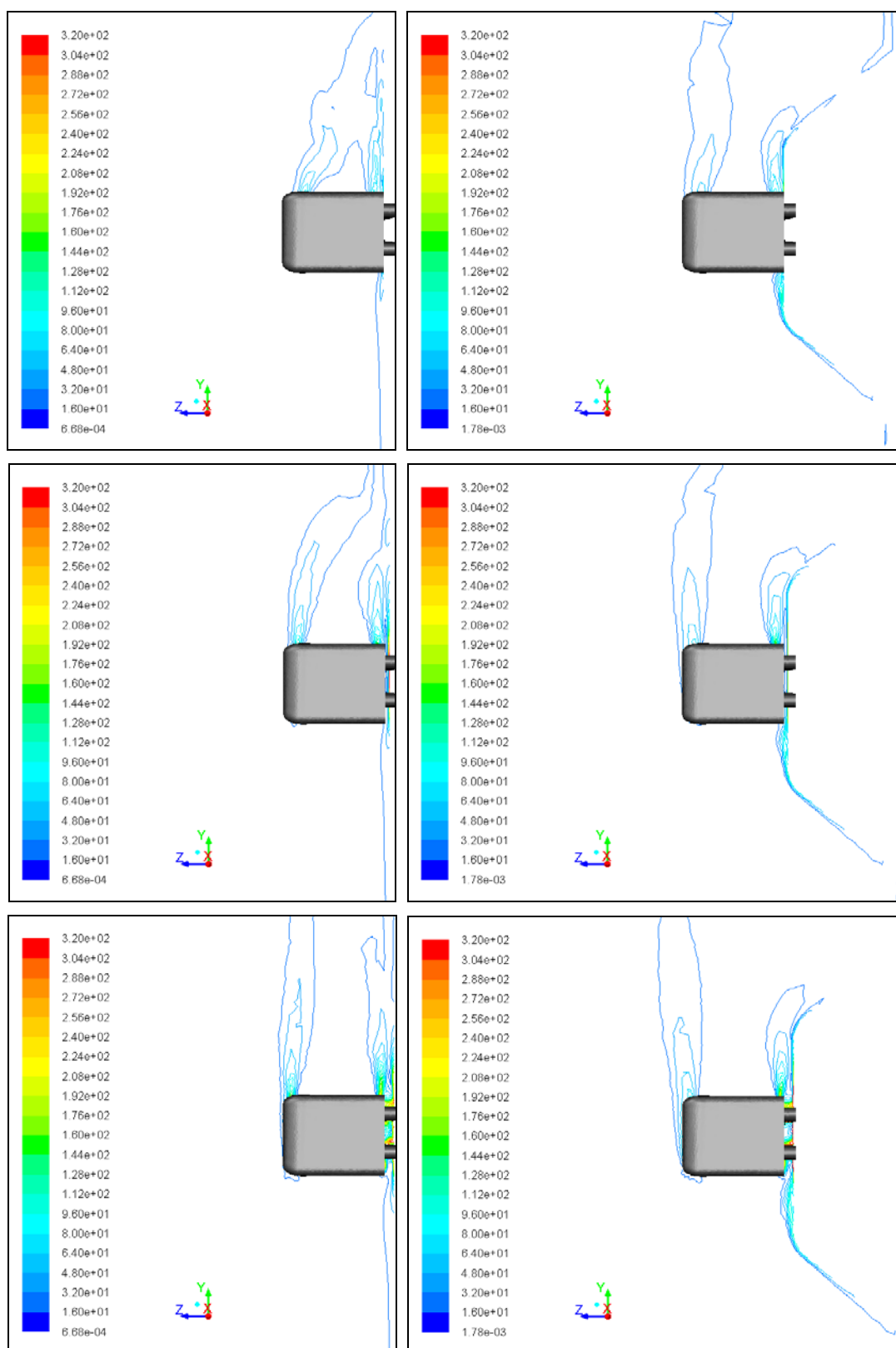
Слика 5.23 Вртложне линије у [1/s] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 15° за обе конфигурације тла



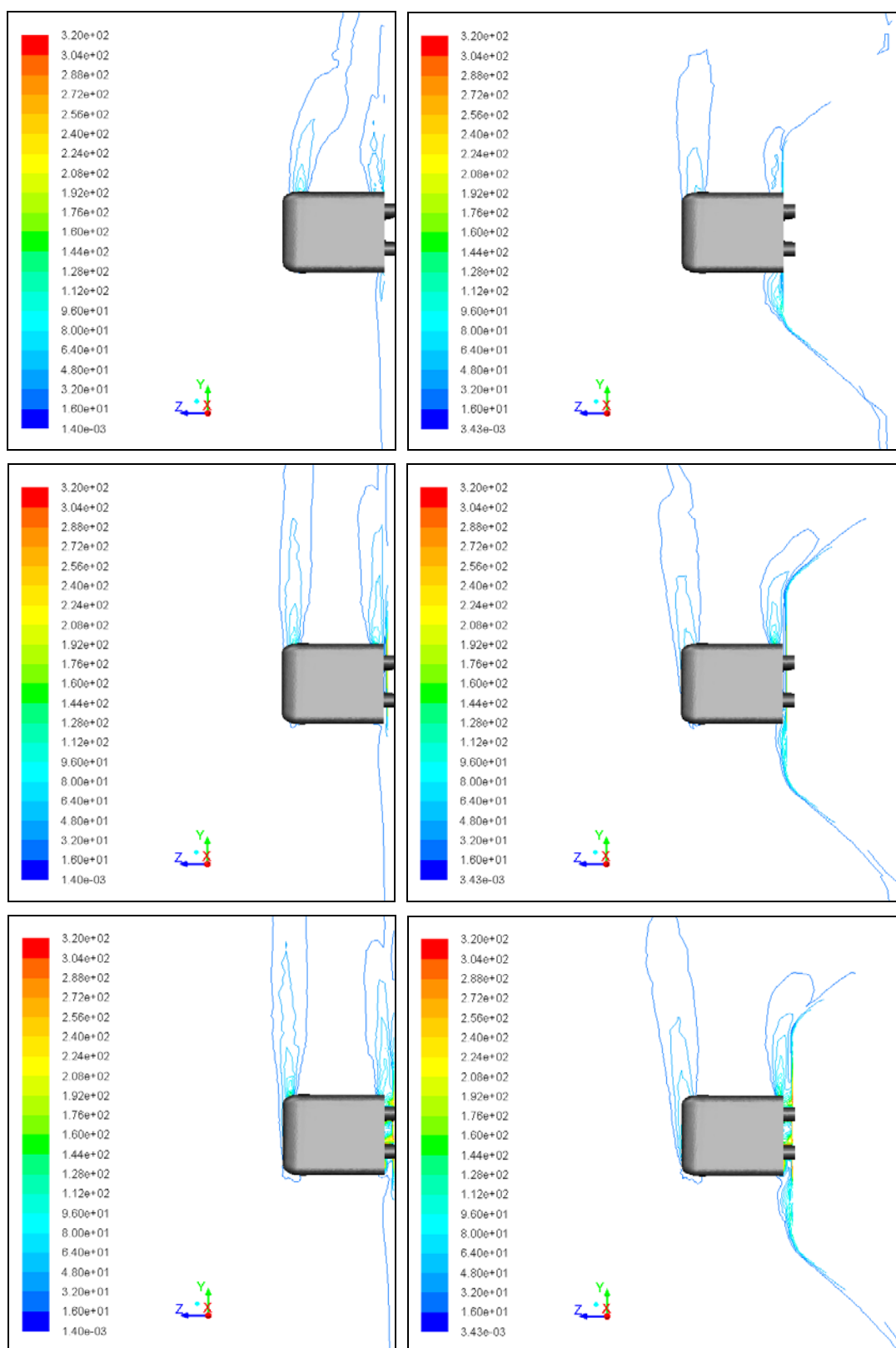
Слика 5.24 Вртложне линије у [1/s] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 30° за обе конфигурације тла



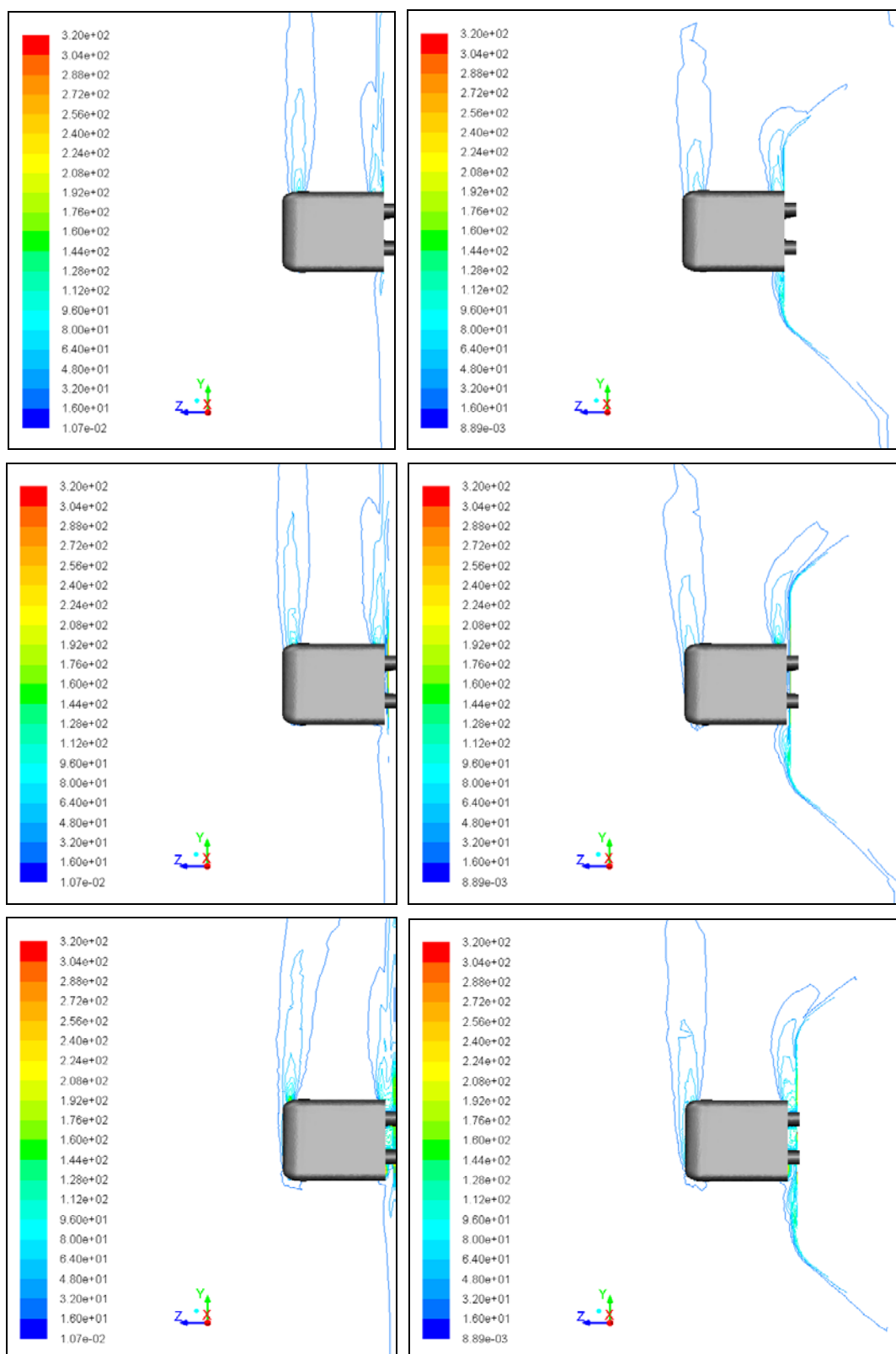
Слика 5.25 Вртложне линије у [1/s] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 45° за обе конфигурације тла



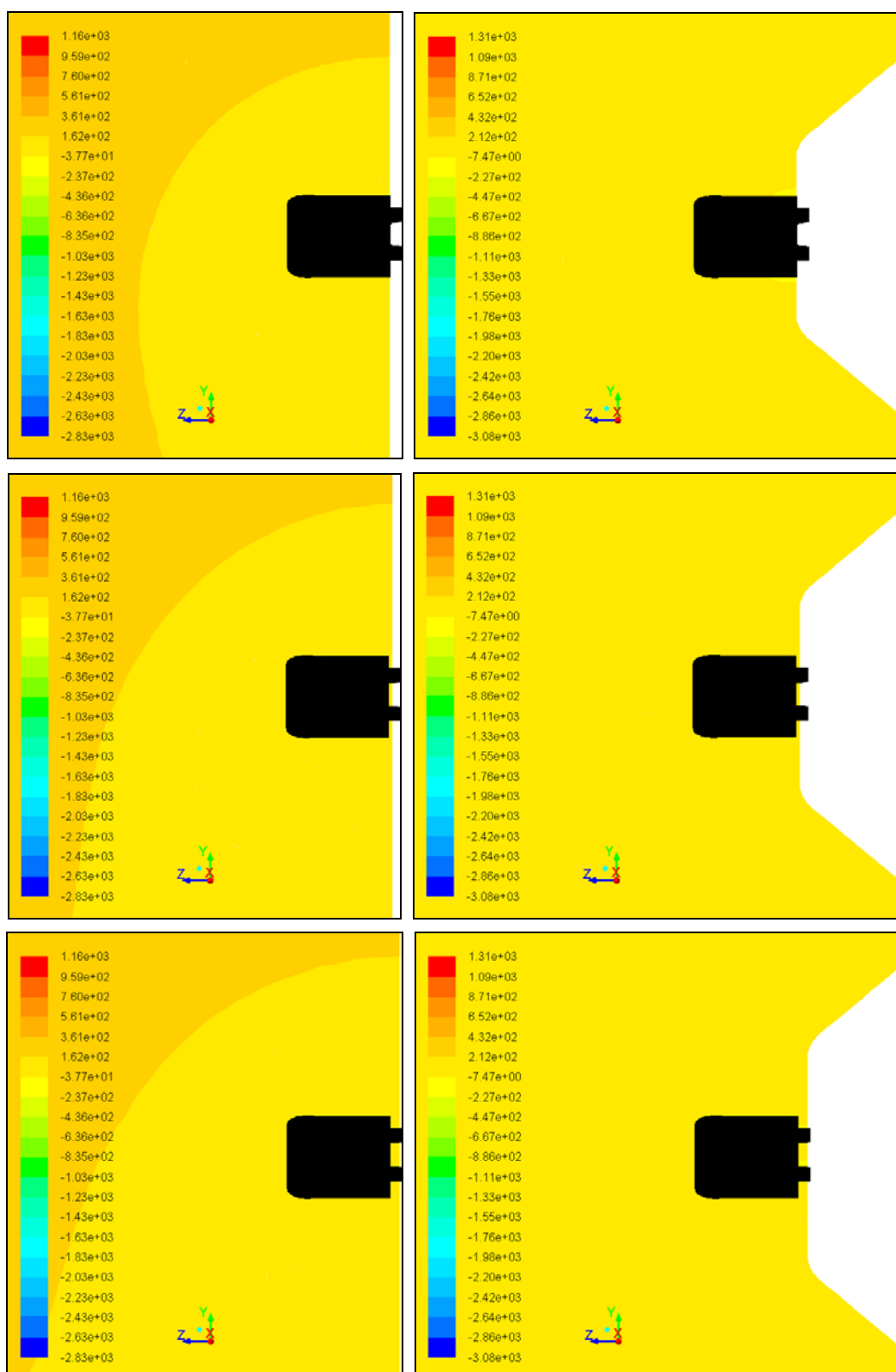
Слика 5.26 Вртложне линије у [1/s] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 60° за обе конфигурације тла



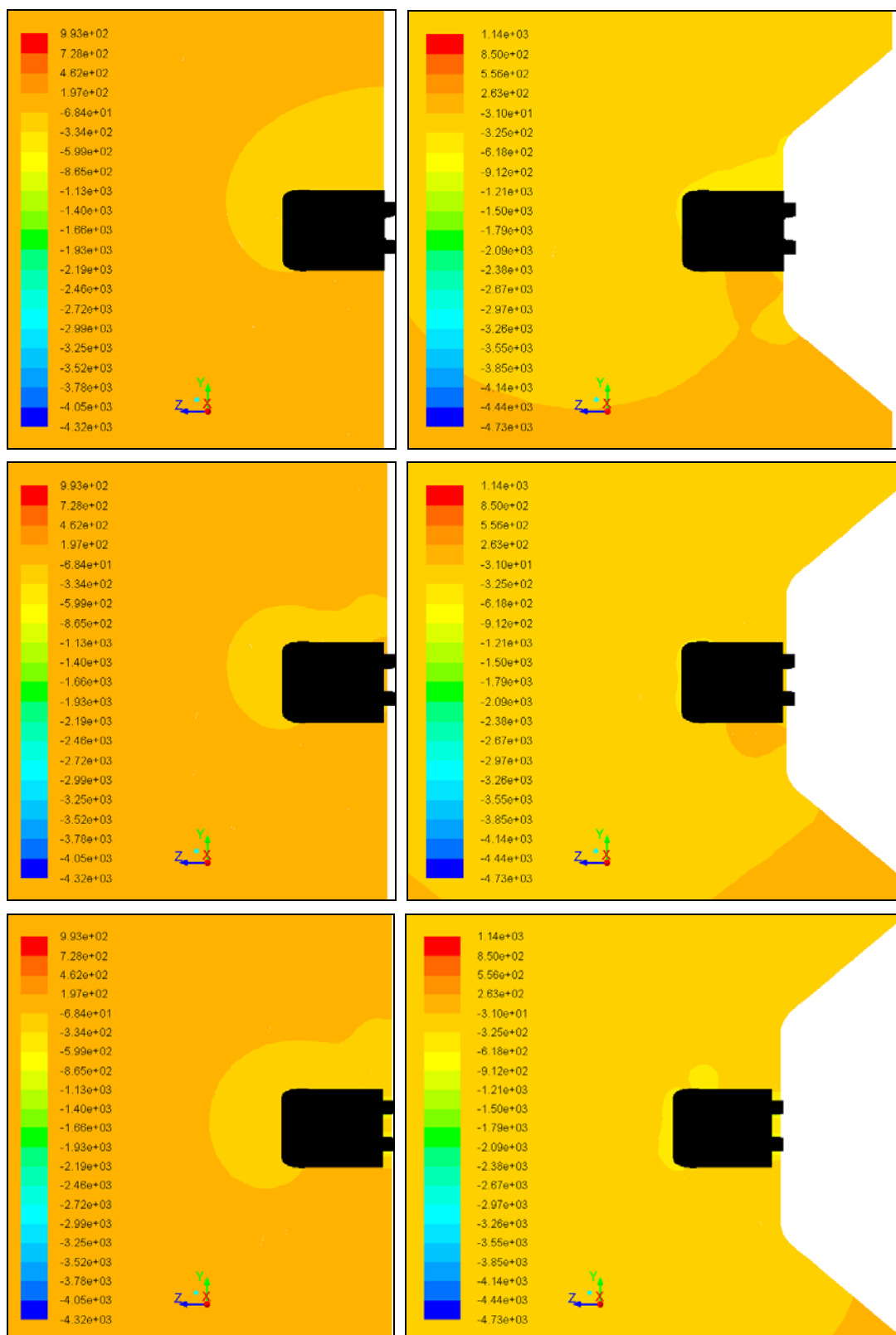
Слика 5.27 Вртложне линије у $[1/s]$ у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 75° за обе конфигурације тла



