

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Сузана Љ. Линић

**БИОМИМИКРИЈА КАО МЕТОД
АЕРОДИНАМИЧКОГ ДИЗАЈНИРАЊА
ВОЗА ВЕЛИКИХ БРЗИНА**

Докторска дисертација

Београд, 2018.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Suzana Lj. Linić

**BIOMIMICRY AS A METHOD OF THE
HIGH-SPEED TRAIN AERODYNAMICAL
DESIGNING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018.

Ментори

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

др Мирко Козић, научни саветник,
Војнотехнички институт – Београд

Чланови комисије

др Александар Бенгин, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Марко Милош, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Јован Танасковић, доцент,
Универзитет у Београду, Машински факултет

Датум одбране

ЗАХВАЛНОСТ

Ова докторска дисертација је резултат мултидисциплинарних истраживања изведених кроз пројектне активности у различитим обласима. Захваљујем се Министарству за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије на финансијској помоћи коју је пружило кроз пројекте технолошког развоја ев. бр. ТР 35045, ТР 34028 и ТР 14018 као и Министарству културе и информисања Републике Србије које је финансијски подржало научноистраживачки пројекат „Истраживање могућности коришћења фотограметрије за прецизно дефинисање геометрије музејских експоната комплексних облика на примеру узорка водомара Природњачког музеја Београд“.

Захваљујем се менторима др Војкану Лучанину, редовном професору, Универзитет у Београду, Машински факултет и др Мирку Козићу, научном саветнику, Војнотехнички институт у Београду, на вишегодишњој подршци и помоћи, пруженој мотивацији, пренетом знању и искуству из широких области шинских возила, теоријске и прорачунске механике флуида. Кроз динамичну дискусију са конструктивним саветима и прецизним примедбама су ме усмеравали током рада и без њих представљено мултидисциплинарно истраживање не би било успешно изведено.

Желим да изразим захвалност институцијама и организацијама које су такође помогле и подржале истраживања из ове докторске дисертације

- Универзитету у Београду, Машинском факултету,
- Универзитету у Београду, Иновационом центру Машинског факултета,
- Универзитету у Београду, Институту за хемију, технологију и металургију, ИХТМ, у Београду,
- Војнотехничком институту, ВТИ, у Београду,
- Институту Гоша д.о.о.,
- Природњачком музеју у Београду и
- Централном институту за конзервацију, ЦИК, у Београду.

За помоћ, вредне савете и усмеравање у области бионике се захваљујем др Бошку Рашуо, редовном професору, Универзитет у Београду, Машински факултет. На помоћи и подршци у раду и стицању нових практичних искустава захваљујем др Борису Катавићу, вишем научном сараднику, Институт Гоша д.о.о., и др Борету Јегдићу, вишем научном сараднику, Универзитет у Београду, ИХТМ у Београду.

Захваљујем се дугогодишњој колегиници и сарадници др Славици Ристић, научном саветнику, на великој подршци и помоћи у раду и истраживању. Њени вредни савети су у многоме помогли квалитету рада кроз истраживање. Такође, стекла сам нова знања и вештине из научних области која ми нису биле блиске по опредељењу, посебно оптике, микроскопије, термографије и различитих савремених метода мерења и визуелизације струјања. Њен позитиван став и педагошки приступ у многоме су ми помогли да сведем размишљања и фокусирам се на суштину истраживачког проблема.

За сво стрпљење, разумевање и динамичну размену мишљења, кроз скоро четрдесетогодишњу сарадњу, још од када сам била само средњошколац, захваљујем се Николи Мркаљу, дипл. инж. Уз њега је рад у аеротунелу био и остао за мене право задовољство и ван професионалног оквира, док ме је

пренетим знањем и конструктивним саветима, о аеротунелским и сродним испитивањима, подржао у радозналости и сталном трагању за новим изазовима и погледима на проблеме.

Колегама и дугогодишњим сарадницима из ВТИ-а др Зорану Анастасијевићу, вишем научном сараднику, др Душану Турчићу, научном сараднику, др Горану Оцокољићу, научном сараднику, др Срђану Живковићу, научном сараднику, и Драгану Маринковски, дипл. инж. захваљујем на новим знањима и искуству, помоћи, техничкој подршци и вредним саветима током реализације истраживања у Аеродинамичким лабораторијама ВТИ-а у Жаркову.

За стечена основна знања из аеродинамике и аеротунелских испитивања возова захваљујем дугогодишњој колегиници и сарадници др Мирјани Пухарић, вишем научном сараднику, Универзитет у Београду, Иновациони центар Технолошко-металуршког факултета у Београду. За израду прелиминарних нумеричких симулација струјања око возова и прва знања у овој области захваљујем се Душану Матићу, дипл. инж. брод.

Захваљујем се на помоћи у истраживању и пренетом знању о животу и понашању водомара, које је од суштинског значаја за ово истраживање, Марку Раковићу, истраживачу сараднику, кустосу орнитологу у Природњачком музеју у Београду.

За помоћ и вредне савете, извођење фотограметријских и микроскопских испитивања захваљујем се др Сузани Полић, вишем научном сараднику, Централни институт за конзервацију у Београду.

Захвална сам Полу Соверу (Paul Sawyer), уметничком фотографу и издавачкој кући Солент (Solent), путем сајта Дејли Мејл, који су одобрили коришћење ауторских уметничких фотографија водомара из природе за ово истраживање.

За помоћ и подршку у извођењу дела активности захваљујем и компанијама:

- Hexagon Metrology - Србија, Крагујевац,
- Алмег, Београд,
- Compact Line д.о.о. и Центрохем д.о.о., Београд.

За израду нумеричког модела водомара фотограметријском методом и нова знања захваљујем се Марку Алексићу, дипл. арх., ЦИК, а Владимиру Ивановићу, Hexagon Metrology–Србија, за ласерско скенирање. За израду везних делова модела захваљујем Стеви Вукмировићу, дипл. инж. Алмег. Захваљујем се колегиницама и сарадницама из Иновационог центра Машинског факултета Универзитета у Београду, др Ивани Васовић, научном сараднику, за изведене симулације оптерећења структуре у прелиминарним испитивањима и Бојани Радојковић, истраживачу сараднику, на помоћи у извођењу микроскопских испитивања. За техничку подршку и помоћ у испитивањима металографским микроскопом захваљујем Милораду Кочићу, дипл. инж., истраживачу сараднику, и Славиши Ђурђевићу, дипл. инж. из Института Гоша. За донацију олеинске киселине, за потребе визуелизација, захваљујем компанијама Compact Line д.о.о. и Центрохем д.о.о.

Посебну захвалност изражавам својој породици на подршци и разумевању током година истраживања, а посебно Славену Линићу, дипл. инж. и Михајлу Линићу који су помогли при извођењу хидродинамичких испитивања и обради података из нумеричких симулација.

„БИОМИМИКРИЈА КАО МЕТОД АЕРОДИНАМИЧКОГ ДИЗАЈНИРАЊА ВОЗА ВЕЛИКИХ БРЗИНА“

Резиме

Шински транспорт, у односу на остале, иступио је у врх према критеријумима брзине и исплативости услуга. Повећање брзине је условило аеродинамичко дизајнирање возова, ради испуњења захтева енергетске ефикасности, потрошње, заштите животне околине, исплативости и др. Међутим, процес аеродинамичке оптимизације, варирањем параметара и услова, се показао дуготрајаним и скупим. Циљ овог истраживања је да се оптимизује процес дизајнирања, смање време и трошкови у почетној фази развоја прототипа. Мотивација је проистекла од воза Шинкансен, Јапан, био-инспирираног кљуном водомара. Биомимикрију као методу за аеродинамичко дизајнирање воза великих брзина чине биомимикрија облика, комбинована метода за одређивање сличности струјања, у 2D, и потом дизајнирање и испитивање бионичког 3D воза. Биомимикрију облика чине избор, испитивање облика и понашање јединки, са посебном пажњом на водомара, и примена на бионичке возове. Комбинована метода дефинише зависност параметара дизајна од услова струјања, испитивањем слободне површине воде двофазног струјања око 2D водомара, уз анализу сличности струјања око воза налик водомару. Нумеричка испитивања различитих бионичких 2D возова и конфигурација су употребљена за сужавање избора облика параметара дизајна. Стандардна и термографска испитивања у аеротунелу референтног бионичког воза су верификовала нумеричку методу и описала струјно поље у присуству тла. Бионички 3D воз је испитан нумерички, са клизним мрежама, у проласку кроз тунел. Анализа резултата је потврдила оправданост примене методе биомимикрије и 3D бионички дизајн кроз усклађеност облика са изабраним изведеним дизајнима и усклађеност изабраних параметара струјања са референтним испитивањима, током уласка носа воза у тунел. Био-инспириран дизајн воза је погодан за даљи процес оптимизације, док метода биомимикрије отвара нове могућности за истраживања.

Кључне речи: воз за велике брзине, аеродинамика, бионика, биомимикрија, прорачунска динамика флуида, хидродинамика, аеротунел, дизајн

Научна област: техничко – технолошке науке,
грана машинско инжењерство.

Ужа научна област: аеродинамика шинских превозних средстава.

УДК број: 629.4.016.56 : 533.6 : 658.512.2(043.3)
629.4.016.56 : 532.51 : 519.87(043.3)

„BIOMIMICRY AS A METHOD OF THE HIGH SPEED TRAIN AERODYNAMICAL DESIGNING“

Abstract

The rail transport, in relation to the others, step-out to the top considering criteria of velocity and economy of the service. The increase of the running velocity requested the train aerodinamical designing, for accomplishing the requests of energy efficiency and consumption, environmental protection, economy , etc. However, the process of the aerodynamic optimization, by varying the parameters and conditions, has been longlasting and expensive process. The goal of this research is optimization of the designing process, reduction in time and expenses, in the early phase of the prototype development. The motivation was found in train Shinkansen, Japan, bio-inspired with the beak of the kingfisher. The biomimicry as a method for aerodinamical designing of the high-speed train consists of the biomimicry of natural shapes, combined method for determining of the flow similarity, in 2D, and than designing and observation of the bionic 3D train. Biomimicry of the shape consists of the selection, observations of the shape and behavior of species in nature, as well as the application on the bionic trains, with the special interests to the kingfisher. The combined method set the relation between the design parameters and the flow conditions, by observations of the free water surfaces two-phase flow around the 2D kingfisher, with the analyze of the flow similarity with the kingfisher-like train design. The numerical investigations of different bionic 2D trains and their configurations were used to narrow the selection of the design parameters. Standard and thermographic experiments in the wind tunnel of the referent bionic train were used for verification of the numerical method, and for describing of the flow field affected by the ground model. The bionic 3D train was observed numerically, using the sliding meshes, passing the tunnel. The analyse of the results was justified application of the biomimicry method and 3D bionic design, through the compliement of the bionic 3D design with the selected designs in operation, and correspondence of the flow parameters with referent cases, during the train nose entering the tunnel. Bio-inspired design of the train is convenient for the future optimization process, while the biomimicry method opened the new possibilities for the research.

Key words: high-speed train, aerodynamics, bionics, biomimicry, computational fluid dynamic, hydrodynamics, wind tunnel, design

Scientific field: Technical science, Mechanical engineering branch

Scientific subfield: Aerodynamics of the rail vehicles.

UDK: 629.4.016.56 : 533.6 : 658.512.2(043.3)
629.4.016.56 : 532.51 : 519.87(043.3)

Садржај

Резиме	vi
Abstract	vii
Ознаке	xii
Скраћенице	xvi
1. УВОД	1
1.1. Образложење теме	1
1.2. Образложење наслова теме докторске дисертације	4
1.3. Научни проблем и предмет истраживања	5
1.4. Циљ рада	6
1.5. Циљеви и објекат истраживања	7
1.6. Хипотезе	9
1.7. Научне методе истраживања	9
1.8. Методологија истраживања	12
1.9. Значај истраживања	13
1.10. Структура докторске дисертације	16
2. ГЕНЕЗА ИСТРАЖИВАЊА	22
3. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ	39
3.1. Испитивање облика и квалитета објеката	39
3.1.1. Фотограметријско одређивање облика и површинске текстуре	40
3.1.2. Просторно ласерско испитивање облика објеката –Ласерско 3D скенирање	41
3.1.3. Микроскопија	45
3.1.4. Мерење храпавости	47
3.2. Биомимикрија – биологија у примени	48
3.3. Изводи из теорије механике флуида	49
3.3.1. Закони одржања и једначине транспорта	50

3.3.1.1. Једначина континуитета _____	52
3.3.1.2. Једначина промене количине кретања _____	52
3.3.1.3. Једначина енергије _____	53
3.3.1.4. Једначине транспорта _____	53
3.3.1.5. Општа једначина транспорта _____	55
3.4. Основе решавања струјних проблема применом CFD _____	56
3.4.1. Општи принцип дискретизације скалара и решења _____	56
3.4.1.1. Просторна дискретизација _____	57
3.4.1.2. Дискретизација простора – мреже _____	57
3.4.1.3. Просторна дискретизација за променљиве величине _____	60
3.4.2. Временска дискретизација _____	61
3.4.3. Одређивање градијената и дериватива _____	61
3.4.4. Пакети за решавање једначина транспорта (солвери) _____	62
3.4.4.1. Притисни солвер _____	62
3.4.4.2. Густински солвер _____	64
3.4.5. Моделовање турбуленције струјања _____	66
3.4.5.1. НСЈ усредњене према Рејнолдсовом моделу _____	67
3.4.5.2. Почетни и гранични услови _____	71
3.4.6. Мултифазно струјање _____	74
3.4.7. Модел запреминских удела фаза – VOF _____	74
3.4.7.1. Једначина запреминског удела фаза _____	75
3.4.7.2. Интерполација у близини граничне површине раздвајања фаза _____	76
3.4.8. Клизне мреже _____	77
3.4.9. Динамичке – деформабилне мреже _____	77
3.4.10. Хидрауличка аналогија _____	79
3.5. Термографско мерење површинске термпературске расподеле _____	81
3.5.1. Основни појмови из термографије _____	82
3.5.2. Пренос топлоте у граничном слоју _____	88
3.6. Аеродинамичка испитивања _____	91
3.6.1. Визуелизација струјања у аеротунелу _____	93
3.7. Хидродинамичка испитивња _____	93
3.8. Закључак _____	93
4. ИЗБОР И ИСПИТИВАЊЕ БИОЛОШКИХ УЗОРАКА _____	95
4.1. Морске животиње _____	95
4.2. Водомар _____	96
4.2.1. Креирање и анализа фото-документације као улазних података за биомимикрију _____	97
4.2.2. Реконструкција бионичког модела водомара у маневру обрушавања – зарањање _____	98

4.2.3. Визуелни преглед _____	100
4.2.4. Испитивања водомара микроскопом _____	101
4.2.5. 3D скенирање водомара _____	104
4.2.6. Фотограметријско испитивање водомара _____	106
4.2.7. Мерење храпавости кљуна водомара _____	108
4.3. Тумачење резултата _____	112
4.4. Закључак _____	113
5. БИОМЕХАНИКА ВОДОМАРА ПРИ МАНЕВРУ ОБРУШАВАЊЕ – ЗАРАЊАЊЕ _____	114
5.1. Закључак _____	119
6. БИОНИЧКИ 2D ВОЗ ВЕЛИКИХ БРЗИНА _____	120
6.1. Геометрија 2D ВНСТ _____	120
6.2. Резултати нумеричких испитивања 2D ВНСТ _____	121
6.3. Тумачење резултата _____	125
6.4. Закључак _____	130
7. КОМБИНОВАНА МЕТОДА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ СЛИЧНОСТИ СТРУЈАЊА _____	131
7.1. Хидродинамички експеримент _____	132
7.1.1. Резултати хидродинамичких испитивања бионичког водомара _____	134
7.1.2. Тумачење резултата хидродинамичких испитивања _____	135
7.1.3. Закључак _____	138
7.2. Нумеричко - хидродинамичка испитивања модела водомара при зарањању у воду _____	139
7.2.1. Верификација нумеричких симулација _____	145
7.2.2. Тумачење резултата верификације _____	146
7.2.3. Резултати нумеричких симулација _____	148
7.2.4. Тумачење резултата нумеричких симулација _____	153
7.3. Критеријум избора услова испитивања и геометријских параметара модела _____	158
7.4. Начин формирања таласа _____	160
7.5. Сличности струјања флуида око водомара и ВНСТ _____	161
7.6. Закључак _____	167
8. БИОНИЧКИ 3D ВОЗ ВЕЛИКИХ БРЗИНА _____	169
8.1. Прелиминарна нумеричка испитивања воза за велике брзине _____	169

8.2. Аеротунелска испитивања SHST	169
8.2.1. Резултати испитивања	178
8.2.2. Тумачење резултата	180
8.2.3. Закључак	181
8.3. Нумеричке симулације за VHST у проласку кроз тунел	183
8.3.1. Резултати испитивања 3D VHST у проласку кроз тунел	190
8.3.2. Тумачење резултата	194
8.3.3. Закључак	199
9. ЗАКЉУЧЦИ	201
9.1. Нова научна информација	208
9.2. Отворена подручја истраживања	211
9.3. Вредновање рада	212
10. ЛИТЕРАТУРА	217
11. ПРИЛОЗИ	233
ПРИЛОГ 1.	234
ПРИЛОГ 2.	244
ПРИЛОГ 3.	264
ПРИЛОГ 4.	267
ПРИЛОГ 5.	269
ПРИЛОГ 6.	271
ПРИЛОГ 7.	274
ПРИЛОГ 8.	281
ПРИЛОГ 9.	292
ПРИЛОГ 10.	299
ПРИЛОГ 11.	306

ОЗНАКЕ

A	Површина попречног пресека [m^2]
A/A_{max}	Нормализована вредност површине попречног пресека [-]
a	Брзина звука [m/s]
α	Коефицијент апсорпције [-]
b	Размах крила [m]
c	Брзина таласа [m/s]
c_p	Коефицијент притиска [-]
c_x	Коефицијент отпора [-]
c_z	Коефицијент узгона [-]
c_y	Коефицијент бочне силе [-]
c_l	Коефицијент момента ваљања [-]
c_m	Коефицијент момента пропињања [-]
c_n	Коефицијент момента скретања [-]
c_f	Коефицијент површинског трења [-]
D	Дијаметар [m]
D	Растојање од окулара до детектора камере [m]
D'	Хидраулички дијаметар попречног пресека воза [m]
E	Енергија [J]
E_q	Енергија једне струјне фазе [J]
E_{black}	Емитована енергија идеално црног тела [W/m^2]
e	Висина неравнина стварног профила [m]
ϵ	Коефицијент емисије [-]
Fr	Фрудов број [-]
F_p	Сила потиска [N]
f_{obj}	Жижна даљина објектива [m]
f_{okul}	Жижна даљина окулара [m]
FT	Протекло време од почетка догађаја [s]

G	Тежина тела [N]
g	Убрзање земљине теже [m/s^2]
h	Коефицијент преноса топлоте конвекцијом [$W/m^2/K$]
H	Висина модела воза [m]
K_s	Калибар пешчаног зрна [m]
k	Термална кондуктивност-проводљивост тела [$W/m/K$]
k_f	Термална кондуктивност-проводљивост флуида [$W/m/K$]
L	Репрезентативна дужина модела, дужина носа воза [m]
l	Референтна дужина модела или воза, средња аеродинамичка тетива крила [m]
M	Укупно увеличање микроскопа [-]
M_{obj}	Увеличање објектива [-]
M_{okul}	Увеличање окулара [-]
M	Махов број струјања [-]
M_x	Момент ваљања [Nm]
M_y	Момент пропињања [Nm]
M_z	Момент скретања [Nm]
\dot{m}_{pq}	масени проток из фазе у фазу [kg/s]
Pr	Прандтлов број [-]
p	Статички притисак [Pa]
p°	Стагнациони притисак [Pa]
q	Динамички притисак [Pa]
\dot{q}_{kond}	Топлотни флуks при трансферу путем кондукције [W/m^2]
\dot{q}_{konv}	Топлотни флуks при трансферу путем конвекције [W/m^2]
Re	Рејнолдсов број струјања [-]
R	Гасна константа, $R = 287,156 J/K/kg$;
Ra	Профилна храпавост површине [m]
R	Резултантна аеродинамичка или хидродинамичка сила [N]
R_x	Сила аеродинамичког отпора [N]
R_y	Бочна сила [N]
R_z	Сила узгона [N]

R	Запречавање железничког тунела [-]
S	Референтна површина модела [m ²]
S	Контролна површина [m ²]
t	Време [s]
TS	Временски корак [s]
T	Температура [K]
TI	Интензитет турбуленције [%]
TF	Фактор турбуленције струје [-]
t	Коефицијент транспаренције [-]
u, v, w	Компоненте вектора брзине у x , y и z правцима [m/s]
u_τ	Брзина услед трења [m/s]
U_{obj}	Излазни сигнал са ИЦ камере [V]
U^T	Укупни измерени сигнал [V]
U_{refl}, U_{atm}	Теоријски излазни сигнали добијени калибрацијом термокамере за црно тело [V]
V	Брзина струјања [m/s]
V_0	Упадна брзина, брзина зарањања при додиру са водом [m/s]
\mathcal{V}	Контролна запремина [m ³]
x, y, z	Правци Декартовог координатног система
x/L	Нормализована дужина профила [-]
X/X_{max}	Нормализовано растојање изабраног пресека [-]
y^+	Бездимензионално вертикално растојање од зида
y/H	Нормализован калибар или висина профила (2-Д) [-]
z	Дубина воде [m]
z	Одступање од номиналног профила [m]
α	Нападни угао модела [°]
α	Отклон ласерског уређаја [°]
α	Степен попуњеност контролне запремине струјном фазом [-]
δ_T	Висина температурског граничног слоја [m]
δ_V	Висина брзинског (струјног) граничног слоја [m]
Δ	Запремина (воде или ваздуха) у природном окружењу [m ³]

θ	Угао обрушавања или зарањања [°]
κ	Однос специфичних топлота идеалног гаса [-]
λ	Таласна дужина [m]
λ'	Хидраулички коефицијент трења делова воза [-]
μ	Динамичка вискозност [Pa s]
ν	Кинематска вискозност [m ² /s]
ν'	Флуктуација брзине [m/s]
ρ	Густина ваздуха [kg/m ³]
σ	Стефан Болцманова константа $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$;
τ_w, τ_{yx}	Напони трења на зиду [N/m ²]
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	Компоненте угаоне брзине [rad/s]

СКРАЋЕНИЦЕ

Скраћеница	Енглески	Српски
1D		Једнодимензионални простор
2D		Двостранционални простор
3D		Тространционални простор
6DOF	Six-Degrees of Freedom	Солвер шест степени слободe
<i>AC</i>		Аеродинамички центар
BHST	Bionic High-Speed Train	Био-инспирисан дизајна воза за велике брзине
CAD/	Computer Aided Designing /	Дизајнирање и производња
CAM	Computer Aided Machining	помоћу рачунара
CFD	Computational Fluid Dynamics	Прорачунска динамика флуида
<i>CB</i>		Центар силе потиска
<i>CG</i>		Центар гравитације
<i>CP</i>		Центар притиска
DNS	Direct Numerical Simulations	Директне нумеричке симулације
FMG	Full Multigrid	мулти – мрежна
GGNB	Green-Gauss Node-Based	срачунавање градијената по методи Грин-Гаус у чворовима
<i>HCD</i>		Тачка дејства резултујуће хидродинамичке силе
HST	High-Speed Train	Воз за велике брзине
HCJ		Навије – Стоксове једначине
ИЦТ		Инфрацрвена термографија
ИТ		Информационе технологије
LES	Large Eddies Simulations	
<i>MC</i>		Попречни метацентар

NEWF	Non-Equilibrium Wall Function	Неравнотежна функција зида
ПДЈ		Парцијална диференцијална једначина
PFF	Pressure Far Field	Далеко поље притиска
PO	Pressure Outlet	Излазни пресек – поље статичког притиска
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes	Навије-Стоксове једначине усредњене према Рејнолдсовом моделу
Roe-FDS	Roe Flux-Difference Splitting	
S-A	Spalart-Allmaras	Спаларт-Алмарас модел
ScLM	Scientific Lifecycle Management	Научно засновано управљање животним циклусом производа
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations	Семи-имплицитни метод решавања за једначине везане по притиску
SHST	Standard High-Speed Train	Референтни воз за велике брзине
UDF	User-Defined Functions	Корисничка функције
VOF	Volume of Fluid	Модел запреминских удела фаза

1. УВОД

1.1. Образложење теме

Излазећи у сусрет потребама савременог путничког саобраћаја за бржим, сигурнијим и економичнијим превозом, последњих деценија дошло је до наглог развоја возова за велике брзине и преузимања примата над осталим видовима саобраћаја према подацима Међународне уније железница из 2010.г. [1]. Извештаји Међународне уније железница [2,3] скрећу посебну пажњу на постојање потребе за унапређењем аеродинамичких карактеристика возова великих брзина. Такође, нека ранија иновативна решења су технолошки постала изводљива, али исто тако се појављују и нова решења, за која се ради технолошки развој, а која могу допринети повећавању брзине возова за велике брзине, уз приоритет на безбедности саобраћаја, очувања животне средине и енергетске ефикасности железничког транспорта са повећањем брзине, и то у областима:

- побољшања аеродинамичких карактеристика воза за велике брзине HST (High-Speed Train, HST), како приказују у прегледу Регунатхана и др.(Raghunathana и др.) у раду [4],
- унапређења система за погон, пренос снаге и кочење:
 - електричан погон нове генерације,
 - хидродинамички преносници нове генерације за возове са електричним погоном, како су представили Б. Давидовић и В. Лучанин у [5],
 - погон горивим ћелијама на основу истраживања нано-материјала, М. Давидовић и др. [6-8],
 - развој погона на бази соларне енергије;
 - развој аеродинамичких [9-13] и реверзбилних кочница и сл.

- анализе и унапређења постојећих система, како су навели А. Радосављевић и В. Лучанин у [14],
- испитивања безбедности у транспорту кроз мултидисциплинарна истраживања [13-15],
- изградње одговарајуће инфраструктуре (носеће потпоре, шина, тунела и др.), која такође има значајан утицај на аеродинамичке карактеристике HST, и која у неким случајевима има и двојачке улоге (као што је напр. полагање соларних панела на кровове надстрешница пруге и сл.),
- развоја различитих категорија железничког превоза (шинских и маглев) и возова за вакуумизирани тунеле – хиперлуп (Hyperloop) [16],
- прилагођења конструкције, увођење нових конструкционих материјала и превлака површина [17] ради смањења аеродинамичког отпора и нових технологија технологија производње, применом многих решења из ваздухопловне индустрије, али и традиционалног занатског умећа [18],
- очувања енергетских извора и животне околине.

Гарсиа (García) наводи поређење различитих видова транспорта по основу утрошка енергије и емисије гасова, при чему је истакнута предност транспорта возовима великих брзина на релацијама у трајању од око 2 сата као и оптимална брзина од 300 – 320 km/h, за конвенционалне HST [19]. Не мање значајан је и допринос увођења HST на друштво у целини, у смислу повећања фреквенције путовања и сигурности, што истиче и Економска анализа брзе железнице у Европи, иако се њен удео на тржишту није променио. Преузимање примата HST у односу на ваздушни саобраћај је поред техничких података подржано и субјективним мишљењем путника исказаним кроз анкете, прикупљене кроз ЕУ пројекат, COST 318 [20]. Економска анализа брзе железнице у Европи у закључку подвлачи да се одлука о инвестирању у брзе пруге у крајној инстанци доноси на основу жеља и потреба путника.

Регунатхана и др. [4] су приказали Буладонов критеријум могућности досезања максималних брзина појединих видова транспорта као и криву идеалне максималне брзине кретања на различитим путним дистанцама. Упоредни приказ

различитих врста транспорта према критеријуму утрошене енергије за транспорт јединице тежине по јединици брзине у функцији брзине кретања позиционирао је железнички саобраћај брзим пругама са предношћу над осталима, за област брзина од 250 – 500 km/h и дестинације од 100 до 2000 km. Транспорт HST и ваздушним путем, упоређени по истим критеријумима, показују да зависности утрошене снаге са брзином транспорта леже на истој правој, линији границе максималних достигнутих брзина транспорта за развијене технологије и методе оптимизације.

Брзи железнички саобраћај је релативно нова врста транспорта која је осим великих предности у пракси показала и неке од својих недостатака. Регунатхана и др. [4] сумирају да су недостаци у експлоатацији HST последица недовољно истражених феномена који се јављају при великим брзинама кретања. Са сврхом да се системски смање на најмању меру, недостаци које носи собом HST, а на основу бројних истраживања и искустава, уведени су стандарди од којих јапански постављају најстроже критеријуме [21]. Стандарди дају приоритет безбедности и заштити здравља људи.

Ургентни проблеми аеродинамике и аероакустике HST су међусобно уско зависни, а односе се на:

- безбедност путника и средстава, што су представили Лучанин и др. у раду [15],
- губитке услед струјања ваздуха око HST, који нарушавају енергетску ефикасност, као што приказују Пухарић и др. у раду [22],
- проблем заштите здравља и животне околине изазване неприхватљивим нивоом буке, као последице струјних појава при кретању воза кроз тунел, којима су посвећени радови Регунатхана и др. [4] и Бејкер и др. (Baker et al.) [23].

Научна тема ове докторске дисертације се бави решавањем проблема струјања, аеродинамиком воза за велике брзине, са тежњом да се направи још један корак даље и допринесе дугогодишњим напорима научне и инжењерске праксе ка стварању урбано-компромисног дизајна воза за велике брзине са тежњом да се поступак поједностави и тиме смање време и трошкови дизајнирања прототипа.

1.2. Образложење наслова теме докторске дисертације

Постојеће методе дизајнирања возова великих брзина примењују разноврсно заобљавање контура до вретенастог облика, док се аеродинамичка оптимизација спроводи у највећем броју примера статистички над великим бројем узорака који су обликовани изменама геометријског облика, односно, параметара дизајна.

Истраживања чији је део представљен у овом раду управо имају за циљ да помогну при обликовању полазног дизајна како би се процес аеродинамичке оптимизације који следи, а захтеван је по многим питањима од времена до ресурса, извео у смислу финих промена над обликом узорка.

Овај рад је мотивисан јединим примером биомимикрије, подражавања облика птице на воз, Шинкансен возом серије 500, Јапанске железнице. Како у литератури нису пронађени подаци о начину и методи примене биомимикрије на Шинкансен воз, то је био додатни мотив за истраживање.

Како аеродинамичка оптимизација воза за велике брзине представља скуп мултидисциплинарних активности, на релацији идејни дизајн – аеродинамичке карактеристике, у овом раду је представљен део активности које се тичу дефинисања, успостављања и спровођења једног циклуса аеродинамичког дизајнирања бионичког воза, полазног дизајна за даљи процес оптимизације облика према техничко-технолошким захтевима пројекта. Основни оквир циклуса дизајнирања, у овом истраживању, је заснован на научној дисциплини бионици како је описује Бар-Кохен (Bar-Cohen) у свом раду [24], а основна метода бионичког дизајнирања воза, како је представио Рапуо у књизи [25], за велике брзине је, у ужем смислу, биомимикрија. Биомимикрија представља научну методу прилагођавања природних облика или понашања јединки, или њихових скупина, према изабраним карактеристикама, за примену на производе или системе, ради побољшавања квалитета живота човека употребом производа или система [24]. Начин на који се врши прилагођавање понајвише зависи од нашег познавања и разумевања природног система који је изабран за примену.