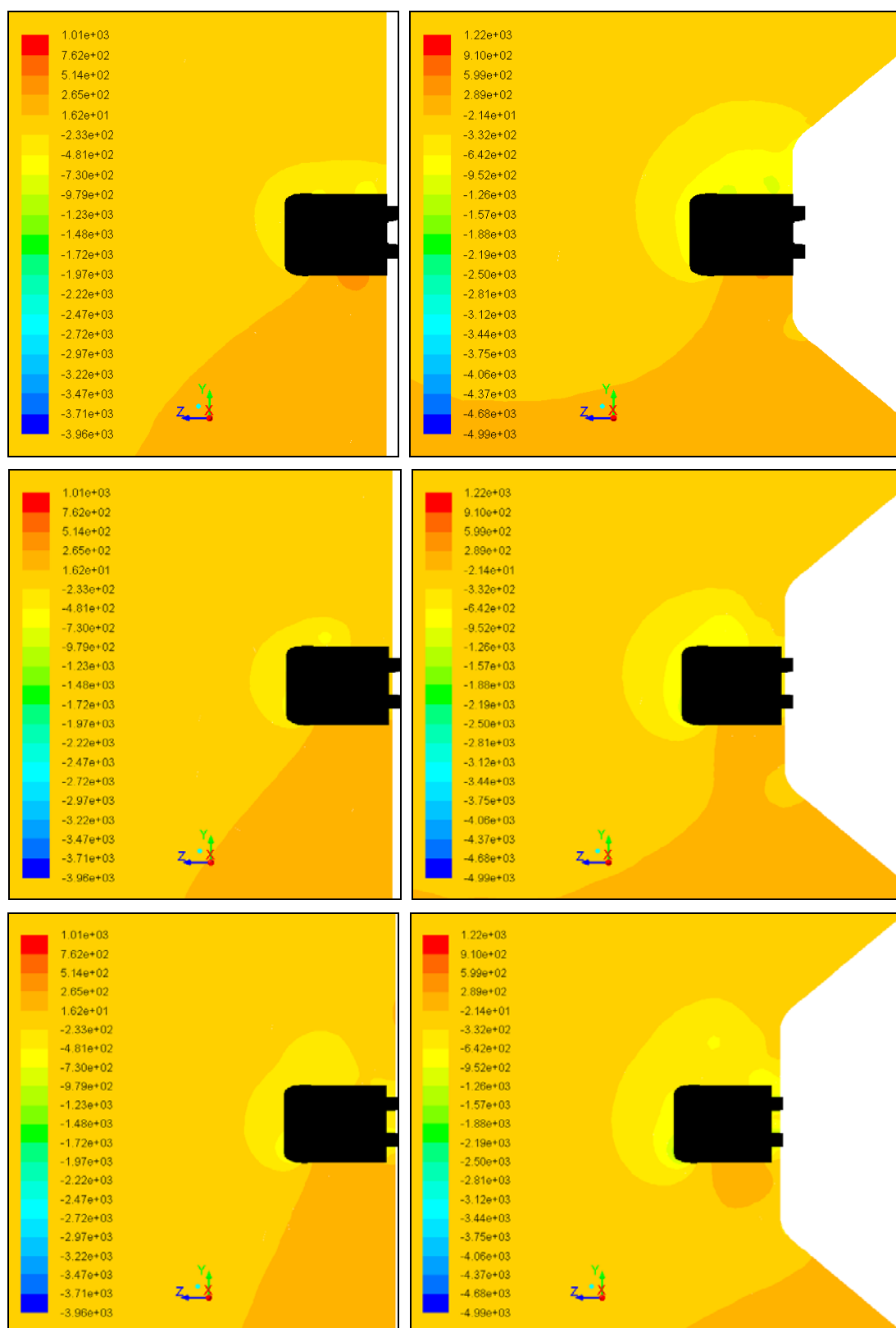
Слика 5.28 Вртложне линије у [1/s] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 90° за обе конфигурације тла



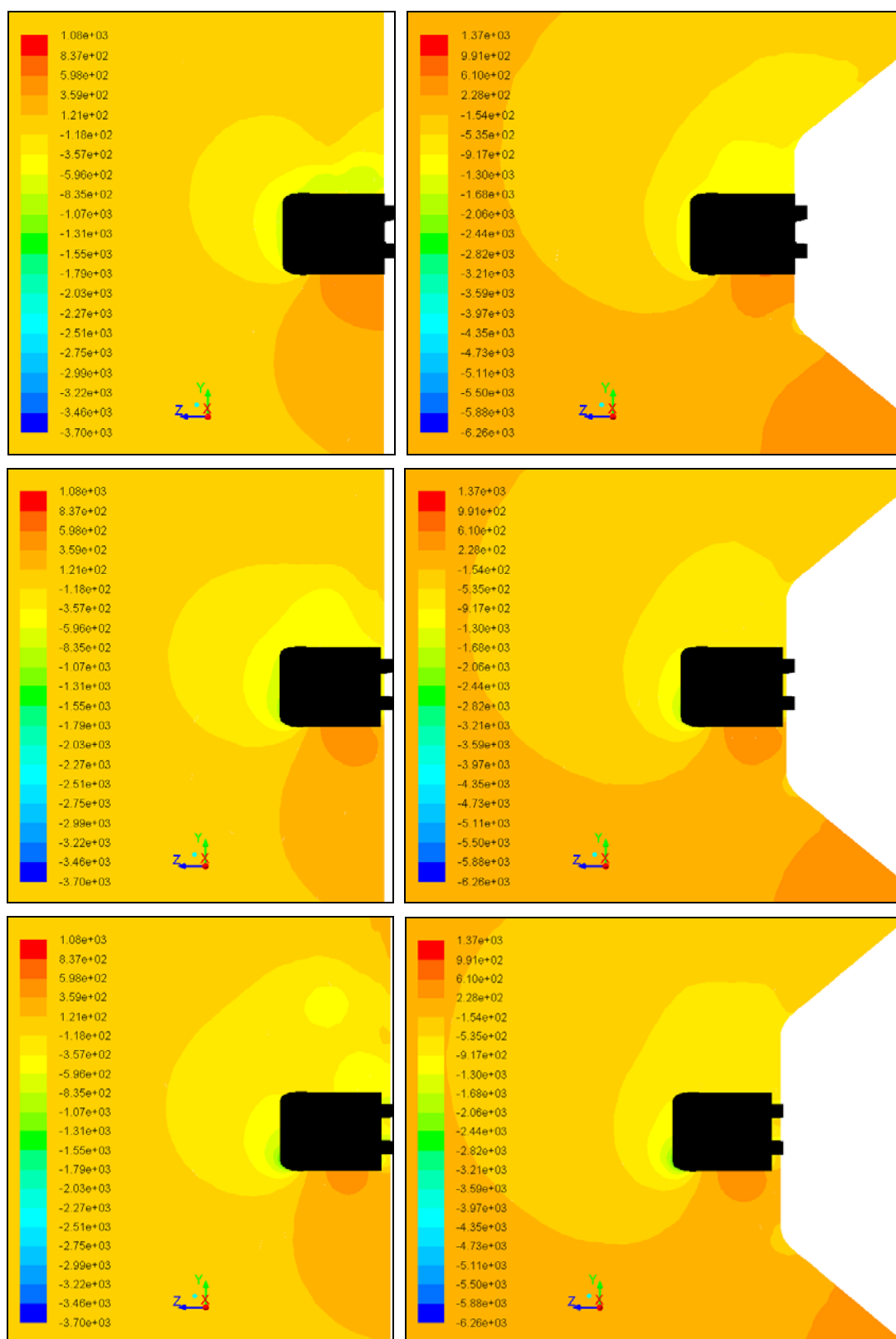
Слика 5.29 Статички притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 0° за обе конфигурације тла



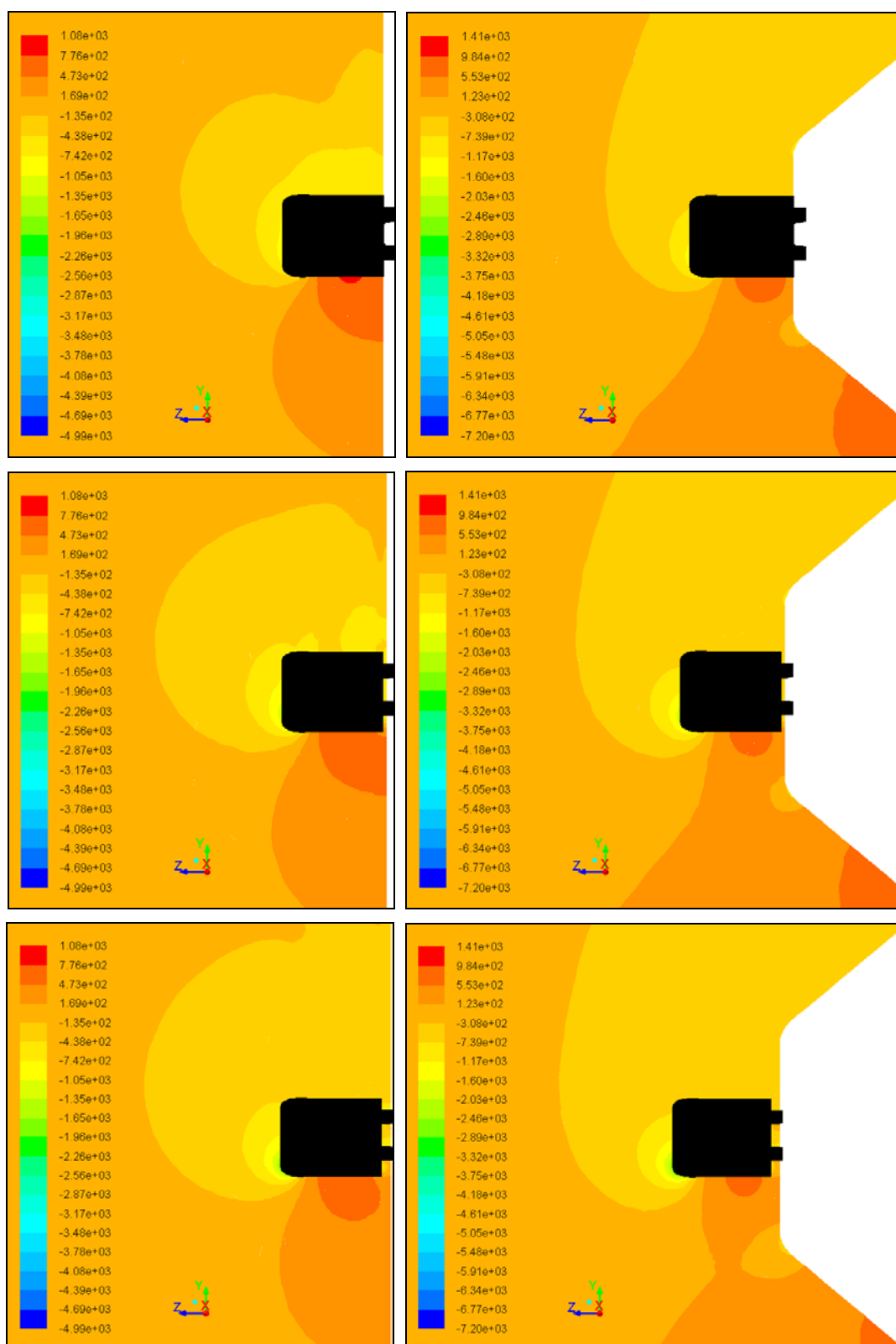
Слика 5.30 Статички притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 15° за обе конфигурације тла



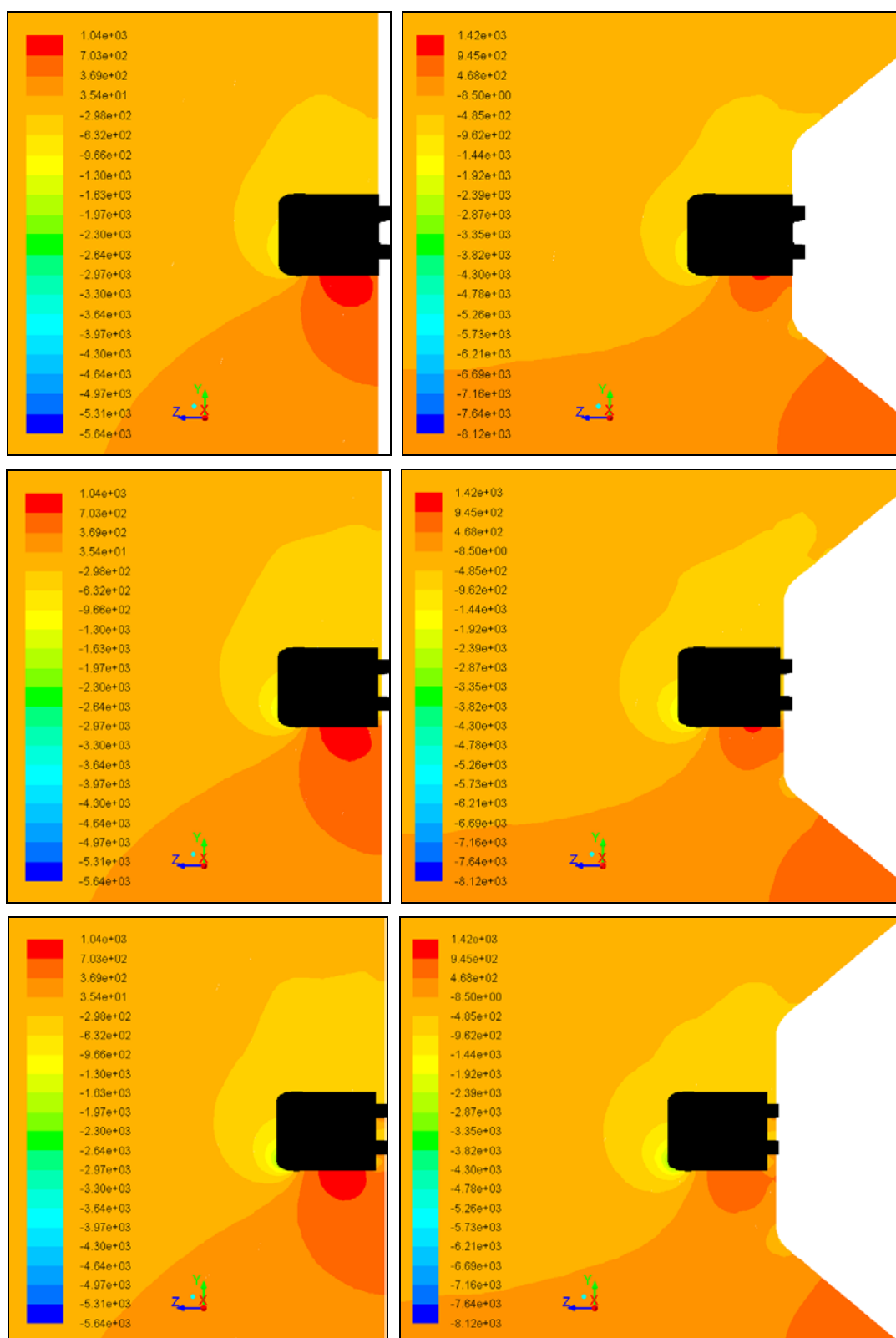
Слика 5.31 Статички притисак у [Pa] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 30° за обе конфигурације тла



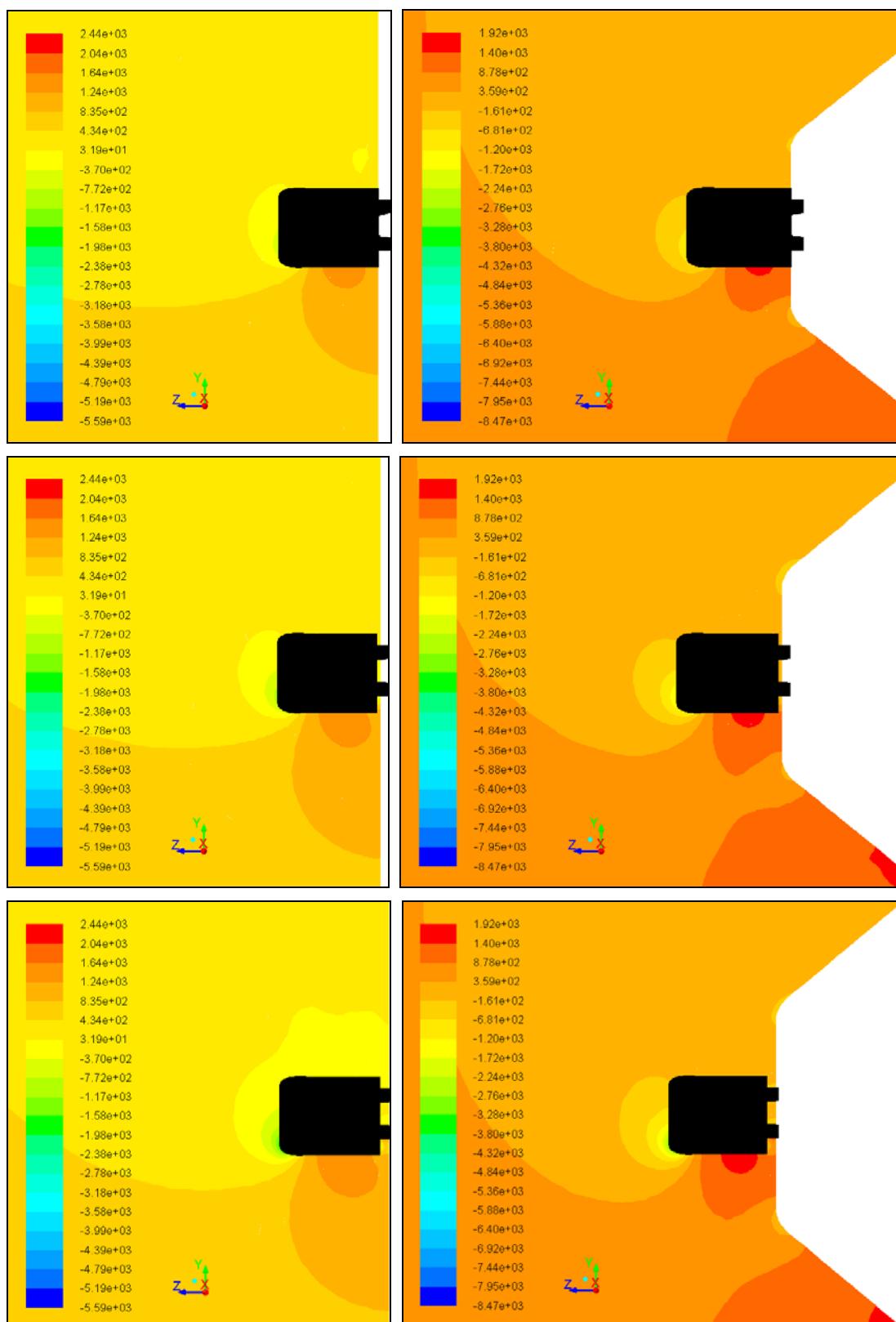
Слика 5.32 Статички притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 45° за обе конфигурације гла



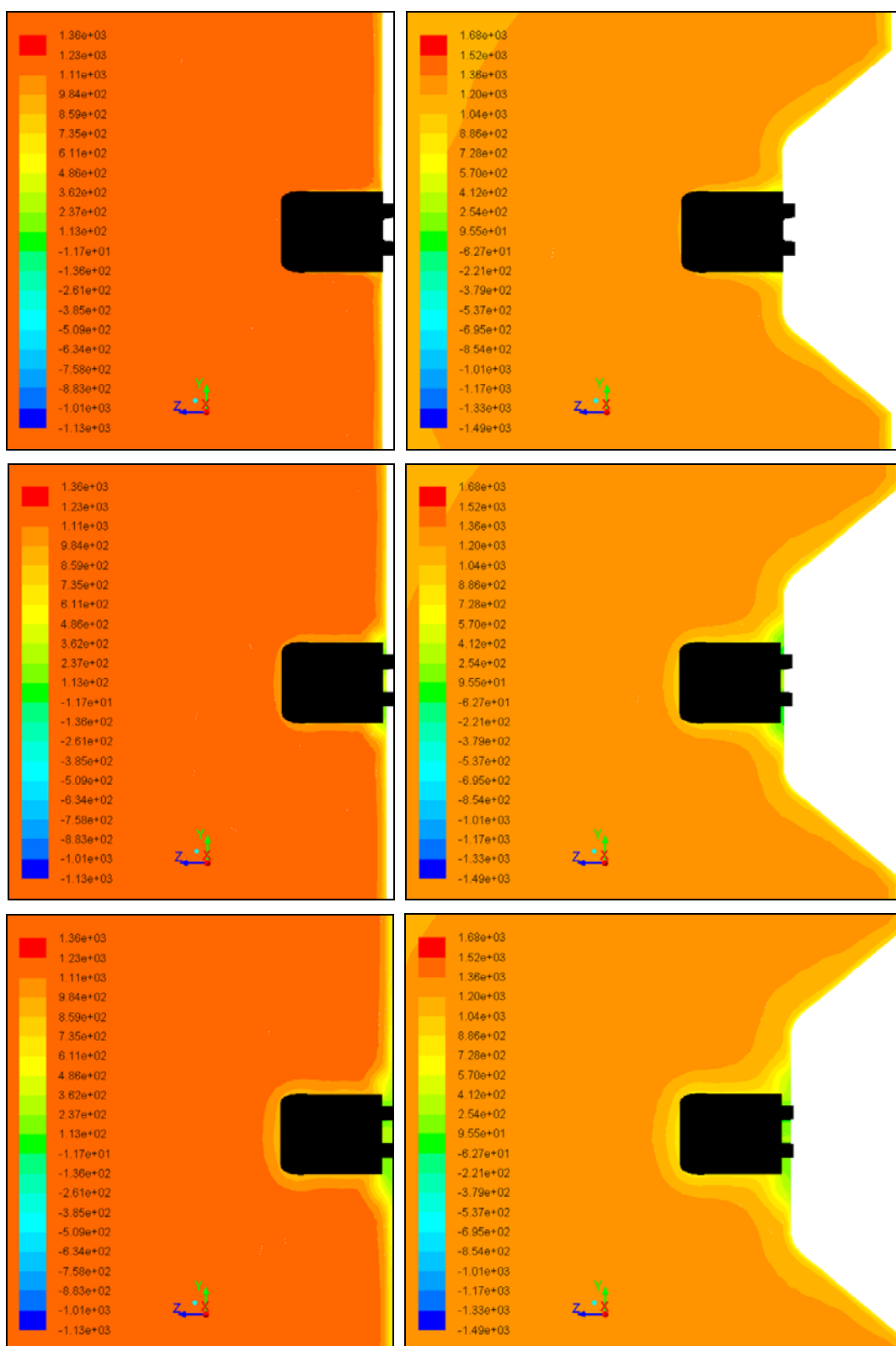
Слика 5.33 Статички притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 60° за обе конфигурације тла



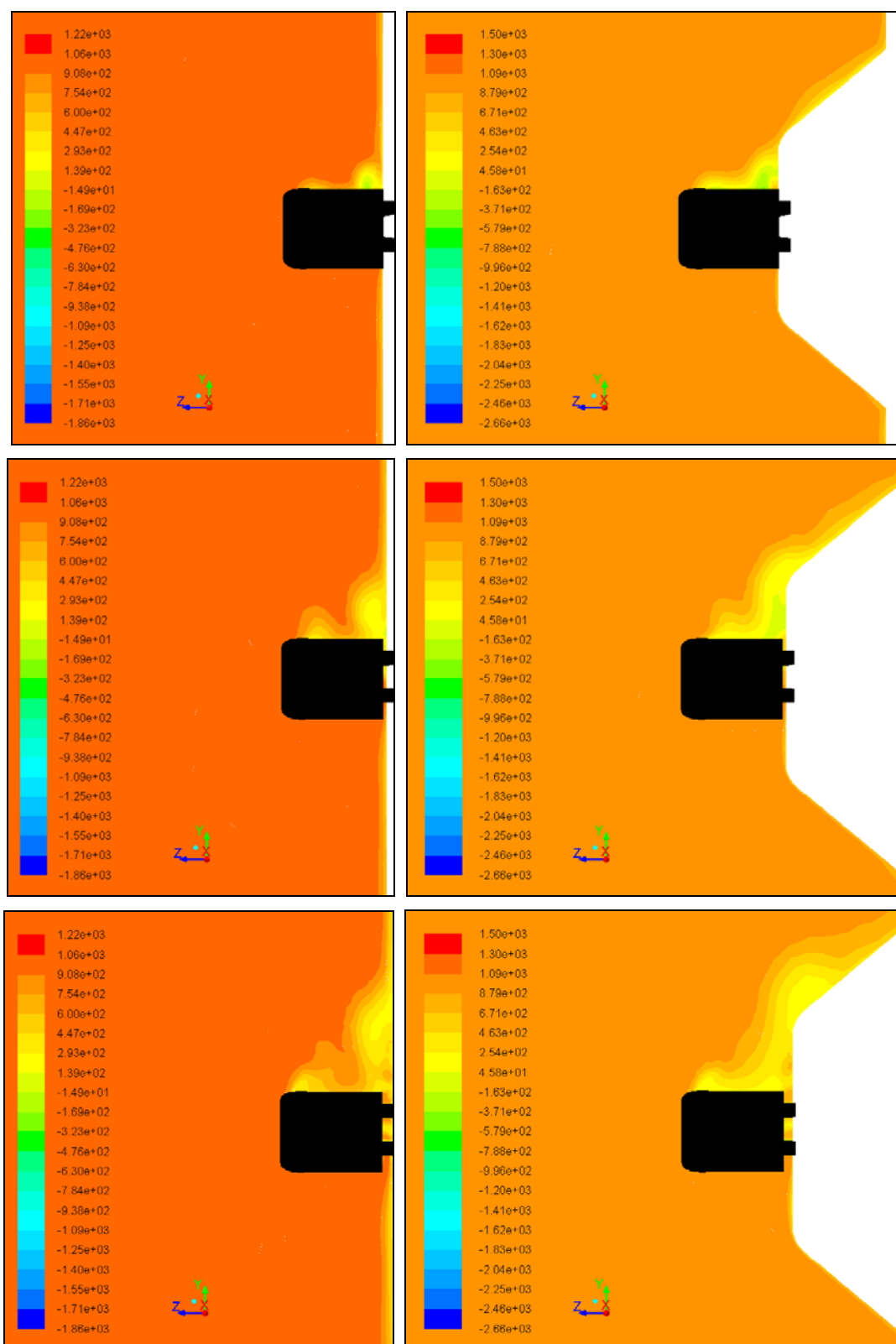
Слика 5.34 Статички притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 75° за обе конфигурације тла



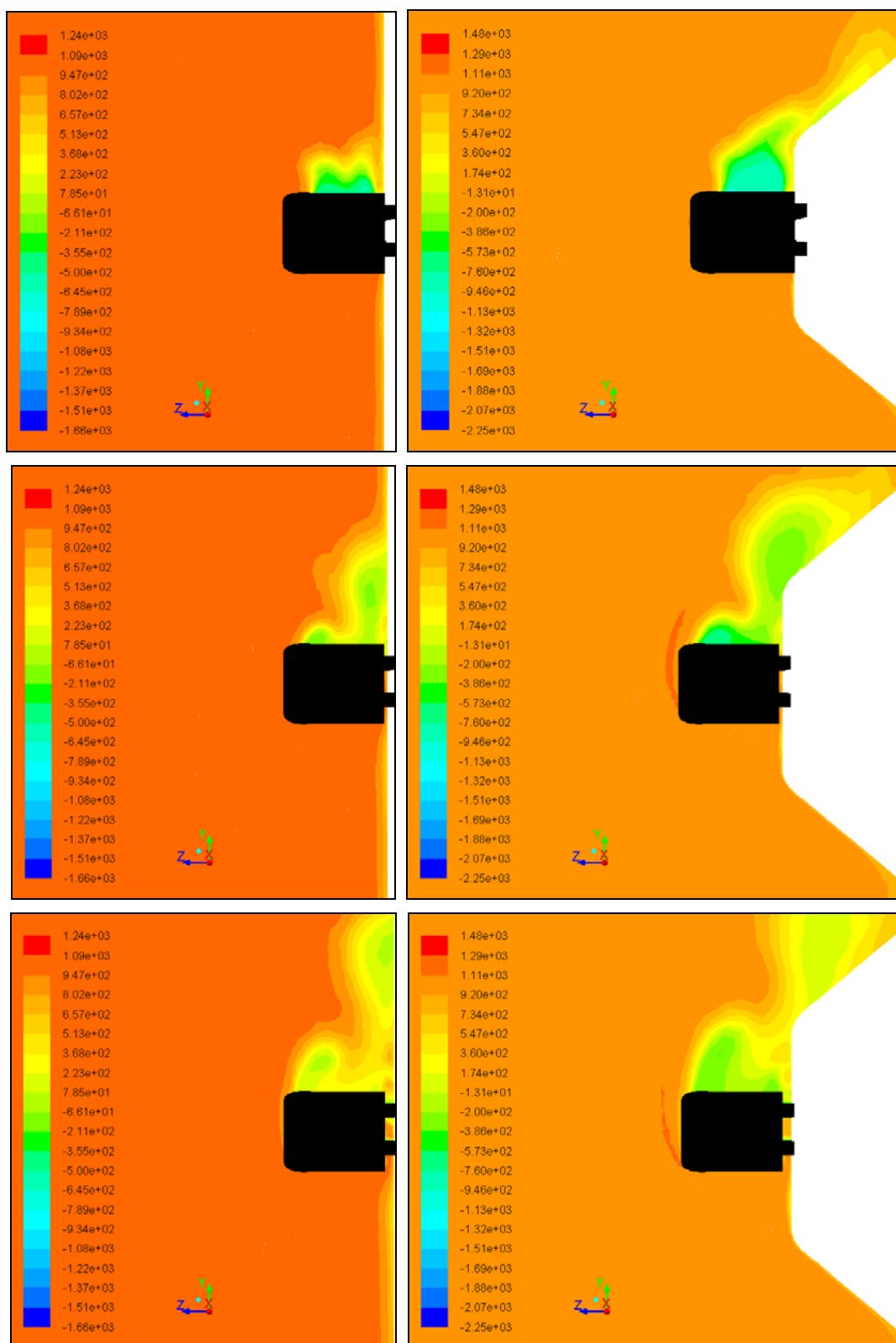
Слика 5.35 Статички притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 90° за обе конфигурације тла



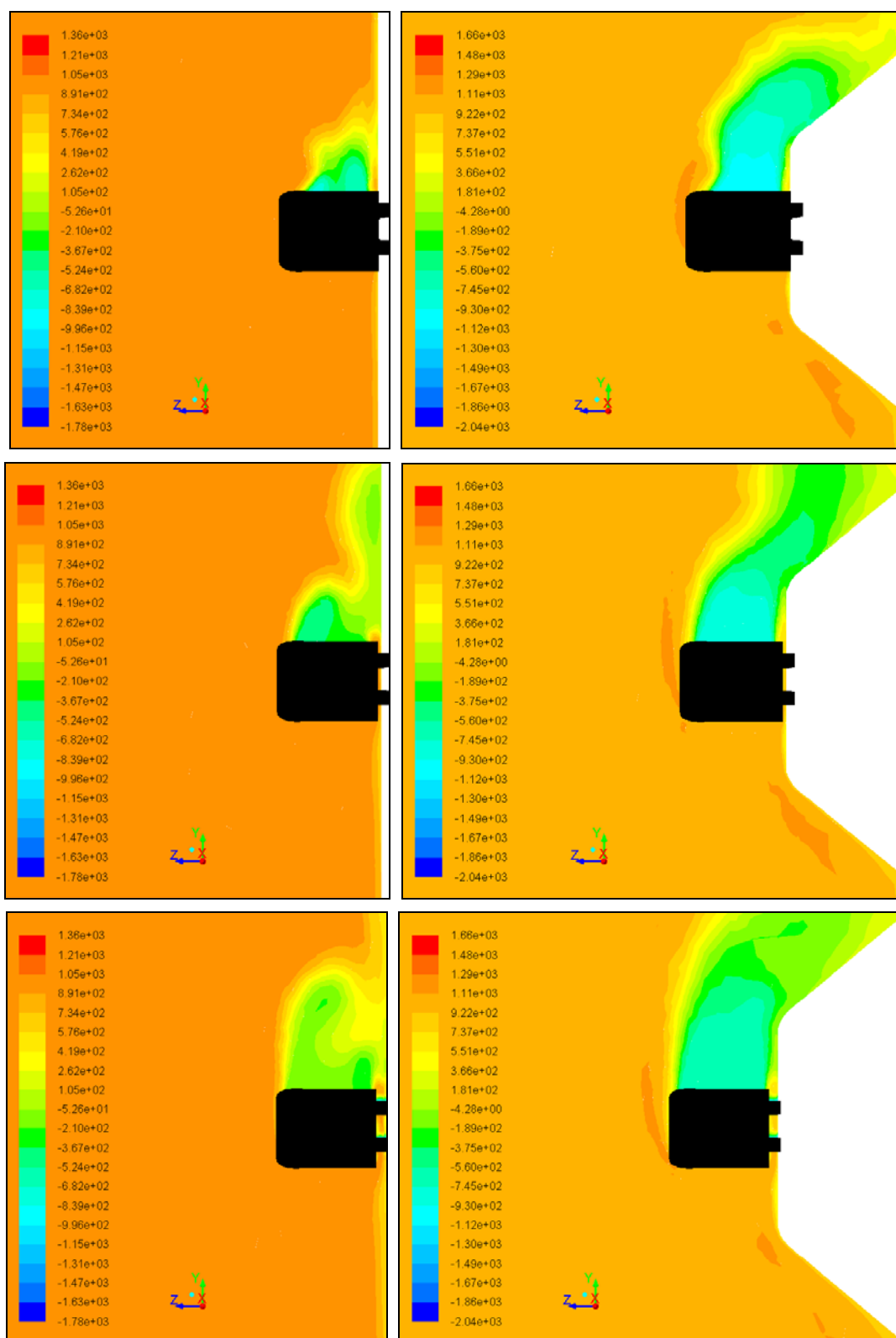
Слика 5.36 Тотални притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 0° за обе конфигурације тла



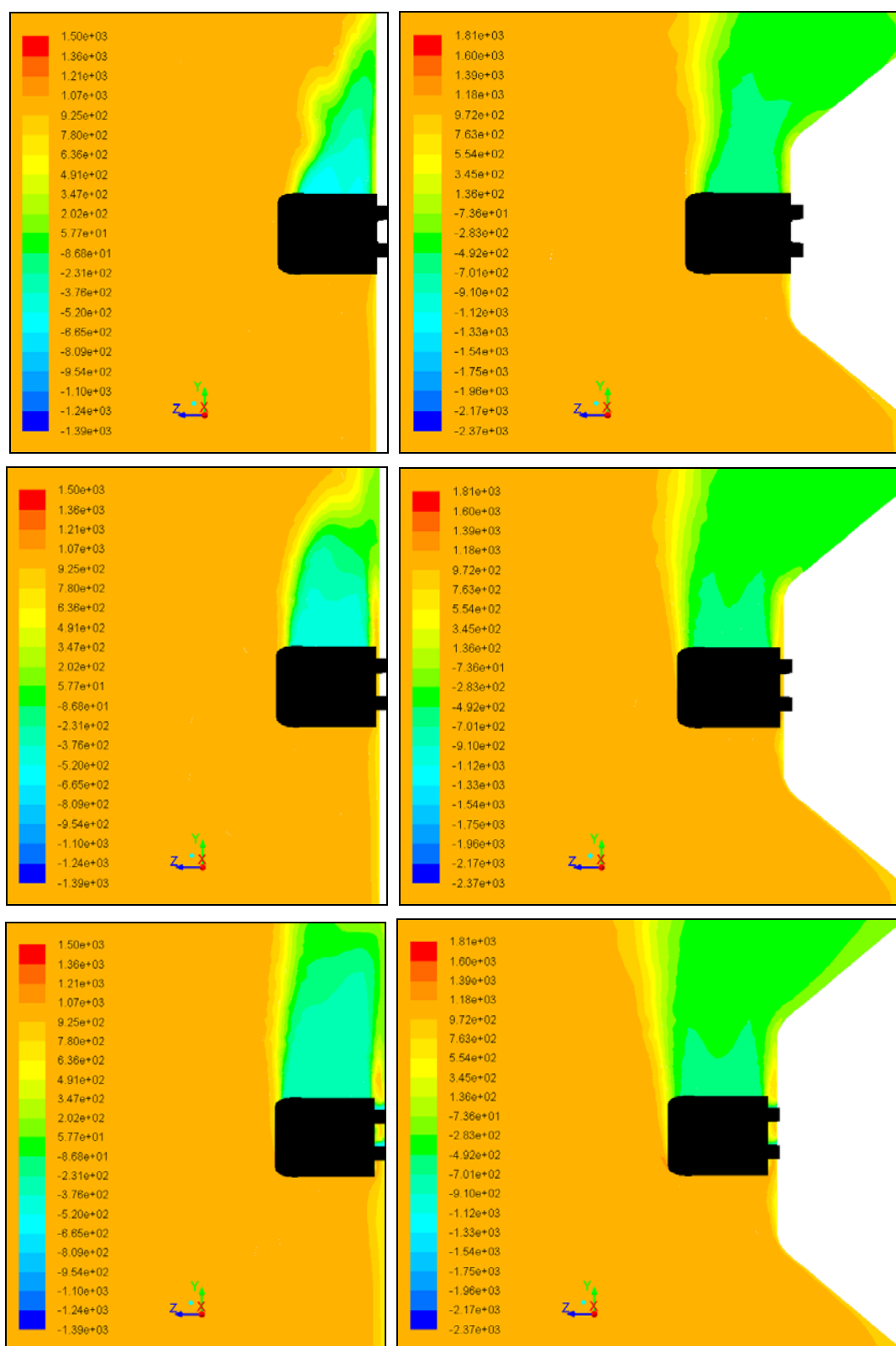
Слика 5.37 Тотални притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 15° за обе конфигурације тла



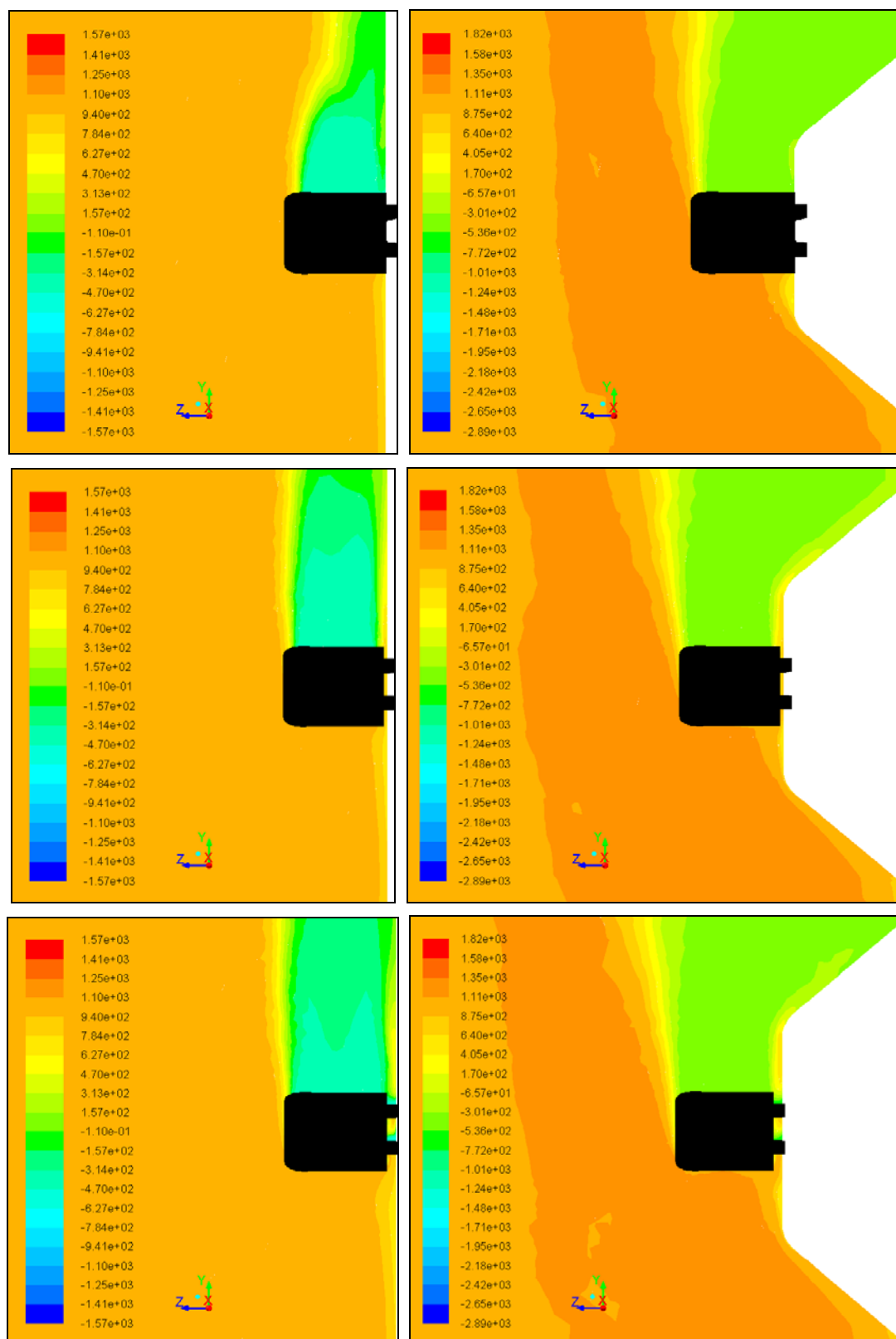
Слика 5.38 Тотални притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 30° за обе конфигурације тла