Метода из теме овог рада представља нови начин приступа у решавању проблема аеродинамичког дизајнирања воза за велике брзине. Метода је заснована на биомимикрији – прилагођавању различитих животињских јединки и

примена на дизајн воза за велике брзине [26]. Осим прилагођавања облика дата је и процена оправданости био-инспирисаних дизајна воза за велике брзине VHST (Bionic high-speed train, VHST) за практичну примену при изабраним условима вожње. Биомимикрија као метода је, у конкретном случају, основа за дизајнирање оптималног облика воза за велике брзине у аеродинамичком смислу, али поред тога може се са великом сигурношћу рећи да је биомимикрија оптимизована метода дизајнирања и сама по себи.

У овом раду биомимикрија као метода је приказана у ширем смислу: то је уједно метода дизајнирања и метода оптимизације облика, но подразумева и процес верификација и евалуација резултата, у који су укључени различити алати као што су: нумеричко CAD моделирање, нумеричке методе, хидро– и аеродинамички експерименти и др..

1.3. Научни проблем и предмет истраживања

Уз чињеницу да остваривање великих погонских снага више није технолошки проблем, али њена ефикасна потрошња и те како јесте још увек, а под условом високог нивоа безбедности саобраћаја и очувања здравља, проблем и предмет ове дистертације представљају:

- успостављање методе аеродинамичког дизајнирања воза за велике брзине, применом биомимикрије [25], односно, прилагођење природних облика појединих животињских јединки и примена на дизајне HST тзв. био-инспирисане дизајне VHST.
- анализа дизајна био-инспирисаног воза за велике брзине и његове аеродинамичке карактеристике, у опсегу брзина до 500 km/h, при вожњи на отвореној прузи и при проласку кроз железнички тунел.

Објекат представља VHST конвенционалног типа, чисте конфигурације, са занемареним детаљима, како би се резултати истраживања могли потенцијално применити и на друге категорије железничког саобраћаја .

1.4. Циљ рада

Неопходност аеродинамичке оптимизације воза за велике брзине је препозната као ургентни проблем, када се разматра железнички саобраћај у урбаним срединама на међународном нивоу, и преузима једно од примарних места у развијеним друштвима. Методе аеродинамичке оптимизације, иако се у великом обиму данас обављају нумеричким путем поред експерименталног, и даље представљају дуготрајан и веома скуп процес праћен многим изазовима и компромисима.

Успостављање нове методе аеродинамичког дизајнирања возова за велике брзине биомимикријом, има за циљ у ширем смислу, успостављање и подстицање мултидисциплинарног приступа у решавању проблема како би се отворила нова могућност за истраживања и постизање боље ефикасности самог процеса дизајнирања. Мултидисциплинарни приступ подразумева укључивање различитих научних дисциплина у процес управљања животним циклусом производа, нарочито при конципирању дизајна, као што су бионика, биологија, хидродинамика, физика (оптика), термодинамика, херитологија и друге, које нису заступљене у садашњој пракси. Трансфер и освајање нових знања и искустава води ка поузданијој евалуацији решења.

Надаље, дугорочно посматрано, мултидисциплинарност у раду има за циљ стварање развојних тимова новог типа, а тиме и запошљавање стручњака из различитих области, омогућавање бољих позиција и конкурентност на тржишту. Друштвено-одговорни аспект рада има за циљ смањење утрошене погонске енергије и очување здравља људи, а што у крајњој инстанци тежи смањењу трошкова транспорта.

Увођење биомимикрије у процес дизајнирања возова за велике брзине има за циљ увођење нове научно засноване методе дизајнирања, чији је процес примене оптимизован, и која у крајњој инстанци, у процесу креирања прототипа, води ка скраћењу времена и трошкова креирања концепт дизајна, развој и производњу прототипа. Оптимизација процеса дизајнирања прототипа има за циљ повећање конкурентности на тржишту. Осим наведених, циљ успостављања методе на предложен начин је да буде универзална и применљива на друга транспортна средства или производе опште и посебне намене.

1.5. Циљеви и објекат истраживања

Истраживања из ове дисертације имају за научни циљ да:

- пружи нова сазнања и анализу животињаских облика у сврху примене биомимикрије, односно, био-инспирисаних дизајна на HST. Анализа дизајна различитих животиња са аспекта прилагођености облика тела животној околини, даје основну скицу био-инспирисаних дизајна описаних параметрима,
- успоставе методу за креирање дизајна VHST биомимикријом и тиме унапреде постојеће методе дизајнирања и оптимизације, посебно у фази креирања полазног дизајна намењеног даљем процесу аеродинамичке оптимизације
- успоставе методу експерименталног и нумеричког истраживања облика VHST
- дају упоредну анализу различитих био-инспирисаних дизајна,
- процене оправданост VHST дизајна
основни критеријум процене оправданост се у оквиру ове дисертације односе пре свега на критеријуме процене аеродинамичких карактеристика за различите конфигурације VHST. Процена оправданости за употребу дизајна има за циљ сужавање избора дизајна са сврхом скраћивања времена дизајнирања VHST,
- посебна пажња у дисертацији је усмерена на нумеричко моделирање нестационарног струјног поља у циљу одређивања расподеле притисака по површинама и у простору око VHST, у условима кретања VHST кроз тунел и карактеризација критичних параметара дизајна и струјања.

У научни циљ истраживања такође спада и примена метода које подржавају решавање аеродинамичких и хидродинамичких проблема VHST и модела, који обухватају:

- нумеричко моделирање дизајна VHST по угледу на облике из природе,
- нумеричко одређивање карактеристика струјања око и по површинама VHST, применом нумеричких метода, односно, прорачунска динамике флуида (CFD).

Очекује се да анализа резултата и закључци добијени разрађеном методом

дају и практично применљиве информације како за дизајнирање конвенционалних исто тако и неконвенционалних дизајна BHST, као што су маглев возови.

У ужем смислу, циљ је примена биомимикрије на дизајн воза за велике брзине, под претпоставком да су биолошки облици најбоље прилагођени одређеним условима живота изабраних јединки. Међутим, сама по себи, без додатних ограничења и евалуације, биомимикрија не мора дати оптимални резултат. Из тог разлога уведен је још један додатни циљ – успостављање комбинованог метода за одређивање сличности струјања, који ће у процесу евалуације резултата помоћи оцењивање изведеног дизајна и услова за његово коришћење.

У случају непотпуне сличности модела, у случају непотпуне геометријске сличности модела, циљ је и одређивање методе за „премошћавање“ сличности струјања између хидродинамичког понашања флуида узорка из природе и аеродинамичких карактеристика струјања око воза за велике брзине у стварној величини.

Истраживања која је обухватила ова докторска теза су део истраживања у оквиру пројеката Министарства за просвету, науку и технолошки развој из области технолошког развоја и Министарства за културу и информисање Републике Србије:

- „Научно-технолошка подршка унапређењу безбедности специјалних друмских и шинских возила“, реализатор Универзитет у Београду Машински факултет, ев. број ТР 35045
- „Истраживање и оптимизација технолошких и функционалних перформанси вентилационог млина термоелектране Костолац Б“, реализатор Универзитет у Београду, ИХТМ, ев. број ТР 34028
- „Истраживање и развој носеће структуре и процена материјала елемената пасивне сигурности шинских возила“, реализатор Универзитет у Београду Машински факултет, ев. број ТР 14018
- „Испитивање могућности коришћења фотограметрије за прецизно дефинисање геометрије музејских експоната комплексних облика, на примеру узорка водомара из Природњачког музеја Београд“, реализатор Централни институт за конзервацију из Београда, МКИИ РС.

1.6. Хипотезе

X1 – Природни облици тела животињских примерака примењени на VHST ће дати најоптималније аеродинамичке карактеристике тела VHST при кретању отвореном пругом или кроз железничке тунеле. Резултати мултидисциплинарних истраживања пружиће научне доказе о неопходности примене био-инспирисаних дизајна воза великих брзина у пракси.

X2 - Не постоји један и јединствен, оптималан дизајн VHST који ће испунити на економско-техничке захтеве у експлоатацији.

X3 - Не постоји јединствено и идеално тело животиње које је прилагодљиво свим условима преживљавања у природи, а по чијем моделу би се дизајнирао воз великих брзина, па тако један јединствен дизајн VHST није најоптималније решење за све услове кретања. Тело животиње је обликовано сходно компромису између бенефита дизајна и „губитака“, најчешће утрошене енергије животних процеса.

Претпоставка је да се брзи воз креће подзвучном брзином, у условима стандардне атмосфере и на нивоу мора. Воз се креће у мирном ваздуху, у лонгитудиналном правцу. Доњи део тела воза је отворен и ваздух се слободно креће у простору.

Посматрано тело VHST се сматра идеално крутим, те се из анализе изузимају различите аеродинамичке појаве који су последица еластичности конструкције, вибрација услед турбулентних струјања или друго.

Оквашене површине VHST су аеродинамички глатке и кроз истраживања у овој дисертацији се неће анализирати утицај квалитета завршне обраде модела нити врста материјала од ког су израђене, односно, утицај храпавости и квашљивости површина VHST.

1.7. Научне методе истраживања

Примењене научне методе у овом истраживању у општем смислу припадају трима целинама које су у дијалектичкој спреси, и то: логички, теоријски и практични део, како је то описао Миљевић [26].

Логичке методе, као најопштији приступ сагледавању проблема, су у овом истраживању засноване на примени парцијалне аналитичке методе и синтезе.

Парцијална анализа се односи на оквире у којима је проблем и предмет истраживања посматран у просторном и временском окружењу, у оквиру које су примењене функционална анализа, компаративна и факторска анализа. Функционална анализа је примењена да би се спознале активности и односи унутар предмета истраживања. Компаративна анализа је примењена како би се стекла сазнања о сличностима, односно, разликама појединачних елемената у предмету истраживања, као и њихове функције, везе и зависности, кретање и промене. У компаративној анализи су укључене квалитативне и квантитативне особине предмета истраживања. У оквиру компаративне анализе укључени су и резултати, анализа и закључци из претходно изведених истраживања других аутора. Факторска анализа је примењена у смислу сагледавања међусобних веза и интеракције фактора – параметара у истраживању. Дескриптивна анализа се односи на описивање појава природних догађаја, односно, понашања животињских јединки у природном окружењу, која је послужила за даљу конкретизацију и детаљније схватање кроз експлицитну методу анализе. Метода специјализације је примењена са сврхом рашчлањавања и/или упрошћавања проблема истраживања на делове који сваки за себе чине целине и понаособ постају елементи истраживања (3D у 2D).

Синтезом су доведени у однос елементи предмета истраживања претходно анализирани као мање засебне целине. Метода конкретизације кроз експериментална (стварна и нумеричка испитивања) је примењена за деловање елементе предмета истраживања – различите моделе и прототип.

Методом индукције су стечена сазнања о емпиријским и конкретним особинама и понашању посматраних система.

Теоријска и методолошка разматрања у оквиру научних метода истраживања се односе на методе креирања нумеричких модела – нумеричких модела тела и симулација, статистичке и компаративне методе. Теоријске методе истраживања имају за циљ да пруже довољан број информација, како би се на основу њих оформили математички модели којима се могу описати природне појаве. Метода моделирања физичких процеса је примењена ради разумевања

самих појава, примене и поједностављена комплексних проблема. У овом раду је коришћен развијен систем за прорачунски механику флуида, који представља стандард, верификован експериментима, те се примена нумеричких метода као једне врсте моделирања динамичког система (напр. комплексна струјања при проласку воза кроз тунел), фокусира на нови начин приступа и примене различитих нумеричких метода са новом сврхом. Испрва се примењују упрошћени модели, да би се након њихове анализе и верификације проширила операција моделовања и на комплексни 3D случај. Моделирање система се тако врши према хијерархији од једноставнијих ка комплекснијим моделима. Циљ моделовања са оваквом хијерархијом је да се у најранијој фази добију прве информације о посматраном проблему или пронађу слабе тачке модела, чиме се може значајно поједноставити сам поступак моделовања, уочити понашање система и изврше ране корекције самог модела. Статистичка метода се односи на статистичку обраду података и анализу резултата из експерименталних и нумеричких испитивања. Упоредна анализа је примењена ради верификације експерименталних резултата са природним догађајима и нумерички добијених резултата са експерименталним.

У основу теоријско–методолошке методе је уграђен позитивизам са жељом да се допринесе наставку истраживања у смислу стицања нових сазнања и унапређења квалитета живота људи.

У истраживање су укључене различите **експерименталне методе мерења** изведене испитивањима помоћу посматрања и студија случајева код којих су употребљена истраживачка (лабораторијска) и индустријска средства. Примењене технике, кроз које су прикупљани подаци о облику узорка и понашању објеката или система, се у пракси примењују у различитим областима науке и инжењерства: механике флуида и аеродинамике, термодинамике, оптике, контроле квалитета производа, архитектуре и очувања културне баштине и др. Експерименталне методе су примењене са сврхом испитивања облика, понашања и особина издвојених узорка или модела, и ради верификације резултата из нумеричких симулација.

Експерименталне заједно са теоријско-методолошким методама дале су овом истраживању мултидисциплинарни карактер.

На основу прикупљених података извршена је квантитативна и квалитативна анализа и верификација хипотеза и резултата на основу којих су донети закључци и смернице за наставак и проширење дизајна експеримената, као и самог истраживања са сврхом примене биомимикрије као методе аеродинамичког дизајнирања воза за велике брзине. Верификација је изведена на три начина и то поређењем експерименталних резултата са резултатима посматрања, нумеричких и експерименталних резултата, и на крају поређењем резултата из овог истраживања са доступним резултатима претходно изведених истраживања.

1.8. Методологија истраживања

Методологија по којој је изведено истраживање се састоји од следећих кључних елемената:

- избор природних облика за моделирање BHST,
- описивање биомеханике водомара,
- моделирање дизајна 2D BHST,
- нумеричко испитивање BHST у 2D простору,
- хидродинамичко испитивање слободне површине воде и нумеричко испитивање мултифазног струјања око бионичког модела водомара,
- верификација нумеричких резултата са природним феноменима, и нумеричких са резултатима хидродинамичких експеримената
- анализа резултата и корекције,
- поставка комбиноване методе за одређивање сличности струјања,
- аеротунелска истраживања једне изабране конфигурације – SHST, за потребе верификације нумеричких метода и анализе струјног поља,
- креирање модела 3D BHST,
- нумеричко испитивање 3D BHST у проласку кроз тунел са клизном мрежом, за нестационарно струјање вискозног и невискозног флуида
- верификација и поређење нумеричких резултата са корекцијама за 3D BHST са објављеним теоријским и стварним резултатима мерењима.

Истраживања представљена у дисертацији су посвећена процесу

дизајнирања облика VHST, применом биомимикрије. Анализе резултата нумеричких испитивања VHST, у стационарним и нестационарним условима, при слободном лету, кретању на отвореној прузи и при проласку кроз тунел имају за циљ утврђивање аеродинамичких карактеристика био-инспирираног дизајна.

1.9. Значај истраживања

У складу са модерним тенденцијама у развоју науке, смањења потрошње енергије за погон, развој и производњу и заштите животне околине развијена је нова дисциплина у начину решавања поменутих проблема, бионика. Бионика, како је описује Бар-Кохен у [24], је научна дисциплина која се у примени појављује у свим научним областима, од физике, електронике, хемије, све до психологије, а односи се на проучавање и адаптирање посматраних система или природних процеса и појава за употребу или организацију у свакодневном животу. Кључни догађај у процесу развоја једног производа, од проучавања до практичне примене, је разумевање функционисања система, процеса или појава, на основу ког се може направити ваљана анализа, избор и пројекција детаља који могу допринети човековом бољитку или смањењу утрошене енергије.

Практичне примере и добру праксу био-инспирираних дизајна је приказао Рашуо кроз [25] из који се види неопходност мултидисциплинарног прилаза сваком од проблема засебно, са циљем његовог разумевања и касније практичне примене. Историјски посматрано могло би се рећи да су први описани био-инспирирани дизајни примењивани за летеће направе, потом у ваздухопловној индустрији, да би се у данашње време примењивали и у брзом железничком саобраћају. Заједнички именитељ свим овим дизајнима је свакако објекат који је опструјаван ваздухом, а феномени који стварају различите аеродинамичке проблеме код HST узроковани су повећањем брзине, и то са квадратом или кубом њеног интензитета.

Посебно место међу возовима брзе железнице заузима воз Јапанске железнице ЈР Вест (JR West), Шинкансен (Shinkansen) серије 500 [28], у основи воз конвенционалног шинског транспорта (са електричним погоном), препознатљив по специфичном вретенастом дизајну. Конструктор и дизајнер

Шинкансен воза, Еји Накацу (Eiji Nakatsu) [29], је применио принцип биомимикрије, са водомаром у лову, на дизајн носа воза давне 1989., да би 1997. Шинкансен серије 500 достигао рекордну брзину и минимални ниво буке, где је Маеда (Maeda) у раду [30] дао приказ развоја овог VHST у смислу решавања појединих проблема.

Шинкансен серије 500 је показао највећи допринос, у својој класи, у смањењу аеродинамичке буке на излазу из тунела уз истовремено значајно повећању брзине (са 220 km/h код “0-те серије” на 320 km/h) уз одржавање нивоа буке од 70 dB (захтеваног стандардима и легислативом у Јапану), смањила отпор ваздуха за 30%, утросак снаге за 13% у односу на серију 300 и утросак електричне енергије за 15%, према подацима са сајтова који промовишу „зелене“ технологије – GreenBiz [31], AskNature [32] и Japan for Sustainability [33].

При брзинама кретања возова већим од 200 km/h аеродинамички отпор ваздуха постаје доминантан чинилац укупног отпора кретању система VHST (поред отпора услед трења, клизања, котрљања, вибрација и других губитака). Аеродинамички отпор воза великих брзина, у различитим конфигурацијама VHST – околина, превасходно зависи од квадрата брзине кретања, површине попречног пресека, облика и димензија композиције [4]. Такође, са порастом брзине кретања генерално, повећава се и ниво аеродинамичке буке, тако важног фактора за очување животне околине, посебно при проласку воза кроз тунел [4].

Значајан допринос дисертације се огледа се у истраживању различитих дизајна VHST, добијених биомимикријом животињских јединки које имају специфичан начин кретања или околину у којој живе, мотивисаног за сада јединим изведеним и у литератури наведеним примером из праксе – Шинкансен возом. У раду ће бити посвећена посебна пажња параметрима струјања – расподели притисака и аеродинамичким карактеристикама VHST у различитим конфигурацијама и при различитим брзинама.

Значај истраживања је и у мултидисциплинарности у свим сегментима испитивања, моделирању и анализи резултата из експерименталних и нумеричких истраживања. Мултидисциплинарност се огледа у примени различитих научних метода за реконструкцију, репродуковање и мапирање изабраног сегмента природног облика, затим теоријских, експерименталних и нумеричких метода из

области контроле квалитета производа и механике флуида (аеродинамике, хидродинамике).

У недостатку довољног броја биолошких података о појединим животињским врстама као и детаљних техничких података о изведеним концептуалним дизајнима произашла је прва идеја - формирање једне врсте систематизације дизајна брзих возова, засноване на биомимикрији са неким од животињских врста, односно, избора параметара дизајна за улазне податаке аеродинамичког дизајнирања. Критеријуми за избор биолошких облика, који су послужили као био-инспирација, су подељени према групама карактеристичних понашања, односно, прилагођености животној околини и то: према ефикасности у лову – брзини, окретности и вештини при лову; специфичностима начина кретања кроз околину (ваздух/вода) са посебном пажњом на птицу водомара која понирењу зарања у воду за пленом, и оне врсте које се крећу у близини речних корита или морског дна.

Био-инспирисани дизајни морских животиња се бирају и примењују према подацима о понашању, највећој брзини, утрошку енергије при лову и др. Посебно за птицу водомар истраживање изабраног природног догађаја у понашању се обавља хидродинамичким експерименталним методама.

Као полазни модел за анализу струјања у аеротунелу израђен је референтни или стандардни бионички модел воза за велике брзине (SHST), који је испитан употребом метода: визуелизација струјања, термографским мерењем и мерењем сила. Метода термографског мерења у аеротунелу је кроз ово истраживање први пут уведена у употребу у подзвучном аеротунелу ВТИ ВС. Модел SHST је испитан и нумеричким методама ради њихове верификације и разумевања струјног поља. Примена принципа дизајнирања тела при кретању надзвучним брзинама допринеће корекцији облика BHST како би се задржала функција промене површина.

Предложена метода оставља простора за прилагођавања потребама у будућој пракси као што су прилагођења различитим опсезима брзина; различитим категоријама железничког саобраћаја; различитим конфигурацијама и др. Осим тога очекује се да време дизајнирања буде значајно скраћено, а тиме и трошкови израде прототипова.

Истраживања аеродинамичке буке су ван оквира ове дисертације.

С обзиром на велико и дугогодишње искуство у самој изради железничких средстава у Републици Србији и тежњу ка увођењу брзих пруга, препоруке ове врсте би биле од посебног значаја за оснаживање и модернизацију, као и конкурентност у области дизајна. Такође, на тај начин би се постигао и вид едукације нових генерација тимова који би, кроз мултидисциплинарни рад, могли произвести дизајне и производе од значаја, како у окружењу тако и на међународном нивоу. Оно што није била пракса до сада, у процес дизајнирања железничких средстава могла би бити укључена и нека од експерименталних, аеротунелских и хидродинамичких истраживања. На међународном нивоу, посебне препоруке за дизајнирање железничких превозних средстава по принципима бионике, нису истакнуте. С обзиром да Међународна унија железнице истиче неопходност да се аеродинамици возова за велике брзине посвети посебна пажња, истраживања из ове дисертације могу имати практичну примену и на међународном нивоу.

1.10. Структура докторске дисертације

Докторска дисертација се састоји од једанаест целина.

Први део даје образложење теме истраживања и описује научни проблем и предмет истраживања. У првом делу су дати општи циљеви рада и конкретни циљеви истраживања. На основу постављених циљева, за изабрани објекат истраживања постављене су хипотезе. Након тога су наведене научне методе, чијом применом је научни проблем решаван, и методологија истраживања. Такође, први део истиче значај истраживања у области шинског транспорта.

Други део представља генезу истраживања. Преглед и анализа истраживања из различитих области науке су полазна грађа, извори нових знања и информација примењени у овом истраживању на различите начине: као полазни подаци, основи метода, анализе, верификације и потврде резултата и крајњег дизајна. На самом почетку дат је преглед досадашњих истраживања којима је дефинисан проблем кретања воза при великим брзинама и решења проблема кроз оптимизацију облика воза и инфраструктуре. Један од примењиваних метода оптимизације је

праћење коефицијента отпора и расподеле притисака при кретању воза на отвореној прузи. Досадашња истраживања од реалних до моделованих случајева истакла су приоритет услова и критеријума за оптимизацију за конфигурације кретања воза кроз железнички тунел. Проблем и последице комплексног струјања створеног проласком воза кроз тунел су приказани у кратком опису феномена са циљем да се прикажу основни правци решавања проблема и критеријуми који се примењују у поступку процене и оптимизације облика воза. Са сврхом оптимизације облика воза пажња је усмерена ка феноменима који се појављују током уласка носа воза у тунел. Струјни параметри, притисак и градијент притиска у тунелу, су истакнути као основни критеријуми за верификацију резултата истраживања и процену квалитета оптимизованог дизајна воза за велике брзине.

Како је истраживање мултидисциплинарног карактера, преглед и анализа истраживања су проширени ван оквира механике флуида и аеродинамике шинских возила, тако да су од интересовања области биологије, бродоградње, механике крутог тела, контроле квалитета, архитектуре, мониторинга рада система, и других. За потребе примене биомимикрије на воз обављен је преглед и анализа доступне и штуре грађе из области биомимикрије и биологије. Направљен је преглед описа и биолошких података за рибе и морске сисаре и птице, са посебним освртом на водомара. Из штуре биолошке грађе приказани су неки од основних података о геометријским параметрима и брзинама кретања животиња. За водомара је дат приказ понашања при лову са процењеним подацима из посматрања.

У наставку је представљен проблем удара брода о таласе, критичан за случај за прорачун и обликовање конструкције брода. Пажња је посвећена и експерименталним, теоријским и нумеричким методама у бродоградњи. Истакнуте су нумеричке методе мултифазног струјања, које су у многоме допринеле унапређењу решавања проблема пада крутог тела у воду.

Проблем сличности струјања и једно од решења гасодинамике, хидрауличка аналогија, је приказана кроз резултате и верификације експерименталних испитивања изведених различитим методама.

У **трећем делу** су дате теоријске основе изабраних метода. Представљене су

укратко основне метода за испитивање облика и квалитета површина из области општег машинства. Представљене су основне методе за дефинисање облика узорака из природе и то метода за контролу квалитета производа (3D ласерско скенирање и дигитализација), метода дефинисања природног облика помоћу блискодометне фотограметрије, реконструкција природног облика методом припреме за 3D штампу, микроскопска испитивања контроле квалитета површина (испитивања метролошким и електронским микроскопом) и мерења профилне храпавости површине узорка. Биомимикрија је укратко представљена као метода прилагодљива потребама и захтевима производа. У наставку су дати изводи из теорије механике флуида и основе за решавање проблема у струјању методом прорачунске динамике флуида. Приказ метода прорачунске динамике флуида, из пакета програма ANSYS Fluent, се односи на просторну и временску дискретизацију, пакете за решавање једначина транспорта, моделовање турбулентног струјања помоћу НСЈ усредњених према Рејнолдсовом моделу, методу мултифазног струјања, модел запреминских удела фаза, клизне и динамичке мреже. Аеротунелска испитивања са визуелизацијом струјања, хидродинамичка и термографска испитивања су приказана по наособ.

Четврти део се односи на избор и испитивање биолошких облика. На основу штурих података из литературе направљен је избор биолошких узорака и то морских животиња (делфин, сабљарка, ајкула и баракуда), а од птица је изабран водомар. Посебна пажња је посвећена водомару и он је детаљно испитан и реконструисано је неколико нумеричких модела са различитим сврхама. Доступни узорци водомара из Природњачког музеја у Београду као и снимци из природе су визуелно прегледани, оформљена је фото–документација. На основу снимака из природе направљен је први реконструисан 2D облик водомара у маневру обрушавања – зарањање. За тело водомара дефинисани су основни подаци који су касније употребљени као улазни подаци за нумеричке симулације. Потом је испитиван кљуун водомара, биолошки узорак који је примењен за биомимикрију облика воза. Изведена су испитивања микроскопом, 3D ласерским скенером и фотограметријом. Приказани су основни геометријски параметри облика. Такође приказано је и мерење храпавости кљуна како би се дефинисали улазни подаци за нумеричке симулације.

У **петом** делу је приказан опис биомеханике водомара у маневру обрушавања – зарањање и математички модел, који су проистекли из биолошке грађе и доступних података. На основу биомеханичког модела направљена је поставка за нумеричке симулације мултифазног струјања.

Шести део приказује аеродинамичке карактеристике и описује струјна поља око 2D бионичких возова, креираних на основу биолошких описа и података за изабране узорке. Биомимикрија са изабраним узорцима је примењена на делу носа воза великих брзина. Резултати ових истраживања су примењени за сужавање избора биолошких узорака за даљу примену биомимикрије на 3D бионички воз. Избор је сужен на облике налик водомару и баракуди, уз истицање потребе за комбиновањем параметара код примене на 3D бионички воз. Изведена су испитивања бионичког воза налик водомару до брзина $M = 0.9$ како би се лоцирали потенцијални недостатци у дизајну. Методом „Махове лупе“ је лоцирано место на ком контуре 2D дизајна одступају од номиналних на основу анализе расподеле притисака.

Седми део приказује комбиновану методу за одређивање сличности струјања. Комбинована метода се састоји од експерименталних и нумеричких испитивања. Модел бионичког 2D водомара је испитан хидродинамичким тестовима и за срачунату брзину зарањања одређени су основни геометријски параметри креираних таласа при зарањању под углом и при вертикалном паду у воду. Приказане су нумеричке симулације мултифазног струјања са деформабилном мрежом и кориснички дефинисаном функцијом, за три брзине зарањања бионичког модела водомара. Резултати нумеричких симулација су верификовани са хидродинамичким испитивањима и сликама из природе. На основу анализе облика таласа добијених из нумеричких симулација, срачунати су Фрудови бројеви за врхове таласа и тачке одвајања таласа од кљуна, при свим брзинама кретања. Из зависности срачунатих Фрудових бројева од Рејнолдсових бројева и параметара дизајна потољеног дела кљуна одређени су критеријуми за избор услова и димензија бионичког модела, и потом критеријуми за процену дизајна и избора дела дизајна са сврхом примене за биомимикрију на воз великих брзина. У овом делу је, на основу резултата симулација, дат опис формирања таласа воде око кљуна. На основу хидрауличке аналогије описана је сличност

струјања око кљуна водомара у зарањању у воду и воза великих брзина налик водомару у слободном лету, вожњи отвореном пругом и при проласку кроз тунел. У недостатку потпуне сличности између модела зарањања водомара у воду и проласка воза кроз тунел, и потребе да се комбинованом методом дефинише дизајн погодан за даљи процес дизајнирања 3D бионичког воза, направљено је „премошћење“ сличности струјања. Поређење путања флуидних делића у дубини воде и изо-густинских линија око воза налик водомару у тунелу показало су велику сличност по облику и распореду у подкритичном режиму кретања.

Осми део је посвећен испитивању два 3D бионичка воза. На основу прелиминарних испитивања једног воза за велике брзине у вожњи отвореном пругом изабран је део улазних података за даље нумеричке симулације. Приказана су аеротунелска испитивања стандардног бионичког модела воза великих брзина, која су обухватила мерење отпора модела у присуству тла, мерење расподеле температура термографском камером и визуелизацију струјања. За исти модел и услове испитивања направљене су и нумеричке симулације. Према аеротунелским испитивањима обављена је верификација нумеричке методе која ће бити примењена на крајњи дизајн 3D бионичког воза. Приказана је верификација при једној брзини и то за коефицијент отпора, расподелу температура и струјних слика по површинама модела.

На основу резултата испитивања геометрије водомара, анализа 2D бионичког воза и комбиноване методе за одређивање сличности струјања креиран је 3D бионички воз. Након дизајнирања воза приступило се креирању два мрежна модела у домену око воза. У поставци нумеричких симулација уклопљене су мреже и дефинисан је за сваку понаособ начин кретања као и интерфејс. Нумеричке симулације нестационарног струјања се односе на конфигурацију модела при проласку кроз тунел у опсегу брзина од 200 km/h – 500 km/h, и временски интервал од почетка кретања до тренутка уласка носа воза у тунел. Направљене су анализе расподеле максималних притисака и њихових градијената по времену при различитим брзинама кретања за случајеве вискозног и невискозног струјања. Такође, анализирана је и расподела густина по висини тунела, од површине воза до интерфејса мрежних модела, као и изо-густинских линија унутар тунела на местима која су блиска посматраним положајима таласа

око кљуна водомара. Резултати испитивања су упоређени са подацима из мерења, из доступне литературе, и то поређењем вредности максималних притисака и градијената притисака при брзини 200 km/h, док је зависност промене притиска на целом опсегу изабраних брзина упоређена са теоријским вредностима из литературе. Поред тога постављена је метода провере контуре дизајна на основу анализе струјних параметара коефицијента трења и температуре по уздужној оси модела заснована на аеротунелским мерењима и нумеричким симулацијама.

У **деветом делу** су изложени преглед закључака из истраживања и општи закључак. У саставу закључног поглавља су наведене нове научне информације проистекле из овог истраживања, приказ отворених подручја истраживања и вредновање рада са критичким освртом на изведено истраживање.