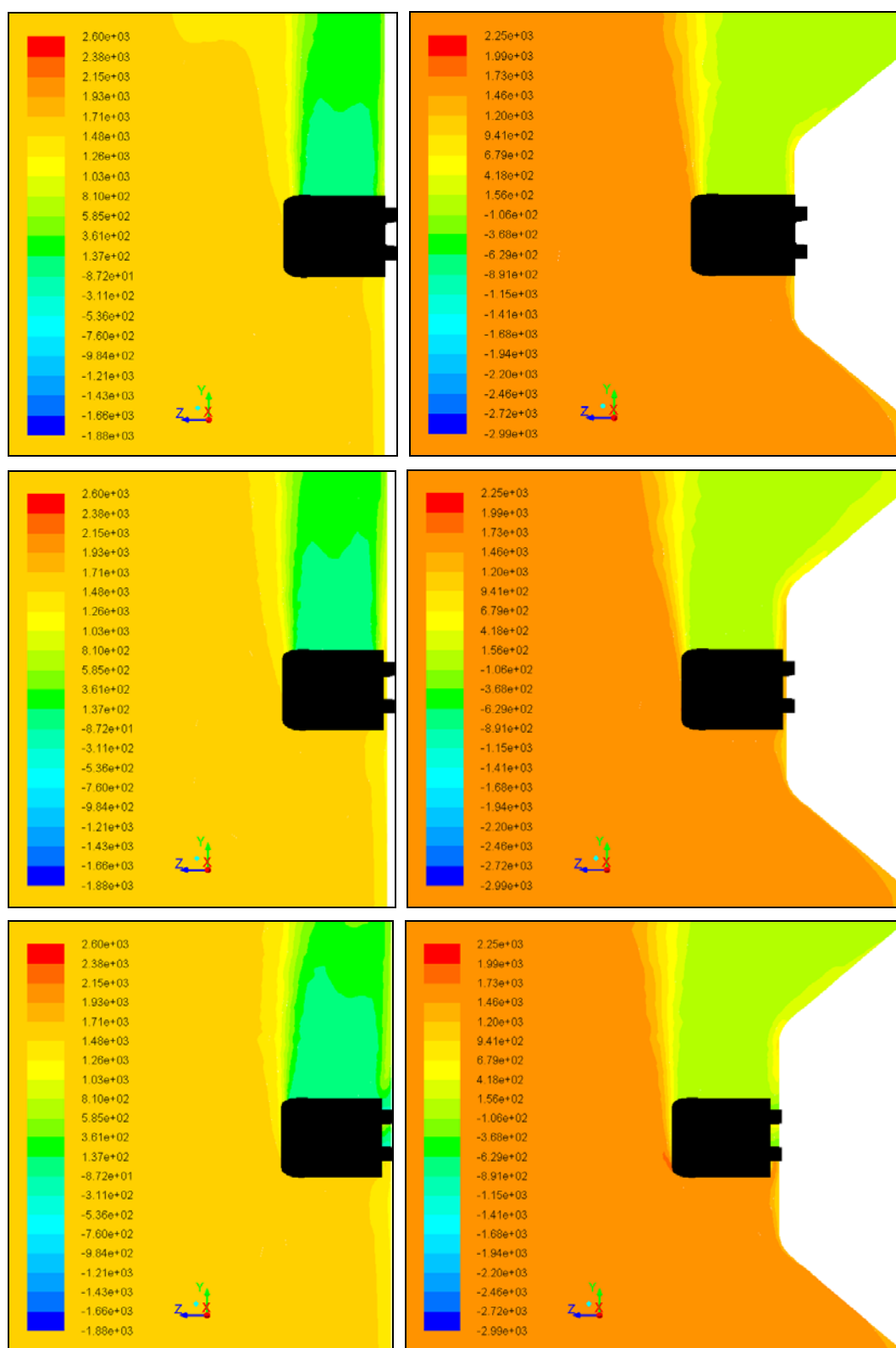
Слика 5.39 Тотални притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 45° за обе конфигурације тла



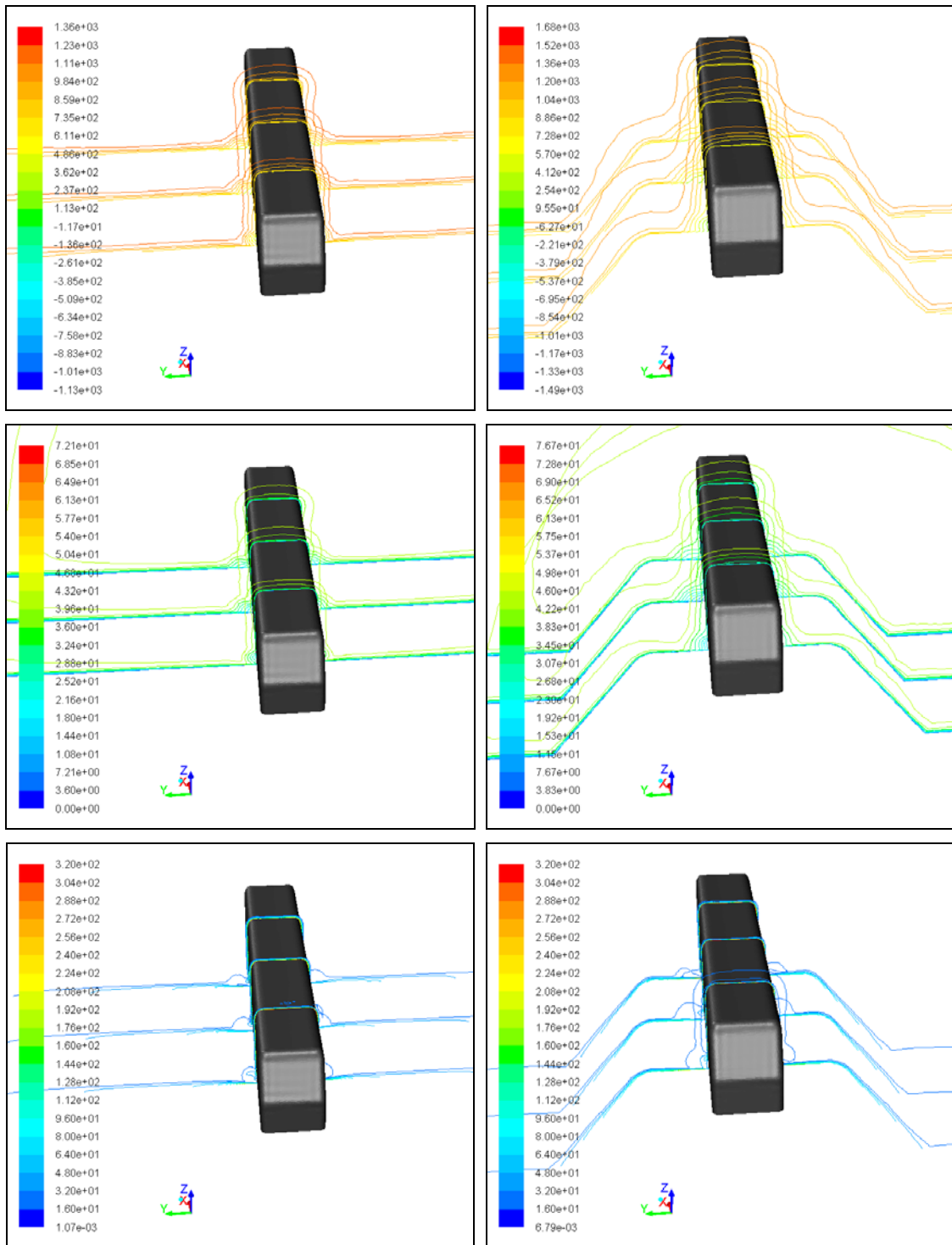
Слика 5.40 Тотални притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 60° за обе конфигурације тла



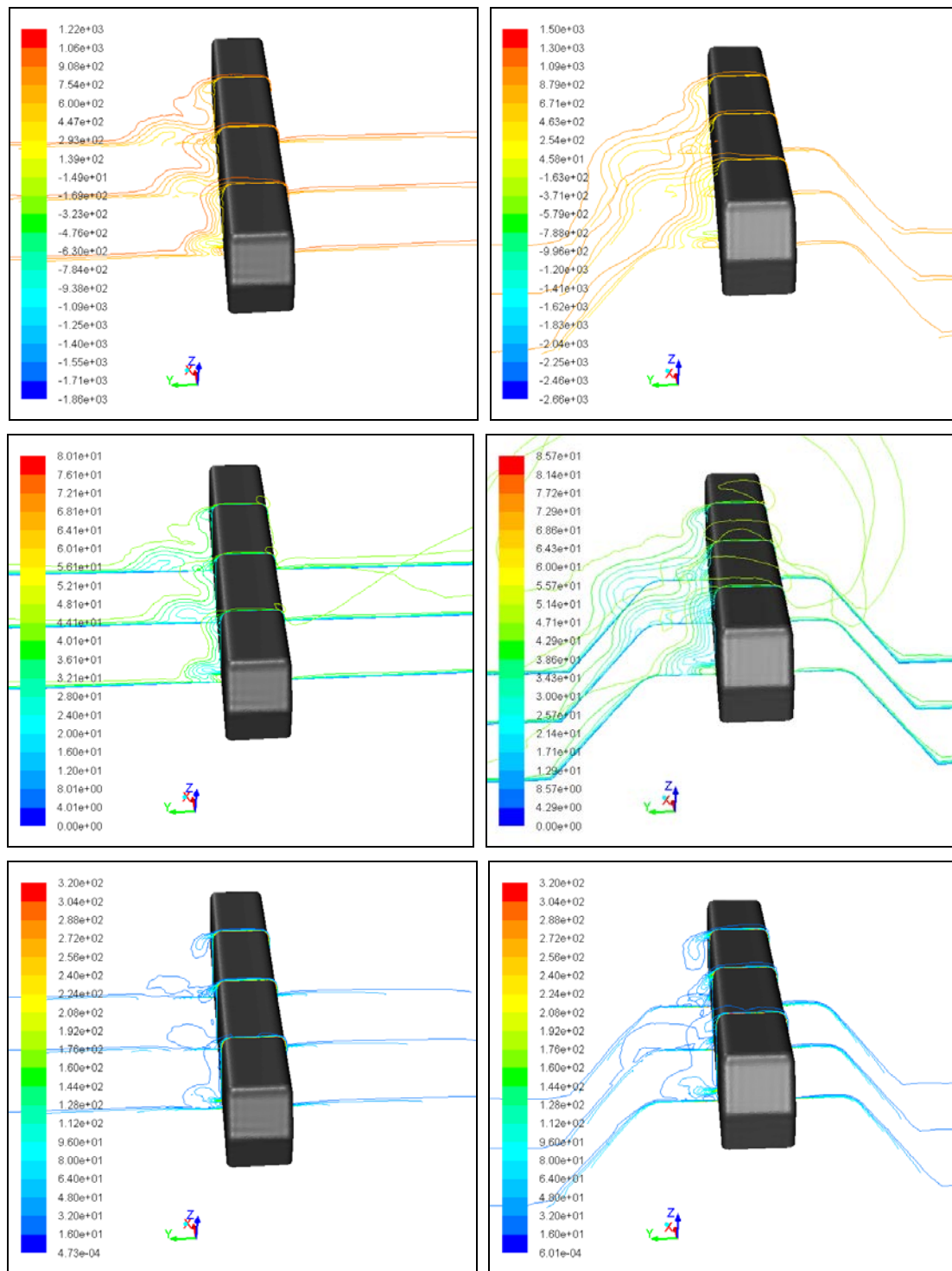
Слика 5.41 Тотални притисак у [Pa] у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 75° за обе конфигурације тла



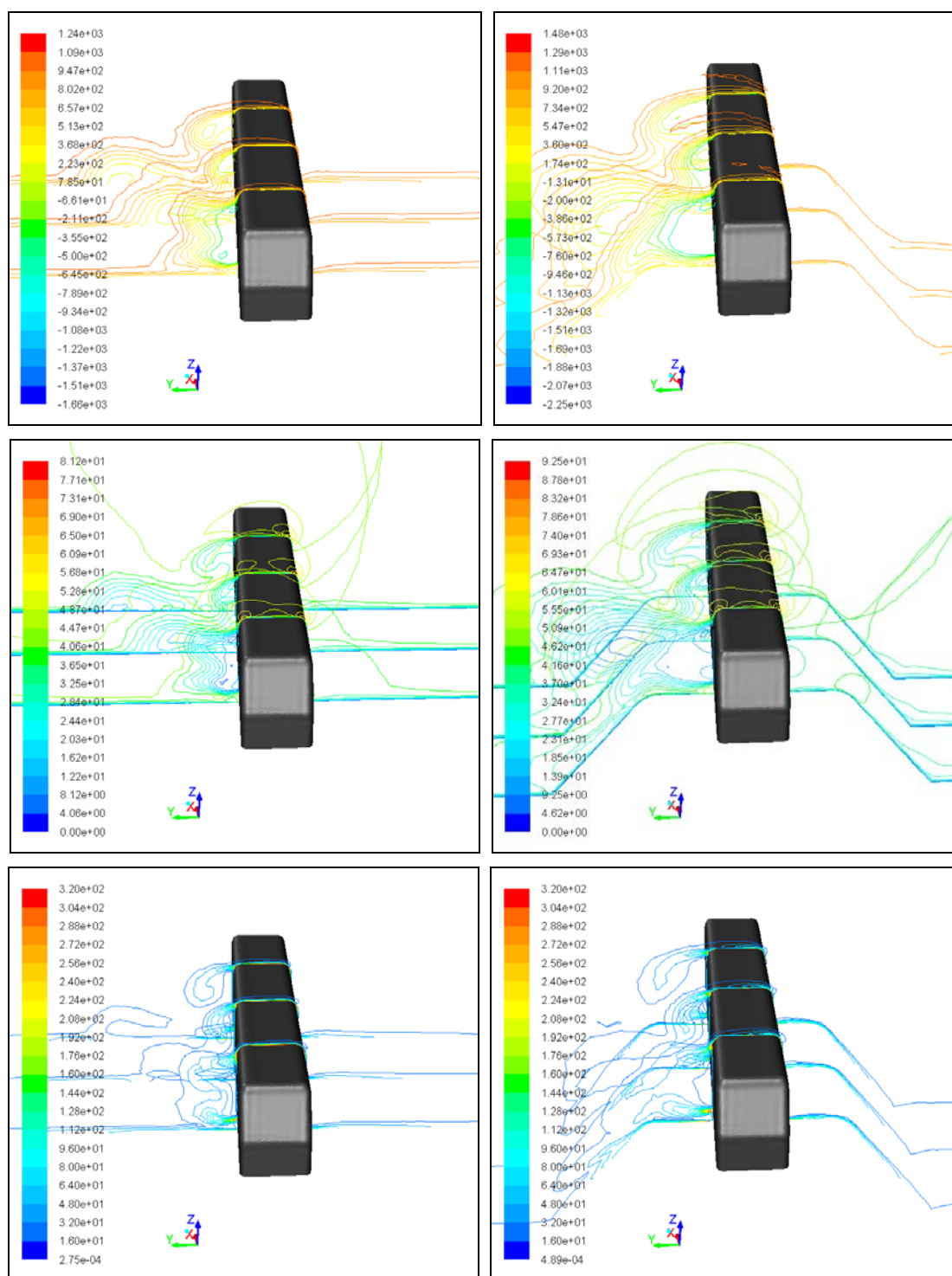
Слика 5.42 Тотални притисак у [Pa] у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 90° за обе конфигурације тла



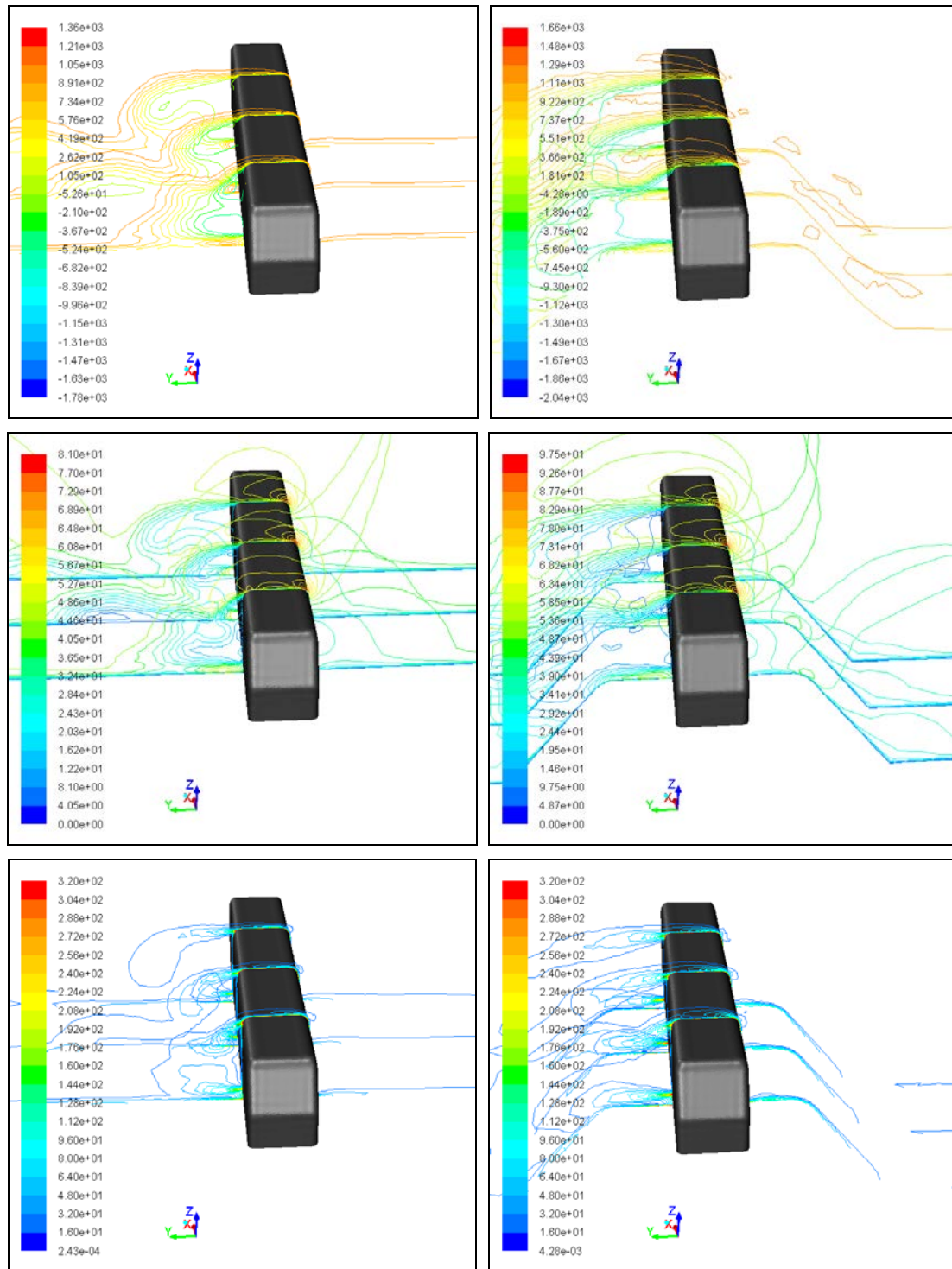
Слика 5.43 Контуре тоталног притиска, брзине и вртложности у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 0° за обе конфигурације тла



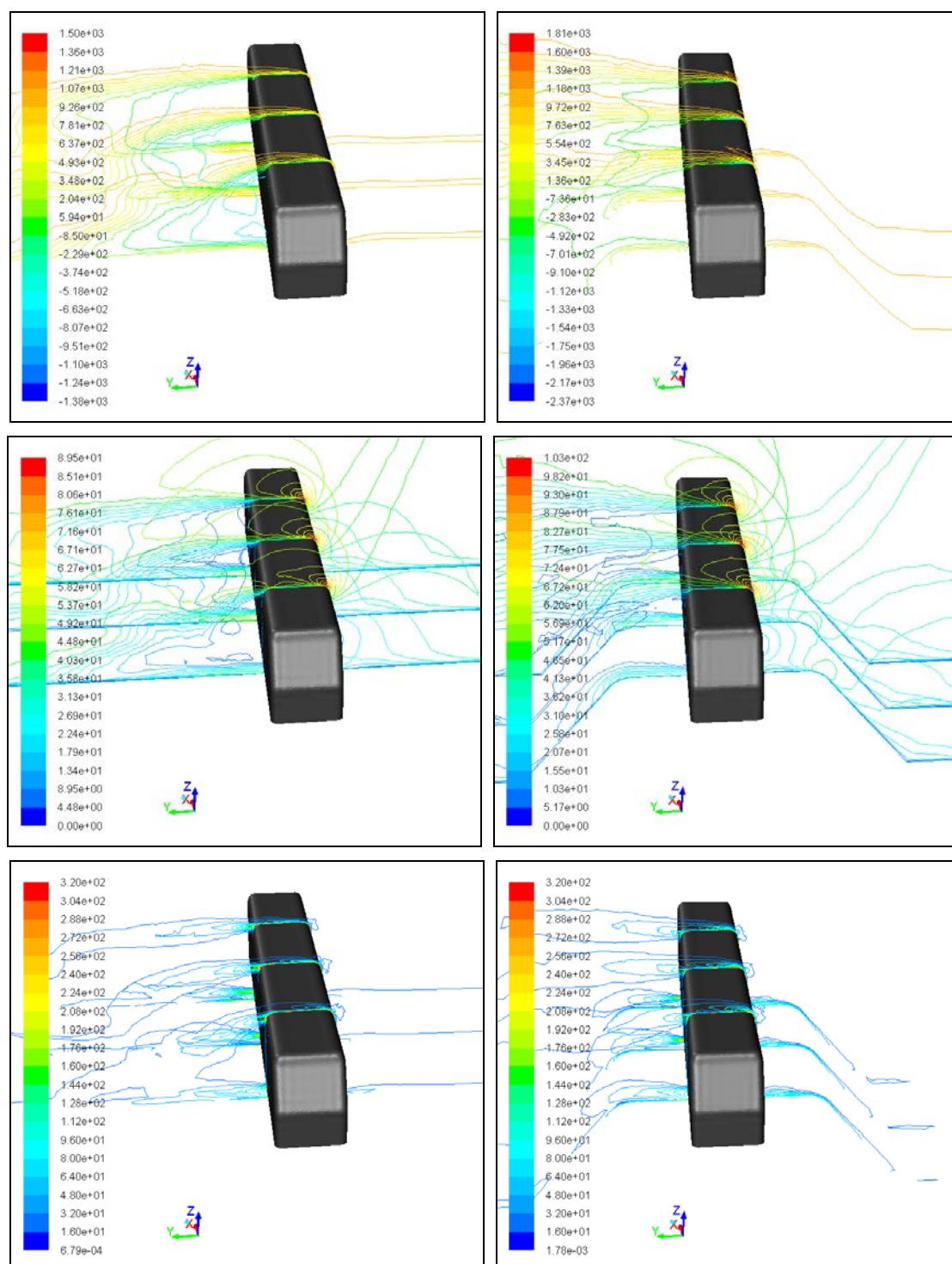
Слика 5.44 Контуре тоталног притиска, брзине и вртложности у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 15° за обе конфигурације гла



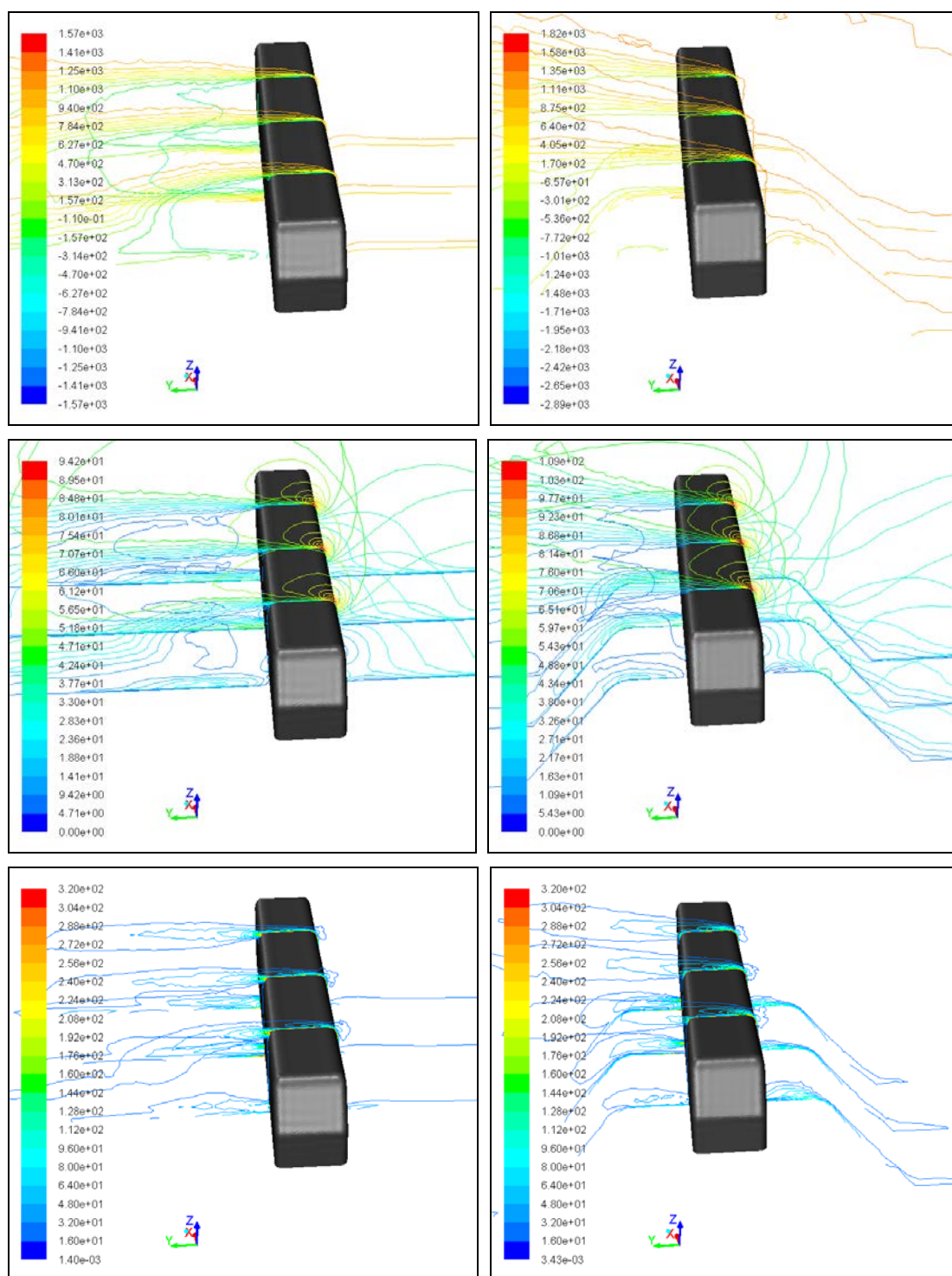
Слика 5.45 Контуре тоталног притиска, брзине и вртложности у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 30° за обе конфигурације гла



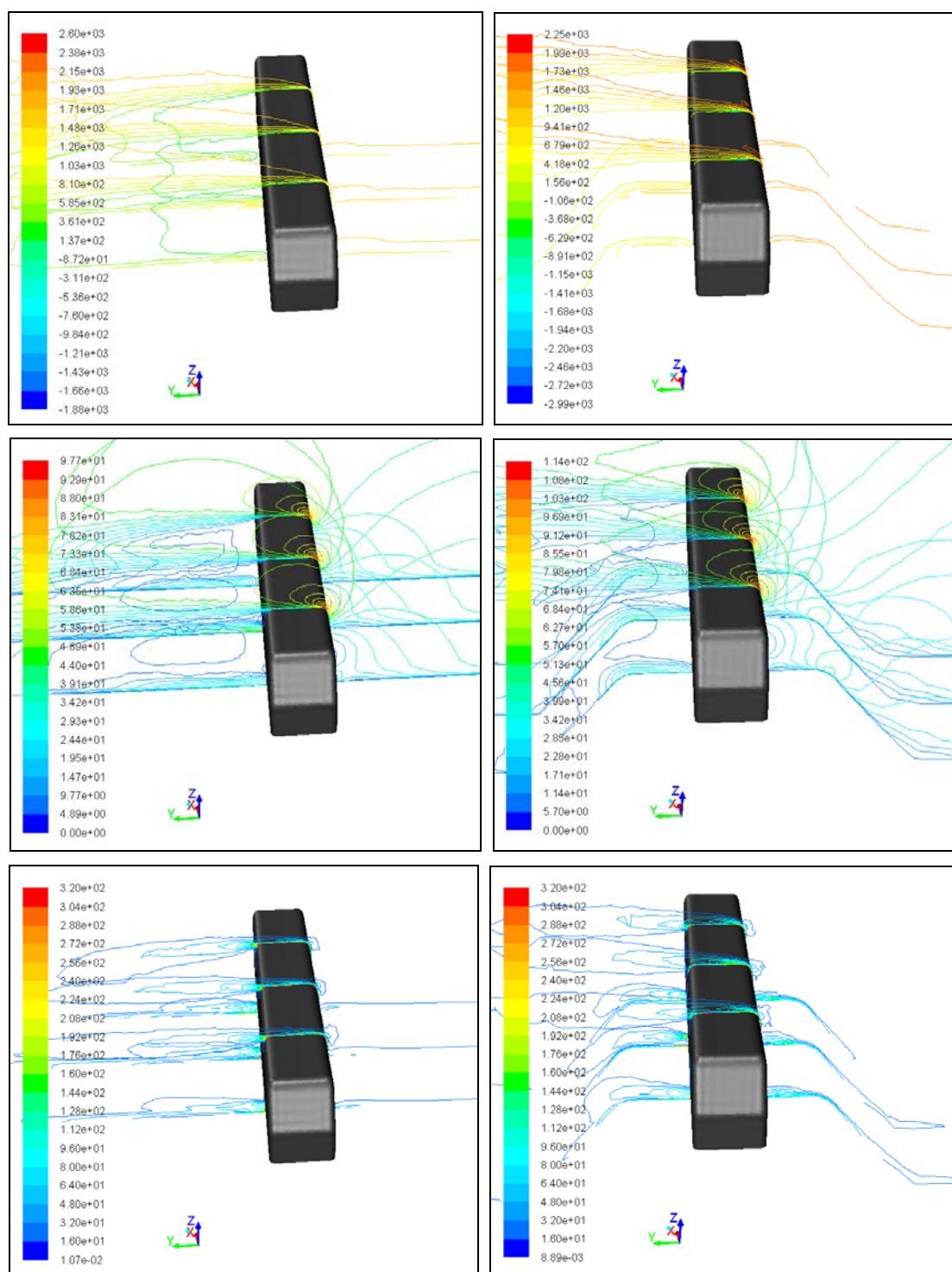
Слика 5.46 Контуре тоталног притиска, брзине и вртложности у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 45° за обе конфигурације гла



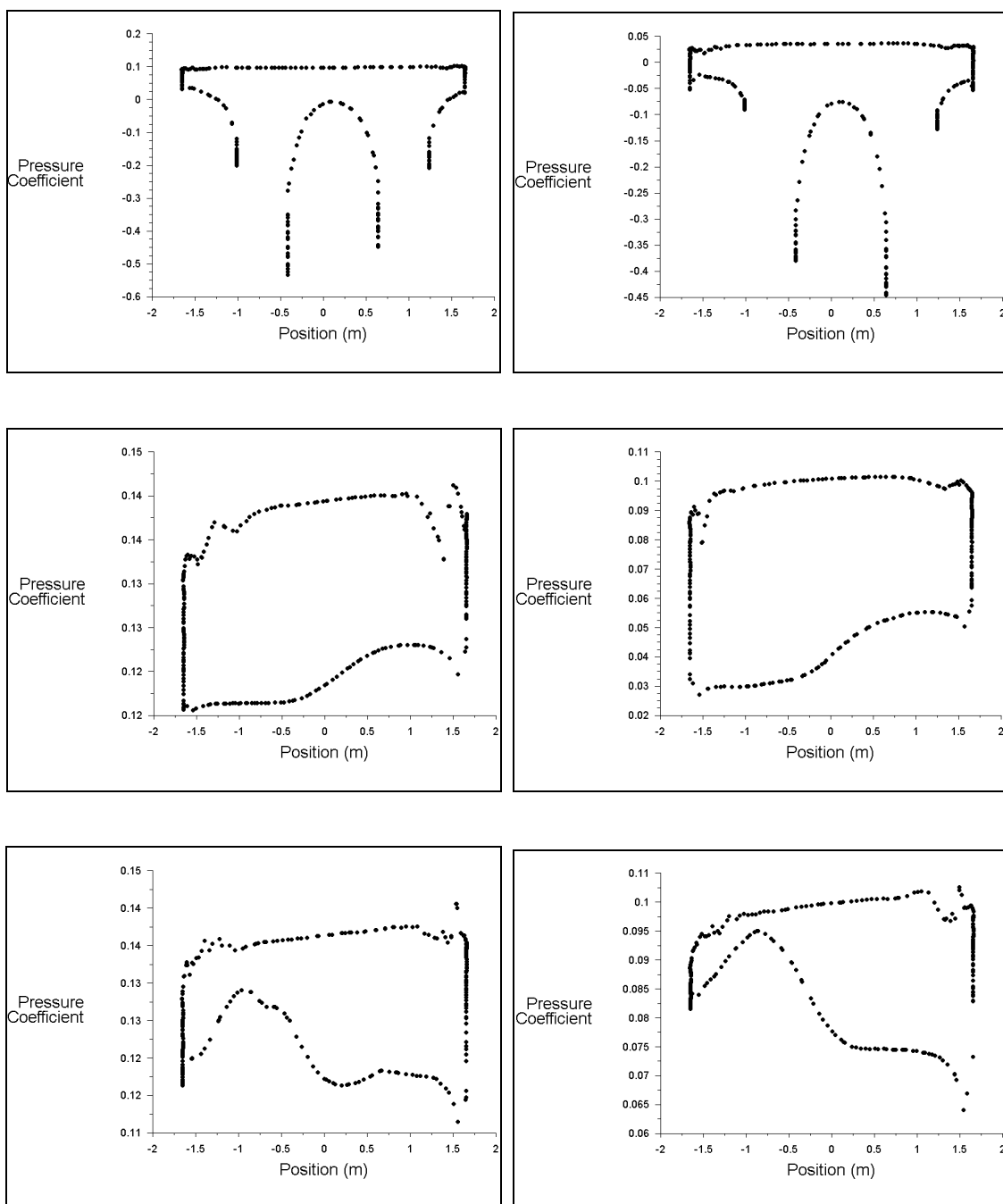
Слика 5.47 Контуре тоталног притиска, брзине и вртложности у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 60° за обе конфигурације гла



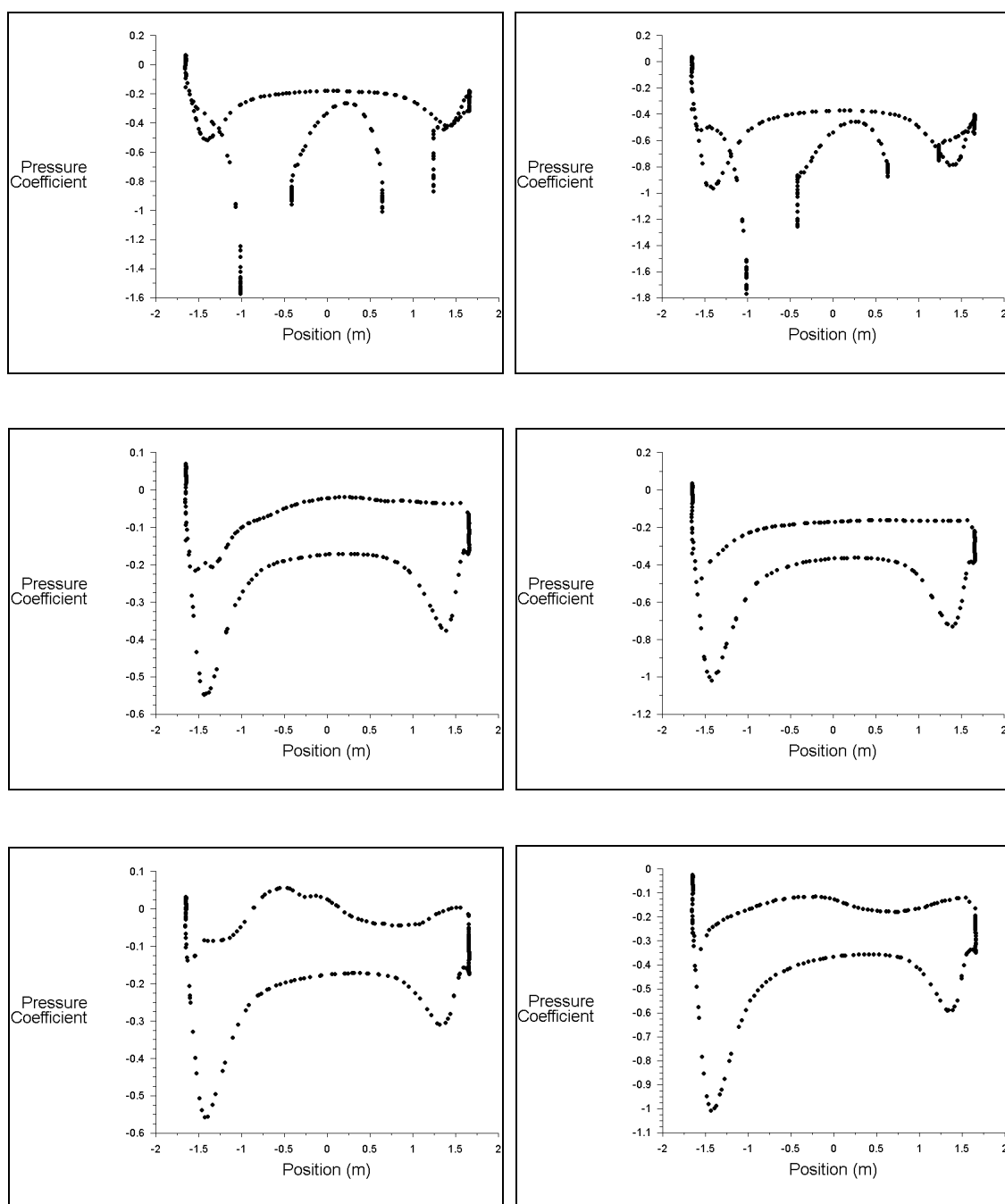
Слика 5.48 Контуре тоталног притиска, брзине и вртложности у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 75° за обе конфигурације гла



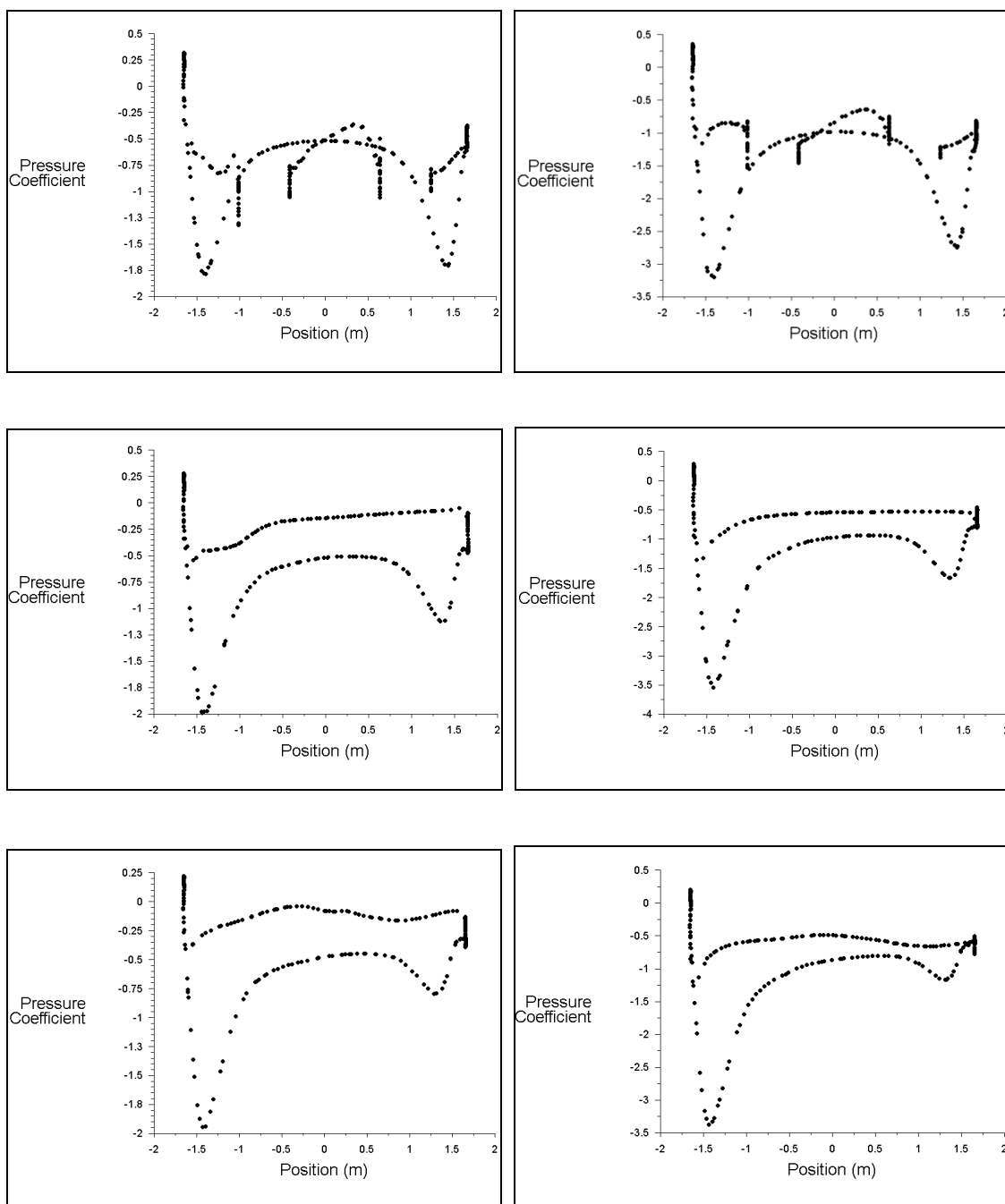
Слика 5.49 Контуре тоталног притиска, брзине и вртложности у попречним равнинама удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 90° за обе конфигурације тла