Дести део представља листу коришћене литературе која се састоји од научних радова у часописима са импакт фактором и часописима од националног значаја, затим књига и монографија, конференцијских радова, извештаја међународних организација и легислативе из области интересовања, приказа софтвера отвореног кода и отворене библиотеке слика и видео материјала.

Једанаести део сачињавају следећи прилози: радови који чине целину са садржајем дисертације, спецификација уређаја, одобрење за коришћење уметничких фотографија водомара из природе и Изјава о поштовању права животиња и бризи о њиховом животу, здрављу и животној средини.

2. ГЕНЕЗА ИСТРАЖИВАЊА

При прегледу литературе и стицања нових знања и сазнања из области аеродинамичке оптимизације возова за велике брзине приоритет је дат проблемима аеродинамике возова за велике брзине. Након тога је пажња посвећена биологији са сврхом примене у процесу примене биомимикрије ради аеродинамичког дизајнирања воза за велике брзине.

За разлику од ваздухоплова и бродова, возови се уопштено крећу у простору који је ограничен све време кретања. Утицај околине се огледа кроз присуство тла, када се воз креће по отвореној прузи и железнички тунел. У таквим околностима кретање воза је отежано и захтева већу погонску снагу, када се повећава и потрошња. Такође у отежаним условима кретања, воз не може да развије брзине које са истом снагом, односно, потрошњом развијају друга превозна средства.

У основи проблема кретања воза, а који директно утиче на брзину кретања и потрошњу енергената, је отпор кретању. Укупна сила потребна за кретање воза представља потребну силу погона (при различитим условима кретања) која је једнака силама које отежавају кретање, а то су, у општем случају за конвенционалне железнице: силе отпора услед механичког кретања (котрљања) и аеродинамичка сила отпора настала услед струјања вискозног ваздуха по оквашеним површинама воза [4,34].

Према Дејвисовој формули (Davis) сила отпора кретању воза, R , се исказује као полином $R = A + B G V + C V^2$, где су A , B и C константе које се одређују експериментално. Други члан израза за отпор, $B G V$, се односи на отпор механичком кретању, док се трећи, $C V^2$, односи на аеродинамички отпор [4,35,36]. Отпор механичком кретању зависи линеарно од тежине воза, G , и брзине кретања, V , док аеродинамички отпор зависи од квадрата брзине кретања.

Аеродинамички отпор струјања ваздуха по оквашеним површинама воза је комплексан параметар [4,35-40]. Када се ради о HST, радни флуид се посматра као вискозан, када се ради о кретању по отвореној прузи, и невискозан када се посматра кретање кроз тунел. Услови струјања идеалног гаса и невискозно струјање се примењују пре свега у складу са физикалношћу појава у струјању у тунелу, при чему утицај вискозности није примаран у односу на ефекте изазване компресибилношћу флуида у комплексном струјању при великим брзинама.

Испитивања и анализе аеродинамичких карактеристика се врше прво за конфигурацију на отвореној прузи, а потом и за пролазак кроз тунел [4,34].

Отпор воза, R , дат у (1) се састоји од две компоненте и то отпора насталог под дејством димензија воза, приоритетно његове дужине, $c_{x,t}$, и отпора насталог као последица облика воза, превасходно облика носа и репа, $c_{x,p}$ (2) [4]

$$Rx = c_x \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (1)$$

$$c_x = c_{x,p} + c_{x,t} = c_{x,p} + \frac{\lambda'}{D'} l \quad (2)$$

где су $c_{x,i}$ – коефицијенти отпора, ρ – густина ваздуха, V – брзина кретања, A – површина попречног пресека воза, λ' – хидраулички коефицијент трења потекао од пантографа, возног построја и др., D' – хидраулички дијаметар попречног пресека воза, и l – дужина воза.

Компонента отпора трења је настала услед трења ваздуха по оквашеним површинама воза (површине воза, пантограф, возни построј, спојеве између вагона и сл) и она се врло тешко може у потпуности прецизно одредити, осим кроз реалне експерименте. Компонента отпора зависна од облика се односи на промену у расподели притиска по оквашеним површинама воза која је настала услед промене облика воза на локалним местима.

Евалуација утицаја на укупни отпор воза из [37] показује да је удео отпора трења по површинама воза око 27% од укупног отпора воза, отпор од облика носа и репа око 8%, скоро једнако колико је и појединачно услед присуства пантографа и опреме испод воза. Мере смањења аеродинамичког отпора се односе на аеродинамичко обликовање носа и репа воза, као и аеродинамичко уобличавање контура по странама воза и возног построја, у смислу затварања контура помоћу

различитих врста оклопа или заптивки.

Из разлога комплексности конструкције и ограничења испитних метода, у истраживањима која се раде експериментално у аеротунелима или нумеричким симулацијама, детаљи се изостављају. Принципе испитивања шинских превозних средстава, у размери и стварној величини, искључујући мерење нивоа буке, је врло сличан испитивањима модела за друмски саобраћај, чији приказ је детаљно и систематизовано дат кроз искуства многих аутора [40]. Преглед физичких појава, метода испитивања и резултата испитивања, по бројним параметрима, за возове великих брзина је дат у [4].

Отпор воза за брзе пруге услед промене притисака се, према [4], ради прецизнијег одређивања, дефинише као средња вредност коефицијената отпора за воз истог облика носа и репа, али различитих дужина, или кроз релативан однос када се ради о поређењу различитих облика. Узимајући у обзир и пролазак кроз тунел, одређивање отпора постаје комплексан проблем превасходно због физичких појава компресибилног струјања у тунелу и геометрија тунела и воза. Отпор воза услед трења је још комплекснији и може се одредити експериментално у времену, кроз пораст притисака – статичког на зиду тунела, на боку тела воза, или стагнационог притиска који се у највећем броју случајева јавља на врху носа [4].

Расподела притисака или вредности мерене на појединим мерним местима на возу и на тунелу, поред коефицијената отпора, служе такође као параметри евалуације при дефинисању облика воза. За разлику од силе отпора, притисци и њихова расподела су параметри који се брзо и лако могу измерити са високом тачношћу и кроз временску историју. Притисци на мерним местима представљају директно последице промена у струјном пољу око воза те су опште прихваћени као примарни струјни параметар од интереса за процену понашања струјног поља око воза.

Процес дизајнирања воза има за циљ управо да према изабраним критеријумима (c_x , p , c_p и $\partial p / \partial t$) пронађе онај дизајн који ће у поређењу са осталима или са стандардима, дати пожељне карактеристике задате пројектним захтевом. Освојене су многе методе оптимизације облика воза за велике брзине, међутим у овој области има још довољно простора за развој.

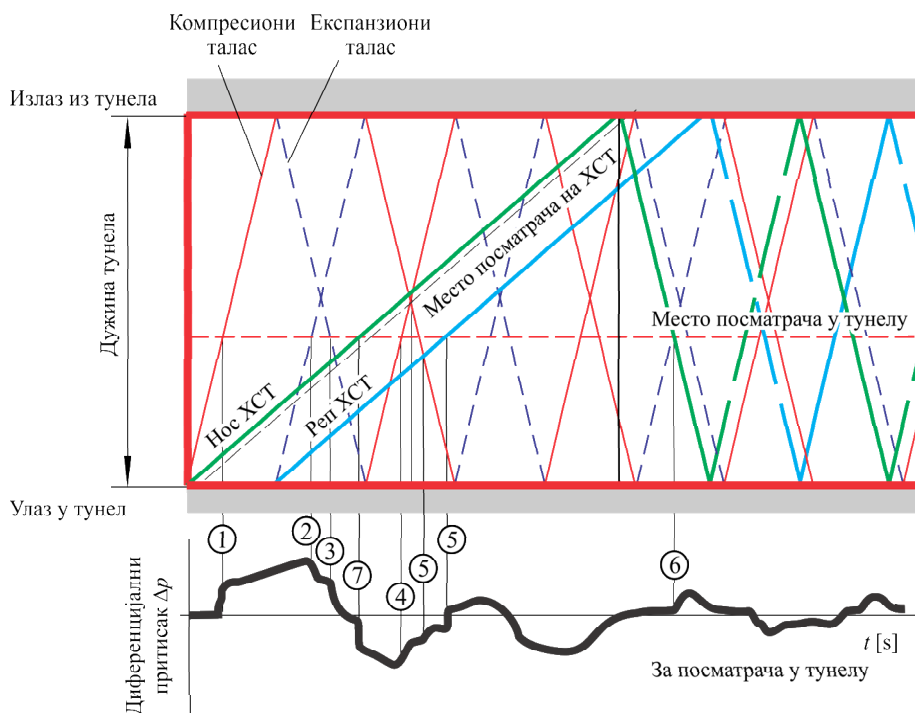
Преглед резултата аеротунелских испитивања за различите облике HST су показала да је издужење контуре HST, у вертикалној и хоризонталној равни, значајан параметар од утицаја на аеродинамички отпор воза [4,34]. Поређење коефицијената отпора, c_x , добијених аеротунелским испитивањима, је показало да су најпогоднији купасти облици, какав је облик напр. HST Шинкансен, док су облици сужени само у вертикалној равни, као што је воз типа ICE, показао веће вредности коефицијента отпора [4]. Свакако, при поређењу коефицијената отпора треба водити рачуна о размери модела, типу поставе модела тла (слободна струја или подсисавање граничног слоја), утицају тла на аеродинамичке карактеристике и др [40]. Посебан проблем представља екстраполација услова и аеротунелских резултата на стварне услове, узимајући у обзир услове испитивања, при чему се тежи задовољавању сличности струјања у аеротунелу и стварном случају. Процена аеродинамичких карактеристика HST напослетку зависи увелико и од искуства из области. Осим аеротунелских испитивања данас су у употреби многе нумеричке методе које значајно смањују време и цену коштања испитивања прототипова [41,42].

Иако c_x може послужити као критеријум према коме се процењује дизајн, то се чини најчешће када се врши оптимизовање дизајна за вожњу на отвореној прузи. Критеријуми при процени дизајна HST су, зависно од брзине кретања, постављени према условима кретања кроз тунел, представљени кроз промене притисака, p , кроз временску историју кретања воза и градијент промене притиска, $\partial p/\partial t$, у функцији параметара као што су запречавање тунела телом воза, геометријски параметри воза и тунела, врста шина и подлоге и др.

Андерсон (Anderson) [41] и Липман и Рошко (Liermann & Roshko) [42] су показали да феномени који се јављају при проласку воза кроз тунел су у основи феномени механике флуида стишљивог струјања при критичним и њима блиским условима, али се за разлику од уобичајених проблема аеродинамике, HST креће у ограниченем простору. Физикалност појаве су објаснили Бејкер и др. (Baker) [41-45], Зонглин и др. (Zonglin et al.) [46], Маеда и др. (Maeda et al.) [47] као и други аутори.

Слика 1 приказује нестационарни карактер промене притиска у тунелу при проласку HST [45], док су описе појаве представили Орелано (Orellano) [34],

Бејкер [45] и Маеда и др. [47], на основу којих је направљен кратак преглед феномена.



Слика 1. Нестационарна промена притиска у тунелу [45]

По уласку носа HST у тунел, у области испред носа се ствара компресиони фронт, слаб компресиони талас. Како HST напредује кроз тунел, компресиони талас постаје интензивнији и уједно се креће брзином блиској звуку, далеко већом од брзине HST, у правцу и смеру кретања HST. Компресиони фронт пропагира све до излаза из тунела, али на том путу и слаби услед постојања вискозних сила и трансфера топлоте, што се одражава на дисипацију енергије. На месту излаза из тунела, део компресионог таласа наставља пут и излази ван тунела, у виду импулсног таласа, док се један део одбија од равни излазног пресека тунел и враћа назад у тунел, али сада промењеног карактера – у виду експанзионог таласа. На неком месту у тунелу, зависно од дужине тунела, брзине воза и брзине експанзионог таласа, и др. новонастали наилазећи компресиони и рефлектован – експанзиони талас се сусрећу и стварају комплексно и интензивно међудејство. За последицу, HST трпи велика променљива оптерећења при проласку кроз тунел, која стварају непожељне ефекте на путнике. Са друге стране, импулсни талас, који је изашао ван тунела, је кратког дејства али великог интензитета притиска, што за последицу ствара изузетно непријатан звучни ефекат који се простире кроз

околину, сличан оном који стварају ваздухоплови при пробијању звучног зида, па је у том смислу и назван још и „sonic boom“.

Маеда и др. [47] истичу утицај геометријских и струјних параметара на вредност максималног градијента притиска по времену, $(\partial p / \partial t)_{\max}$. Одавде, максимални градијент притиска у времену је приближно пропорционалан трећем степену брзине кретања воза. Вредност $(\partial p / \partial t)_{\max}$ се смањује са порастом коефицијента облика воза, односно, повећањем дужине носа воза. Такође, Маеда и др. предлажу мере за смањење утицаја импулсног таласа. На примеру Шинкансен воза предлажу мере које се спроводе над конструкцијом тунела и мере које се спроводе над дизајном воза. За воз Шинкансен је наведено да су измене извршене у смислу смањена површина попречног пресека тела воза и оптимизације облика носа. Према [47] издужавање контуре носа воза се показало ефикасним у смислу смањења $(\partial p / \partial t)_{\max}$. Аутори наводе и податке да су следећи дизајни оптимизовани у смислу смањења дејства импулсних таласа, и то: Шинкансен серије 500 (JR West), 700 (JR Central, JR West), E1-E4 (JR East), а приложени резултати се односе на конфигурације кретања оптимизованих возова кроз прилагођене тунеле (Шинкансен тунеле) [47].

Флукуације притисака су испитиване на моделима од најједноставнијих поставки проблема, у 1D простору, како су приказали Саито и др. (Saito et al.) у раду [48], када је цилиндрични модел погођен кроз дугу цев при чему су мерени притисци у појединим тачкама дуж цеви, па све до мерења у реалним условима како су приказали Мартинез и др. (Martínez et al.) у раду [49]. Мартинез и др. дају комплетан увид у реалну слику понашања струјног поља при кретању више типова возова за велике брзине, кроз више различитих тунела, при различитим брзинама са анализом различитих вариабли које утичу на промену притиска у времену, из које се види комплексност проблема и утицајних фактори.

Истраживања флукуација притисака у тунелу показују да је при самом уласку воза у тунел врло изражена појава наглог пораста притиска у кратком временском периоду, у фази стварања компресионог фронта. Вредност притиска у посматраној тачки на зиду тунела је скоковита функција у времену, током проласка HST кроз тунел [4,45,47,49]. Нагли скок притиска у времену доводи до појаве интензивних импулсних таласа на излазу из тунела и буку.

Са једне стране карактер промене притиска у времену је могуће превазићи смањењем фактора запречавања тунела телом воза, но у реалности оваква промена није изводљива у потпуности, осим при изградњи нових тунела. Конструкције тунела за возове брзих пруга се изграђују са посебно прилагођеним улазним и излазним деловима, који су профилисани тако да доприносе смањењу буке, са изведеним проширењима, системима за одзрачивање и сл. [4,48].

Зависност интензитета компресионог таласа од величине запречавања тунела, за различите брзине кретања воза приказали су Регунатхана и др. [4]. У изворима [4,45] истакнуто је да смањење вредности запречавања тунела доводи до смањења вредности притиска компресионог таласа.

Од интереса у овом раду је зависност притиска компресионог таласа створена проласком воза кроз тунел, за $R = A_{voza} / A_{tunela} = 0.216$, за брзине преко 200 km/h, која је функција квадрата брзине [4].

Осим измене геометрије тунела, изводи се прилагођавање облика HST условима кретања, односно, струјања. При томе се укупна промена притиска при уласку носа воза у тунел мења до приближно истог нивоа, посматрајући различите композиције воза и тунела једнаких габарита (и запречавања), али у продуженом временском интервалу за прилагођен облик HST. То значи да ће прилагођење дизајна допринети његовој споријој промени [49], што се једноставније представља променом градијента притиска у времену [4], а директно води смањењу: нивоа бука на самом излазу из тунела, дејства на сам воз, промене притиска у унутрашњости, па тако и утицаја на путнике [4].

Како је истакнуто и у [4,49], феномени флукуације притисака унутар тунела су интензивнији код дугачких тунела, те [4] препоручује извођење оптимизације облика HST управо за услове проласка при великим брзинама (преко 200 km/h) кроз дуге тунеле (преко 1500 m). Истраживања за препоручене услове су врло захтевна и у литератури се најчешће проналазе примери оптимизације облика у вожњи отвореном пругом, оптимизација у времену нешто већем од потребног да се појави прва максимална вредност притиска унутар тунела, затим испитивање умањених и поједностављених облика модела, за које је потребно касније извршити екстраполацију резултата. Испитивања реалних возова у смислу оптимизације, у литератури се користе за корекцију или

верификацију постојећих или нових нумеричких метода, као и самих дизајна (возова и тунела) креираних помоћу нумеричких симулација, исте или сличне конфигурације.

Прилагођавање облика HST условима струјања ради пролонгирања промене притиска у времену се врши у фази развој прототипа употребом нумеричких и експерименталних метода (аеротунелских или испитивања са катапултирањем воза кроз моделе тунела). Сам процес у основи представља оптимизацију облика према изабраним критеријумима, али у пракси крајњи резултат зависи и од конфигурације терена за који је намењен сам HST, што усложњава цео процес. Нумеричке симулације за оптимизацију облика се врше према задатим критеријумима, као што су c_x , c_p , c_m , у циклусима кроз које се врши измена услова испитивања и геометријских параметара. Ради побољшања ефикасности креирани су алгоритми за оптимизацију који аутоматизују део операција као што су: генетски (базиран такође на бионици [25]) , мулти-објектни [51-54] и сл. Доношење одлуке је ипак на стручњацима, при чему алгоритми за оптимизацију и статистичку обраду помажу у смислу скраћења времена доношења одлука. Свакако, оптимизован дизајн има своја ограничења и односи се на један оперативни сегмент и испитану конфигурацију. На примеру који су представили Сузуки и др. (Suzuki et al.) [51] може се видети како се кроз процес оптимизације врха носа HST, у возњи отвореном пругом, по два критеријума – c_x и c_p могу добити два врло различита дизајна носева HST, код узорка који је оптимизован према c_{xmin} је оса попречног пресека врха носа у усправном положају у односу на тело HST, док је код дизајна оптимизованог према критеријуму c_{pmin} оса попречног пресека врха носа положена.

Према методи локалне функције и методи одговора површина према алгоритму GA-GRNN, Јао и др.(Yao et al.) [55] су представили оптимизован дизајн по пет геометријских параметара. У резултату је оптимизован дизајн показао смањење c_x од 8.7% при возњи на отвореној прузи у односу на изабрани полазни дизајн воза CHR380A.

Шец (Schetz) [56] је у оквиру прегледа истраживања у области аеродинамике возова за велике брзине приказао многе резултате истраживања, од којих се посебно истичу резултати мерења добијени за два случаја: пролазак кроз

тунел у реалној ситуацији и за умањен модел, приказани у виду временске промене притисака на различитим растојањима мерних места од улаза у тунел. У оквиру прегледа дати су резултати калкулација употребом Ојлерових једначина који су упоређени са одговарајућим експерименталним, за умањен модел, на три позиције унутар тунела. Осим тога, Шеџ даје приказ ефеката изазваних присуством тла кроз приказ граница вртложног трага, као и расподеле притисака на маглев возу био-инспирираном са пачијим кљуном, али у ограниченом простору инфраструктуре.

Аналитичке и нумеричке методе у употреби за прорачуне параметара струјања за HST у проласку кроз тунел се у пракси изводе употребом Ојлерове једначине, односно, усваја се невискозно струјање, обзиром да се ради о високом нивоу компресије ваздуха у тунелу, када вискозност није од примарног утицаја, те је оваква врста апроксимације оправдана и поуздана [57]. За квалитет резултата нумеричких симулација је од пресудног значаја валидација резултата са експерименталним: аеротунелским или најбоље реалним испитивањима које се раде за потребе развоја дизајна возова или инфраструктуре [59,60,61]. Такође, врше се и основна испитивања и поређење резултата са идеализованим облицима носа воза са основним облицима (конус, параболоид, елипсоид), као референци у процесу оптимизације облика носа HST [4,60]. За испитивање конфигурација HST у тунелу израђују се посебне инсталације помоћу којих се може предвидети понашање струјних параметара на излазу из тунела [57-61].

Винсент (Vincent) [62] и Лепора и др. (Lepora et al.) [63] истичу да је примарни задатак модерног производа употребљивост и оптимизован облик/ток у свим сегментима живота, од идеје до контроле, структуре, управљања и др. Индустријске гране ваздухопловне индустрије и бродоградње су прве које су отпочеле истраживања оптималних решења и велики део решења је управо изнађен у био-инспирираним облицима.

Савремена истраживања постала су мултидисциплинарна управо да би се суочила са комплексношћу природних феномена и њихове примене, укључујући итеративни поступак, као и расположиве технике и методе (експерименталне, теоријске, аналитичке и нумеричке) са циљем налажења једноставнијих решења за примену како приказују До и др. (Dou et al.) у раду [60].

Развој у појединачним гранама биологије, технологије, инжењерства и др., довели су до стварања потпуно нове мултидисциплинарне науке бионике [25,26], која се интензивно развија последње три декаде [63].

Преглед литературе из биологије се у првом кораку односио на различите пливаче међу животињама. Нестерук и др. (Nesteruk *et al.*) [65] су у анализи упоредили минималне коефицијенте отпора, тип граничног слоја при одговарајућим Re , и ефикасност у пливању различитих пливача. Студија је истакла да су најбољи пливачи они код којих је тело профилисано хидродинамички и који при пливању одржавају ламинарно струјање у већем опсегу Re . Облик и начин кретања су уско повезани са карактеристикама пливача, где је од важности издуженост тела (однос дужине и дебљине тела животиње). Студијом [65] су наглашене одличне хидродинамичке карактеристике пливача са најмањим могућим c_{xmin} , које пливају под суперкритичним условима, међу које спадају разне врсте сабљарки и ваху („wahoo“). Од осталих врста истакнуте су баракуда, делфин и ајкуле. Додатно поређење, међу добрим пливачима из исте врсте, је направљена поређењем по параметру биолошког капацитета и ефикасности пливања, где су међу најефикаснијим пливачима сабљарке, ајкуле, баракуда, штука и сл..

Према класификацији облика тела и кретања животиња из мора предатори су врсте које се најбрже крећу и то карангиформно или тунаформно, како су истакли Веб (Webb) [66] и Виделер (Videler) у раду [67]. Приближна брзина кретања за индо–пацифичку сабљарку је 109 km/h, сабљарке 78 – 110 km/h, ајкуле око 70 km/h и баракуду око 40 km/h, према подацима из отворене библиотеке [68]. Овакав начин пливања подразумева латерално осциловање репа животиње у дужини од приближно $1/3$ тела у репном делу до дужине самог репа, код туниформног, при чему се покрети главе умирују са скраћењем дужине дела тела које осцилује. Посматрањем облика и кретања у карангиформном стилу, може се уочити да је облик главе код најбржих, сабљарки и ајкула, спљоштен како би се умањио отпор бочном кретању главе при пливању и лову [68]. Фиш и Рор (Fish, Rohr) у [69] истичу да c_x тела нагло опада са порастом издужења тела $L/D \approx 3$, након чега је благи пад праћен издужењем до $L/D \approx 4.5$, при ком је c_x минималне вредности за припадајућу запремину тела. Фиш и Хју (Fish, Хуи) су у [70] дали и

податак да врста *Delphinidae* управо покрива област геометријског параметра тела $4 < L/D < 11$, при чему је оптимална вредност од 3 – 8. Такође, аутори су дали приказ природне визуелизација граничног слоја код делфина током пливања уз саму површину, која показује ламинарност у области од врха носа па све до отвора за дисање, практично целог „носа“ делфина [70]. У студији се истиче да је за смањење отпора делфина битан управо положај максималне дебљине тела, а да се ламинарни гранични слој може задржати и до 45% дужине тела, при погодним условима. Истакнуто је да постоје и други различити начини управљања граничним слојем, а тиме и побољшања хидродинамике тела, међу које спадају фина храпавост коже, секреција, загревање у граничном слоју код топлокрвних животиња, fine деформације подкожног ткива, турбулизатори на кожи који спречавају отцепљење струје и др.

Из доступне литературе о птицама издвојен је водомар као основа за примену биомимикрије на BHST, из разлога што за опстанак мора да извршава екстремне активности уз коришћење само пасивних мера за постизање услова за успешан лов. Водомар примењује два начина детекције плена. Један начин је сачекивање у миру изнад воде са мале висине, а други начин је маневар зарањања из обрушавања или лебдења изнад површине воде, у литератури назван маневром обрушавања – зарањање („plunge-diving“) [68]. Маневар обрушавања – зарањање за водомара је често неуспешан, па чак и погубан. У оба типа маневра практикује исту технику са разликом у убрзавању тела и правцу кретања, где се може претпоставити да са мирног места лови у плићим водама богатијим рибом, док маневар обрушавања – зарањање примењује када се риба налази на већој дубини, односно, када је то једини начин да до ње физички допре. У току обрушавања, водомар прилагођава вид да би лоцирао плен, поставља се у положај за зарањање и зарања. Заузимање правилног положаја тела пре уласка у воду има за циљ успешан лов, али и предупредивање повреда насталих преоптерећењем појединих делова тела.

У неким случајевима крилима убрзава у понирању и уједно усмерава кретање, Хамилтон Џејмс (Hamilton James) [71]. Водомар може зарањати са полураширеним или сасвим скупљеним крилима. Такође, у неким случајевима зарања и са отвореним кљуном. Тек касније, када изађе на суво мирном месту

водомар убија плен и гута.

Пасивне мере прилагођавања при лову код водомара се односе на: детекцију и позиционирање плена употребом различитих унутрашњих делова очију; постављање тела у погодан положај за лов, из лебдења, са приближно сталним правцем са различитих висина изнад воде; убрзавање по правцу и заштита од повреда прилагођавањем облика тела и променом положаја и начина покретања крила. За разлику од водомара друге птице које користе маневар обрушавања – зарањање за лов, као што су обична блуна, пеликан или албатрос, употребљавају и пасивне и активне мере припрема за лов (махање крилима, потисак стопалима са пловним кожицама и др.), пре свега због довољног простора под водом у коме могу маневрисати без повреда. Подводни простор на располагању за маневрисање водомара је дубине реда величине пар десетина центиметара и у том простору он из понирања, са висине од око неколико метара није у стању да маневрише због велике брзине зарањања и кратког трајања маневра. С тога се претпоставља да је то довољан разлог што не врши подводне маневре. Како водомар тражи плен са сувог места, не плутајући по води, он нема пловне кожице између прстију на ногама, а пошто лови у близини станишта, не поседује велику површину крила.

Путање обрушавања и зарањања су најчешће под врло великим нападним углом $(-45)^\circ - (-90)^\circ$, практично вертикално, у односу на површину воде. Претпоставља се да тако најбоље могу проценити место и дубину на којој је плен и тако најбрже стижу до њега. Друге птице које примењују маневар обрушавања са гњурањем, с обзиром да имају могућности контроле под водом, зарањају под мањим угловима или из положаја плутања по води.

Такође, за разлику од морских птица које прибегавају обрушавања – зарањање у узбураној води ради досезања плена на већој дубини, без тенденције прикривања, водомар у много мањем домену и у релативно мирној води користи овај маневар првенствено за прикривање. Свакако, не мање захтеван део маневра је и израњање водомара са пленом, до мирног места дистанцираног изнад воде, при чему се очекује да његово тело трпи хидродинамичка оптерећења због сада придодате масе плена, утицаја облика тренутне конфигурације тела на хидро- и аеродинамички отпор, као и нове расподеле оптерећења. У току израњања, према доступним фотографијама, евидентно је да се користи махањем крила под водом

како би остварио потисак потребан за повратак на површину. У овом раду пажња је посвећена фази маневра од додира врх кљуна са водом до тренутка зарањања кљуна и дела главе.

С обзиром услове лова, облик кљуна је од посебног значаја за успешност лова. Кљун је први део тела који прима екстремно хидродинамичко оптерећење, и како је утврђено посматрањима и снимањем [72,73] не проузрокује уочљив скоковити талас и радијалне таласе на површини, све док у воду не зарони глава. У литератури се појављују врло штурни подаци о максималној брзини летења и један од ретких наводи да је максимална процењена брзина обрушавања приближно 11 m/s, уз коментар да маневар некада не може бити испраћен брзином снимања од 10 кадрова по секунди, Мекфедајн (McFadyen) [73], што је усвојено као довољно прецизан податак.

Податке о понашању и брзини кретања различитих врста водомара приказали су Куке (Cooke) у [74] и Бурланд (Burland) у [75]. Само мали број доступних радова је из области бионичких истраживања птица у маневру обрушавања – зарањање изведених за потребе примене у роботизици. Тако су Лианг и др. (Liang et al.) у раду [76] студирали дизајн велике блуне (*Morus bassanus*) нумерички и експериментално, у серији са променљивим параметарима и условима кретања, пратећи промену убрзања тела током маневра. Нумеричка испитивања импулсне силе и расподелу притисака на 3D бионичком моделу блуне у маневру посматрали су Ванг и др. (Wang et al.) у [77] и Јанг и др. (Yang et al.) у [78] за потребе израде робота. Информације о истраживањима или примени дизајна тела водомара аутор није пронашао у доступној литератури.

Постојеће теоријске и методе испитивања, врло широко искуство стечено кроз претходна истраживања из области механике флуида, аеро- и хидродинамике су биле чврста основа за стицање нових знања, успостављање метода из овог истраживања, верификацију и анализу резултата. Механика флуида је дала смернице и основу за истраживање природних феномена и феномена аеродинамике возова за велике брзине.

Феномени из механике флуида повезани са падом тела у воду због своје комплексности и потребе у инжењерској пракси проучавани су од стране многих аутора. Најчешћи примери примене истраживања феномена код пада тела у воду,

као комплексног проблема хидродинамике, су приказани у процесу дизајнирања трупа брода, океанских платформи, струјања у отвореним каналима, пројектила, проблема квашљивости и завршне обраде површина, робота и сл.

Експерименталне методе су прве које су дале допринос у области хидродинамике тела које пада у воду, а тек накнадно су освојене теоријске и аналитичке методе. Експерименти су паралелно употребљавани као методе верификације и обсервације појава, представљајући упрошћене проблеме у локалним лабораторијским условима. Основна метода бележења резултата истраживања је фотографија, како су је први применили на модел кугле Ворфингтон и Кол (Worthington & Cole) у [79], последњих година XIX века. Но, и данас је метода бележења у основи иста, али технолошки унапређена са употребом високо квалитетних дигиталних снимака или видео материјала, или снимак неком од мерних метода које дају у резултату квантитативни приказ топографије читаве сцене.

Модели кружног попречног пресека, цилиндар и сфера, су најзаступљенији модели у истраживањима феномена стварања таласа, од истраживања Малока (Mallock) [80] до Меја (May) [81], слично стандардном моделу кугле у истраживањима експерименталне и теоријске аеродинамике.

У области бродоградње критични услови за димензионисање структуре брода су, између осталих, услови при којима брод удара о високе морске, настале у току невремена (“slamming“), како је истакао Фалтисен (Faltinsen) кроз детаљне приказе истраживања у [82], са циљем дизајнирања брзих бродских средстава. За испитивања хидродинамичких ефеката и оптерећења услед удара брода о слободну површину воде примењује се референтни модел облика 2D клина, који представља упрошћен попречни пресек брода на изабраним местима конструкције, као што је приказано у примеру Занг и др. (Zhang et al.) [83]. При хидродинамичким испитивањима слободна површина воде је у почетном тренутку непоремећена. Хидродинамичка испитивања клинова су у основи примењивана за потребе предикције оптерећења конструкције брода, путем предикције облика и димензија створених таласа и њима створене расподеле притисака по оквашеним површинама.

Теорију асимптота, која описује утицај облика клина на облик слободне

површине, први је развио вон Карман (von Kármán) [84]. Проблеме сличности струјања за нестишљив флуид теоријски су обрадили Вагнер (Wagner) [85], Пирсон (Pierson), Моисев и др. (Moiseev et al.).

Решавајући проблеме везане за издржљивост брода на ударе таласа, који оптерећују конструкцију до крајњих граница на узбурканом мору, Доброволскаја (Dobrovolskaya) је у приказу своје методе, у [86], прилагодила изразе и аналитички решила проблем за себи-слично струјање, око попречних пресека клинова са различитим угловима нагиба према слободној мирној површини, односно, угловима клина.

Данас је велико искуство и знање из механике флуида (Краус (Krause) [87] и Хирмен (Hereman) [88]) уграђено у софтверске пакете за итеративно решавање проблема, што су на примеру пада клина у воду показали Газизад-Ахсе и Никсерешт (Ghazizade-Ahsae, Nikseresht) у [89]. Александру и др. (Alexandru et al.) су у [90] упоредили нумеричке резултате испитивања на примерима удара таласа о брод, добијених различитим нумеричким софтверима, и при томе истакли поузданост нумеричких метода за решавање оваквих врста проблема.

Ослањајући се на нумеричке методе коначних запремина, проблем пада тела у воду, путем сета итеративних нумеричких прорачуна је издељен на засебне али међусобно зависне врсте прорачуна. Делови прорачуна третирају различите феномене у секвенцама, којима се заједно обликује слободна површина као резултат, а то су: утицај гравитације, нестационарност појаве, мултифазно струјање, принудне деформације нумеричке мреже, модел б-степени-слободе, 6DOF (Six-Degrees-of-Freedom, 6DOF), модел запреминских удела фаза VOF (Volume of Fraction, VOF) и моделовање турбуленције (утицај вискозности флуида).

Укратко, метода VOF је срж нумеричке методе за одређивање облика слободне површине код мултифазног струјања и представља модел којим се прорачунава облик интерфејса између фаза укључених у струјање, дискретизацијом у времену, при чему су параметри модела зависни од граничних услова. Модел VOF су први увели Хирт и Николас (Hirt & Nikolas), приказан у раду [91], суштински важан метод за одређивање облика интерфејса, који заправо представља слободну површину, нумеричком методом коначних запремина. Сам

нумерички метод је исказивао неке од проблема у примени, а везани су за дефиницију интерфејса између укључених фаза, где кроз историју догађаја и помераја модела понекада долази и до прекида интерфејса. Ипак, савремена софтверска решења су превазишла овакве проблеме, тако да данас CFD пакети као што је ANSYS Fluent [92,93], дају поуздана решења, верификована бројним експериментима, и успешно се примењују у многим областима примењене хидродинамике, бродоградње или балистике пројектила. Пример провере дизајна пресека брода комплексне геометрије испитан нумеричким методом приказују Гадими и др.(Ghadimi et al.) у [94].

Истраживања у области гасодинамике, у областима соничне и суперсоничних брзина, су паралелно истраживала и могућности развоја бржих и јефтинијих метода од аеротунелских и нумеричких. Аналогија између два физичка процеса се може успоставити ако се физички процеси могу описати еквивалентним математичким изразима. Тако је на основу анализирања понашања слободне површине нестишљивог флуида – воде, и изентропског струјања стишљивог гаса развијена хидрауличка аналогија.

Међу првима, Преисверк (Preiswerk) [95,96] и Орлин и др. (Orlin et al.) [97] описују методу аналогије и верификују резултате. Пресликавање путем хидрауличке аналогије подразумева да је за посматрани гас однос специфичних топлота $\kappa = 2$, уместо као код ваздуха 1.4, [95-99]. У случају подкритичних струјања према анализи Гилмор и др. (Gilmore et al.) [100] имагинарни гас се може сматрати ваздухом, а разлике у вредностима занемарити.

Хидрауличка аналогија омогућава да се помоћу хидродинамичких експеримената дође до сазнања о понашању гаса при различитим условима струјања. Талас на слободној површини воде, у хидродинамичком испитивању, је репрезент критичног струјања, дефинисаног условом $Fr = 1$, и тада је брзина струјања једнака брзини кретања таласа. Изражен облик или стварање крунице таласа прате услов надкритичног струјања при $Fr > 1$, када је брзина струјања далеко већа од брзине кретања таласа.

Хидрауличка аналогија даје корелацију између параметара облика таласа на површини воде, у плитком каналу, и параметара стишљивог струјања ваздуха, у 2D простору. Основни параметар облика таласа воде је локална дубина, док је за

гас основни параметар сличности густина ваздуха. У смислу примене и тумачења резултата свакако је најважнији израз једнакости између Фрудовог броја, Fr , и Маховог броја, M , за струјање имагинарног гаса ($\kappa = 2$).

Многи експерименти су потврдили вредност хидрауличне аналогије кроз добру предикцију услова струјања у ваздуху на основу експеримената у води, ово посебно у условима компресибилног струјања у ваздуху [98-105], уз примену значајно унапређених мерних метода за дефинисање топографије слободне површине воде. Савремене експерименталне методе су описали Кумар и др. (Kumar et al.) за примену методе PIV (Particle Image Velocimetry) [106], Лавицка и др. (Lavicka et al.) [107] мерење дубине воде на воденом-столу микрометром, визуелизацијом таласа методом кодирања боја у примеру Аренце и Скјус (Arendze, Skews) [108], као и примери примене различитих нумеричких метода [106,107].

У многим проблемима из праксе потпуна сличност два модела не може бити испоштована, па се прибегава анализи резултата испитивања под условима непотпуне сличности. У примени, непотпуна сличност се превазилази на различите начине који у многоме зависе од намене прототипа, расположивих испитних инсталација, али и искуства из области. У ваздухопловној индустрији, проблеми непотпуне сличности и процена аеродинамичких карактеристика се изводи кориговањем резултата добијених за модела са резултатима стварних испитивања прототипа у лету. На основу великог броја испитивања и статистичких анализа се, у једноставним случајевима или за стандардне облике модела, могу проценити корекције које узимају у обзир разлике између полазних модела.

3. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

3.1. Испитивање облика и квалитета објеката

У савременој индустријској производњи и репаратурној пракси контрола квалитета производа, као и реверзни инжењеринг [109], спадају у можда најзахтевније операције у процесу производње. Дизајн производа, из врло широке палете, је у већини случајева комплексне геометрије, састављен од низа закривљених површина које је у општем случају, као што је индустријска производња, врло захтевно пројектовати, извести и контролисати. За потребе контроле квалитета и дефинисања облика готовог производа употребљавају се и развијају различите методе и алати, зависно од потребног нивоа квалитета у завршној фази [110]. Заједничко за методе контроле облика и квалитета израђених производа у примени је недостатак у недовољно ефикасном приказивању резултата. Производ се подвргава испитивањима помоћу различитих метода ради склапања целокупне слике и верификације са полазним захтевима.

У истраживању из ове докторске дисертације употребљене су две методе за дефинисање облика узорака, односно, дигитализацију: фотограметријска метода и 3D ласерско скенирање. Метода фотограметрије се у пракси показала као ефикасна метода за дигитализацију комплексних облика као што су музејски узорци, и то у врло широком дијапазону габаритних димензија [110].

Метода 3D ласерског скенирања је у протеклих десетак година добила значајно место у процесу контроле индустријских производа и дигитализације разноврсних објеката, пошто су потребни ИТ ресурси постали доступни, Мајсторовић и Живковић [111], Полић и др. [112]. Поред наведених, класичне високо квалитетне методе за контролу производа и критеријуми тачности облика и квалитета површина, најпре су примењиване у ваздухопловној индустрији и

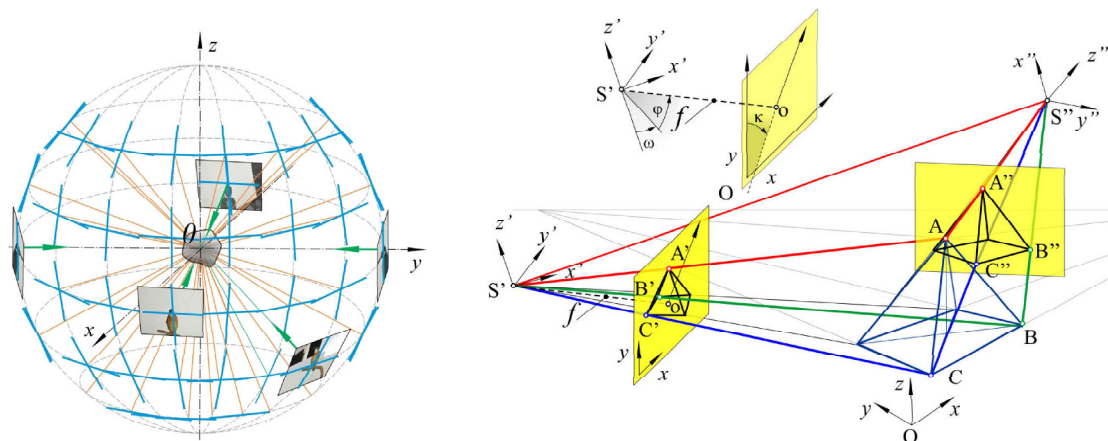
аеротунелским испитивањима, Линић и Мркаљ [113], Живковић [111,114], а потом су се прошириле и на примену у широкој индустрији, пре свега јер су захтеви за тачностима постали блиски. Но, класични уређаји за контролу квалитета облика производа по тачкастој методи (напр. са рубинским врхом) нису погодни за дигитализацију природних облика, из разлога што је само позиционирање природног облика на уређају отежано и, као у случају водомара не постоји референтни модел.

3.1.1. Фотограметријско одређивање облика и површинске текстуре

Фотограмтерија је научно-техничка метода за пасивно безконтактно и недеструктивно одређивање квалитативних и квантитативних особина објекта, употребом низа сликовних приказа објекта, [110,115]. Сливовни прикази могу бити начињени различитим техникама – од снимања фотоапаратом, дигиталним камерама до употребе термокамера и ласера. Најчешће примењивана је дигитална фотографија објеката. Објекат се снима у серијама, из великог броја положаја, са преклапањем од 60% површине снимка (слика 2а), како би се регистровао сваки детаљ на објекту из што је могуће више погледа. Фотограметријски 3D модел се добија након уређивања серије слика и обраде рачунарским путем. Као крајњи резултат блискодометне фотограметрије добија се 3D нумерички модел објекта (напр. формата .obj, .stl и др.) који у себи садржи информације о димензијама, детаљима и положају објекта у простору, као и податке о бојама и текстури површина [110].

У основи фотограметрије је одређивање положаја сваке тачке на површини модела методом триангулације (пример за два снимка приказује слика 2б), а одатле и облика површине објекта. За сваку тачку на објекту, чији је положај у простору непознат, потребно је неколико дефинисаних и међусобно положајно зависних пројекција.

У овом истраживању је употребљена метода конвергентног кадрирања са различитих удаљености од предмета (слика 2б), код ког централне пројекције посматраног објекта нису у истој равни нити су паралелне, већ су постављене међусобно под извесним углом и различитим растојањима од објекта.



(а) просторно распоређени положаји за снимање (б) шема триангулације са конвергентним кадмирањем из два положаја

Слика 2 Шематски приказ фотограметријске методе снимања

Положаји пројекција тачака су дефинисани положајем на фотографији, а за познати положај дигиталног апарата, односно, места очишта које је дефинисано за конфигурацију оптичког уређаја и сензора апарата. Триангулацијом се, упрошћено приказано, математичким путем, доводе у однос положаји два очишта за две пројекције објекта у централној перспективи, и два зрака пројекције ($S'A$ и $S''A$), за одређену тачку на површини објекта, при чему је познат међусобни просторни положај очишта пројекција ($S'S''$). Очишта перспективе су дефинисана у локалном координатном систему камере, $x'S'y'$ и $x''S''y''$, векторима ротације и translације, у односу на принципијелни координатни систем, xOy .

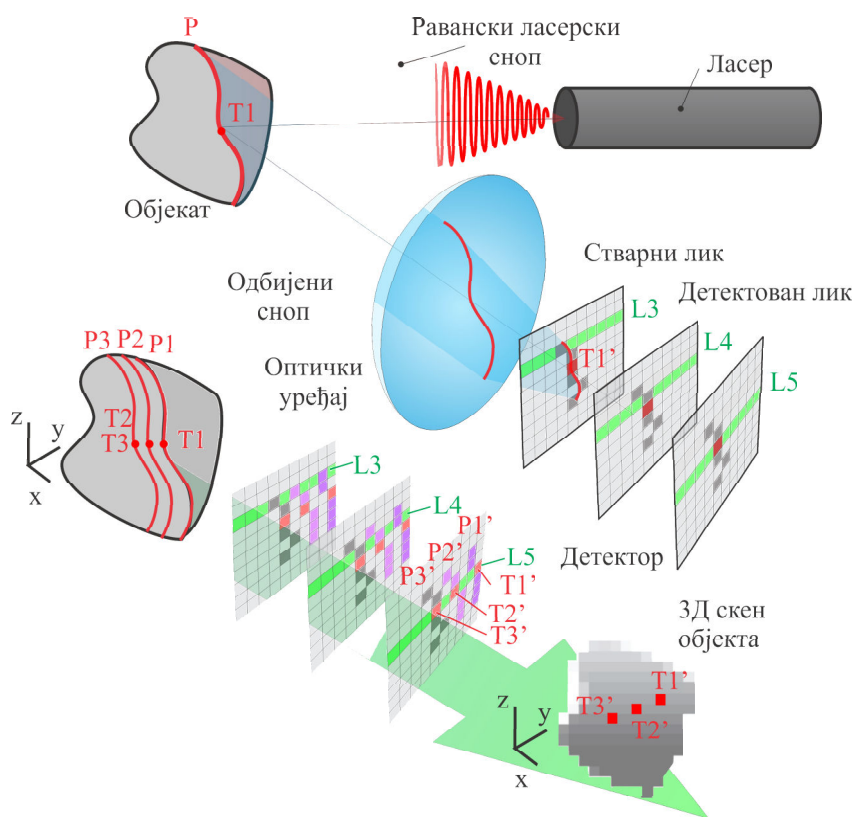
3.1.2. Просторно ласерско испитивање облика објеката –Ласерско 3D скенирање

Ласерско 3D скенирање је метода за безконтактно квалитативно и квантитативно одређивање облика узорка и дефинисање површина, континуално по видљивим површинама, високог квалитета мерења [116-119]. Велика предност методе је и у флексибилности и мобилности савремених уређаја, који омогућавају мерења на терену из једне поставке уређаја за снимања и из више позиција. Мана овакве методе контроле производа је у понајвише у високој цени мерног пакета. Метода се примењује у области очувања културне баштине [112], археологији [117],

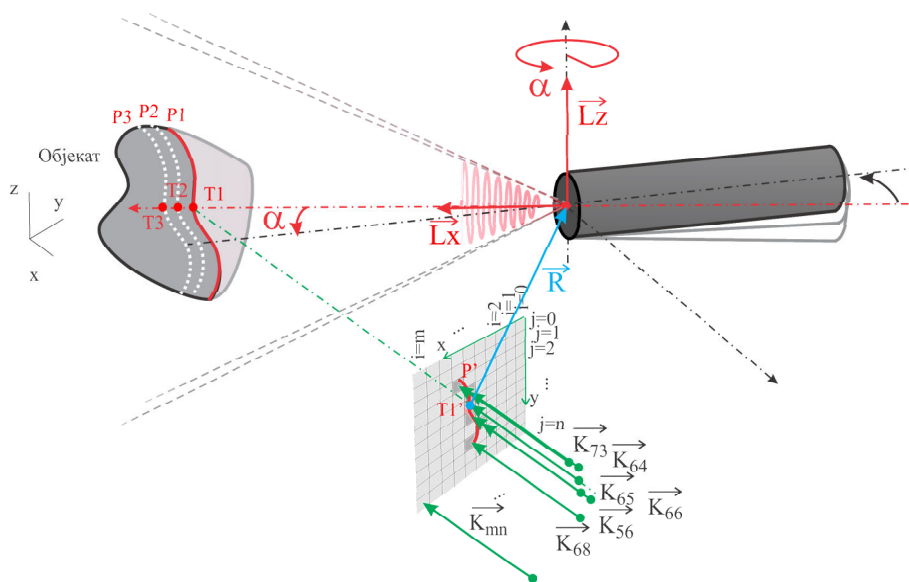
медицини и антропологији, палеонтологији [118], и др.

Принцип мерења помоћу тзв. 3D ласерске методе скенирања шематски приказује слика 3а. Принцип методе се заснива на тзв. триангулацији – повезаност вектора светлосног снопа, елементарних ћелија детектора и просторни положај ласерског уређаја и камере [110,112,116,119]. Ласер производи равански светлосни сноп који, падајући на посматрани објекат, осветљава једну линију на објекту. Осветљена линија припада скупу површинских тачака локалног попречног пресека, пресека који уједно припада равни светлосног снопа. Осветљена линија се сматра повезаним низом просторних тачака. Оптички уређај на камери прилагођава уочени одраз осветљене линије и прослеђује га детектору. Детектор светлости дискретизује одраз стварног лика, имагинарни лик, у извесној резолуцији и ствара дигитализовану 2D слику. Раванској слици, како би се дефинисала и трећа димензија, потребан је и трећи податак, податак о међусобном положају ласера и камере. Овакав поступак одређивања просторног положаја сваке детектоване тачке на осветљеној линији назива се триангулација. Померањем ласера, односно ротацијом ласерског снопа под углом α , мери се видљива страна објекта. Врло често се објекат поставља на обртно постоље тако да се снима објекат у једном пролазу са свих страна.

Ланман и Таубин (Lanman, Taubin) описују да континуирано кретање само мерне главе у једном циклусу мерења, или обрнуто, кретање објекта док је мерна глава стабилна, представља један скен или снимак, за који су дефинисани тренутни локални координатни систем у коме је смештен виртуелни објекат у односу на јединствен, принципијелни [119]. Прикупљени подаци о измереним положајима површинских тачака објекта у простору, из сваког појединачног снимања, креирају тзв. облак тачака .



(a)



(б)

Слика 3. Принцип 3D ласерског скенирања објеката и дефиниција мерене тачке триангулацијом вектора положаја [116]

Слика 3б приказује компоненте вектора светлосног снопа \vec{L}_x и \vec{L}_z , који описују кретање светлосног снопа, ротацију око осе ротације држача ласера и ротацију држача ласера, (3) [119]. Вектори који дефинишу детектоване дискретизоване тачке, $P1 - P6$, на једној осветљеној линији дефинисани редом, (одозго на доле, слика 3б као пример), при чему је редни број хелије уједно и координата тачке на имагинарном лику у x и y правцима локалног координатног система детекторске плочице са мерним хелијама. Остали вектори који припадају мерним хелијама су нуле, јер не детектују делове имагинарног лика осветљене линије.

$$\begin{aligned} \vec{L}_x &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \text{const.}, \vec{L}_z = \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \vec{K}_{00} = \vec{K}_{01} = \vec{K}_{0m} &= 0, \vec{K}_{10} = \vec{K}_{11} = \vec{K}_{1m} = 0, \dots \\ T73': \vec{K}_{73} &= \begin{pmatrix} 7 \\ 3 \end{pmatrix}, T64': \vec{K}_{64} = \begin{pmatrix} 6 \\ 4 \end{pmatrix}, \\ T1': \vec{K}_{65} &= \begin{pmatrix} 6 \\ 5 \end{pmatrix}, T66': \vec{K}_{66} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix}, \\ T56': \vec{K}_{56} &= \begin{pmatrix} 5 \\ 6 \end{pmatrix}, T68': \vec{K}_{68} = \begin{pmatrix} 6 \\ 8 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Дискретизовани подаци о имагинарном детектованом лику, се претварају у електричне сигнале и прикупљају, да би, након укључивања и података о узајамном положају извора и детектора, били обрађени специјализованим програмом произвођача опреме. Приказ виртуелног објекта се у резултату може представити у виду полигоналне мреже, и чувати у виду неког од стандардних 3D формата (.iges, .stp, .stl и сл.), или у облику текстуалног фајла у форми просторних координата облака тачака са површине објекта. Уколико се ради о врло комплексним узорцима, као што су природни облици, 3D скенирани модели морају се подвргнути корекцијама пре даље употребе, како су приказали Паули и др. (Pauly et al.) у раду [120]. Мрежни модели се надаље могу користити за дизајнирање или реконструкцију облика модела [117,118,120]. Квалитет снимака директно зависи од амбијенталних услова, осветљења и рефлексија, осетљивости

мерног уређаја и квалитета површина мереног објекта.

3.1.3. Микроскопија

За испитивања објеката димензија од око 0.1 μm до 10 mm уобичајено је коришћење оптичког микроскопа. Модерни микроскопи су дизајнирани да приказују дводимензионалне слике фокусиране у правцу управно на референтну раван узорка.

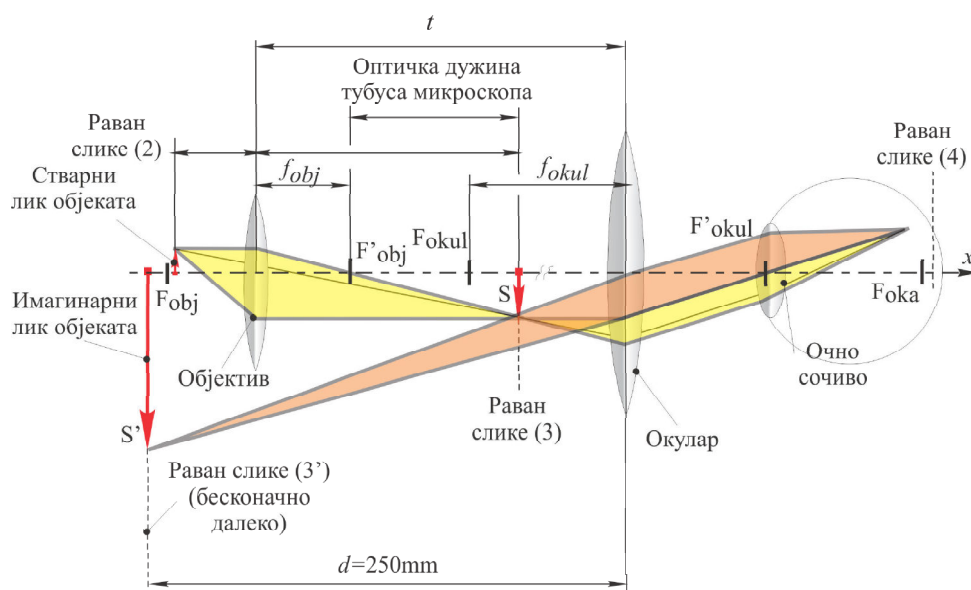
Адекватним постављањем узорка, снимањем и анализом омогућавају детаљно испитивање у 2D и у 3D простору [121,122]. Модерни оптички микроскопи су поред оптичког уређаја за увећавање опремљени и дигиталним уређајима који могу забележити дигитални снимак посматраног узорка, али исто тако и видео приказ, уз подршку специјализованих програма.

За потребе мапирања површине узорка микроскопи су опремљени и померљивим постољима у равни узорка, са лењирима који омогућавају регистровање положаја узорка у односу на равански координатни систем. Микроскопи омогућавају и мерење димензија дубине детаља на узорку помоћу микрометра који је постављен на механизму за покретање оптичког уређаја. Фокусирањем у равнима најнижег и највишег места на изабраном сегменту површине узорка и читавањем положајне разлике на микрометру директно се одређује и висина неравнине на сегменту [121].

Када се посматрају типови оптичких микроскопа, из угла овога рада, најзначајнија је подела на класичне и рефлектујуће. Класичан микроскоп пропушта светлост кроз провидан узорак, али се може донекле прилагодити снимањима са рефлексијом додавањем других извора светлости. Додавање светлосних извора са жарном нити, бочно – изнад узорка, узрокује проблеме као што су: загревање узорка, недовољна количина светлости и слаба рефлексија, неприступачност узорку са свих страна при мапирању и др. LED осветљење превазилази овакве проблеме и даје довољну рефлексију светлости за снимање непровидних објеката. Рефлектујући микроскопи се уобичајено користе за испитивање непровидних узорака (металографски), и с тога је код њих извор светлости постављен са стране узорка тако да микроскоп региструје слику

створену рефлектовањем светлости од објекта, а не светлости која је прошла кроз провидни узорак.

Слика 4 приказује функционалну шему микроскопа. Увеличавање слике узорка се постиже скупом објективских (фронтално и неколико корекционих) и окуларских сочива (сабирно и очно). Објектив образује стварни и увеличан лик, али изврнут. Стварни лик се посматра уз помоћ окулара када се добија имагинарни, увеличан лик у истој резолуцији. Укупно увеличање микроскопа је производ увеличања објектива и окулара $M = M_{obj} \cdot M_{okul}$.



Слика 4 Функционална шема микроскопа

Попречно увеличање система за пројекцију, $M_{proj} = f_{obj}/f_{okul}$, представља однос жижних даљина објектива, f_{obj} , и окулара, f_{okul} . Укупно увеличање на сензору камере, када се директно са окулара пројектује слика на сензор камере је $M_{укупно} = M_{obj} D/f_{okul}$, где су M_{obj} увеличање објектива и D растојање од окулара до детектора камере [112,123].

За потребе снимања узорака данас су у употреби дигитални или класични, прилагођени микроскопи којима је камера смештена на месту ока посматрача, а снимање и обрада се врши рачунарски. Када се посматрају објекти природног облика или закривљени, само део снимка изабране површине за посматрање има изоштрени изглед и то онај који се налази тренутно у фокусу. Да би се направила изоштрена слика комплетне површине посматрања, потребно је по деловима

посматране површине изоштравати слику, тако да серија слика садржи изоштрене снимке свих делова посматране површине. Јединствена изоштрена слика посматране површине се добија специјалитованим програмом за обраду слика који врши селекцију и комбиновање изоштрених делова сваког снимљеног сегмента. Мапирана површина посматраног објекта се добија уклапањем свих претходно обрађених слика, добијених при истом увеличању, са различитих посматраних површина.

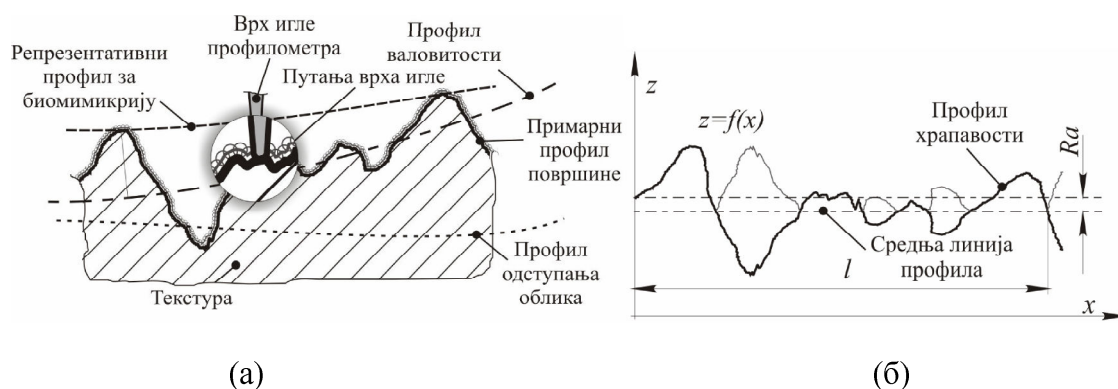
3.1.4. Мерење храпавости

Храпавост површина узорка је један од параметара при дефинисању топографије површине и дефинисана је у пракси на више начина [124]. Један од метода мерења храпавости је мерење профилне храпавости помоћу профилометра. Резултат мерења представља средњу аритметичку вредност одступања неравнина ефективне површине, Ra , од средње линије. Параметре храпавости Ra приказује слика 5.

Храпавост Ra се на референтној дужини, l , изражава као [124]

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |z| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (4)$$

где су z – одступање од профила, управно на правац мерења, x – координата положаја мерног места у правцу мерења.



Слика 5 Параметри храпавости Ra

3.2. Биомимикрија – биологија у примени

Биомимикрија као метода аеродинамичког дизајнирања воза за велике брзине се у ширем смислу, у овом истраживању, односи на методу којом је дизајниран воза за велике брзине, док се у ужем смислу односи на прилагођавање природних облика и примену при дизајнирању воза за велике брзине са циљем креирања дизајна који би представљао полазни дизајн за даљи процес аеродинамичке оптимизације према техничко-технолошким захтевима прототипа. Дизајн воза за велике брзине креиран биомимикријом је 3D модел добијен као резултат процеса дизајнирања развијан у неколико фаза.

Основа за примену биомимикрије је биологија. Знања из биологије, пре свега анализе облика и понашања животињских јединки, су од суштинског значаја за разумевање природних феномена и примену у сврху биомимикрије. Међутим, опште методе за избор, прилагођење и примену биолошких облика или процеса нису дефинисане, и то даје велику слободу у истраживању за сваку врсту развоја идеја од интуитивнивог и имагинарног до креативног и систематизованог модела истраживања. Како је циљ биомимикрије креирање оптимизованих производа или система, биологија сама за себе не може бити самостално примењена како би одговорила на захтеве дизајна, па су тако све научне области и методе добродошле како би се за сваку намену креирала посебна метода заснована на биомимикрији. Биомимикрија као метода дизајнирања или оптимизације тако подразумева мултидисциплинарно истраживање при чему се научне дисциплине примењују на иновативан начин, са крајњим циљем добијања квалитетног производа.

У овом истраживању су према подацима и применама из доступне литературе направљени критеријуми и избор биолошких узорака. У истраживању је посебна пажња посвећена облику и понашању водомара, који је наведен као био-инспирација за воз Шинкансен, али подаци о методи прилагођења дизајна нису пронађени у доступној литератури. На основу посматрања облика, понашања водомара и птица сличног понашања у лову и грађе прикупљене из доступне литературе, направљен је прво груби преглед по различитим научним областима, а које су могле да изађу у сусрет решавању следећих проблема везаних за

биомимикрију, а то су

- одређивање комплексног биолошког облика,
- одређивање брзине и услова кретања у природи и експерименту,
- одређивање облика и параметара таласа на слободној површини воде,
- методе симулације природног понашања биолошких узорака (у овом случају водомара),
- методе креирања бионичког дизајна,
- методе за утврђивање сличности струјања око модела биолошког узорка и бионичког дизајна воза,
- методе реалистичног нумеричког испитивања финалног бионичког дизајна воза.

За избор узорака, начин прилагођења облика и методолошки приступ примени биомимикрије, с обзиром на широке могућности, примењен је мултидисциплинарни приступ. Усвојене су методе из различитих научних дисциплина како би се фокус задржао на правцу дефинисања биомимикрије као методе аеродинамичког дизајнирања и како би се направила једноставна и сведена метода применљива у научне и индустријске сврхе. Мултидисциплинарност биомимикрије као методе дизајнирања се огледа у примени знања и метода из области као што су: машинско инжењерство (опште, шинска возила, механика флуида, ваздухопловство, бродоградња, термодинамика механика крутог тела, и др.), биологија, физика (оптика, ласерске методе и др.) архитектура и др.