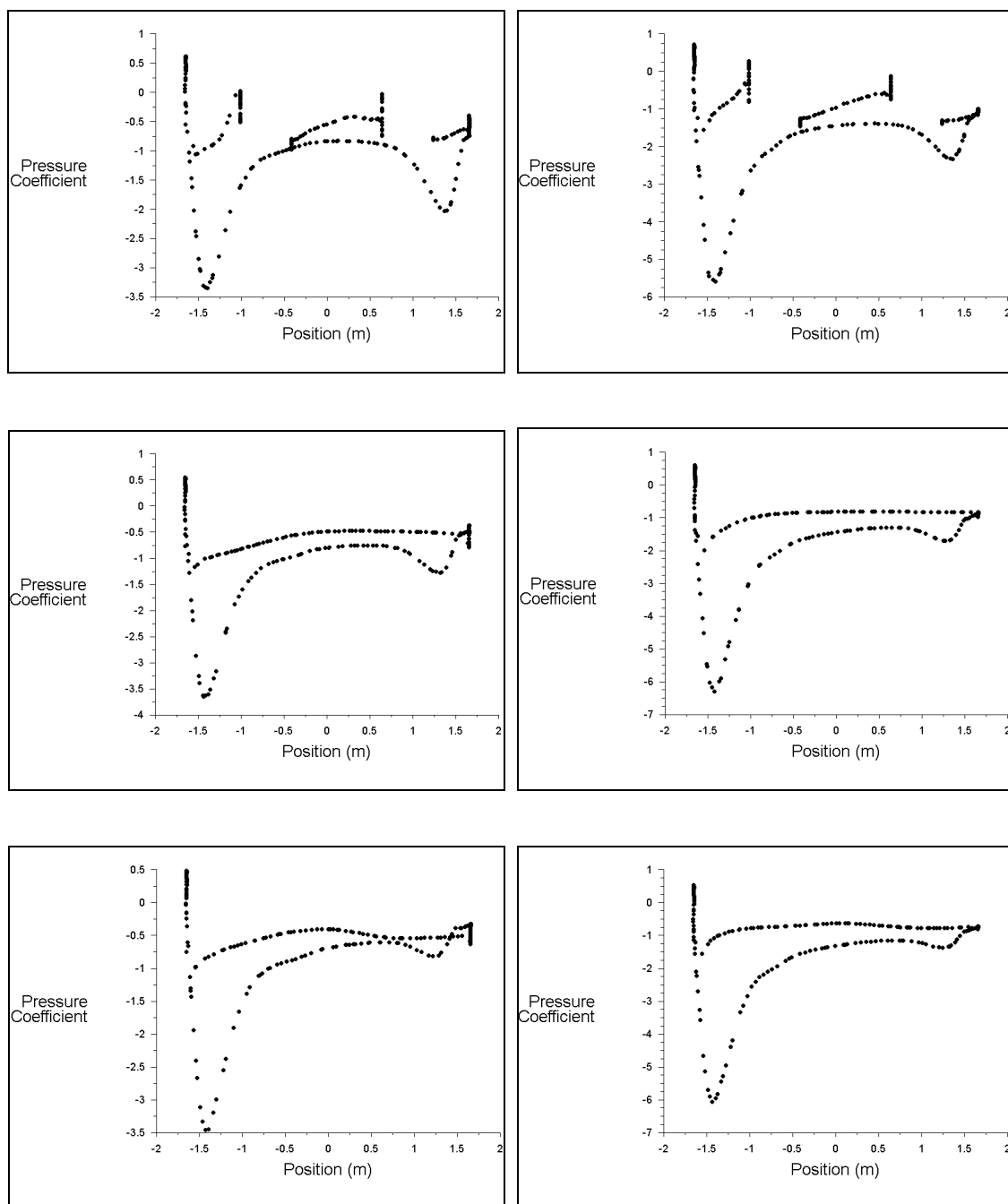
Слика 5.50 Коефицијент притиска у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 0° за равно тло (лево) и насип (десно)



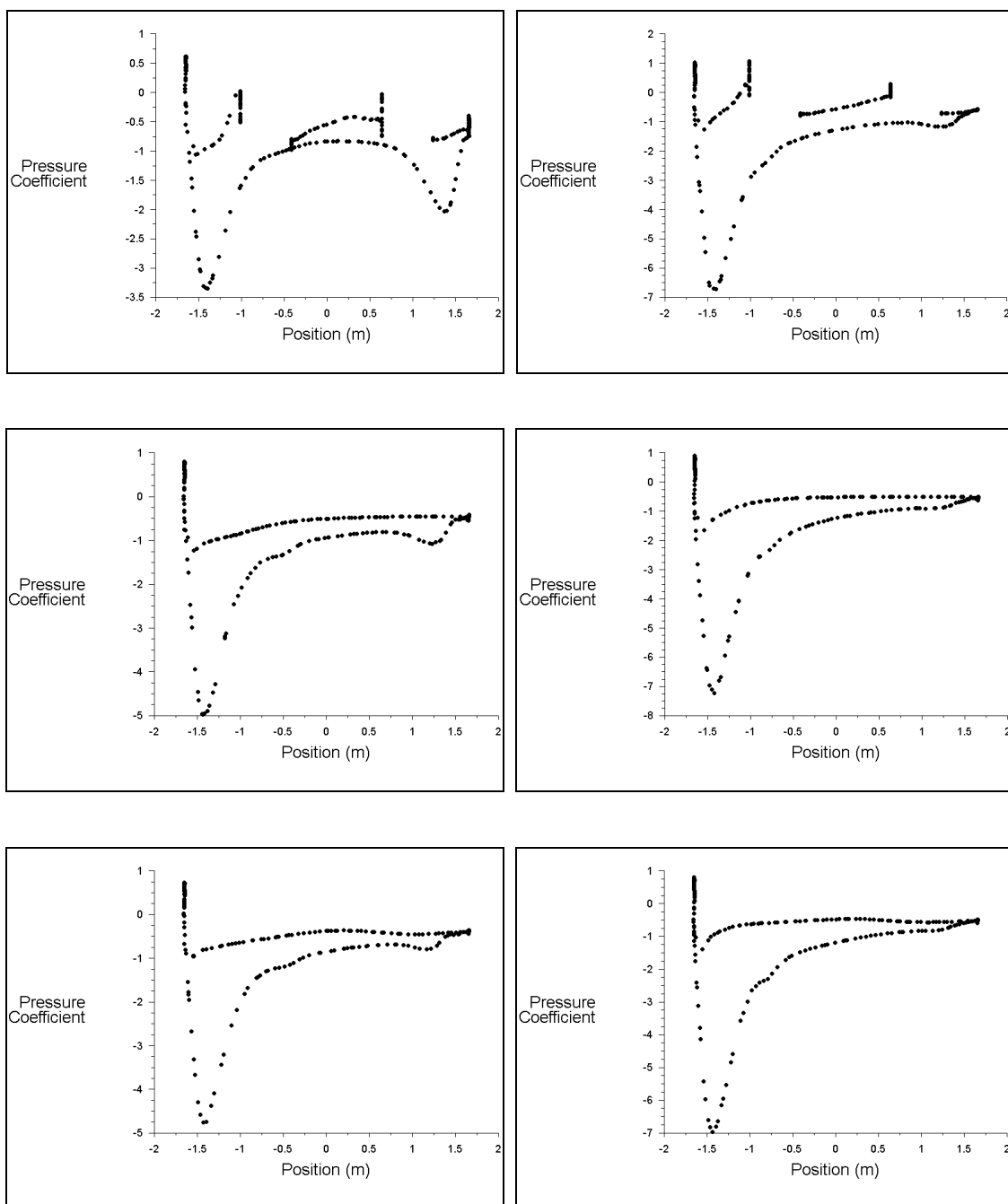
Слика 5.51 Коэффициент притиска у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 15° за равно тло (лево) и насип (десно)



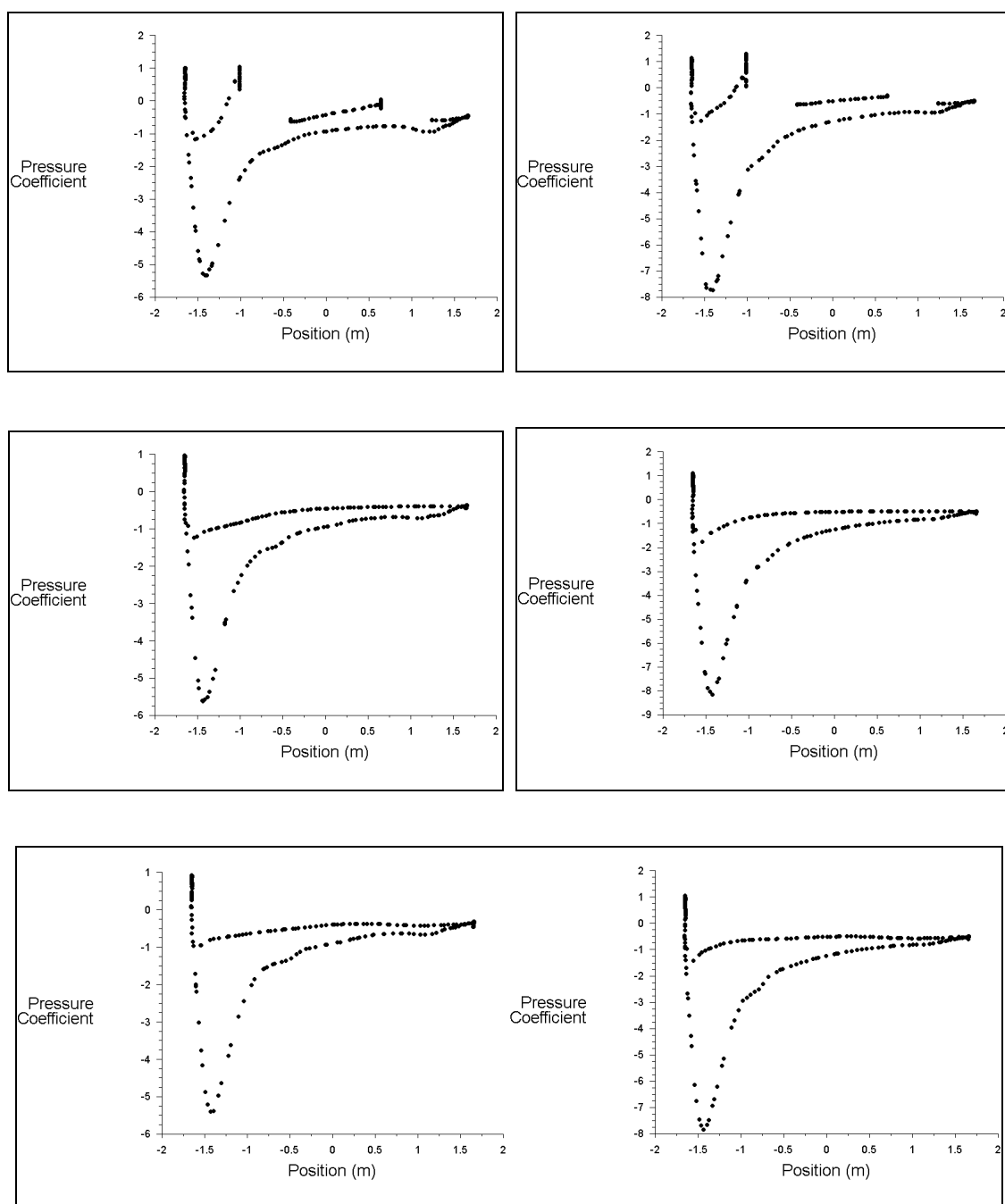
Слика 5.52 Коэффициент притиска у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 30° за равно тло (лево) и насип (десно)



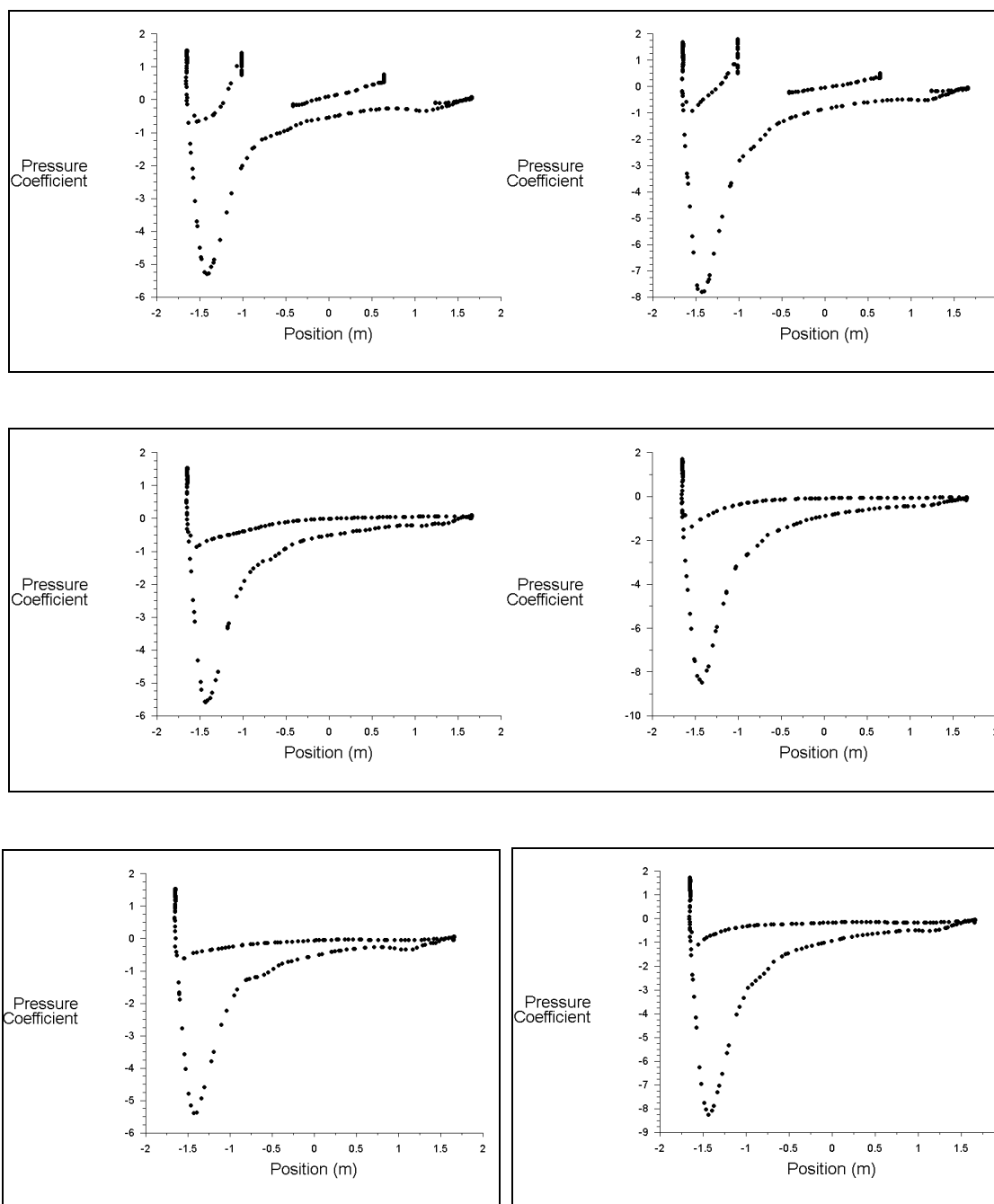
Слика 5.53 Коефицијент притиска у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 45° за равно тло (лево) и насип (десно)



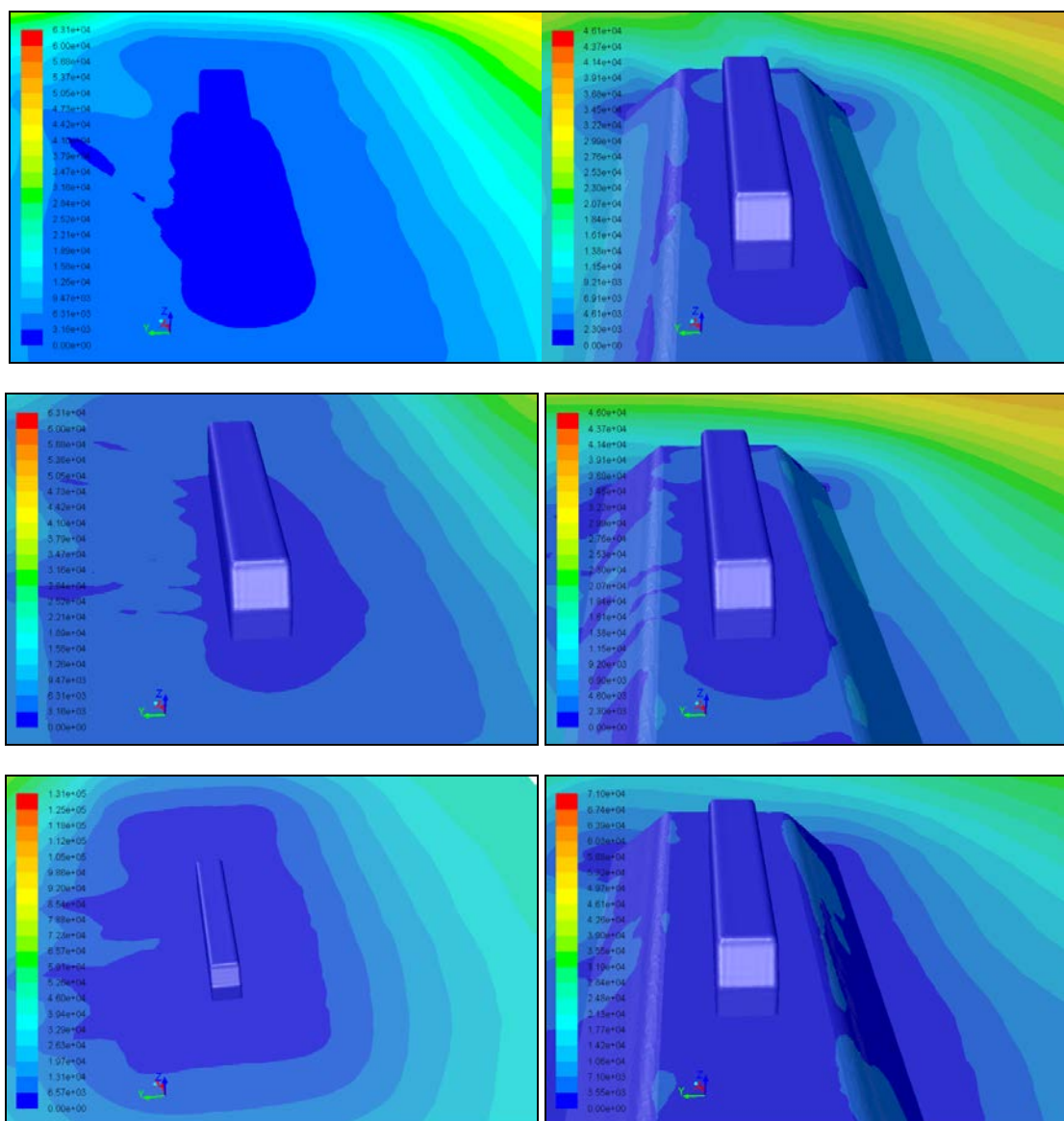
Слика 5.54 Коэффициент притиска у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 60° за равно тло (лево) и насип (десно)



Слика 5.55 Коefицијент притиска у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 75° за равно тло (лево) и насип (десно)



Слика 5.56 Коэффициент притиска у попречним равнима удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза при углу скретања 90° за равно тло (лево) и насип (десно)



Слика 5.57 Бездимензиона удаљеност од зида по површини воза и тла за углове скретања 30° , 60° и 90° за равно тло (лево) и насип (десно)

Глава 6

Прорачун критичне брзине ветра за превртање

6.1 Увод

У циљу одређивања вероватноће превртања потребно је обухватити велики број различитих утицаја као што су: аеродинамичке и инерцијалне карактеристике возила, тежина, начин ослањања возила, брзина кретања и висинске разлике шина у коловозу, распоред вагона у композицији, аеродинамичке карактеристике суседних возила, топографија трасе, надморска висине трасе, локална висина трасе у односу на ниво терена, пролазак преко мостова, вијадуката, усека и насипа, ружа ветрова и начин анализе дејства ветра у временском домену, утицај буре, итд. Први корак у дефинисању критеријума сигурности је одређивање аеродинамичких особина шинског возила [35].