3.3. Изводи из теорије механике флуида

У циљу описивања струјања, односно, дефинисања основних параметара струјања, било у жељеној тачки или делу струјног поља, неопходно је моделирати струјање применом основних принципа физике. Модел струјног поља представља систем математичких једначина, којег у основи чине једначина континуитета и једначине транспорта.

Крајњи резултат је у општем случају немогуће добити, те је примена прорачунске динамике флуида, CFD (Computational Fluid Dynamics, CFD), која

решава систем једначина транспорта нумеричким путем, једна од могућности за предикцију струјања, размену топлоте и масе, хемијских реакција и друге сличне комплексне проблеме [92,93].

У овом раду коришћена је и представљена нумеричка метода коначних запремина за решавање једначина транспорта флуида, чији се нумерички алгоритам решавања састоји из следећих корака [125,126]: (1) формална интеграција једначина транспорта по свим контролним запреминама у домену решења, (2) дискретизација, трансформација интегралених једначина путем смењивања чланова са одговарајућим апроксимацијама типа коначних разлика, претварање интегралних у алгебарске једначине и (3) корачно, итеративно решавање алгебарских једначина.

3.3.1. Закони одржања и једначине транспорта

Полазна претпоставка при посматрању кретања флуида је та да се флуид сматра континуумом, односно, непрекидном средином која потпуно попуњава флуидни простор [125]. Основне једначине којима се описује кретање флуида произилазе из основних физичких принципа, три закона одржања [126-129]:

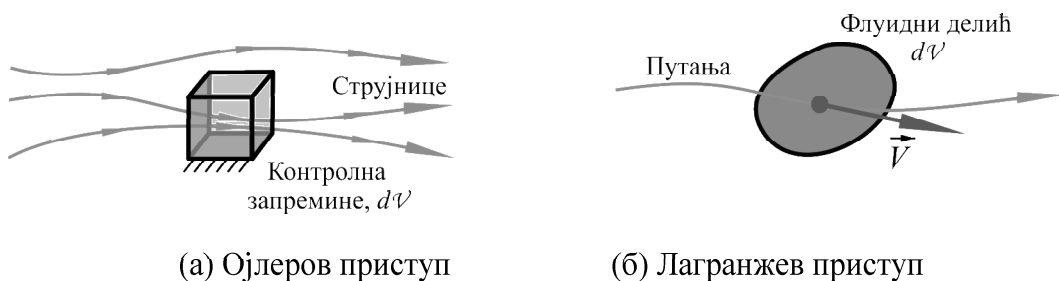
1. Закон одржања масе $\xrightarrow{\text{резултира}}$ једначина континуитета
2. Закон одржања количине кретања
(Други Њутнов закон) $\xrightarrow{\text{резултира}}$ једначина промене количине кретања
3. Закон одржања енергије
(Први закон термодинамике) $\xrightarrow{\text{резултира}}$ једначина енергије
4. Закони одржања флуидних фаза
5. Једначина стања гасова – доводи у везу особине флуида (напр. p , ρ и T) и употребљава се са сврхом да се затвори систем једначина

Једначина кретања представља векторску једначину, која даје три скаларне једначине за просторни проблем. Изворно, диференцијални облик једначине одржања количине кретања независно су поставили Стокс (Stokes) и Навије (Navier), иако је уобичајено да се комплетан систем једначина одржања (масе, количине кретања и енергије) у диференцијалном облику назива Навије-

Стоксовим једначинама.

Флуидни простор може се ограничити на један део, репрезентативни елемент коначне контролне запремине dV , и затворене контролне површине dS , на који се сада могу применити основни физички принципи. Контролна запремина може бити непокретна у струји флуида, према Ојлеровом (Euler) приступу, и тада се директно добијају интегрални конзервативни записи физичких закона, док се парцијане диференцијалне једначине понашања система добијају индиректно. Са друге стране, уколико се посматра флуидни делић у кретању, према Лагранжевом (Lagrange) приступу, физички записи било у интегралном или диференцијалном облику су не конзервативни.

Са циљем да се физички модел запише директно у диференцијалном облику и касније на најлакши начин прорачунају параметри струјања, у посматраном физичком пољу, контролна запремина, односно, флуидни делић, се смањују до бесконачно малих димензија [126,128,129]. Димензије флуидног делића задовољавају услове за решавање парцијалних диференцијалних једначина, али су истовремено довољно велике да се флуид може сматрати континуалним медијумом.



Слика 6 Модел посматрања репрезентативне запремине величине флуидног делића

При кретању флуидног делића из тачке „1“ до „2“, у временском интервалу од t_1 до t_2 , долази до промена свих параметара, и то: просторних положаја $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$, вектора брзине који описују кретање ($\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$) и скалара који описују стање $\rho(x, y, z, t)$, $p(x, y, z, t)$ и $T(x, y, z, t)$. За општу параметар струјања, ϕ може се дефинисати брзински извод параметра за флуидни делић у кретању, по јединици запремине (материјални извод) као збир (5) [126-129]

$$\underbrace{\frac{D\phi}{Dt}}_{\substack{\text{Материјални} \\ \text{извод} \\ \text{Брзина промене } \phi \\ \text{за флуидни делић} \\ \text{Лагранжева метода} \\ \text{за флуидни делић}}} = \underbrace{\frac{\partial(\phi)}{\partial t}}_{\substack{\text{Локални извод} \\ \text{Брзина промене } \phi \\ \text{у контролној запремини}}} + \underbrace{\text{div}(\phi\vec{V})}_{\substack{\text{Конвективни извод} \\ \text{Укупан проток } \phi \\ \text{из контролне запремине}}} \quad (5)$$

Ојлерова метода описа за контролну запремину

Физичко тумачење се може приказати изразом за компоненту инерцијалне силе у $0x$ правцу, R_{ax}^* , (6)

$$R_{ax}^* = \underbrace{\rho \frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{локална сила}} + \underbrace{\rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2} \right)}_{\substack{\text{услед промене} \\ \text{кинетичке енергије}}} + \underbrace{2\rho \left(u\omega_y - v\omega_z \right)}_{\text{услед вртложности}} \quad (6)$$

сила конвекције

где су локално убрзање, $\partial u/\partial t$, изазвано translацијом, а сила конвекције садржи у себи убрзања: линеарне деформације $u(\partial u/\partial x)$, угаоне деформације $1/2[v(\partial v/\partial x + \partial u/\partial y) + w(\partial u/\partial z + \partial w/\partial x)]$, обртања $1/2[w(\partial u/\partial z - \partial w/\partial x) - v(\partial v/\partial x - \partial u/\partial y)]$, а ω_y и ω_z компоненте угаоне брзине флуидног делића [126-129].

3.3.1.1. Једначина континуитета

Једначина континуитета (7) произилази из закона одржања масе за флуидни делић и доводи у равнотежу промену масе унутар флуидног делића, кроз време, са укупним масеним протоком кроз флуидни делић [126-129].

3.3.1.2. Једначина промене количине кретања

Једначина промене количине кретања (8) потекла из Другог Њутновог закона изједначава брзину промене количине кретања флуидног делића са збиром спољашњих сила које дејствују на флуидни делић: површинских (силе притиска и вискозне силе) и масених (гравитациона, центрифугална, Кориолисова и електромагнетна) [126-128].

3.3.1.3. Једначина енергије

Једначина енергије (9) одређена из Првог закона термодинамике, представља енергетску равнотежу између брзине промене укупне енергије за флуидни делић и збира брзина промена енергија унетих у систем путем трансфера топлоте (конвекција, кондукција, радијација), као последице разлике температура, и извршеног рада над флуидним делићем од стране спољашњих површинских сила. Укупна енергија флуидног делића по јединици масе, e , представља збир унутрашње енергије, кинетичке енергије и потенцијалне енергије по јединици масе [126-129].

3.3.1.4. Једначине транспорта

Једначине одржања у неконзервативном облику за нестационарни, тродиманзионални стишљиви њутновски вискозни флуид, флуид који укључује дисипацију, транспортне феномене вискозности и термалну кондуктивност, су представљене редом једначинама (7) – (12) [126-129]

Једначина континуитета

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0, \quad (7)$$

Једначине промене количине кретања по правцима, Навије–Стоксове једначине

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}, \quad (8)$$

Једначина енергије

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j H) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \tau_{ij} - q_j), \quad (9)$$

где су τ_{ij} – тензор напона, q_j – вектор топлотног флукса и H тотална енталпија

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (10)$$

$$q_j = -k \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (11)$$

$$H = h + \frac{u_i u_i}{2} \quad (12)$$

где су μ – динамичка вискозност, $\lambda = -2\mu/3$, κ – термална кондуктивност, h – статичка енталпија, Кронекерово (Kronecker) делта δ_{ij} ($\delta_{ij} = 1, i = j; \delta_{ij} = 0, i \neq j$), .

Парцијалне диференцијалне једначине одржања имају исти генерички облик, те могу се записати у јакој конзервативној форми, погоднијој за нумеричко решавање, уколико се \mathcal{U} , \mathcal{F} , \mathcal{G} , \mathcal{H} и \mathcal{J} посматрају као вектори колоне (13) [129]

$$\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial z} = \mathcal{J} \quad (13)$$

при чему су

$$\mathcal{U} = \left\{ \begin{array}{c} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho \left(e + V^2 / 2 \right) \end{array} \right\}, \quad \mathcal{F} = \left\{ \begin{array}{c} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho v u - \tau_{xy} \\ \rho w u - \tau_{xz} \\ \rho \left(e + V^2 / 2 \right) u + \rho u - k \frac{\partial T}{\partial x} - u \tau_{xx} - v \tau_{xy} - w \tau_{xz} \end{array} \right\},$$

$$\mathcal{G} = \left\{ \begin{array}{c} \rho v \\ \rho u v - \tau_{yx} \\ \rho v^2 + p - \tau_{yy} \\ \rho w v - \tau_{yz} \\ \rho \left(e + V^2 / 2 \right) v + \rho v - k \frac{\partial T}{\partial y} - u \tau_{yx} - v \tau_{yy} - w \tau_{yz} \end{array} \right\},$$

$$\mathcal{H} = \left\{ \begin{array}{c} \rho w \\ \rho u w - \tau_{zx} \\ \rho v w - \tau_{zy} \\ \rho w^2 + p - \tau_{zz} \\ \rho \left(e + V^2 / 2 \right) w + \rho w - k \frac{\partial T}{\partial z} - u \tau_{zx} - v \tau_{zy} - w \tau_{zz} \end{array} \right\}, \quad \mathcal{J} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \rho f_x \\ \rho f_y \\ \rho f_z \\ \rho \left(u f_x + v f_y + w f_z \right) + p \dot{q} \end{array} \right\},$$

где \mathcal{U} – представља вектор решења, јер садржи конзервативне променљиве које се одређују нумеричким путем, док \mathcal{F} , \mathcal{G} и \mathcal{H} – садрже променљиве конвективног и дифузионог флукса, и \mathcal{J} – изворе масе, количине кретања и енергије. Тотална енергија $E = e + V^2 / 2$, сума унутрашње и кинетичке енергије, је повезана са притиском преко једначине стања идеалног гаса.

3.3.1.5. Општа једначина транспорта

За решавање струјних проблема техником контролних запремина скаларне једначине транспорта потребно је превести у алгебарски облик ради нумеричког решавања. За општу променљиву струјног поља, ϕ , конзервативни израз у диференцијалном облику за све једначине одржања [126], се може записати у виду једначине транспорта (14)

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\phi\vec{V}) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad}\phi) + S_\phi. \quad (14)$$

Интеграцијом (14) по запремини просторног флуидног делића, KZ , и применом Гаусове теореме о дивергенцији ($\int_{KZ} \operatorname{div} \vec{a} d\mathcal{V} = \int_S \vec{n} \cdot \vec{a} dS$), добија се кључни израз за примену у CFD методом коначних запремина, општа једначина транспорта у интегралној форми, за сваку контролну запремину [125,127] (15)

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{KZ} \rho\phi d\mathcal{V} \right)}_I + \underbrace{\int_S \vec{n} \cdot (\rho\phi\vec{V}) dS}_{II} = \underbrace{\int_S \vec{n} \cdot (\Gamma \operatorname{grad}\phi) dS}_{III} + \underbrace{\int_{KZ} S_\phi d\mathcal{V}}_{IV}, \quad (15)$$

при чему чиниоци представљају редом :

- I – брзину пораста укупне вредности ϕ унутар флуидног делића,
- II – укупан проток компоненте ϕ услед струјања дуж нормале \vec{n} , или брзина смањивања ϕ кроз границе флуидног делића, S , услед конвекције,
- III – укупан проток ϕ услед дифузије кроз границе флуидног делића,
- IV – брзину стварања ϕ услед појаве извора.

За случајеве стационарног струјања, брзина пораста укупне вредности ϕ унутар флуидног делића се изједначава са нулом, у изразу (15), када се добија интегални израз стационарне једначине транспорта (16)

$$\int_S \vec{n} \cdot (\rho \phi \vec{V}) dS = \int_S \vec{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dS + \int_{KZ} S_\phi dV. \quad (16)$$

Када се решавају проблеми нестационарног струјања општи израз једначине транспорта (15) потребно је интегралити по малим временским интервалима одакле се добија најопштији израз једначине транспорта у облику (17) [125,126]

$$\begin{aligned} & \int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{KZ} \rho \phi dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_S \vec{n} \cdot (\rho \phi \vec{V}) dS dt = \\ & = \int_{\Delta t} \int_S \vec{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dS dt + \int_{\Delta t} \int_{KZ} S_\phi dV dt \end{aligned} \quad (17)$$

3.4. Основе решавања струјних проблема применом CFD

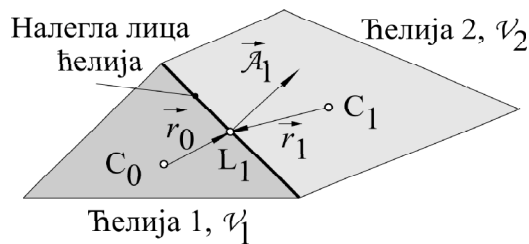
У овом раду је за потребе нумеричког решавања проблема динамике флуида коришћен CFD пакет ANSYS Fluent [92]. ANSYS Fluent у основи користи нумеричку методу контролних запремина за превођење скаларних једначина транспорта у алгебарске облике, који се надаље решавају итеративним путем. Алгоритам прорачуна се заснива на интеграцији једначина транспорта за сваку контролну запремину, дајући дискретизовану једначину која представља закон одржања у оквиру контролне запремине.

3.4.1. Општи принцип дискретизације скалара и решења

Дискретизована једначина одржања опште променљиве ϕ (15), за сваку контролну запремину, односно, ћелију нумеричке мреже, у нумеричком домену, се може представити са (18) [92,93,125-129]

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \mathcal{V}}_{\text{брзина промене } \phi \text{ у целом домену}} + \underbrace{\sum_l^{N_{\text{лица}}} \rho_l \vec{v}_l \phi_l \cdot \vec{A}_l}_{\text{конвективни члан}} = \underbrace{\sum_l^{N_{\text{лица}}} \Gamma_l \nabla \phi_l \cdot \vec{A}_l}_{\text{дифузивни члан}} + \underbrace{S_\phi \mathcal{V}}_{\text{извор}} \quad (18)$$

где су $(\partial \rho \phi / \partial t) \mathcal{V}$ брзина промене ϕ по запремини ћелије (решава се временском дискретизацијом), \mathcal{V} запремина ћелије, $N_{\text{лица}}$ број лица која окружују ћелију, \vec{A}_l површина налегних лица и $\nabla \phi_l$ градијент ϕ на лицу l , слика 7.



Слика 7 Две суседне ћелије нумеричке мреже [92,93]

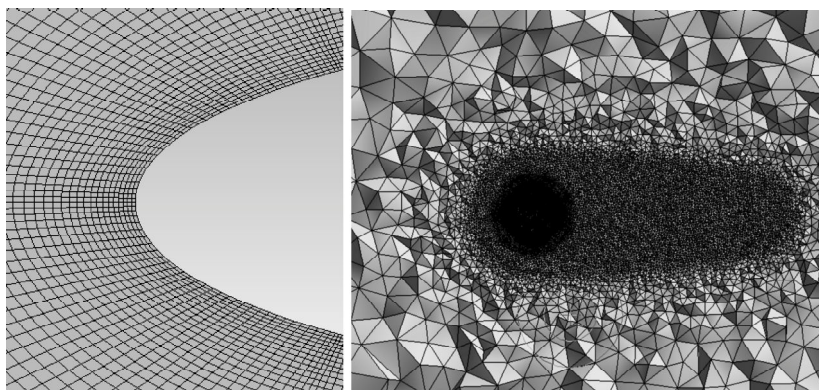
Дискретизована нелинеарна скаларна једначина транспорта (18) садржи непознате величине променљиве ϕ у центроиду посматране ћелије мреже (слика 7: центроид C_0) али и непознате у суседним ћелијама ϕ_{sc} (слика 7, центроид C_1). Линеаризовани облик (18) је представљен као $a_p \phi = \sum a_{sc} \phi_{sc} + b$, где су a_p , a_{sc} коефицијенти линеариције, а који надаље чине део матрице коефицијената за читав систем.

3.4.1.1. Просторна дискретизација

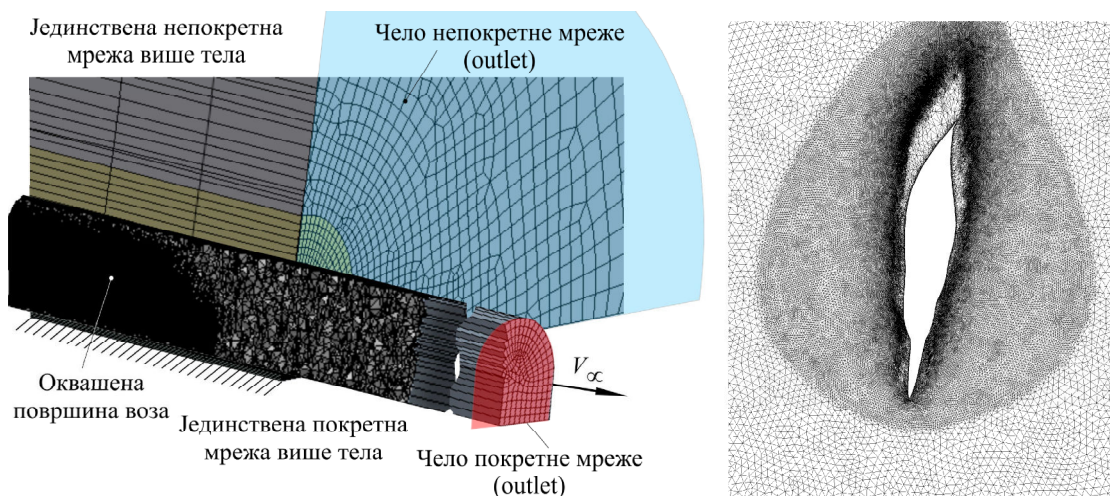
Просторна дискретизација НСЈ представља нумеричку апроксимацију конвективних, вискозних флуксава и извора, и подразумева поделу посматраног простора – домена, у случају методе коначних запремина, на ситније запремине са циљем дискретизације једначина транспорта и њиховог решавања корачним путем [92,93,126-129].

3.4.1.2. Дискретизација простора – мреже

Елементи простора који испуњавају домен струјног поља представљају тзв. нумеричку мрежу. У основи се примењују два типа нумеричких мрежа: структурисане (слика 8а) и неструктурисане мреже (слика 8б) [93,127].



(а) структурисана мрежа (б) неструктурисана мрежа



(в) клизна мрежа

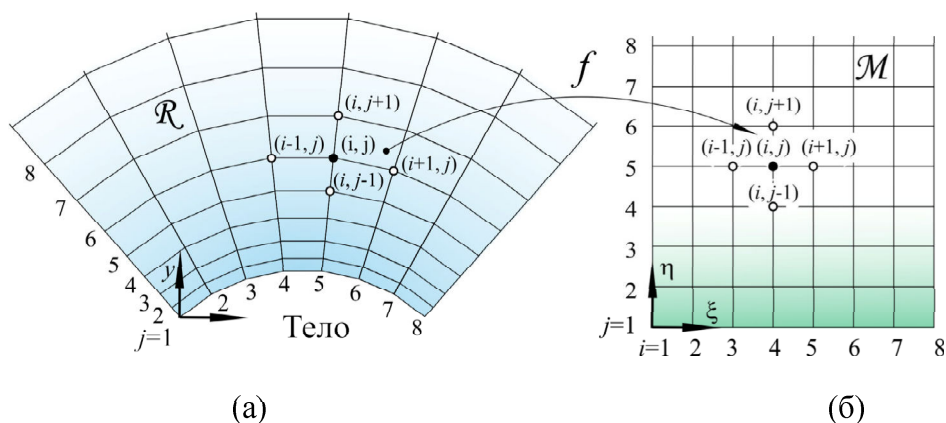
(г) деформабилна мрежа

Слика 8 Врсте нумеричких мрежа

Зарад што бољег прилагођавања мреже облицима тела креиране су нове методе које омогућавају: стварање мултиблок мрежа, или комбиновање компатибилних, али засебних мрежа, као што је то случај код клизних, слика 8в, или деформабилних мрежа, слика 8г, у примени код нестационарних струјања.

Структурисане мреже имају уређен распоред геометријски сличних елемената (напр. правоугаоници у 2D, квадрати у 3D или криволинијских контура базе, ако прате контуре граница). Чворне или крајње тачке по границама домена, код структурисане мреже имају дефинисан положај у физичком и нумеричком простору. Једначине транспорта, које описују кретање у домену са структурисаном мрежом морају укључити пресликавање, f , физичког $\mathcal{R}(x, y)$ у нумерички простор $\mathcal{M}(\eta, \zeta)$ [127], слика 9а,б. Структурисане мреже се могу

произвести алгебарским методама или методама пресликавања помоћу ПДЈ.



Слика 9 Пресликавање чворних тачака структурисане мреже (а) 2D мрежа у физичком простору (б) 2D мрежа у нумеричком простору

$$f: x0y: \frac{\partial u}{\partial x} + c \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \longrightarrow \xi0\eta: (\xi_x + c\xi_y) \frac{\partial u}{\partial \xi} + (\eta_x + c\eta_y) \frac{\partial u}{\partial \eta} = 0, \quad (19)$$

$$\xi = \xi(x, y), \quad \eta = \eta(x, y), \quad \forall x_i \quad i=0, 1, 2, \dots \text{ и } \forall y_j \quad j=0, 1, 2, \dots$$

Код неструктурисаних мрежа, чворови ћелија мреже нису повезани у уређеном реду. Метода коначних запремина се примењује директно за сваку ћелију мреже – без пресликавања физичког у нумерички домен, с обзиром да се користе једначине одржања интегралног облика. Ћелије такве мреже могу бити различитих облика и величина, деформисани у односу на основне облике, при чему попуњавају домен без преклапања. Неструктурисане мреже се могу произвести на два начина: Деланај-Воронојевом (DVT) или методом напредујућег фронта (AFM) [127].

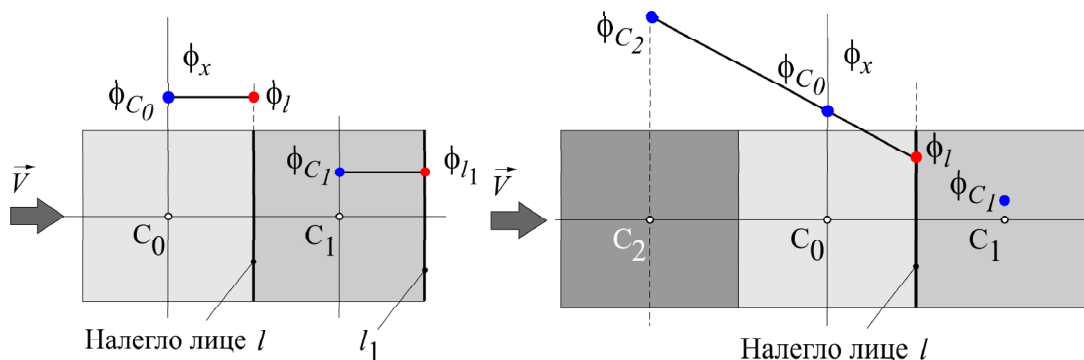
Структурисане и неструктурисане мреже, у комбинацији или појединачно могу се употребити за моделирање појединачних или вишебројних покретних зона. Вишебројне зоне мреже се уобичајено користе у проблемима са релативним кретањем објеката у струји (турбомашина, мимоилажење возова, и др). У програму ANSYS Fluent на располагању су три приступа: модел вишебројних референтних структура (MRF), модел мешавине и модел клизних мрежа.

3.4.1.3. Просторна дискретизација за променљиве величине

Конвективни члан у (18) је одређен вредношћу ϕ_l на лицу ћелије, док су дискретне вредности ϕ одређене у центроидима ћелија (слика 7 – C_0 и C_1). За одређивање ϕ_l потребно је извршити интерполацију вредности са центроида на лице ћелије. Интерполација се врши шемама „уз–струју“ (upwind scheme): првог и другог реда, централних разлика, QUICK, трећег реда MUSCL и др. У основи шема „уз–струју“ означава методу одређивања вредности ϕ_l на лицу ћелије мреже на основу вредности ϕ_{C_0} у центроиду ћелије која се положајем налази уз струју, претходи посматраној (слика 10а,б) [92].

Шема првог реда уз–струју даје резултате мање тачности, али и мање закупуља ИТ ресурсе, тако да се уобичајено користи за добијање прелиминарних резултата у првим итерацијама рачуна. За постизање боље тачности (како за притисни тако и за густински солвер) користи се шема дискретизације другог реда уз–струју, која дефинише променљиву величину на лицу ћелије у функцији градијента у центроиду његовог положаја у односу на лице, $\phi_l = \phi_C + \nabla \phi_C \cdot \vec{r}$ (слика 7).

Дифузиони члан у (18) се одређују шемом централних разлика, са тачношћу другог реда.



(а) шема првог реда уз–струју

(б) шема другог реда уз–струју

Слика 10 Интерполација вредности променљивих на лицима ћелија

3.4.2. Временска дискретизација

Када се решавају нестационарни проблеми струјања, осим просторне неопходно је да се обави и временска дискретизација, која се врши у основи исто као и стационарна просторна, с тим да се интеграција сваке величине врши за временски корак, Δt , делић укупног времена трајања посматране појаве.

Брзина промене ϕ_l се представља функцијом променљиве, $\partial\phi/\partial t = F(\phi)$, при чему $F(\phi)$ садржи и просторну дискретизацију. Временска дискретизација $\partial\phi/\partial t$ представља апроксимацију добијену методом коначних разлика, тачности првог реда и тада је $(\phi^{n+1} - \phi^n)/\Delta t = F(\phi)$ или другог реда када је $(3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1})/(2\Delta t) = F(\phi)$, при чему су: ϕ^{n+1} – вредност у следећем кораку у тренутку $t + \Delta t$, ϕ^n – текућа вредност у t и ϕ^{n-1} – вредност у првом претходном тренутку $t - \Delta t$. Функција $F(\phi)$ се може апроксимирати за први будући тренутак на два начина (а) имплицитним $\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^{n+1})$, када се ϕ^{n+1} односи на вредност у првој суседној ћелији мреже, у првом будућем тренутку, и (б) експлицитним $\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^n)$. Имплицитна шема је стабилна независно од дужине временског интервала, док је експлицитна (доступна за густински солвер) осетљива на промене дужине временског интервала, те неопходно је да он буде најмањи од свих локалних временских корака у домену.

3.4.3. Одређивање градијената и дериватива

Градијенти функције ϕ су основа за одређивање скаларних величина на лицу ћелије мреже (слика 7), за срачунавање секундарних дифузионих чланова и дериватива брзина. Такође, градијент ϕ се уобичајено употребљава за дискретизацију конвективних и дифузионих чланова у једначинама одржања (18). За срачунавање градијената на располагању су три методе: Грин-Гаус (Green-Gauss) заснован на ћелији, Грин-Гаус у чворовима (GGNB) и метода најмањих квадрата за ћелију [92,93]. Као најпоузданија, али и ИТ захтевна показала се GGNB, која је коришћена у овом раду.

Према Грин-Гаусовој теореме, градијент скалара ϕ , у центриоду S_0 , се приказује у дискретизованом облику као сума производа средњих вредности ϕ_l и по свим лицима једне ћелије, по њеној јединичној запремини

$$(\nabla\phi)_{C_0} = (1/V) \sum_I \bar{\phi}_I \bar{A}_I, [92].$$

Грин-Гаусова метода за чворове одређује вредности ϕ_I као средњу аритметичку средину вредности у чворовима $\bar{\phi}_n$, заједничког лица, са N_I чворних тачака, у запису $\phi_I = (1/N_I) \sum_n \bar{\phi}_n$.

3.4.4. Пакети за решавање једначина транспорта (солвери)

С временом и према текућим потребама у ANSYS Fluent [92] је развијен нумерички модел за нестишљива струјања, „притисни“ пакет за решавање или солвер („pressure-based solver“), а потом и за стишљива струјања, уобичајено намењен за примену при великим брзинама, „густински“ („density-based solver“). Савремена софтверска решења дају квалитетне резултате и ван области уобичајене примене, тако да се напр. густински солвер може применити и при подзвучним брзинама у оним областима у струјном пољу у којима се очекује појава стишљивости и пропратни ефекти. Оба солвера прати исти алгоритам за решавање (а) подела домена на ситније запремине помоћу мреже; (б) интеграција једначина одржања за сваку контролну запремину и запис алгебарских једначина за дискретне непознате зависно променљиве; (в) линеаризација дискретизованих једначина са циљем решавања линеарног система једначина, и одатле одређивања нових вредности зависно променљивих. Разлика између солвера је у процесу линеаризације и решавања дискретизованих једначина.

3.4.4.1. Притисни солвер

Притисни солвер одређује брзинско поље из једначине стања, а поље притисака из једначине за притиске (или корекције). Једначина за притиске се одређује из једначина континуитета и одржања количине кретања, тако да поље брзина, кориговано према притисцима, задовољава континуитет. Ова метода је корачног карактера с обзиром да се ради о повезаним и нелинеарним једначинама. Постоје два алгоритма за решавање, и то: притисни не повезани и повезани. Код притисног не повезаног алгоритма, решавају се независно једна за другом

једначине транспорта за променљиве из скупа решења (напр. $u, v, w, p, T, k, \varepsilon$) [92].

Дискретизација једначине одржања количине кретања

Шеме дискретизације скаларних једначина транспорта (18) примењују се и за дискретизацију једначина одржања количине кретања,

$$a_p u = \sum_{SC} a_{sc} u_{SC} + \sum p_l S \cdot \vec{i} + S, \text{ укључујући вредности у суседним ћелијама мреже и}$$

на налеглом лицу [92]. Поље брзина биће одређено ако су познати поље притисака и масени флуksеви по лицима ћелија мреже. Како су вредности притиска, p , и брзине, u , познати у центроиду ћелије потребно је интерполирати вредности из центроида на лице ћелије, p_l .

Вредност интерполираног притиска на лицу ћелије, користећи коефицијенте дискретизоване једначине за две суседне ћелије (слика 7), представља (20)

$$p_l = \frac{p_{C_0}/a_{p,C_0} + p_{C_1}/a_{p,C_1}}{1/a_{p,C_0} + 1/a_{p,C_1}} \quad (20)$$

Овако интерполиран притисак, стандардним начином, се може применити само у случајевима са малим разликама притисака између суседних ћелија. За стишљива струјања, препоручује се шема другог реда, или PRESTO! шема када се ради о мултифазном струјању [92].

Дискретизација једначине континуитета

Једначина континуитета, интегралног облика $\oint \rho \vec{v} d\vec{S} = 0$, у дискретизованом облику је $\sum_l^{N_l} J_l S_l = 0$, где је J_l масени флуks кроз лице, облика ρv_n . Како је потребно одредити вредности брзина унутар ћелија и одатле добити вредности брзина на лицу ћелије v_n , J_l се изражава као

$$J_l = \hat{J}_l + d_l (p_{C_0} - p_{C_1}), \quad (21)$$

при чему \hat{J}_l садржи брзине у центроидима суседних ћелија, d_l је зависност од средњег коефицијента \bar{a}_p на налеглим лицима, из дискретизоване једначине одржања количине кретања (20) [92].

Када је реч о густини, она се за нестишљива струјања одређује као средња

аритметичка средина, док се код стишљивих (сматрајући ваздух идеалним гасом) интерполира неком од шема уз–струју, на лицу хелије. Код мултифазних струјања зависно од карактеристика укључених фаза у струјању (вода – ваздух и сл.) примењује се и интерполациона шема.

Међувеза притиска и брзине

Алгоритам међувезе притиска и брзине одређује једначине за притисак из једначина континуитета и одржања количине кретања, (7) – (9). Један од алгоритама је тзв. SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, SIMPLE), одређује алгебарске једначине за кориговани притисак [92]. Напредовањем у итеративном поступку добијају се текуће вредности корекција притиска. Дискретизована једначина коригованог притиска у хелији, p' , је облика $a_p p' = \sum_{SC} a_{sc} p'_{sc} + b$, где је b извор – укупан улаз за хелију, $b = \sum_l^{N_l} J_l^* S_l$, а $J_l = J_l^* + d_l (p'_{C_0} - p'_{C_1})$. Притисак у хелији се коригује на начин $p = p^* + \alpha_p p'$, а флукс кроз лице хелије помоћу J_l , где је α_p – под-релаксациони фактор за притисак.

3.4.4.2. Густински солвер

Алгоритам густинског солвера одређује поље густина из једначине континуитета, а брзинско поље из једначина одржања количине кретања. Дискретизоване и нелинеарне једначине одржања се у првом кораку линеаризују, како би се добио систем једначина или вектор зависно променљивих, у свакој хелији нумеричког домена, те се потом решавају корачно и једновремено.

Са циљем да решење система једначина брже конвергира и да цео поступак буде временски и економски оправдан, код густинског солвера се прибегава прилагођавању система једначина (15), односно, дефинисању еквивалентног система који ће брже конвергирати.

Конвективни флукс густинског модела се може одредити на неколико начина, а овде је укратко описана шема подељених разлика флукса Roe Flux (Difference Splitting Scheme, Roe Flux) [92]. Вектор флукса за нестишљиво

струјање, који садржи информације о простирању кроз домен са брзином и правцем у складу са еугенвалима система, дели се и тако носи собом информације у сваком правцу. Дељење вектора флукса се врши по странама лица налегних ћелија мреже (лева и десна) али је систему придодата и матрица са дисипативним члановима. Матрица са дисипативним члановима врши интерполацију уз–струју за променљиве конвекције, притиска и флукса брзине код суперсоничног струјања, док са друге стране обезбеђује међувезу притиска и брзине код нестишљивог флуида и при малим брзинама, потребну за стабилну и ефикасну конвергенцију резултата.

Повезаност између једначина одржања се формулише: имплицитним или експлицитним начином линеаризације једначина одржања. Битно је напоменути да се једначине транспорта за додатне скаларе, напр. турбуленцију, решавају независно од повезаног система једначина.

За имплицитни начин линеаризације, коришћен у овом раду, непозната вредност променљиве у свакој ћелији се срачунава на основу зависности које у себи садрже, и постојеће познате и непознате вредности променљиве од суседних ћелија мреже. Посматрајући скуп суседних ћелија уочава се постојање истих непознатих величина у више једначина система које је потребно једновремено решавати.

Код експлицитног начина линеаризације непознате величине у свакој ћелији се срачунавају употребом зависности које садрже само по једну – постојећу срачунату вредност променљиве величине. На овај начин се непозната величина појављује само у једној једначини у систему, а непознате се срачунавају редом једна по једна.

Код густинског модела, описаног експлицитно или имплицитно, врши се и експлицитна и имплицитна подела времена. За овај рад значајна је имплицитна метода поделе времена за нестационарна струјања, подела времена на временске кораке и „унутрашње“ итерације у оквиру временских корака.

3.4.5. Моделовање турбуленције струјања

Струјање флуида је само у ограниченом броју случајева или у ограниченом делу струјног поља ламинарно, са уређеним распоредом блиских слојева и стационарно у случајевима непроменљивих граничних услова. Турбулентно нестационарно струјање, уобичајено у пракси, настаје преображајем из ламинарног струјања. Основни критеријум за утврђивање типа струјног поља је вредност Рејнолдсовог броја [125], који доводи у релативни однос инерцијалне и вискозне силе. Критична вредност $Re_{кр}$ се узима за граничну вредност, односно, вредност при којој долази до преображаја ламинарног у турбулентно струјање. Вредност $Re_{кр}$ заправо представља уску распону вредности који зависи од врсте флуида, услова струјања, облика опструјаваног тела, карактеристичне дужине и квалитета површина. Основна одлика турбулентног струјања су: изражена промена параметара струјања у правцу попречно на правац слободне струје у односу на оне настале у правцу струјања; и релативно мала димензија зоне дејства у односу на карактеристичну дужину, у правцу слободне струје. Карактер турбулентног струјања се описује постојањем вртложности струјања тродимензионалног и непериодичног карактера, вртложењем које води ка мешању и размени количине кретања, топлоте и материје; мешањем које доводи до дисипације количине кретања и кинетичке енергије у условима вискозног флуида при чему долази до смањења градијената брзине, Шлихтинг (Schlichting) [130]. Турбулентно струјање представља енергетску каскаду, сачињено од вртлога различитих величина, при чему они већи одузимају енергију од слободне струје и трансформишу се у мање, док се код најмањих, енергија турбулентног струјања претвара у унутрашњу енергију путем дисипације вискозности.

У пракси последице постојања турбуленције у струји су многе, као на пример: енергетски губитци или енергетска ефикасност различитих објеката, губитак на перформансама или управљивости код летелица, лош квалитет заваара код заваривања у струји заштитног гаса и многи други, због чега је врло значајно што прецизније и реалније предвиђање понашања струјања нумеричким путем.

Основни примери за слободну турбулентну струју су: млазник, вртложни траг и мешање струја; а за примере са граничним слојем су: гранични слој око

равне плоче или у цевима. Примери примене различитих турбулентних модела и поређење резултата из испитивања храпаве кугле са визуелизацијом струјања у подзвучном аеротунелу Т-35, ВТИ ВС, су дати у [113,131] (Прилог 1).

Са циљем да се одреде параметри турбулентног струјања развијена су, уопштено посматрано, три приступа, иако до сада заправо није креиран јединствен модел којим би се поуздано предвидело турбулентно струјање у свим случајевима. Први приступ, директне нумеричке симулације, DNS (Direct Numerical Simulations, DNS), без моделирања нумерички решава НСЈ за читав распон величина вртлога. Следећи у низу је модел симулације великих вртлога, LES (Large Eddies Simulations, LES), који решава НСЈ усредњене у 3D простору, те директно одређује велике вртлоге, док се они мањи од ћелија мреже моделују. Како су DNS и LES приступи захтевни по питању ИТ ресурса и времена реализације најчешће се примењују НСЈ усредњене према Рејнолдсовом моделу, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS), и решавају усредњавањем по времену, укључивањем усредњених вредности параметара слободне струје. При томе RANS обухватају све карактеристичне дужине турбулентног струјања. НСЈ усредњене према Рејнолдсовом моделу су у примени за већину истраживачких и инжењерских проблема [92,132-135].

3.4.5.1. НСЈ усредњене према Рејнолдсовом моделу

Непредвидљивост понашања струјања захтева свеобухватан опис кретања свих флуидних делића. Мерења интензитета турбуленције слободне струје у аеротунелима (топлим влакном, филмом или ласер–Доплер анемометром) дају промену брзине слободне струје у зависности од протеклог времена. За CFD моделирање турбулентног струјања овакав начин приказивања није од практичног значаја, те се прибегава рашчлањавању на два елемента: усредњене вредности брзине и флукуационе брзине. Компонента брзине у изабраном Ox правцу је тада $u_i(x, y, z, t) = \bar{u}_i(x, y, z) + u_i'(x, y, z, t)$, где су $\bar{u}_i(x, y, z)$ – средња брзина слободне струје, а $u_i'(x, y, z, t)$ – променљиви, осцилујући део укупне вредности компоненте брзине $u_i(x, y, z, t)$. На исти начин рашчлањавају се и други параметри струјања: притисак, температура и др.

Усредњавање вредности параметара струјања у изабраној непокретној тачки у простору, у периоду довољно дугачком да су усредњене вредности независне од времена, дато је на примеру компоненте брзине

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+t_1} u dt \quad (22)$$

Осцилације брзине утичу на појаву додатних – Рејнолдсових напона: нормалних $(\tau_{xx} = -\rho \overline{u'^2}, \tau_{yy} = -\rho \overline{v'^2}, \tau_{zz} = -\rho \overline{w'^2})$ и тангенцијалних $(\tau_{xy} = \tau_{yx} - \rho \overline{u'v'}, \tau_{xz} = \tau_{zx} - \rho \overline{u'w'}, \tau_{yz} = \tau_{zy} - \rho \overline{v'w'})$ [123].

У складу са оваквим приказивањем параметара струјања изведени су и кориговани изрази једначина траспорта усредњених у времену – Рејнолдсове једначине. Рејнолдсов тензор напона, $R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ (i, j, k представљају правце x, y и z), представља усредњене ефекте турбулентне конвекције, чијим укључивањем у једначине промене количине кретања су настали RANS модели са сетом непознатих које је потребно моделовати како би се затворио систем једначина.

Једначина промене количине кретања RANS модела [92,93,125-129],

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j}. \quad (23)$$

RANS модели могу бити дефинисани на два начина, и то применом модела вртложне или турбулентне вискозности, μ_T , на основу Бусинескове (Boussinesq) хипотезе или моделом Рејнолдсових напона.

Према Бусинесковој претпоставци Рејнолдсови напони су доведени у везу са усредњеним градијентима брзина [92,93,125-129]

$$R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_T \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (24)$$

уведен је нови параметар турбулентна вискозност $\mu_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ карактеристика турбулентног струјања и зависи од турбулентне кинетичке енергије, $k = \overline{u'_i u'_i} / 2$, и степена дисипације турбулентне кинетичке енергије, $\varepsilon = -dk/dt = \nu \overline{\partial u_i / \partial x_j (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)}$. Члан δ_{ij} је Кронекерово делта. Промена специфичне дисипације представља однос $\omega = \varepsilon / k$, а кинематска

турбулентна вискозност је $\nu_T = \mu_T / \rho$ [m^2/s].

Турбулентна вискозност се моделује, на основу димензионе анализе, према понашању турбулентног струјања у времену и према размерама димензија вртлога. Различити турбулентни модели, у оквиру RANS модела, моделирају μ_T на различите начине, а у складу с тим имају и различите особине и примену.

Турбулентни модел Спаларт-Алмарас (Spalart-Allmaras, S-A) једну једначину транспорта (25) укључивањем модификоване турбулентне вискозности, $\mu_T = f(\tilde{\nu})$ [92,93]

$$\rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\nu} u_i}{\partial x_i} \right) = \underbrace{G_{\tilde{\nu}}}_{\text{стварање турбулентне вискозности}} + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \right] + C_{b2} \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \right)^2 \right\} - \underbrace{Y_{\tilde{\nu}}}_{\text{нестајање турб. вискозности у близини зидова}} + \underbrace{S_{\tilde{\nu}}}_{\text{UDF извора}} \quad (25)$$

где су $\sigma_{\tilde{\nu}}$, C_{b2} , константе, а ν молекуларна кинематска вискозност. Функција турбулентне вискозности је дефинисана зависношћу

$$\mu_T = \rho \tilde{\nu} \underbrace{\left[\frac{(\tilde{\nu}/\nu)^3}{(\tilde{\nu}/\nu)^3 + C_{v1}^3} \right]}_{\text{пригушна функција вискозности}} \quad (26)$$

S-A модел је нашао примену у ваздухопловству и турбомашинама код проблема струјања по зидовима, са slabим отцепљењима и рецикулацијом струјања.

Турбулентни модели типа k - ϵ : стандардни, RNG и оствариви (Realizable), решавају једначине транспорта за k и ϵ , те ако су они познати може се одредити и $\mu_T = f(\rho k^2 / \epsilon)$. Једначине транспорта за оствариви k - ϵ модел су приказане са (27) за k и (28) за ϵ [92,93]

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial \rho k}{\partial t}}_{\text{брзина пораста}} + \underbrace{\frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_i}}_{\text{транспорт услед конвекције}} &= \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]}_{\text{транспорт услед дифузије}} - \underbrace{\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}}_{\text{стварање турб. кинетичке енергије}} \\
 + \underbrace{G_b}_{\text{стварање турб.кин. енергије услед потиска}} - \underbrace{Y_M}_{\text{утицај променљиве дилатације код стишљивог струјања}} - \underbrace{\rho \varepsilon}_{\text{брзина нестајања}} + \underbrace{S_k}_{\text{UDF извор}}
 \end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t}}_{\text{брзина пораста}} + \underbrace{\frac{\partial \rho \varepsilon u_j}{\partial x_i}}_{\text{транспорт услед конвекције}} &= \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right]}_{\text{транспорт услед дифузије}} + \rho C_1 S_\varepsilon - \\
 - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + \underbrace{S_\varepsilon}_{\text{UDF извор}}
 \end{aligned} \tag{28}$$

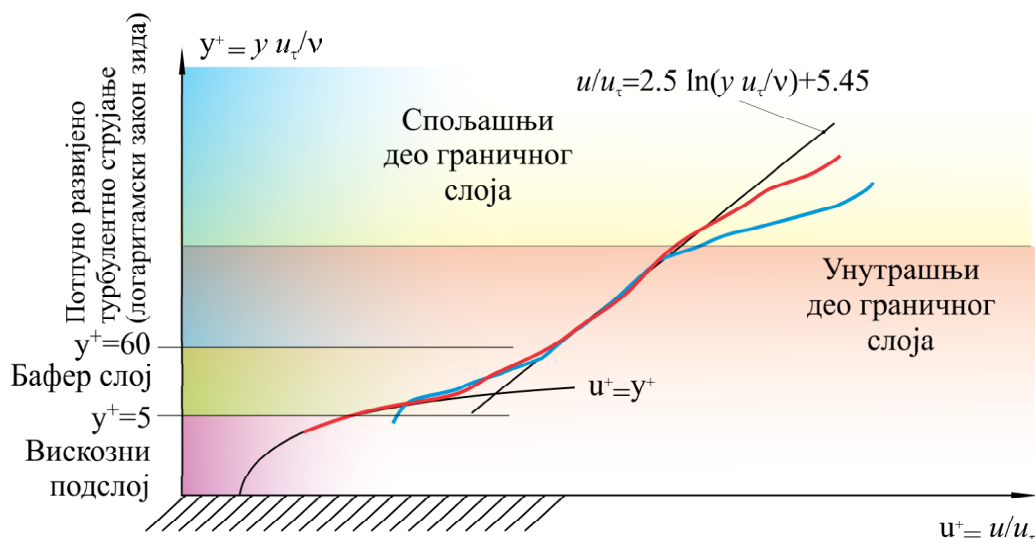
где су σ_k и σ_ε турбулентни Прандтлови бројеви, а C_2 и $C_{1\varepsilon}$ емпиријски одређене константе. Врло је важно истаћи да у случају остваривог k - ε турбулентног модела $\mu_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ поред осталог зависи и од члана C_μ , који је функција средње брзине и турбуленције струјања.

Оствариви k - ε модел узима у обзир и утицај потиска на стварање k у случајевима када се укључује гравитационо поље и температурско поље. За струјања при високим M оствариви k - ε модел укључује и члан назван „дисипација услед дилатације“ којим се представља утицај стишљивости струјања на турбуленцију [92,93]. Такође, исти модел предвиђа и примену преноса топлоте услед присуства турбуленције, коришћењем Рејнолдсове аналогije на пренос количине кретања за турбулентно струјање што је врло значајно код струјања у условима стишљивости флуида [92,93].

Турбулентни модели типа k - ε су нашли широку примену у индустрији, истраживањима и дизајнирању јер су се показали као робусни, прилагодљиви и економски рационални.

Заједничко за све типове k - ε турбулентних модела је то да они не

омогућавају интеграцију једначина до самих граница домена, већ у струји до области важења логаритамског закона зидова, тако да се на посебан начин решавају проблеми струјања у близини зидова, слика 11.



Слика 11 Струјање у близини зида [92,93]

Препоручена дефиниција утицаја зидова, при употреби $k-\epsilon$ модела, посебно код комплексних струјања укључујући постојање зауставе, отцепљења, регенерације или удара струјања, је неравнотежна функција зида (Non-Equilibrium Wall Functions, NEWF), поред стандардне, због особине да парцијално урачунава ефекте градијената притисака [92,93]. Такође, препоручене су и вредности бездимензионалног растојања од зида, $y^+ = \rho u_\tau y / \mu$, у области $30 > y^+ > 300$, за коју је потврђен логаритамски закон за средњу брзину струјања [92,93].

3.4.5.2. Почетни и гранични услови

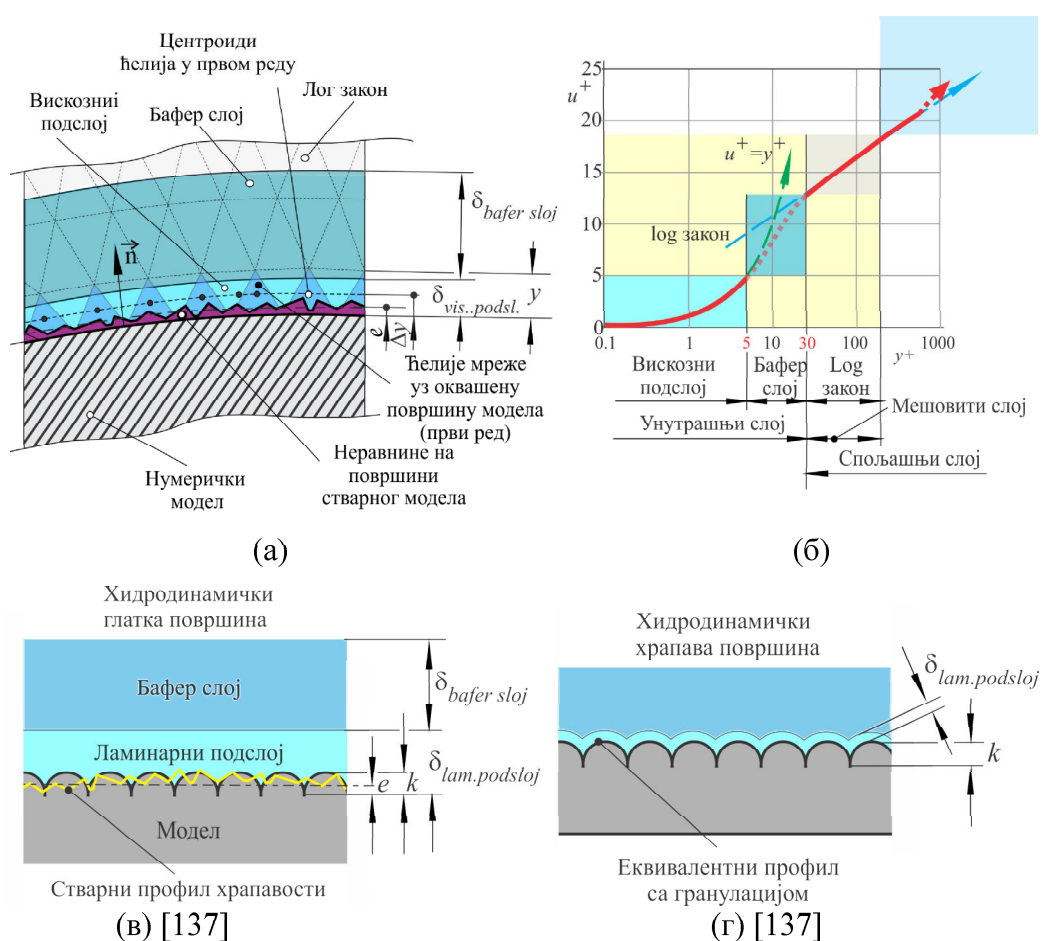
Струјање моделовано НСЈ се може класификовати према математичком моделу [126], где вискозно стационарно струјање представља ПДЈ елиптичког типа, вискозни нестационарни проблем представља ПДЈ параболичног типа. Са друге стране невискозно стационарно струјање у подзвучној области је елиптичког, а у надзвучној области – хиперболичног типа, где нестационарни случај невискозног струјања представља хиперболички проблем, независно од области брзина.

Стационарни проблеми су описани елиптичким једначинама, чији је типични облик дат Лапласовом једначином, а решења се одређују постављањем услова за зависно променљиве по граничним површинама домена. Параболични и хиперболични облици ПДЈ, нестационарни или стационарни струјни проблеми, се решавају корачним методама са дефинисаним почетним и граничним условима, при чему домени решења нису затворени. За нестационарно стишљиво вискозно струјање неопходно је дефинисати почетне услове, у целокупном домену решења, и то ρ , \vec{V} и T , за $t = 0$ s и граничне услове (за стационарне и нестационарне проблеме), по свим границама домена и то: круте границе – зидове (услови: без проклизавања, равномерне температуре и топлотног флукса) и границе изабраног струјног поља на улазном („inlet“) и излазном („outlet“) пресеку. На улазном пресеку ρ , \vec{V} и T треба да су дефинисани у зависности од положаја, док је на излазном пресеку потребан услов нултих градијената свих променљивих у правцу струјања. Такође неопходна је и вредност притиска у једној тачки посматраног домена. Детаљнији опис типова и начина решавања ПДЈ је приказан у [92,93].

Одређивање улазног податка о храпавости зидова

Гранични услов постављен за зидове уобичајено не укључује храпавост површина, али програм оставља могућности уноса висине неравнина и константу храпавости (емпиријска величина). Висина неравнина се на физичком моделу може измерити различитим техникама контроле квалитета производа. Укључивање храпавости у процесу нумеричких симулација је захтевно пре свега због услова, које треба задовољити да би се добила валидна нумеричка симулација, и процесног времена да се изврше захтевне симулације. Суштина проблема лежи у нумеричком третману неравнина, постављању квалитетног мрежног модела и избору турбулентног модела. Висина неравнина доводи до повећања висине првог слоја мрежног модела с чим се сужава избор турбулентних модела на располагању на напр. SST, $k - \omega$, $k - \omega$ који су у примени за третман вискозног подслоја (област $y^+ < 5$), са посебним третманом зида у употреби су модел „Enhanced Wall Treatment“ или модел малог Re („Low-Re“) [92,93]. Са друге стране моделирање већих неравнина доводи до екстремног повећања елемената у мрежном моделу.

Оквашена површина је аеро- или хидродинамички глатка уколико су неравнине толико мале да су потпуно утопљене у ламинарни подслој, при чему су равномерно распоређене и позната је њихова средња висина. Слика 12а је шематски приказ нумеричког модела са стварним профилем храпавости у зони унутрашњег дела граничног слоја. Истакнут је храпави слој средње дебљине e и наглашен је положај првог низа троугаоних елемената узорка површинске мреже. Слика 12в приказује пример аеродинамички глатке површине, код које је задовољен услов да су неравнине потопљене у ламинарни подслој, $e = \delta_{lam.podsl.}$ што би одговарало стварним условима струјања [92,93,137].



Слика 12 Шематски приказ нумеричког модела са стварним и еквивалентним профилем храпавости у зони унутрашњег дела граничног слоја

Из потребе да се моделира струјање и израчунају параметри помоћу CFD, присутни су и додатни критеријуми: да је први низ ћелија мреже уз површину довољне висине, тако да слој у нумеричком домену који спаја центроиде ћелија из првог низа мреже прекрива све неравнине и при томе је најмање двоструко виши

од самих неравнина [92,93,137]. Слика 12в,г шематски приказују струјање преко хидродинамички глатке и храпаве површине са назначеним стварним профилем и еквивалентним у односу на калибар пешчаних зрна, K_s , за чију вредност је предложено да се може одредити приближно као $K_s=5.863 Ra$ [137,138].

Висина положаја центроида првог низа ћелија мреже, Δy , може се приближно одредити на основу израза за равну плочу

$$\Delta y = 8.6 y^+ L Re_\infty^{(-13/14)} \quad (29)$$

где је $y^+ = y u_\tau / \nu$ бездимензионо растојање од зида до тачке у струји изражена помоћу брзине од трења, $u_\tau = (\tau_w/\rho)^{1/2}$, а τ_w напон трења по зиду [93].

Вредност храпавости површине зида је један од улазних параметара којима се дефинише гранични услов на зиду код примене CFD. Основни захтев граничног услова зида се односи на висину првог низа ћелија мреже. Према овом услову, неопходно је да висина центроида ћелија, од граничне површине, из првог низа буде најмање двоструко већа локалне висине неравнина профила.

3.4.6. Мултифазно струјање

Мултифазно струјање подразумева динамичку интеракцију неколико физичких фаза, док су саме активне фазе оне врсте материјала које имају посебан динамички одзив, међудејство са струјањем и потенцијалним пољем којим је посматрана фаза оквашена [92,93]. ANSYS Fluent има развијено више Ојлер–Ојлер мултифазних модела: модел запреминских удела фаза (Volume of Fluid, VOF), модел мешавине и Ојлеров модел. У основи Ојлер–Ојлер (Euler–Euler) приступа, различите флуидне фазе се сматрају континуалним без продирања једне у другу фазу, те су запремине које заузимају фазе заузимају неподељене, а одатле је уведен и концепт запреминских удела фаза по посматраним ћелијама. У наставку је дат приказ употребљеног VOF модела.

3.4.7. Модел запреминских удела фаза – VOF

Резултати нумеричких симулација удара 2D таласа на брод, упоређени од стране Александру и др., сврстали су нумеричке симулације у групу валидних и

поузданих метода за анализу [90]. Ослањајући се на методу контролних запремина, скуп једначина даје итеративно решење раздвајајући комплексан проблем упада тела у воду на делове: утицај гравитације, динамички и мултифазни проблем, принудно деформисање и померање нумеричке мреже, бDOF модел за описивање динамичких карактеристика крутог тела, модел запреминских удела фаза флуида и моделирање турбуленције.

VOF модел је данас у широкој примени у области хидродинамике укључујући и захтевне проблеме из области брзих пловила [82], нафтних и сличних платформи, или балистичког пуцња у воду [139].

Мултифазно струјање се посматра као струјање једне примарне фазе и осталих секундарних фаза које су унешене у примарну фазу, свака са својим уделом у запремини ћелије мреже. Попуњеност ћелије се дефинише запреминским уделом секундарних фаза, те ако ћелија није испуњена са фазом q за њу је $\alpha_q = 0$, ако је потпуно испуњена $\alpha_q = 1$ и ако је делимично испуњена $0 < \alpha_q < 1$ када ћелија садржи и граничну површину или интерфејс између фаза. Запремински удео примарне фазе се срачунава из услова да је сума свих удела фаза једнака 1 [92,93].

3.4.7.1. Једначина запреминског удела фаза

Једначина континуитета за q фазу је основа за праћење граничне површине међу фазама и дата је изразом

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (30)$$

где \dot{m}_{pq} представља масени пренос из фазе q у фазу p , и обрнуто, извор је нулте вредности. У случају дискретизације времена имплицитном шемом, на располагању су стандардна интерполациона шема, QUICK, шеме уз-струју и др. које се примењују ради одређивања флукса по лицима за све ћелије мреже, укључујући и оне блиске граничним површинама фаза [93].

Једначина одржања количине кретања је размењена по запреминским уделима фаза путем ρ и μ .

Једначина одржања енергије се такође размсђује према α_q , при чему су енергија и температура усредњене по маси према изразу

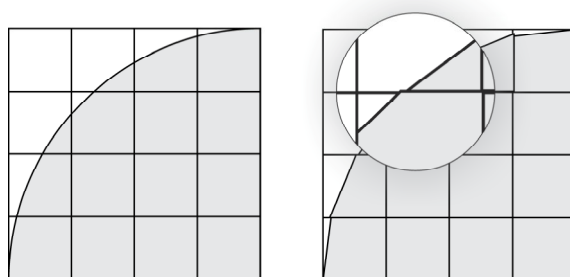
$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q}, \quad (31)$$

при чему је E_q енергија сваке фазе функција специфичне топлоте и дељене температуре сваке фазе.

Модел VOF омогућава и укључивање у систем и скаларних једначина као што су турбулентни модели. Скуп једначина транспорта се решава са раздвојеним вредностима променљивих (напр. κ , ε) по фазама у оквирима целог домена.

3.4.7.2. Интерполација у близини граничне површине раздвајања фаза

Метода контролних запремина условљава срачунавање и изједначавање конвективних и дифузионих флукса по лицима ћелије са изворима унутар саме ћелије. Облик граничне површине раздвајања фаза је у овом раду одређен на основу интерполације методом геометријске реконструкције у ћелијама које су испуњене различитим фазама, слика 13 [92]. Уобичајене интерполационе шеме користе у свим оним ћелијама које су потпуно испуњене једном истом фазом. Овом методом се у границама сваке ћелије линеаризује гранична површина између фаза и на исти начин пренос флуида кроз лица ћелија.



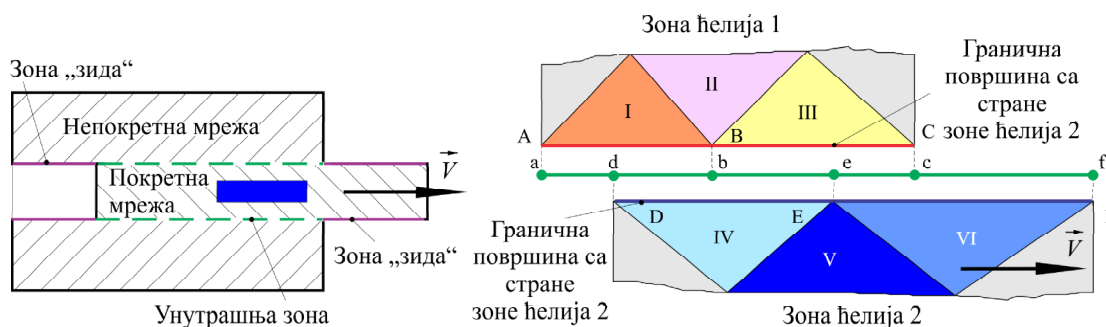
(а) стварни облик граничне (б) геометријска реконструкција

Слика 13 Геометријска реконструкција граничне површине [92]

Својства материјала фаза се одређују на исти начин, те тако за пример густина флуида у ћелији укључује све фазе и њихове запреминске уделе – за две фазе бива $\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1$ или $\rho = \sum \alpha_q \rho_q$, за n фаза.