Аеродинамичка карактеризација водећег вагона путничког воза "DF4D" извршена је у претходним поглављима. У овом поглављу представљена је методологија одређивања критичне брзине ветра (v_{w-int}) при којој долази до превртања возила. У овом раду критична брзина ветра је она брзина при којој долази до потпуног растерећења точкава на страни возила на коју ветар делује, када се возило креће без терета максималном пројектованом радном брзином и праволинијском путањом.

6.2 Методологија прорачуна критичне брзине ветра за превртање

Критична брзина ветра за превртање дефинише, за одговарајуће радне услове, силу ветра (односно брзину ветра) која ће довести до превртања возила [63, 64 и 65]. Када су тачкови на страни возила која је изложена дејству ветра потпуно растерећени, аеродинамички моменат ваљања ($M_{(roll,lee)}$) уравнотежен је резултујућим моментом услед тежине возила (M_G). Прорачун критичне брзине ветра за превртање (v_{w-int}) врши се када је $M_{(roll,lee)} = M_G$. Момент ваљања индукован аеродинамичким силама односно аеродинамички момент ваљања рачуна се по једначини:

$$M_{(roll,lee)} = \frac{1}{2} \rho v_{rel}^2 A h C_{M(roll,lee)} \beta \quad (6.1)$$

где је h средња висина крова воза у односу на осовину точка која се користи за одређивање аеродинамичког момент ваљања око шине у заветрини током нумеричких симулација и/или експеримената у аеротунелу, A је површина оквашене стране возила, v_{rel} је резултантна брзина ветра у односу на воз, ρ је густина ваздуха а $C_{M(roll,lee)}$ је аеродинамички коефицијент ваљања око шине у заветрини.

Уравнотежавајући момент услед тежине возила M_G може се одредити следећим изразом:

$$M_G = m g b_A - M_0 \quad (6.2)$$

где је

$$m = m_0 + m_1 + m_2, \quad (6.3)$$

а момент услед латералног померања и обртања

$$M_0 = g (m_0 y_0 + m_1 y_1 + m_2 y_2). \quad (6.4)$$

У једначинама 6.3 и 6.4 m је маса празног возила (kg), g је убрзање земљине теже ($9.81 m/s^2$), b_A је полуразмах точка у односу на тачку контакта са шинама, M_0 је момент превртања услед латералних померања и обртања тачке вешања под

дејством оптерећења од ветра узимајући у обзир и евентуалну тежинску асиметрију возила (kg), m_0 је неовешена маса (kg), y_0 је латерално померање неовешене масе (m), m_1 је примарна овешена маса (kg), y_1 је латерално померање примарне овешене масе у односу на осу шина (m), m_2 је секундарна овешена маса, y_2 је латерално померање секундарне овешене масе услед било које удаљености тежишта због ваљања и/или асиметрије у односу на осу шина (m).

При разматрању услова превртања ($M_{(roll,lee)} = M_G$), једначина 64 може се трансформисати тако да се одреди резултантна брзина ветра у односу на воз као:

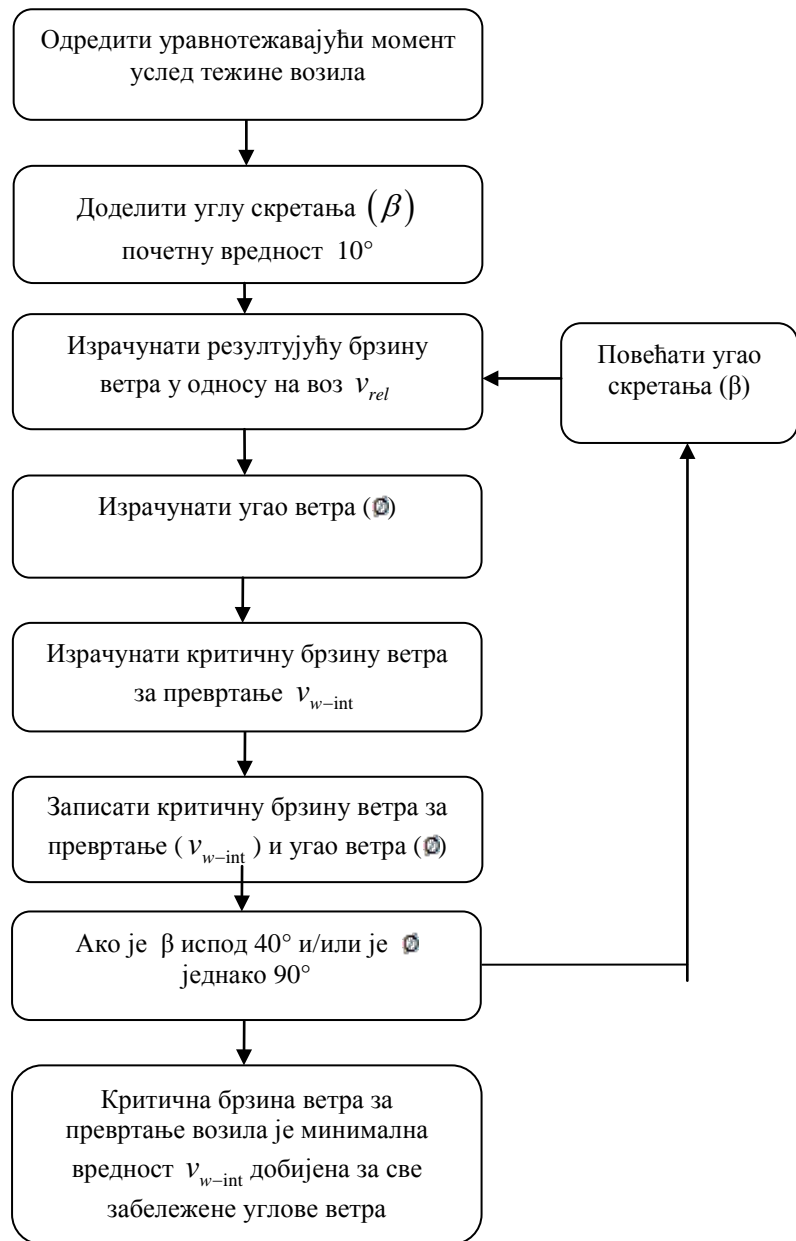
$$v_{rel} = \sqrt{\frac{M_G}{0.5 \rho A h C_{M(roll,lee)}(\beta)}}, \quad (6.5)$$

Користећи слику 4.2, угао ветра (\varnothing) и критичне брзине ветра за превртање (v_{w-int}) могу се изразити као:

$$\varnothing = \tan^{-1} \left(\frac{v_{rel} \sin(\beta)}{v_{rel} \cos(\beta) - v_{tr}} \right), \quad (6.6)$$

$$v_{w-int} = \frac{v_{rel} \sin(\beta)}{\sin(\varnothing)}, \quad (6.7)$$

Поступак се састоји од решавања једначина 68-70 за цео опсег углова скретања (β) од 10° до 40° (што обухвата опсег угла ветра од 30° до 90°) и бележења добијених вредности критичне брзине ветра за превртање (v_{w-int}) за угао ветра (\varnothing) и угао скретања (β) у свакој итерацији. Из скупа свих израчунатих критичних брзина ветра за превртање за различите углове ветра, минимална добијена вредност је критичних брзина ветра за превртање возила. Алгоритам на слици 6.1. илуструје процес добијања критичне брзине ветра за превртање возила.

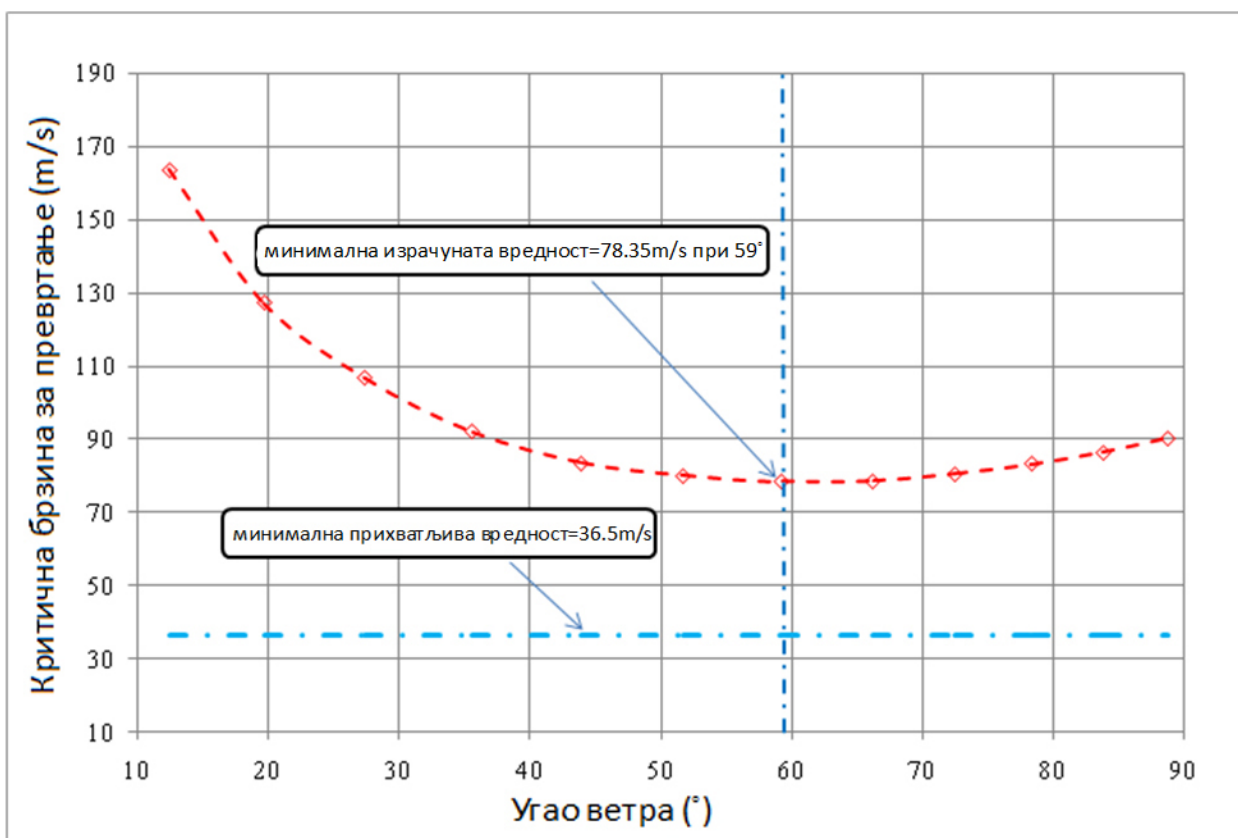


Слика.6.1 Алгоритам за израчунавање критичне брзине ветра за превртање возила

У циљу валидације предложене методологије извршен је прорачун критичне брзине ветра за превртање (v_{w-int}) за водећи вагон DF4D путничког воза за различите вредности угла скретања приликом кретања преко равног терена и насипа високог 6m. За потребе прорачуна коришћени су срачунати коефицијент

аеродинамичког момента ваљања око шине у заветрини, маса празног возила која износи (125,191kg) и максимална пројектована радна брзина возила (145km/h).

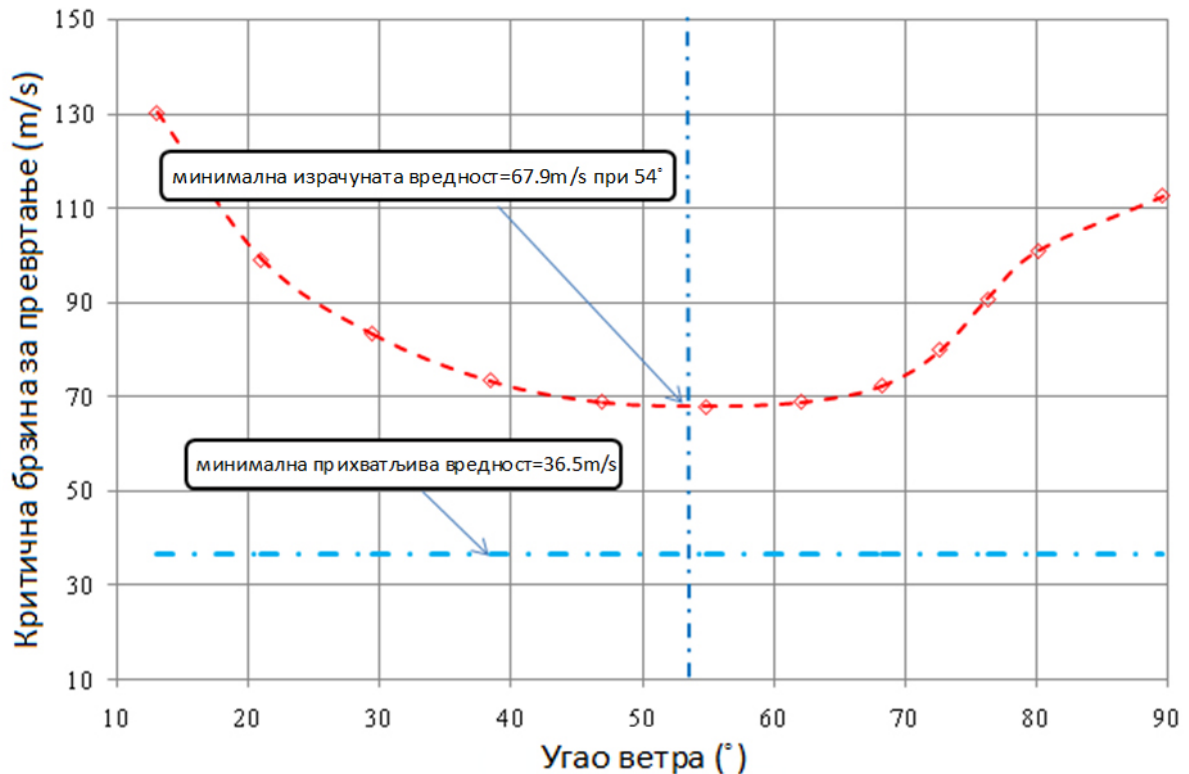
Уравнотежавајући момент услед тежине возила срачунат је коришћењем једначине 65, уз претпоставку да су моменти превртања услед латералног померања и обртања тачке вешања једнаки нули. Затим, израчунате су вредности резултантне брзине ветра у односу на воз (v_{rel}), угла ветра (\varnothing) и критична брзине ветра за превртање (v_{w-int}) коришћењем једначина 68, 69 и 70 за цео опсег углова скретања (β). Срачунате вредности критичне брзине ветра за превртање (v_{w-int}) у зависности од угла ветра (φ) су приказане на дијаграму на слици 6.2 за случај равног терена и на слици 6.3 за случај проласка преко насипа.



Слика 6.2 - Графички приказ срачунате минималне критичне брзине ветра за превртање возила за случај преласка преко равног терена

На слици 6.2 види се да се минимална критична брзина ветра за превртање од 78.35m/s јавља при углу ветра (\varnothing) од 59.29° за возило које се креће преко равног терена, односно, 67.9m/s при углу ветра (\varnothing) од 54° за случај кретања преко

насипа, редом. Угао при коме се јавља минимална критична брзина ветра за превртање називају се 'углови ветра у најгорем случају'.



Слика 6.3 - Графички приказ срачунате минималне критичне брзине ветра за превртање возила за случај преласка преко насипа

Британска железница (The British Railway Group) је стандардом утврдила безбедоносни критеријум како би се минимизирао ризик од превртања возила при дејству ветра. Вредност критичне брзине ветра за превртање (v_{w-int}) за празно возило у композицији које се креће максималном радном брзином преко равнотерена и праволинијском путањом не сме бити мања од 36.5m/s за возила предвиђена за превоз људи (укључујући путнике и посаду) [63-65]. Односно, срачуната вредност минималне критичне брзине ветра за превртање (v_{w-int}) мора бити већа од прописаног минимума (36.5m/s). У разматраном случају возило испуњава услове овог стандарда будући да је срачуната минимална брзина ветра за превртање (v_{w-int}) у оба случаја, кретања по равном терену и преко насипа, изнад стандардом дефинисаног минимума од 36.5m/s. Ипак, услед тежине

разматраног возила (већа маса локомотиве), срачуната критичне брзина ветра за превртање (v_{w-int}) у оба случаја је прилично висока.

Глава 7

Закључак

У овом раду, утицај високог насипа на аеродинамичко оптерећење водећег вагона у композицији уобичајеног путничког воза под дејством снажних бочних ветрова је нумерички испитано. Модел воза који се користио за нумеричке примере је DF4D путнички воз кинеске производње, а који ће се користити на железничкој траси Етиопија-Џибути. У нумеричким симулацијама коришћене се нестационарне RANS методе у спрези са турбулентним моделима за оба разматрана случаја - кретања преко равног терена и кретања преко насипа. Приликом вршења нумеричких експеримената разматран је стационарни модел водећег вагона DF4D воза који је изложен јаком константном бочном ветру брзине 40 m/s при интервалу резултујућих углова скретања (β) од 0° до 90° за случајеве кретања по равном терену и преко 6m високог насипа. Рејнолдсов број срачунат за релативну брзину воза и ваздуха и ширину модела воза износи $1.33 \cdot 10^7$.

К- ϵ турбулентни модел са неуравнотеженом функцијом зида коришћен је за све симулације разматраног модела. Прорачунска мрежа формирана је коришћењем конформног метода са тетраедарским поддоменима. Извршено је одговарајуће уситњење мреже на површинама воза, упрошћеним ослонцима воза и околним областима, такође, моделовање граничног слоја ба површини воза извршено је довољним бројем елемената како би се обезбедило да вредности y^+ буду у валидном опсегу за разматране карактеристике струјања и изабрани турбулентни модел. Прорачунска мрежа састоји се од 3,100,234 елемената.

Брзина струјања на улазу у прорачунску област износи 40m/s. На површини воза и тлу су задати услови не клизања, односно брзина струјања на овим површинама је једнака нули. Симетрични гранични услови су коришћени на

бочним и горњој страни прорачунске области. На излазу, постављен је Нојманом гранични услов, односно градијент притиска једнак је нули. Интензитет турбуленције на улазу и дужинска размера износе редом 3% и 0.3m док су на излазу интензитет турбуленције и дужинска размера једнаке 5% и 1. На тлу и чврстим зидовима, неравнотежне функције зида коришћене су како би се одредиле величина турбуленције на граници.

За све разматране конфигурације терена, аеродинамички коефицијенти сила и момената су срачунати за углове скретања у опсегу од 0° до 90° и упоређени са експерименталним и/или нумеричким студијама сличних модела возова. Одређена је зависност структуре струјања од угла скретања. Природа струјног поља и његових структура детаљно су визуелизовани одговарајућим приказом струјница, вектора брзина, вртложних линија, расподеле статичког и тоталног притиска по попречном пресеку возила.