3.4.8. Клизне мреже

Клизне мреже су у примени уобичајено код нестационарних струјања око објеката који су у релативном кретању, translацији или периодичном кружном кретању. Слика 14а показује један пример са translацијом покретне, клизне, у односу на непокретну мрежу. Непокретна и покретна мрежа клизе, релативно једна у односу на другу, по граничним површинама сачињених од граничних лица ћелија на ободу зона, слика 14б. Пресек граничних површина непокретне и покретне мреже чини једну унутрашњу зону и пар зидова (слободни делови двају мрежа). Унутрашња зона, зона по којој покретна мрежа клизи у односу на непокретну, се користи као основа за срачунавање флукса кроз две неконформне мреже (слика 14б: лица ћелија d–b, b–e, e–c) тако што се заменарују граничне површине зона ћелија, а укључују се лица на унутрашњој зони (слика 14б: флукс кроз граничну површину ка ћелији IV се одређује из информација са унутрашњих зоне d-b и b-e које потичу из ћелија I и III) [92].



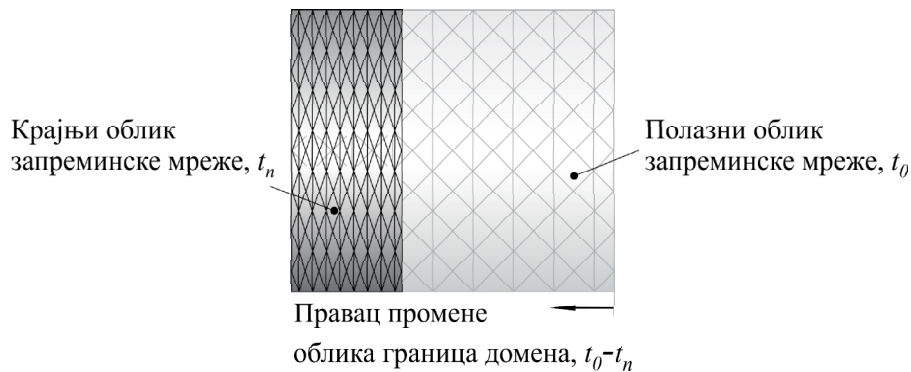
Слика 14 2D гранична површина између две зоне ћелија [92]

3.4.9. Динамичке – деформабилне мреже

У пакету ANSYS Fluent модел динамичких мрежа је предвиђен за струјне моделе код којих се облик граница домена мења током времена [92]. Начин на који се мењају границе може бити унапред дефинисан или срачунат за сваки временски тренутак посебно, као што то ради 6DOF (Six-Degrees of Freedom) солвер. Мрежа се ажурира за сваки текући положај граница домена, почев од облика полазне запреминске мреже, према опису кретања свих покретних зона (лица или зона мреже).

Промена облика, односно, кретање граница мреже ради ажурирања се врши помоћу: методе уједначеног деформисања („smoothing“), динамичког раслојавања и методе локалне реконструкције или промене мреже („local remeshing“).

Код методе уједначеног деформисања са опругама („Spring-Based Smoothing Method“) странице између свих чворова се сматрају идеализованом мрежом међусобно повезаних опруга, слика 15.



Слика 15 Скица методе уједначеног прелаза са опругама [92]

Померање чворова по границама ствара силу пропорционалну померају свих повезаних опруга на правцу кретања, према Хуковом (Hook) закону за линеарну деформацију опруге. Слика 15 приказује пример деформације запреминске мреже по методу уједначеног прелаза са опругама од полазног тренутка, t_0 , са полазним положајем границе са десне стране, до крајњег тренутка, t_1 , у ком је полазна граница померена у правцу промене облика [92].

Солвер шест степени слободе – 6DOF

Солвер 6DOF примењује се у пакету ANSYS Fluent за срачунавање спољашњих сила и момената које делују на круто тело (хидродинамичке, аеродинамичке и сл.). Оптерећења се одређују интеграцијом притисака и површинских напона по оквашеним површинама крутог тела. 6DOF заједно са VOF и деформабилном мрежом се примењује у нестационарним хидродинамичким проблемима при зарањању крутог тела у воду. За примену је потребно додатно укључивање корисничке функције (User-Defined Functions, UDF) која омогућава дефинисање брзине тела по правцу, угаону брзину за тежиште тела, динамичке зоне крутог тела, параметре динамике крутог тела (масе крутог тела и момената инерције) и

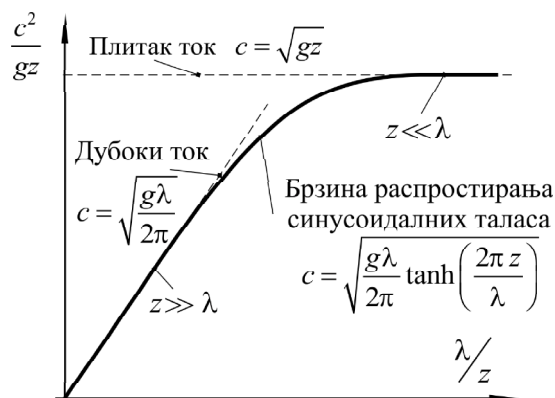
својства друге фазе – воде (густину и брзину простирања звука кроз воду) [92].

3.4.10. Хидрауличка аналогија

Сврха примене аналогија је у примени једноставнијих и економичнијих метода за описивање аналогних струјања, чији се резултати могу превести на жељено струјање, за које су захтевне директне методе мерења, што је за хидрауличну аналогију потврђено нарочито са увођењем нових техника мерења [87,106,107]. Услов за аналогију између два струјања је једнакост математичког модела и почетних и граничних услова којима су они описани [87].

Хидрауличка аналогија се односи на аналогију струјања воде и гаса при различитим условима, па је тако аналогија између стишљивог струјања ваздуха и струјања воде у каналу условљена међуодносом брзине таласа и брзине саме струје. Водени таласи се карактеришу као гравитациони, описани у овом раду, или капиларни, зависно од врсте узрочне силе [87].

Гравитациони таласи настају као последица дејства инерцијалне и гравитационе силе на сваки флуидни делић. Зависност брзине простирања водених таласа, c , од таласне дужине, λ , у односу на дубину тока, z , слика 16 [107].

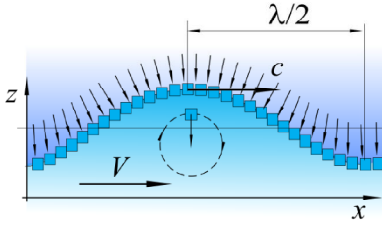
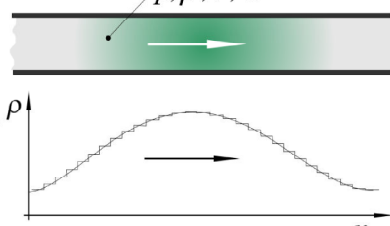


Слика 16 Брзина таласа функција таласне дужине [107]

Табела 1 даје преглед израза и идентичности хидрауличне аналогије за 2D стишљиви изентропски хидраулични гас, $\kappa = 2$, и плитак ток воде са слободном површином, под претпоставком да је струјање воде без трења, да је хоризонтална компонента убрзања воде занемарљива у односу на вертикалну (изазвану

гравитацијом) и да је струјање безвртложно. Метода је уобичајено коришћена и верификована за надкритична струјања [87,106,107].

Табела 1 Изрази и идентичности хидрауличне аналогије [87,106,107]

Вода	Гас
	
Нестишљиво	Стишљиво
Брзина, V	Брзина, V
Брзина таласа, $c = \sqrt{gz}$	Брзина звука, $a = \sqrt{\gamma p / \rho}$
Дубина воде, z	Густина, ρ
Члан, $gz^2/2$	Притисак, p
Дубина воде, z	Температура, T
2	Однос специфичних топлота, $\kappa \rightarrow \kappa = 2$
Фрудов број, $Fr = V/c$	Махов број, $M = V/a \rightarrow M \equiv Fr$
Подкритично $Fr < 1$	Подзвучно струјање $M < 1$
Надкритично $Fr > 1$	Надзвучно струјање $M > 1$
Хидраулични скок	Ударни талас
$\frac{z}{z_0} = 1 + \frac{1}{2} Fr^2$	$\frac{T}{T_0} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \rightarrow \frac{T}{T_0} \equiv \frac{z}{z_0}$
$\frac{\partial}{\partial x} zu + \frac{\partial}{\partial y} zv = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} \rho u + \frac{\partial}{\partial y} \rho v = 0 \rightarrow \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{z}{z_0}$
	$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{T}{T_0} \rightarrow \frac{p}{p_0} = \left(\frac{z}{z_0} \right)^2$

3.5. Термографско мерење површинске температурске расподеле

Термографска мерења се у индустријској делатности користе за потребе одржавања, односно, дијагностиковања стања и рада различитих система и уређаја као и у превентивне сврхе. Промена у расподели температура по површинама система или уређаја је последица промене оптерећења или преоптерећења током рада, оштећења изолације, прекомерног трења, пукотина у материјалу или спојевима конструкцијама као и многи други. Као поуздан индикатор у праћењу сигурности и исправности опреме и уређаја, снимање промена термичког стања, у односу на усвојено стање током исправног рада, је постало неизоставна операција. Осим у индустрији, где се истражују феномени природне конвекције топлоте (на примеру Козић и др. у [140,141]), термографија се користи и у сврху очувања објеката културне баштине и истраживања утицаја влаге на објекте како су приказале Ристић и Полић у [142].

Сајмон и др. (Simon et al.) у раду [143], Carlomagno и Cardone у [144] и Крафорд и др. (Crawford et al.) у [145] су приказали могућности примене ИЦ термографије у аеротунелским испитивањима при дијагностификовању промена у граничном слоју са превасходним циљем смањења трошкова испитивања. ИЦ термографија је, зависно од врсте мерних уређаја у примени, омогућила брзу детекцију зоне преображаја и сагледавање динамике промена у граничном слоју [143-145]. ИЦ камере из класе истраживачких, уједно су мерни и уређаји за визуелизацију струјања, способне да су испрате динамику појава, чак и у подзвучној области, где су једва осетне промене температура, реда величине делова 1К.

Инфрацрвена термографија, ИЦТ, је техника снимања и мерења температуре објеката и њихове околине заснована на детекцији инфрацрвеног зрачења тела и градуацији нивоа енергије тог зрачења у опсегу мерених вредности. Вредности и расподела ИЦ зрачења се бележе на термограму, а читавају на упоредној скали температура.

3.5.1. Основни појмови из термографије

У термографији, као методи мерења термалне енергије на површини тела, основна променљива и улазни податак је топлота коју ода посматрано тело, а исказ је у виду физичке величине температуре. Термографски уређај, односно, њен основни део, детектор, прима информацију од тела и претвара је у нама видљив и функционалан сликовни или графички приказ. Улазни податак који прима детектор је рефлексија топлотног зрачења са површине тела настала свеукупном разменом топлоте између посматраног тела и околине. Да би се термограм успешно тумачио неопходно је познавање врсте и начина топлотне размене у посматраном систему.

За испитивања у аеротунелу систем у ком долази до размене топлоте може се посматрати као систем од три тела: испитног модела, радног флуида и тела из околине, у које спада и атмосфера. Физичке величине које дефинишу размену топлоте у оваквом систему, сведене су на две: количину топлоте и температуру. Количина топлоте је одређена укупном кинетичком енергијом свих молекула тела у систему, при чему представља количину пренесене енергије настале услед разлике у температурама. Температура је приказ интензитета кретања молекула, мера количине молекуларне енергије унутар материјала. За струјање око испитног модела у аеротунелу, без обзира што је подзвучна област деловања, осим физичких појава динамике флуида присутне су и физичке појаве размене топлоте, настале принудним кретањем флуида, путем познатих механизма размене топлоте (провођењем или кондукцијом, преласком, струјањем или конвекцијом и зрачењем или радијацијом). Обе појаве су врло интензивне у времену и простору, и међузависне по свом карактеру и интензитету.

Кондукција представља механизам преноса топлоте механичким путем између молекула у саставу тела, преносом кинетичке енергије кретања са молекула на молекул. Уколико је посматрано тело чврсто његова структура је уређена у облику кристалне решетке и проток топлоте је редоследан, од молекула до молекула редом све док сви молекули не постигну једнак ниво и интензитет локалног кретања. При овом процесу кристална решетка задржава облик, док само молекули у њеним чворовима осцилују око својих равнотежних положаја

тако да се сударају са суседнима. Пренос топлоте зависи од чинилаца: а) разлике температура б) структуре материјала: величине молекула, међусобног растојања и јачине везе, в) од геометрије, односно, величине тела. Тело пружа отпор преносу топлоте зависно од карактеристика материјала и физичке величине тела. Са друге стране, уколико је посматрано тело флуидних карактеристика, везе међу молекулима у саставу тела су значајно слабије, што омогућава неуређено кретање молекула, њихово сударање и размену енергије. Иако се код флуида у стању мировања не може видети, размена топлоте постоји на молекуларном нивоу и дешава се све до тренутка док молекули у посматраном пољу не почну да се крећу на исти начин, односно, када се њихове температуре изједначавају. Равнотежно стање молекула у флуиду је врло лабилно, тако да свака промена температуре доводи до стања неравнотеже као последица малог отпора флуида на простирање топлоте.

Кондукцију је математички описао Фурије (Fourier) путем временске промене преноса топлоте кроз материјал. Према Фуријеовом закону топлота се у времену преноси управно кроз површину материјала пропорционално негативом температурском градијенту,

$$\dot{q}_{kond} = -k_f \frac{\partial T_z}{\partial y}, \quad (32)$$

где је k_f термална кондуктивност.

Конвекција је механизам преноса топлоте струјањем флуида преко непокретног тела. Услед појаве разлике у температурама, у различитим областима флуидне запремине, када се посматра извесна стална количина гаса $pV/T = const.$, долази до промена локалних притисака и запремине услед локалних промена густине флуида, у складу са једначином идеалног гаса. Уопштено, у области са вишом температуром повећава се притисак и запремина флуида и он започиње кретање. Овакав начин преноса топлоте конвекцијом се назива природан.

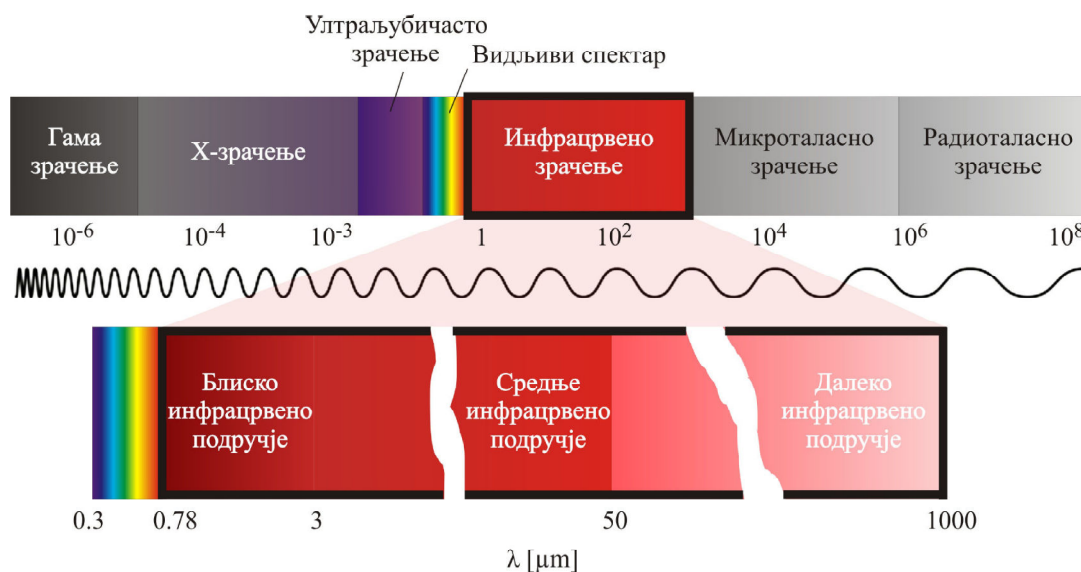
Уколико постоји извор кретања флуида, као што је то случај код аеротунелског испитивања конвекција је принудна. Принудна конвекција, услед постојања разлике у температурама флуида и опструјаваног тела, на примеру хладијег флуида, доводи до припијања флуида уз тело, његово успоравање и

стварање граничног слоја у струји, у ком се флуид креће мањом брзином него слободна струја даље од тела. У овом процесу се кондукцијом преноси топлота на флуид, а надаље флуид кроз процес мешања у граничном слоју преноси конвекцијом енергију у околину. Топлотни трансфер конвекцијом по описаном моделу Њутн (Newton) је математички описао у облику $dT_{тела}/dt \propto T_{тела} - T_{\infty}$, према ком је промена температуре површине тела током опструјавања пропорционална разлици температура тела, T_{zid} и температуре у слободној струји флуида, T_{∞} [130,146,147]

$$\dot{q}_{konv} = h(T_Z - T_{\infty}), \quad (33)$$

где је h коефицијент преноса топлоте конвекцијом.

Зрачење или радијација је безконтактни вид преноса топлоте чији је извор тело које електромагнетно топлотно зрачи [147]. Термално електромагнетно зрачење је, као и друге врсте зрачења дефинисано таласном дужином и фреквенцијом, а његово место у спектру електромагнетног зрачења, према стандарду ISO 20473, приказује слика 17 [148].



Слика 17 Спектар електромагнетног зрачења и подела ИЦ спектра [145]

Топлота извора се преноси тако што долази до трансформације унутрашње топлотне енергије у електромагнетно зрачење које се даље преноси зрачењем [147]. Енергија топлотног зрачења је смештена у највећој мери у области инфрацрвеног спектра. Све време постојања тела, тело једновремено зрачи

(емитује), прима (апсорбује) или пропушта енергију електромагнетног топлотног зрачења. Једначина одржања енергије међусобно условљава односе енергија, сведене на бездимензионе коефицијенте емисије, e , апсорбције, a , и транспаренције, t , како би њихова сума била 1, (34)

$$e + a + t = 1. \quad (34)$$

Једначином (34) су сва тела уопштено описана и подељена на идеална и стварна тела. С обзиром на термичко зрачење идеална тела су дефинисана као апсолутно бела тела, $e = 1$, која рефлектују сву пристиглу енергију до њихове површине; апсолутно црна тела; $a = 1$, идеални термални радијатор који примају сву енергију без рефлексије, и апсолутно прозирна – транспарентна тела која пропуштају сву топлотну енергију [147]. Стварна тела непрестано термички зраче, при чему је задовољен услов јединичне суме коефицијената преноса топлоте зрачењем, али нити један од њих није граничне вредности један, већ мањи.

Топлотно зрачење, (34) проистиче из електромагнетне емисије и апсорбције, а догађа се и у вакууму. Брзина распростирања термичког зрачења је једнака брзини светлости, док је његова енергија пропорционална четвртој степену апсолутне површинске температуре тела [147].

Карактеристике апсолутно црног тела описане су математички Кирхофовим законом, који изједначава својство емисије и апсорбције површине тела, које је у термодинамичкој равнотежи, $e(\lambda) = a(\lambda)$, а у функцији таласне дужине. Емисивност и апсорбција сивог тела, при истој температури имају једнаке вредности [147].

Заснован на Планковом (Plank) закону зрачења, који је једини у добром слагању са експериментима на целом подручју таласних дужина и којим је уведен појам квантне енергије, Стефан-Болцманов (Stefan–Boltzmann) закон дефинише укупну емитовану енергију, E_T , према (35)

$$E_{\text{crnog tela}_r} = \sigma T^4, \quad (35)$$

где фактор пропорционалности $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-4}]$ представља Стефан – Болцманову константу, а T апсолутну површинску температуру тела. Укупна емитована топлотна енергија стварног тела је мања од оне коју зрачи идеално црно тело [147].

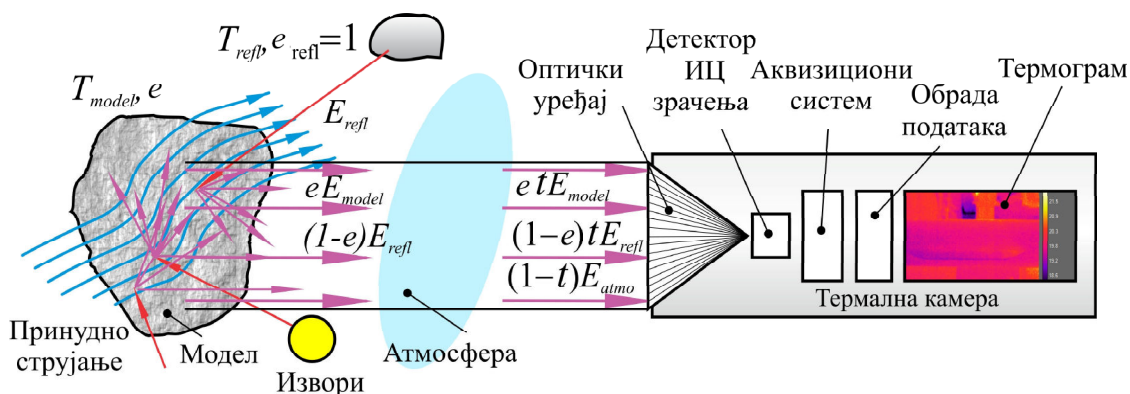
Емитована топлотна енергија зависи од температуре тела. Закони зрачења, су дефинисани за апсолутно црно тело, које је основа за дефинисање односа ИЦ зрачења и температуре тела у термографији, а површине стварних тела имају другачије карактеристике. Стварна тела се понашају, у складу са нивоом емисивности и ИЦ зрачења, као „сива“ тела, $e = const$, или не-сива – спектрална тела, $e = e(\lambda, T)$ [147]. С тога, потребно је представити температуру стварног тела у функцији црног тела за које је топлотно зрачење дефинисано. Коефицијент спектралне емисивности, или само емисивност, $e = E_{stvarno\ telo_T}(T) / E_{crno\ telo_T}(T)$, управо представља везу између енергија емисије стварног и идеалног-црног тела у изабраном правцу при истој таласној дужини, и описује његову способност зрачења.

С тога емитована топлотна енергија стварног тела зависи од температуре, таласне дужине зрачења, материјала у саставу тела, квалитета површинске обраде, угла под којим се догађа емисија или апсорбција, спектралне расподеле упадног зрачења и транспарентности тела.

$$E_{stvarnog\ tela_T} = e \sigma T^4, \quad (36)$$

Стварна, сива, тела имају мању емисивност од црних тела и она узима вредности у $0 \leq e \leq 1$ и не зависи од таласне дужине. У складу са тим, сиво тело има апсорбциону моћ такође у интервалу $0 \leq a \leq 1$, при чему способност апсорбције зависи од температуре, материјала и квалитета површине тела.

Расподела температура по површинама стварних тела, као скуп појединачно измерених температура на локалним местима, се у примени мери инфрацрвеном термографијом, ИЦТ, помоћу ИЦ камера (слика 18) [148].



Слика 18 Шематски приказ ИЦ камере у поставци за мерење [148]

Слика 18 приказује три врсте енергија зрачења које региструје ИЦ камера, а потеклих од различитих извора. ИЦ камера бележи излазни сигнал детектора који срачунат за објекат

$$U_{obj} = (1/e_{obj}t_{atm})U^T - [(1-e)_{obj}/e_{obj}]U_{refl} - [(1-t)_{atm}/e_{obj}t_{atm}]U_{atm} \quad (37)$$

где су U^T укупни измерени сигнал, U_{refl} и U_{atm} – теоријски излазни сигнали добијени калибрацијом за црно тело [148].

Топлотно зрачење са извора прво наилази на вишеделни оптички уређај камере, слика 18, израђен од топлотно проводног материјала, који омогућава изоштравање излазних података слике и термограма, као и увећавање дела приказа поставе. Након проласка кроз оптички уређај зрачење бива припремљено за детекцију – дискретизовано и филтрирано [149]. Детектор ИЦ зрачења прима и трансформише зрачење у електрични сигнал. Електрични сигнали прво бивају прикупљени и конвертовани за потребе обраде, а након софтверске обраде података претворени у разумљиве термограме. ИЦ камера се калибрише према својој намени и опсегу мерења [144]. Термограми представљају резултат ИЦ снимања и приказују температурску расподелу по површинама модела, кориговану са унапред утврђеним параметрима температуре околине, емисивности атмосфере, удаљеност камере од модела и др.

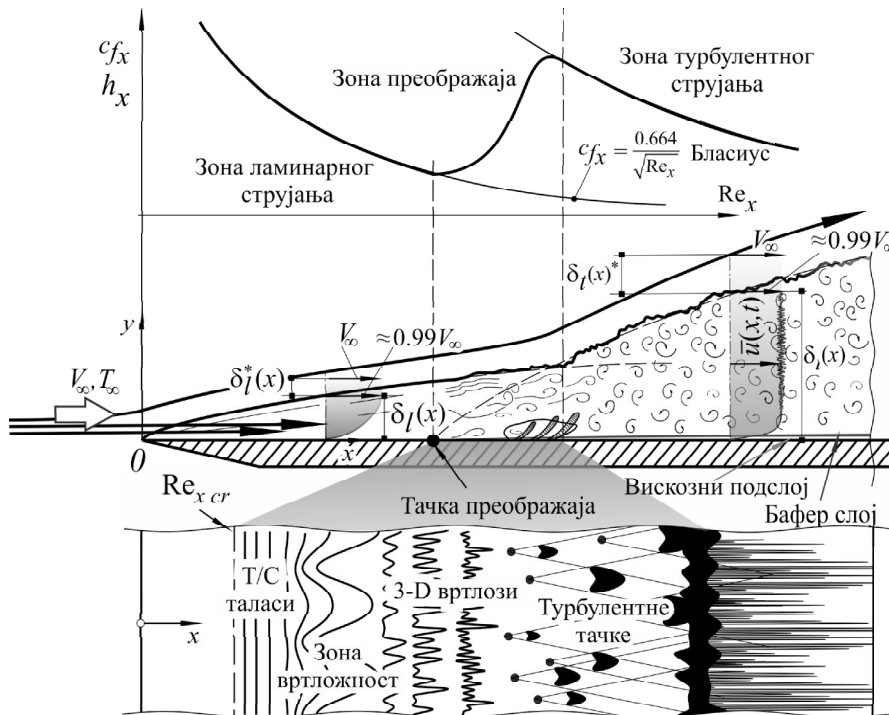
За добијање валидних резултата од значаја су четири параметра квалитета камере, и то [143-145,149]:

- термалне осетљивост ИЦ камере, која највише зависи од детектора сигнала. Како је детектор извор улазних сигнала од њега се захтева низак ниво „шума“ сигнала,
- брзине скенирања (брзине кадрирања) која треба да испрати динамичке промене настале струјањем, а одатле и нестационарне промене у преносу топлоте ,
- резолуције снимања за потребе високо квалитетног снимања и анализе термограма и струјних слика, као и
- интензитет снимања у резолуцији – интензитет приказа који се може регистровати при анализи резултата термограма, а који зависи од међусобног положаја модела и камере.

У постави за мерење, осим квалитета ИЦ камере на квалитет сигнала утичу и физикалност саме појаве која се снима, природе транзиције у струјном пољу, и термалних особине модела. Површине модела, топлотна капацитивност и кондуктивност утичу на свеукупну физикалност промена. Из тог разлога ИЦ мерења у аеротунелу треба да се изводе са посебном пажњом, од постављања квалитетних услова за мерење: изоловања сувишних извора топлоте, локализације видног поља на модел и неопходно окружење, избора аеротунела са највишим квалитетом струје у радном делу, припреме зидова аеротунела и осталих додатних уређаја или модела (напр. модела земље) ради умањења рефлексије, нарочита пажња при избору материјала и обради површина модела за ИЦ мерења, до прилагођавање поставе, односно избора одговарајуће ИЦ камере и положаја ИЦ камера-модел. Све наведено упућује на неопходност квалитетних и опсежних припрема и укључивање најквалитетније опреме за ИЦ испитивање у аеротунелу, пре свега у подзвучној области са присутном транзицијом и/или отцепљењима струје на моделу и високим Рејнолдсовим бројевима.

3.5.2. Пренос топлоте у граничном слоју

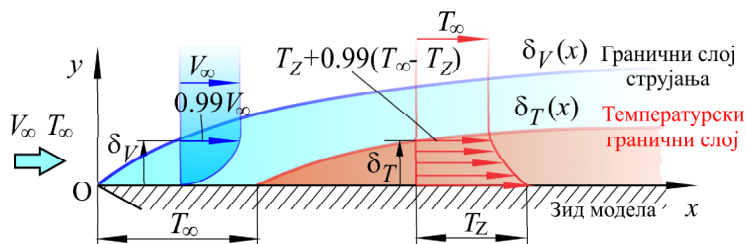
Механизам преноса топлоте струјањем представља принудну конвекцију. Принудна конвекција је комплексан проблем, чија једначина енергије представља баланс: унутрашње енергије, кондукције, конвекције и топлоте настале трењем, где је топлота пренета радијацијом од других тела занемарена. Зависно од карактера струјања уочавају се и разлике између начина преноса топлоте у ламинарном и турбулентном струјању, слика 19.



Слика 19 Гранични слој са карактеристичним зонама [130,136]

Зона ламинарног струјања обухвата зоне стабилног и нестабилног ламинарног струјања, почев од нападне ивице, преко формирања Толмин-Шлихтинг таласа (Tollmien-Schlichting, T/S), до 3D вртлога [130,136]. Вртлози турбулентног струјања доприносе бољем преносу топлоте (конвекцијом), како по правцу тако и у ротацији, него што је то случај код ламинарног струјања, где се пренос топлоте врши простом кондукцијом, под условом нултог градијента притиска и брзине на зиду [130,136].

Без обзира на опсег брзина струјања, разликују се две врсте граничних слојева – брзински или струјања и температурски, слика 20 [130,136]. Разлика се, у смислу термографског мерења, испољава кроз опсег мерења температура, који је битан чинилац про одабиру квалитета камере за снимање. ИЦ камера мери статичку температуру, односно, температуру површине модела.



Слика 20 Гранични слој струјања и температурски гранични слој [130,136]

За флуидни слој уз површину зида, који мирује, коефицијент преноса топлоте конвекцијом одређује се из једнакости топлотних флукса за кондукцију и конвекцију

$$h = \frac{-k_f \left. \frac{\partial T_z}{\partial n} \right|_{n=0}}{T_Z - T_\infty}, \quad (38)$$

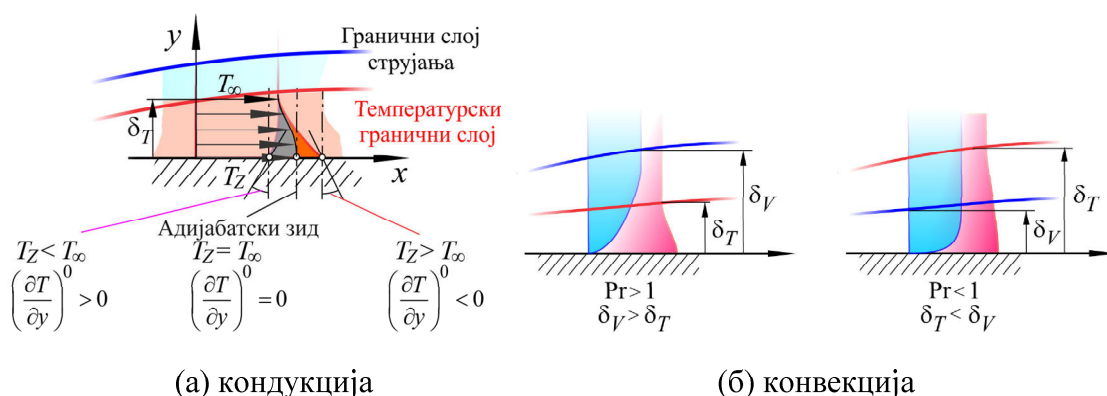
при чему h зависи од особина гаса, врсте (спољашње, унутрашње) и карактеристика струјања, облик и квалитет површине модела, посебно храпавости и др.