Коначно, извршен је прорачун критичне брзине ветра за превртање, односно брзине ветра која доводи до стопроцентног растерећења точкава на шини у заветрини воза, коришћењем коефицијента аеродинамичког момента ваљања око шине у заветрини добијеног нумеричким (CFD) прорачуном за случај кретања празног воза максималном брзином по равном терену или преко насипа.

Циљ ове студије је скретање пажње Етиопијске железничке корпорације на значај утицаја бочног ветра на стабилност возила, односно на неопходност његовог разматрања у смислу безбедности и укључивање у националне стандарде. Такође, овом тезом настоји се скренути пажња на неопходност даљих истраживања утицаја бочних ветрова на стабилност возова приликом саобраћања етиопијским железничким коридорима, будући да је ова проблематика уско везана за локалну конфигурацију терена и климатске услове. Етиопијска железничка корпорације треба да поседује стандард који прописује конструктивне услове и захтеве за одржавање шинских возила како би се осигурала прихватљива отпорност на превртање у условима дејства екстремно јаких ветрова.

Истраживање у оквиру ове тезе, показано је да геометрија инфраструктурних елемената железничког коридора утиче на аеродинамичке карактеристике шинских возила. Поређењем аеродинамичких коефицијената добијених за случај кретања по равном терену или преко 6m високог нагиба, може се приметити да су

срачунати аеродинамички коефициенти за случај кретања по равном терену значајно мањи него у случају кретања по насипу. Најзначајнији параметар у смислу бочне стабилности при дејству ветра је аеродинамички коефицијент момента ваљања око шине у заветрини $C_{M(rol,lee)}$. Резултати истраживања показују да аеродинамички коефицијент момента ваљања око шине у заветрини расте са повећањем угла скретања до вредности од сса. 60° (у случају равнотерена) односно сса. 45° (у случају насипа) пре него што крене да опада и/или почне да се понаша асимптотски. У поређењу са конфигурацијом равнотерена долази до пораста вредности максималног аеродинамичког коефицијента момента ваљања око шине у заветрини од 8.8% услед утицаја насипа.

Природа струјног поља визуелизована је детаљним приказом струјница, вектора вртложности, јачине вектора вртложности, расподеле статичког и тоталног притиска по попречним пресецима воза удаљеним 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза. У области струјног поља у близини воза и насипа, очекивани контраротирајући вртлози дуж стране воза у заветрини могу се приметити за обе конфигурације терена заједно са још једним вртлогом ниже на насипу. Ово је у складу са сликом 1.6, а сличан тренд примећен је и у стручној литератури. За велике углове скретања, велика зона одвајања струјања, односно област сниженог притиска јавља се на страни воза у заветрини. У случају када нема бочног ветра (угао скретања износи 0°), струјање је симетрично. За углове скретања веће од 0° , долази до стварања више вртлога на страни у заветрини. Рециркулациона област проузрокована вртложним струјањем јавља се на површини воза, а потом се полако удаљава од површине воза са развитком вртложног трага. До одвајања струјања долази и на горњој и на доњој ивици стране у заветрини. Пораст јачине ротирајућег вртлога на страни у заветрини са порастом угла скретања доводи до стварања области сниженог притиска на страни воза у заветрини узрокујући тако велике бочне силе и моменте. Уопштено, повећање угла скретања доводи до повћања стварања и распада вртлога на страни воза у заветрини и ова појава је више изражена у случају кретања преко насипа у односу на кретање по равном терену.

Аеродинамичке силе које делују на воз јављају се услед разлике притисака између различитих области око воза. У циљу стицања увида у структуру струјања

извршена је анализа расподеле притиска око насипа и воза. Расподела статичког и тоталног притиска око попречних пресека воза удаљених 5.2m, 10.55m и 15.9m од носа воза израчуната је за интервал углова скретања од 0° до 90°. При 0° расподела притиска на страни воза изложеној дејству ветра и на страни у заветрини су сасвим исти, па су и бочна сила и момент ваљања занемарљиви и за случај равнотерена и за случај насипа. Са порастом угла скретања типични вртложни траг ниског притиска јавља се иза воза у правцу кретања. Сличан тренд примећен је и у стручној литератури. На приказима расподеле статичког притиска уочљиво је да су бочна страна у заветрини и доња и горња страна воза области ниског притиска. На страни у заветрини, негативан притисак јавља се услед постојања ротирајућег вртлога (тзв. делта вртлога) и има већу јачину у случају насипа него у случају равнотерена. Како се и очекује, страна воза изложена дејству ветра је област повишеног притиска што повећава бочну силу и момент ваљања.

Коначно, извршен је прорачун критичне брзине ветра за превртање (v_{w-int}) за водећи вагон DF4D воза за различите вредности углова скретања, коришћењем коефицијента аеродинамичког момента ваљања око шине у заветрини, масе празног возила и максималне радне брзине за случај кретања по равном терену или преко насипа. Резултати показују да се минимална критична брзина ветра за превртање од 78.35m/s јавља при углу дувања ветра од 59.29° за случај кретања по равном терену односно 67.9m/s при углу дувања ветра од 54° у случају кретања преко насипа. Ови углови називају се "углови ветра у најнеповољнијем случају".

Разматрано возило дакле испуњава овај услов будући да је срачуната минимална критична брзина ветра за превртање (v_{w-int}) и за случај кретања по равном терену и преко насипа довољно изнад минималне вредности која износи 36.5m/s. Ипак, ако се узме у обзир разматрана тежина возила, срачуната критична брзина ветра за превртање (v_{w-int}) делује прилично висока.

Уопштено, у овој тези је презентована методологија и резултати CFD симулација упрошћеног модела DF4D путничког воза у условима јаког бочног ветра, при различитим угловима скретања за случај непокретне земље. Аеродинамички подаци добијени овим истраживањем могу се користити за

поређење са будућим истраживањима као што је утицај турбуленције у бочном ветру на аеродинамичке карактеристике DF4D воза приликом кретања по терену са повишеним ризиком од превртања као што су насипи и вијадукти. У циљу даљег повећања поузданости симулација препоручује се да се у будућим експерименталним и нумеричким истраживањима утицаја високих насипа и вијадуката на аеродинамичко оптерећење воза приликом дејства јаког бочног ветра користи реалистичнији модел DF4D воза.

Циљ ове студије је скретање пажње Етиопијске железничке корпорације на значај утицаја бочног ветра на стабилност возила, односно на неопходност његовог разматрања у смислу безбедности и укључивање у националне стандарде. Такође, овом тезом настоји се скренути пажња на неопходност даљих истраживања утицаја бочних ветрова на стабилност возова приликом саобраћања етиопијским железничким коридорима. Етиопијска железничка корпорације треба да поседује стандард који прописује конструктивне услове и захтеве за одржавање шинских возила како би се осигурала прихватљива отпорност на превртање у условима дејства екстремно јаких ветрова. Како би се постигао овај циљ, препоручује се детаљно истраживање топологије и карактеристика ветра дуж железничких коридора у земљи. Када се одреди максимална референтна јачина буре на железничкој мрежи, биће могуће нумерички и експериментално одредити аеродинамичке карактеристике возила који саобраћају на коридорима за различите конфигурације терена. Препоручује се да будућа истраживања на експерименталном и нумеричком начину одређивања утицаја високих насипа или вијадуката на аеродинамичка оптерећења буду вршена на реалистичнијем моделу DF4D воза.

Литература

- [1] Lewis, M. J.T.: Railways in the Greek and Roman world, Retrieved 02 September 2014.
- [2] Wikipedians.: History of Rail Transport in Great Britain, Retrieved 02 September 2014.
- [3] Zhou, L. and Shen, Z.: Progress in high-speed train technology around the world, Journal of Modern Transportation, Vol. 19, No.1, pp. 1-6, 2011.
- [4] Rodrigue, J., Comtois, C., Slack, B.: The Geography of Transport systems, Routledge Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- [5] EuDaly, K., Schafer, M., Boyd, J., Jossip, S., McBride, A., Glischinski, S.: The Complete Book of North American Railroading, Voyageur Press, 2009.
- [6] Ken Gwilliam K.M.: Africa's transport Infrastructure Mainstreaming Maintenance and Management, The World Bank, Washington, D.C., 2001
- [7] Union of African Railway (UAR), Rail development in Africa: takes and perspectives, objectives and missions of the African rail union, First African Union Conference of African ministers responsible for railway transport, Brazzaville, Republic of Congo, April, 2006
- [8] Alfred, I.: in the Encyclopedia Athiopica, Vol. 3, pp. 120 ff. Accessed 17 Mar 2014.
- [9] Jean-Pierre C.: The Franco-Ethiopian and Djibouti-Ethiopian Railway History, 2013, [Last Accessed 1 September 2014].
- [10] Admasu, S., Söderbomb, M., Sibac, E., and Alemud, G.: Road Infrastructure and Enterprise Development in Ethiopia, International Growth Centre London School of Economics and Political Science, London, September 2012.
- [11] The Federal Democratic Republic of Ethiopia, Ministry of Finance and Economic Development (MoFED), Growth and Transformation Plan (GTP)-2010/11-2014/15, Addis Ababa, September 2010,
- [12] Henze, B.: Layers of Time, C. Hurst & Co. Ltd., London, 2000.
- [13] Elisa, M. (Ed.) and Hoefener, L. (Ed.): Aerodynamics in the open air (AOA), WP2 Cross Wind Issues, Final Report, Paris, 2008.
- [14] Diedrichs, B.: Aerodynamic calculations of cross wind stability of a high-speed train using control volumes of arbitrary polyhedral shape, in the VI International

- Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications (BBAA), 20-24.07.2008, Milan.
- [15] Carrarini, A.: Reliability based analysis of the crosswind stability of railway vehicles, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* Vol. 95, pp.493-509, 2007.
- [16] Kwon, H., Park, Y., Lee, D. and Kim, M.: Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 1179–1195, 2001.
- [17] Baker, C.J.: The wind tunnel determination of crosswind forces and moments on a high speed train, *Notes on Numerical Fluid Mechanics*, Vol. 79, pp. 46–60, 2002.
- [18] Boccione, M., Cheli, F., Corradi, R., Diana, G. and Tomasini, G.: Wind tunnel tests for the identification of the aerodynamic forces on rail vehicles, in the XI ICWE-International Conference on Wind Engineering, 2-5.06.2003, Lubbock.
- [19] Orellano, A. and Schober, M.: Aerodynamic Performance of a Typical High-Speed Train, in the Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, 21-23.08.2006, Elounda, pp.18-25.
- [20] Cheli, F., Corradi, R., Rocchi, D., Tomasini, G. and Maestrini, E.: Wind tunnel test on train scaled models to investigate the effect of infrastructure scenario, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.98, pp.353-362, 2010.
- [21] Cheli, F., Ripamonti, F., Rocchi, D. and Tomasini, G.: Aerodynamic behaviour investigation of the new EMUV250 train to cross wind, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* Vol. 98, pp. 189-201, 2010.
- [22] Krajnovic, S., Ringqvist, P., Nakade, K. and Basara, B.: Large eddy simulation of the flow around a simplified train moving through a crosswind flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.110, pp.86-99, 2012.
- [23] Guilmineau, E., Chikhaoui, O., Deng, G. and Visonneau, M.: Cross wind effects on a simplified car model by a DES approach, *Computers & Fluids* Vol.78, pp. 29–40, 2013
- [24] Baker, C.J.: Measurements of the cross wind forces on trains, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 92, pp. 547-563, 2004.
- [25] Suzuki, M., Tanemoto K., Maeda, T.: Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* Vol.

- 91, pp. 209-218, 2003.
- [26] Blakeney, A.: Resistance of railway vehicles to roll-over in gales, Railway group standard, Safety & Standards Directorate, Railtrack PLC, London, 2000.
- [27] Mancini, G., Cheli, R., Roberti, R., Diana, G., Cheli F., Tomasini, G.: Cross-wind aerodynamic forces on rail vehicles wind tunnel experimental tests and numerical dynamic analysis, in the Proceedings of the World Congress on Railway Research, 28.09-01.10.2003, Edinburgh.
- [28] DB Netz AG: Ril 80704: Aerodynamik/ Seitenwind, DB Netz AG, Frankfurt a.M., 2006. (in German).
- [29] EC.TSI-Technical Specification for Interoperability of the trans-European high speed rail system. European Law, Official Journal of the European Communities, 2006.
- [30] CEN: EN 14067-6: 2010 Railway applications Aerodynamics Part 6: Requirements and test procedures for crosswind assessment, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 2010.
- [31] Peters, J.L.: How to Reduce the Cross Wind Sensitivity of Trains, Siemens Transportation Systems, Muenchen, Germany, 1990.
- [32] Thomas, D.: Lateral Stability of High-Speed Trains at Unsteady Crosswind, Licentiate Thesis in Railway Technology, Stockholm, Sweden, 2009.
- [33] Shao, X., Wan, J., Chen D., Xiong H.: Aerodynamic modeling and stability analysis of a high-speed train under strong rain and crosswind conditions, Journal of Zhejiang University-Science A, 2011 12(12):964-970
- [34] Burrage, K.: Resistance of railway vehicles to overturning in gales. Safety & Standards Directorate, Railway Technical Centre, London, 1994.
- [35] Bocciolone, M., Cheli, F., Corradi, R., Muggiasca, S., Tomasini, G.: Crosswind action on rail vehicles: Wind tunnel experimental analyses, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, pp.584-610, 2008.
- [36] Davidson, L.: An introduction Turbulence Models, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Sweden, 2011.
- [37] Baker, C.: A review of train aerodynamics Part 1-Fundamentals', The Aeronautical Journal, Vol. 118, No. 1201, 2014.
- [38] Khier, W., Breuer, M. and Durst, F.: Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study, Computers & Fluids, Vol.29, pp. 179-195, 2000.

- [39] Han, Y., Steve C. S., Chen, Z., Hu, J., Li, C.: Wind tunnel measurements of aerodynamic forces on vehicles and bridges under crosswinds, the Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7) Shanghai, China, 2012.
- [40] Schober, M., Weise, M., Orellano, A., Deeg, P., Wetzel, W.: Wind tunnel investigation of an ICE 3 end car on three standard ground scenarios, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98 (2010) 345-352.
- [41] Versteeg, H.K., Malalasekera, W.: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Pearson Education Limited, England, 2007.
- [42] Wendt, J.F.: *Computational Fluid Mechanics: An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, Germany.
- [43] Anderson, J.D.: *Governing Equations of Fluid Dynamics*, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution, Washington, United states, 2004.
- [44] Currie, I.G.: *Fundamental mechanics of fluids*, McGraw-Hill, United States of America, 1974.
- [45] Blazek, J.: *Computational Fluid dynamics: Principles and applications*, Elsevier Science Ltd, 2001.
- [46] Davidson, P.A.: *Turbulence, an introduction for scientists and engineers*, Oxford University Press, 2005.
- [47] Wolfshtein, M.: Some comments on turbulence modelling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier Ltd, 2009.
- [48] Wilcox, D.C., "Turbulence Modelling for CFD, DCW Industries, 2006,
- [49] Schlichting, H. and Gersten, K.: *Boundary layer theory*, Springer-Verlag, 1999.
- [50] Celik, I.B.: *Introductory Turbulence Modeling, Lecture Notes*, West Virginia University, Morgantown, 1999.
- [51] Wilcox, D.C.: *Turbulence Modeling for CFD, Second edition*. Anaheim: DCW Industries, pp. 174, 1998.
- [52] Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J.: *Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development*, NASA Technical Memorandum 110446, 1997.
- [53] Jones, W. P., Launder, B.E.: The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 301-314, 1972.

- [54] Bredberg, J.: On the Wall Boundary Condition for Turbulence Models, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2000.
- [55] Stephen, B.P.: Turbulent Flows, 1st Ed., Cambridge University Press, 2000.
- [56] Schlichting, H., Gersten, K.: Boundary layer theory, 8th Ed., Springer-Verlag Berlin, 2000.
- [57] Kim, S.E., Choudhury, D.: A Near-Wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient. In ASME FED Vol. 217, Separated and Complex Flows. ASME, 1995.
- [58] Kim, S.E., Choudhury, D., Patel, B.: Computations of Complex Turbulent Flows Using the Commercial Code FLUENT, In Proceedings of the ICASE/LaRC/AFOSR Symposium on Modeling Complex Turbulent Flows, Hampton, Virginia, 1997.
- [59] Hemida, H.N., Large-Eddy Simulation of the Flow around Simplified High-Speed Trains under Side Wind Conditions, Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering in Thermodynamics and Fluid Mechanics, Department of Applied Mechanics Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2006.
- [60] Versteeg, H.K., Malalasekera, W.: An introduction to Computational Fluid Dynamics, 2nd ed. Essex: Pearson Education Limited, 2007.
- [61] Heine Ch. and Matschke G., "The influence of the nose shape of high speed trains on the aerodynamic coefficient, Deutsche Bahn AG, Research and Technology Centre, Voelcker strasse 5, D-80939 Munich, Germany.
- [62] Diedrichs, B.: Computational Methods for Crosswind Stability of Railway Trains, Literature Survey, Report No.: ISSN: 1651-7660, Stockholm, 2005.
- [63] Boocock, C.P.: Resistance of Railway Vehicles to Derailment and Roll-Over, Safety & Standards Directorate, Railtrack PLC, London, 1995.
- [64] Walter, M.H.: "Resistance of Railway Vehicles to Derailment and Roll-Over", Safety & Standards Directorate, Railtrack PLC, London, 1998.
- [65] Rolling Stock Standards Committee (RSSB): Resistance of Railway Vehicles to Roll-Over in Gales, Rail Safety and Standards Board Limited, London, 2009.

Биографија

- Име и презиме:** Mulugeta Biadgo Asress
- Датум рођења:** 12. 06. 1983.
- Место рођења:** Секота, Етиопија
- Школовање:**
- 2001.-2006.: Bachelor Degree study, Addis Ababa University, Technology Faculty, Department of Mechanical Engineering
 - 2007.-2009.: M.Sc Degree study, Addis Ababa University, Technology Faculty, Department of Mechanical Engineering
 - 2010.-2014.: Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду
- Пословно искуство:**
- 2006.-2007.: Sheraton Addis Expansion Project, MEDROC-Ethiopia, Addis Ababa, Ethiopia
 - 2007.-2009.: Part time lecturer in Addis Ababa University, Technology Faculty, Department of Mechanical Engineering
 - 2009.- Lecturer and head of the Department Mechanical Engineering, Debre Markos University, Debre Markos, Ethiopia

Референце:

- [1] **Asress M.B.**, Svorcan J. Numerical investigation on the aerodynamic characteristics of high-speed train under turbulent crosswind, Journal of Modern Transportation, 2014, <http://dx.doi.org/10.1007/s40534-014-0058-7>
- [2] **Asress M.B.**, Simonovic A., Svorcan J., Stupar S. Aerodynamic Characteristics of High Speed Train under Turbulent Cross Winds: a Numerical Investigation using Unsteady-RANS Method, (2014), vol. 42, br.1, str. 10-18
http://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol42/1/02_abiadgo.pdf
- [3] **Asress M.B.**, Simonovic A., Komarov D., Stupar S. Wind energy resource development in Ethiopia as an alternative energy resource beyond the dominant hydropower. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2013), vol. 23, str. 366-378, IF 5.510, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.047>
- [4] **Asress M.B.**, Simonovic A., Komarov D., Stupar S. Wind energy resource development in Ethiopia as an alternative energy resource beyond the dominant hydropower. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2013), vol. 23, str. 366-378, IF 5.510
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.047>
- [5] **Asress M.B.**, Simonović A., Trivković S. Svorcan J. Design and performance of HAWT Blades, Proceedings of 38th JUPITER CONFERENCE, str 2.68-2.73, May 2012

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани Mulugeta Biadgo Asress

број индекса D12/11

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

УТИЦАЈ ПОПРЕЧНОГ СТРУЈАЊА НА АЕРОДИНАМИЧКА ОПТЕРЕЋЕЊА ПУТНИЧКОГ ВОЗА ЗА РАЗЛИЧИТЕ КОНФИГУРАЦИЈЕ ТЛА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 27.4.2015.



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Mulugeta Biadgo Asress

Број индекса D12/11

Студијски програм Докторске академске студије

Наслов рада Утицај попречног струјања на аеродинамичка оптерећења путничког
воза за различите конфигурације тла

Ментор проф. др Александар Симоновић

Потписани Mulugeta Biadgo Asress

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 27.04.2015



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Утицај попречног струјања на аеродинамичка оптерећења путничког воза за различите конфигурације тла

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

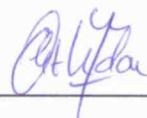
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 27.04.2015.



1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.