Термичке карактеристика струјања се описују односима бездимензионих бројева: Нуселтов (Nusselt), Рејнолдсов (Reynolds), Прандтлов (Prandtl) број и др. [130,136]. У овом раду коришћен је Прандтлов број који представља релативан однос дебљина брзинског и термичког граничног слоја, као критеријум за предикцију типа струјања изнад појединих површина модела [130,147]

$$Pr = \frac{\text{дифузија количине кретања}}{\text{дифузија количине топлоте}} = \frac{V}{\alpha} = \frac{\nu}{k_f} C_p. \quad (39)$$

где су $\alpha = k/(\rho C_p)$ термална дифузивност, C_p специфични топлотни капацитет.

Расподела брзина и температура у граничним слојевима, при кондукцији и конвекцији топлоте приказује слика 21.



Слика 21 Расподела брзина и температура у граничним слојевима [130,147]

Феномен трансфера количине кретања и топлоте у граничном слоју описује Рејнолдсва аналогија ($Pr = 1$, адијабатски зид), овде исказана путем h , у функцији

кофицијената трења за ламинарно, $c_{f_{lam}}$, и турбулентно, $c_{f_{turb}}$, струјање ваздуха око равне плоче, брзине слободне струје и Рејнолдсовог броја на локалном мерном месту, према (40)

$$h = \frac{1}{2} c_f V_\infty \frac{k_f}{\nu}, \quad c_{f_{lam}} \approx \frac{0.664}{\sqrt{\text{Re}_x}}, \quad c_{f_{turb}} \approx \frac{0.027}{\sqrt{\text{Re}_x}}. \quad (40)$$

Да би се добили што бољи резултати мерења тежи се одржавању константног нивоа топлотног флукса по површинама модела грејањем или хлађењем површина модела у току мерења, избором адекватног материјала модела или премазивањем посебним кондукционим бојама. За потребе термографског снимања потребно је да модел „израчи“ довољну количину енергије коју ИЦ камера може да региструје, уз што мање губитке. У доступној литератури, ИЦ термографија је коришћена код струјања при високим брзинама или са отцепљењима. код којих је температурска разлика драстична, а тиме лако мерљива [143-145].

3.6. Аеродинамичка испитивања

Аеродинамички експерименти у подзвучној области брзина се изводе у аеротунелима, лабораторијским постројењима која стварају жељене услове струјања флуида у ограниченој запремини [113,150-153]. Опремљени су различитим мерним и оптичким системима који омогућавају: мерења аеродинамичког оптерећења модела, расподеле притисака по оквашеним површинама модела или у пољу блиском површинама (спољашњих и унутрашњих струјања, са могућношћу увођења додатних извора струјања флуида), оптичка метода за мерење вектора брзина флуида, PIV (Particle Image Velocimetry, PIV), визуелизацију струјања различитим методама као и многих других [152,153], Прилог 2.

Почев од шездесетих година прошлог века започела су аеротунелска испитивања возова великих брзина, када је уочен проблем утицаја аеродинамичких карактеристика воза за велике брзине, и стандардно примењују и данас.

Аеротунелска испитивања возова се примењују ради одређивања расподеле притисака по возу, одређивања аеродинамичких карактеристика (пре свега коефицијент отпора и момената – утицај бочног ветра) [22,154], утицај тла и различитих конфигурација терена као и мерење буке око модела воза. У овом раду је мерен отпор воза, при нултом углу скретања у конфигурацији са моделом тла.

Зависно од фазе развоја примењују се модели возова великих брзина у различитим размерама. У већини истраживања, модел воза је постављен у близини модела тла са или без система за одсисавање граничног слоја. Заједнички именитељ за сва испитивања је процена тачности резултата и њихова поузданост, посебно ако се ради о раним фазама развоја дизајна. Бакер и Броки (Baker and Brockie) у [155] истичу проблем различитости резултата добијених испитивањем модела различитих размера, при различитим условима струјања. Разлике коефицијената отпора воза у присуству тла су протумачене утицајем типа модела тла (до 10% разлике) и екстраполацијом, где разлика од реалних достиже и до 30%) [137]. Тип и релативни положај у односу на модел воза, зависно од размере и услова струјања, препоручено је да буде такав да растојање тло-воз буде нешто веће од дебљине измештања граничног слоја, θ , Поуп и Харпер (Pope, Harper) [151].

Избор методе екстраполације је истакнут као значајнији од одређивања најбољег типа модела тла с обзиром да је извор проблема у комплексности граничног слоја. Бакер и Броки [154] предлажу развој нумеричких модела који би реалистичније представили величину отпора насталу услед трења, а који је доминантан за аеродинамику брзих возова.

У свим фазама развоја прототипа врше се испитивања у аеротунелу [154], а за већ произведене – испитивања у реалним условима како је приказано на примеру Лучанин и др. [13]. Нумеричке симулације за поставе у аеротунелу и у реалној вожњи се изводе ради предикције аеродинамичких карактеристика, анализе струјног поља и корекције.

У овом раду су комбиноване експерименталне и нумеричке методе са сврхом верификације нумеричких метода и анализе струјања око модела.

3.6.1. Визуелизација струјања у аеротунелу

Контактне методе визуелизације подразумевају употребу неке супстанце или гаса која ће испратити оку невидљиве промене у струји или по моделу и тако дати јасан приказ који се бележи камером. У ове методе спадају на пример: димна визуелизација, визуелизација са кончићима, визуелизација са емулзионим премазима и др.. Неке од безконтактних метода користе се у подзвучној области уз извесна ограничења, као на пример PIV или LDA систем у водено-кавитационом тунелу и сл, јер друге не могу регистровати благе промене параметара струјања настале стишљивошћу ваздуха у областима $M < 0.5$ при нормалним условима слободне струје [152,153].

3.7. Хидродинамичка испитивња

Хидродинамичка испитивња су обављена по угледу на испитивња пада клина у воду, а том разликом што је клин замењен бионичким моделом. Огледи су биоинспирирани маневром обрушавања – зарањање водомара, а постава мерења је прилагођена према подацима из литературе, Бионички модел водомара је димензија највећег узорка наведеног у литератури како промене на слободној површини биле видљивије.

У овом раду је искоришћен предлог Крауса (Krause) [87] према коме се брзина пропагације таласа иницираног упадом бионичког модела у воду, као и верификација нумеричког метода, одређује на основу пропагације изабраних тачака на слободној површини. У сваком посматраном тренутку изабрана је тачка највеће висине.

3.8. Закључак

У поглављу су укратко приказане научне методе истраживања које су примењене током истраживања. Са жељом да се биомимикрији као методи аеродинамичког дизајнирања приступи на нов начин, примењене су и различите методе које нису уобичајене у областима дизајнирања шинских возила и аеродинамике.

Мултидисциплинарни приступ је укључио методе које се су могле бити примењене у лабораторијским условима, и то из области општег машинства, механике флуида, прорачунске механике флуида, механике крутог тела, термодинамике, биологије, археологије, очувања културне баштине и др.

У општем смислу, примењене теоријске и експерименталне научне методе имају за циљ да обезбеде валидне и што прецизније улазне податке, помоћу савремених метода, и омогуће креирање прецизних нумеричких модела и касније извођење нумеричких симулација. Избор метода је направљен у складу са изазовима дефинисања комплексних природних облика који су основа за методу биомимикрије у процесу аеродинамичког дизајнирања воза за велике брзине.

4. ИЗБОР И ИСПИТИВАЊЕ БИОЛОШКИХ УЗОРАКА

Биолошка истраживања су имала за циљ да дефинишу основне улазне податке за примену биомимикрије. Испитани су узорци водомара и примерци риба и морских сисара из доступне документације.

Основни критеријуми за избор узорака су они који представљају истакнуте особине животињских врста из одабраних група, а за које је претпостављено да су од примарног значаја за дизајн BHST.

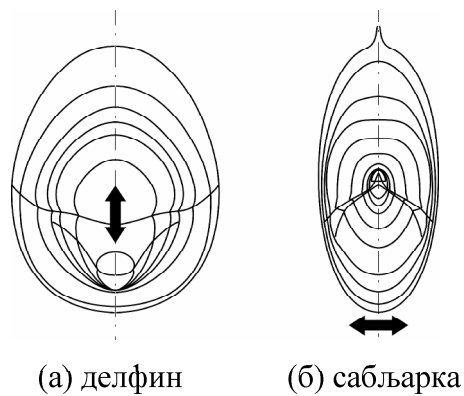
Генерално, према критеријуму утрoшка енергије потребне за кретање у функцији масе тела, Гемел и др. (Gemmell et al.) [156], избор узорка је сужен на птице, рибе и морске сисаре.

4.1. Морске животиње

Шири избор животиња из мора је направљен према анализи Нестерука и др. [65]. Како су примерци, у оквиру истих врста, доста сличних облика и начина кретања, а са намером да се испита неколико различитих типова облика био-инспирисаних дизајна, изабране су врсте карактеристичних изгледа: делфин, ајкула, сабљарка и баракуда. Попречни пресеци тела животиња и начин кретања су скицирани на основу фотографија, модела и видеа доступних у отвореној библиотеци [68], ради анализе зависности 3D облика и животних навика, као и избора облика за примену у биомимикрији.

Попречни пресеци су од узорка до узорка различити, тако да код делфина подсећају на кружне, а код сабљарке на елипсасте, слика 22. Облик горњаке је протумачен прилагођењем тела за постизање ламинарног струјања у складу са начином пливања. Делфин и сабљарка пливају карангиформно, али се њихови репови и глава крећу у различитим равнима. Делфин се креће на основу створеног узгона на репу, док се сабљарка креће на основу отпора на репу [69,71]. С

обзиром да делфини имају плућа и искачу из воде ради дисања, њихово тело је на овај начин прилагођено савладавању отпора.



Слика 22 Скице попречних пресека тела животиња [68]

Приказани и слични модели тела животиња, удопуњени биолошким подацима о животним навикама, умногоме би допринела проширењу сазнања и помогли примену биомимикрије при дизајнирању возова за велике брзине.

4.2. Водомар

За ово истраживање изабран је водомар као узорак птице за биомимикрију, а од интереса је хидродинамички оптимизован облик кљуна.

Слика 23 приказује два тренутка у два погледа [72], (а) приказује тренутак када је водомар заронио до дубине у нивоу очију док (б) приказује тренутак када је цео кљун оквашен, приближно до места промене градијента контуре главе у равни симетрије.



(а) зароњени кљун и глава до нивоа очију, поглед с леђа



(б) зароњен цео кљун, поглед са стране

Слика 23. Водомар у тренутку зарњавања, река Алда у Сафолку (снимци су доступни љубазношћу Пола Совера и издавачке куће Солент [72], Прилог 3)

Ове слике потврђују претпоставку да скоковити талас није уочљив све док се значајно не промени контура, односно, површина потопљеног попречног пресека. Слика 23а показује видљиви скоковити талас око главе са израженим обручем круне таласа, отцепљен од тела, израженије са бокова главе и темена, али и слабе радијалне таласе површине воде.

Протекло време до овог тренутка даје предност водомару, док са друге стране, не даје довољно времена плену за детекцију претње и бег. Сликe из природе показују да кљун не производи приметне хидродинамичке промене на површини или по дубини воде, све време одржава стабилан правац маневра обрушавања – зарањање, током роњења и израњања (слика 23б).

У недостатку података из литературе за ово истраживање је из видео записа, анализом кадрова, одређен распон приближних вредности брзине обрушавања. Касније је из распона приближних вредности изабрано неколико брзина обрушавања које су, верификацијом са хидродинамичким и нумеричким експериментима, усвојене као релевантни подаци.

4.2.1. Креирање и анализа фото-документације као улазних података за биомимикрију

Истраживање облика тела водомара, као примарног узорка за биомимикрију, је започето прављењем детаљне фото-документације, касније проширено на испитивање фотограметријским снимањем, 3D ласерским снимањем и коначно реконструкцијом облика. Фотографије из дивљине и новоформиране документације, су заједно са визуелним прегледом музејских примерака употребљене и комбиноване у улазне податке за биомимикрију и унапређење знања.

Фото-документација је направљена за два узорка водомара, мужјака и женку, који се настањују у Србији. Узорци су за истраживање били доступни љубазношћу Природњачког музеја у Београду. Мужјак водомара (*Alcedo atthis*) је препарирани изложбени музејски примерак (Манојловце, Лесковац, 1980.год., 2002028, Природњачки музеј у Београду), а женка водомара (*Alcedo atthis*), препарирани истраживачки примерак (Чукојевац, Краљево, 1939.год, 2005003) ,

Природњачки музеј у Београду).

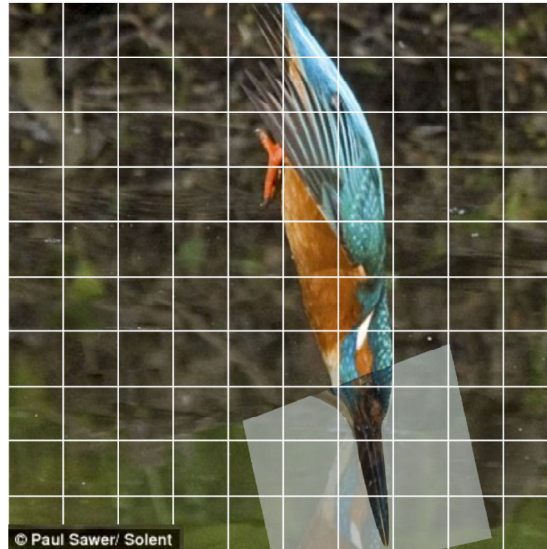
Колекција слика за фото-документацију је креирана помоћу два фото-апарата: CANON, SONY и Huawei телефона, за потребе графичко-нумеричке анализе облика и површина водомара, као и увоза у програме за нумеричко моделирање. Реконструкција и провера 3D нумеричких модела водомара на основу фото-документације је изведена за моделе: нумерички модел реконструисан само на основу фото-документације, реконструкција модела добијеног помоћу ласерског скенера и провера фотограметријског модела водомара. Нумерички модел реконструисан на основу фотографија није задовољнио и одбачен је.

У процесу реконструкције облика, посебно када се ради о комплексним површинама као што је то код кљуна водомара, нити једна од мерних метода сама за себе није довољна за креирање доброг и прецизног нумеричког модела. Пожељно је коришћење више метода, са више појединачних мерења, како би се формирао коректан модел. Са друге стране за примену у процесу дизајнирања помоћу биомимикрије дозвољене су и веће толеранције грешке мерења, све док није нарушена физикалност појаве у посматрању, односно, њено разумевање. Иако креирање био-инспирисаног дизајна није обавезно копирање природних облика и не подразумева моделе високе тачности, у процесу сакупљања података и тумачења природних појава из природе, врло је важно имати поуздане и верификоване податке са којима се улази у скицу дизајнерског решења прототипа.

4.2.2. Реконструкција бионичког модела водомара у маневру обрушавање – зарањање

На основу снимака из природе и фото-документације израђен је приближан 2D бионички облик водомара. Укупна дужина, од врха кљуна до краја репа водомара, мерена по осовини a , износи 190 mm. Изабрана дужина је нешто већа од максималне у природи од 170 mm за обичног водомара, али се уклапа се у интервал дужина за крупније врсте водомара, а изабрана је због веће прецизности при реконструкцији нумеричког модела и ручној изради модела. Корекције облика и прилагођавања су направљене према фотографијама из природе, слика

24. За бионички модел водомара претпостављена је густина тела према објављеним подацима од $\rho = 2.1 \text{ g/cm}^3$, Думонт (Dumont) [157]. Карактеристике крутог тела су коришћене као улазни подаци за нумеричке симулације.



Слика 24. Основа за креирање бионичког модела водомара

Квалитет реконструисаног нумеричког модела је врло тешко одредити са поузданом тачношћу неком од контактних метода. Употребом безконтактних метода, на пример мерењем контурних тачака са фотографија, квалитет завршног модела зависи од броја измерених тачака на површини тела, квалитета и квантитета фотографија, броја снимљених позиција и др. Наиме, коришћење мерних тачака са мањег броја фотографија (напр. три пројекције), довољан је само за дефинисање простијих облика. Код комплексних облика је неопходно анализирати велики број фотографија из више различитих углова посматрања уз услов да је познат угао посматрања (напр. методом фотограметрије која је објашњена у даљем тексту). Захтев је практично тешко остварив у примеру водомара у кретању при маневру обрушавања зарањање, јер се облик тела водомара мења зависно од маневра који изводи у природи. Из тог разлога је изабрана 2D конфигурација чија је контура одређена мерењем контурних тачака тела водомара са фотографије, по кљуна апроксимирана полиномима над горњаком и доњаком, док је сам врх кљуна апроксимиран радијусом. Једини начин контроле квалитета дела или целине дизајна је једноставно поређење слика пре и после реконструкције, што задовољава потребе биомимикрије.

Снимање водомара током маневра у природном окружењу брзом камером и ИЦ термокамером значајно би допримело квалитету реконструисаног облика у маневру, разумевању физичких појава и увећало би број података за примену у нумеричким симулацијама.

4.2.3. Визуелни преглед

За примарни узорак из природе у овом истраживању, водомара, извршена је детаљна визуелна анализа облика [158,159]. Део фото документације водомара за визуелни преглед, приказују слике 25 и 26. Доступни узорци су усвојени као репрезентативни (Прилог 6). Визуелним прегледом је утврђено да је мужјак водомара крупнији од женке, и има знатно дужи и издуженији кљуна. Део кљуна мужјака, око самог врха, је заобљен.



Слика 25. Мужјак водомара



Слика 26. Женка водомара

(љубазношћу Природњачког музеја) (љубазношћу Природњачког музеја)

Површина кљуна код мужјака, у дужини од скоро $2/3$ укупне дужине до корена, је таласасте структуре. Надвишења површина су приближно управна на правац линије отварања кљуна, а облик надвишења је закривљен. Таласаста површина кљуна није тако изражена код женке. Код оба примерка горња половина кљуна има карактеристичан брег целом дужином, од врха до носних шупљина. Са доње стране, такође код оба примерка, постоји брег, у дужини приближно од $2/3$ укупне дужине од врха доњаке. На доњаци, у близини главе

попречни пресеци мењају облик и преводе брег у заравњену површину која се даље утапа у профил на месту врата. Ивице горњакe и доњакe кљуна на месту преклопа су такође заобљене. Код испитаног примерка женке уочена је уједначенија структура површине без надвишења, али са уочљивим размаком између горњакe и доњакe кљуна, при самом корену, која чини да на том месту кљун поприма облик клешта која обезбеђују плен.

4.2.4. Испитивања водомара микроскопом

Испитивање микроскопом је обављено са циљем да се испита површина кљуна водомара и прикупе нове информације које могу помоћи у разумевању физикалности хидродинамичких појава при маневру обрушавања – зарањања. Микроскопска испитивања су обављена након визуелног прегледа када су уочена одступања бочних површина дуж кљуна у виду благих таласа.. Такође, циљ је био и да се ближе испита и облик врха кљуна, који има такође значајну улогу у маневру, посебно у тренутку додире кљуна и воде, када су највећа очекивана тренутна оптерећења кљуна.

Испитивање је обављено на два микроскопа, слика 27.



(а) микроскоп за металографска испитивања у Институту Гоша

(б) дигитализовани оптички микроскоп са рачунарском подршком у ЦИК, Београд

Слика 27. Поставка за снимање микроскопима

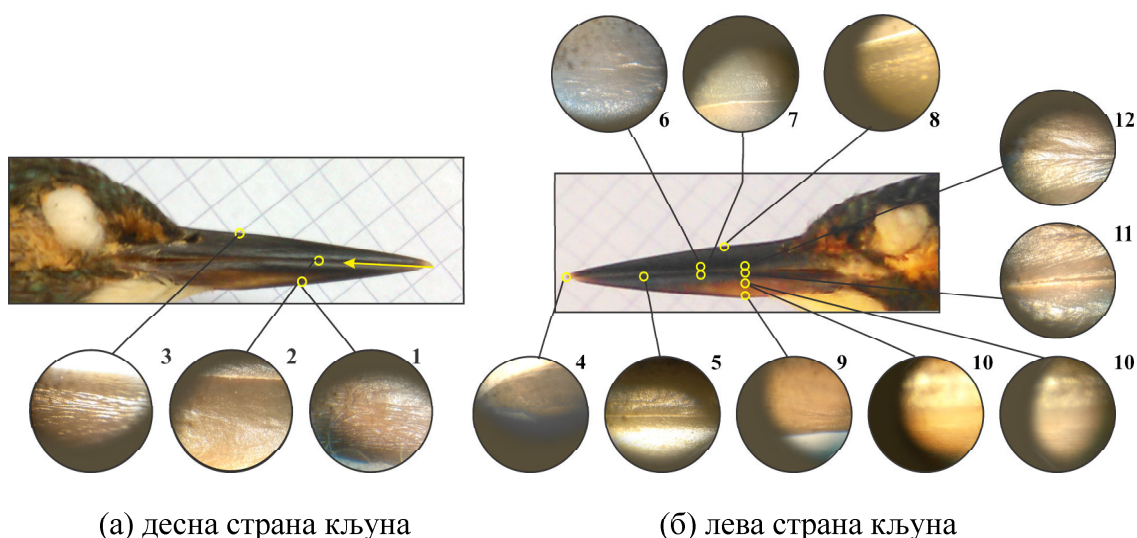
Један микроскоп је у употреби за металографска испитивања заварених спојева, 3D лупом, са највећим увећањем до 50 пута, Лабораторија за

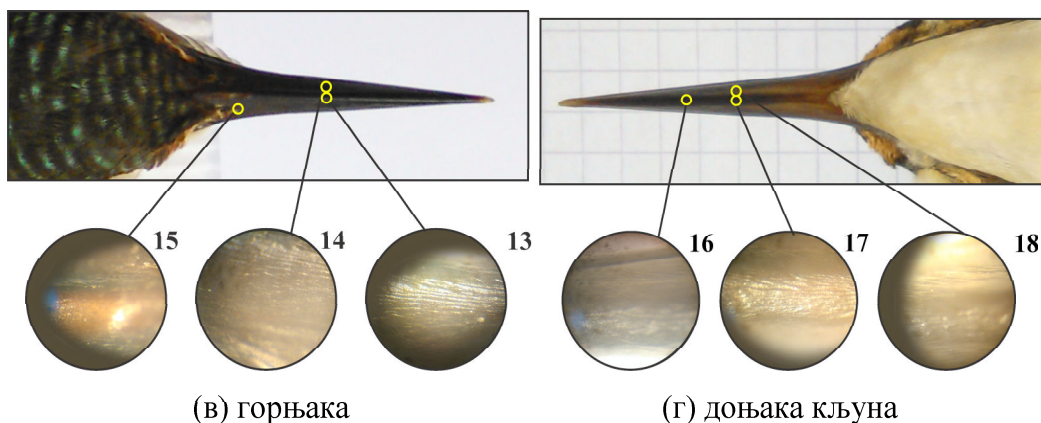
металуршка испитивања у Институту Гоша, Смедеревска Паланка (слика 27а). Добијени резултати су употребљени за истраживање основних карактеристика површине и профила кљуна, посебно са стране горњаке (по хрбату кљуна).

Електронски микроскоп, OLIMPUS, је дигитализован оптички микроскоп са увеличањима 40, 100 и 200 пута, у лабораторији Централног института за конзервацију (слика 27б).

Снимци направљени дигитализованим микроскопом се бележе специјализованим програмом, развијеним од стране произвођача. Како је микроскоп просветљавајући, основној поставци су придодати извори светлости, 2 неонска са сваке стране узорка и једно LED светло с чела у близини објектива. При сваком увећању и при свакој позицији узорка на држачу, израђено је по неколико слика за које су различита изоштрављања. Изоштрављање слике је вршено по сегментима увек истим редоследом и на сличан начин, како би се могла урадити интеграција серије слика у једну накнадном обрадом. Обрада слика је изведена програмом PICOLAY (програм за некомерцијалну употребу) [160], а потом су креиране и мапе површина кљуна, програм Paint.NET [161].

Испитивања урађена на микроскопу за металографска испитивања при увеличању 10 и 20 пута, искоришћена су за позиционирање објекта. При максималном увеличању од 50 пута утврђено је да промене по површинама имају облик канала и одређен распоред, слика 28.

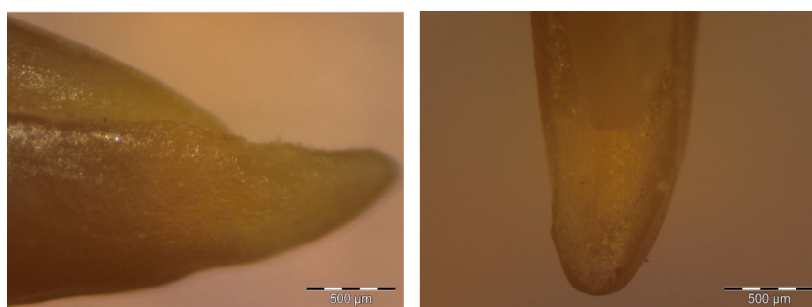




Слика 28 Изглед делова површина кљуна женке водомара при увећању од 50 пута снимљени металографским микроскопом

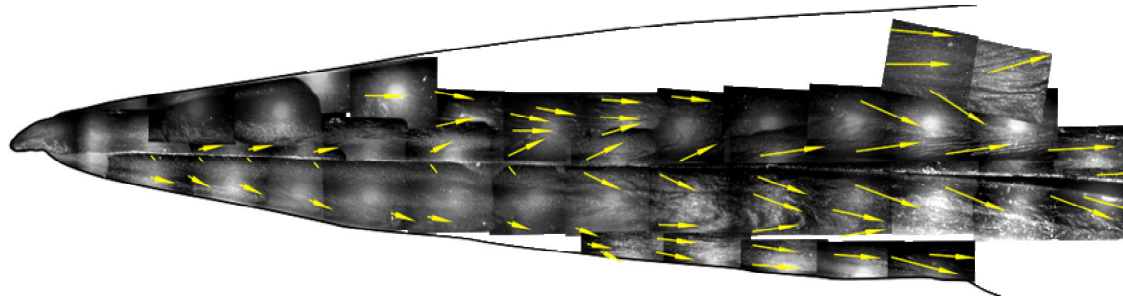
Металографским микроскопом било је могуће прићи површинама са свих страна. Посматрања су показала правилности у распореду бразди по свим површинама кљуна. Бразде по површини су симетричне са обе бочне стране, што је протумачено као метода за спровођење вођење воде при зарањању које омогућава прецизније позиционирање и додатно смањење отпора при улазу у гушћу средину. Бразде по горњем брегу кљуна спроводе само мали део воде низ кљун, већи део воде, према смеру бразди, даје утисак да већи део воде скреће ка отвору кљуна. Симетрично и са доње стране, вода уз отвор кљуна скреће ка њему док са доње стране кљуна тече ка средини наилазећи на заравњен део доњаке.

Врх кљуна снимљен електронским микроскопом (40×) дао је детаљнију слику површина. приказује наглу промену пресека из бочног погледа, која није видљива голим оком. Врх је глатке порозне структуре у односу на остатак површина, слика 29а. Поглед одоздо показује благо затупљен врх као и благо проширење профила у односу на поглед са стране.

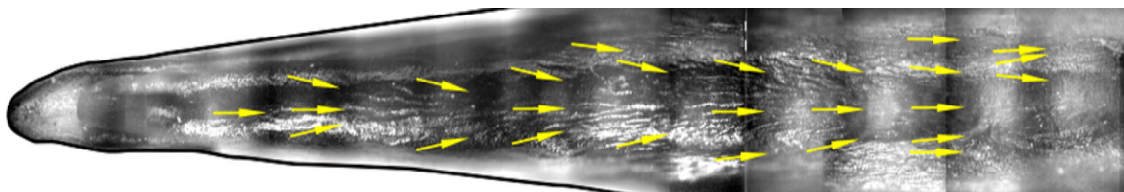


(а) са стране (б) одоздо
Слика 29. Приказ врха кљуна са увећањем 40 пута

Слика 30 приказује мапу површина снимљену електронским микроскопом са увеличањем 40 пута. Мапа површина указује стрелицама на правилан распоред бразди по бочним површинама и доњаци.



(а) поглед са стране



(б) поглед одоздо

Слика 30. Мапа кљуна из снимања електронским микроскопом (40×)

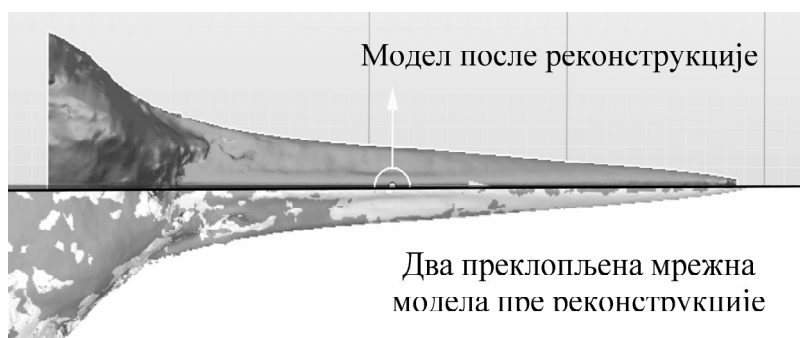
4.2.5. 3D скенирање водомара

Методом 3D ласерског скенирања извршено је безконтактно мерење и креирање основног мрежног модела површина из облака тачака за објекат женку водомара. Снимање је обавила компанија HEXAGON д.о.о. из Крагујевца, помоћу мобилног мерног уређаја Romer Absolute Arm – Portable Measuring Arm (Прилог 4). Помоћу ласерске главе и камере прикупљени су податци у облику просторних тачака, облак тачака. Слика 31 приказује детаљ из поставе за мерење, где се лако може уочити осветљена линија на површини кљуна по којој је изведено локално тренутно мерење. Слободним померањем мерне главе (ласер и камера) у простору, умножава се број мерних тачака у простору. Снимање је вршено кретањем мерне главе по четири латералне и међусобно управне равни у односу на правац кљуна. Изабрани снимци су обрађени специјализованим програмом произвођача уређаја и приређени у .stl формату ради реконструкције и параметризације облика кљуна водомара.



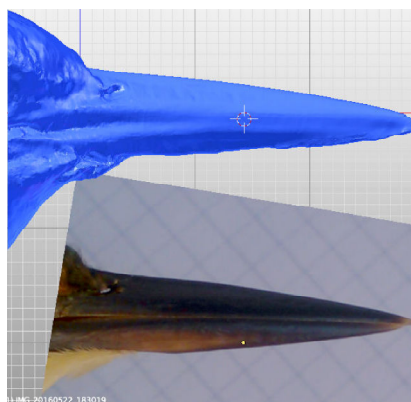
Слика 31. Приказ поступка мерења методом 3D ласерског скенирања

Интегрална слика 3D мрежних модела водомара после и пре софтверске реконструкције приказује слика 32. Мерени објекат је реконструисан помоћу софтвера отвореног кода Blender, за 3D моделовање и 3D штампу [162], и MeshLab, за обраду мрежних модела [163]. Реконструкција тела модела (солида) је обављена за једну половину модела која је била целовитија.

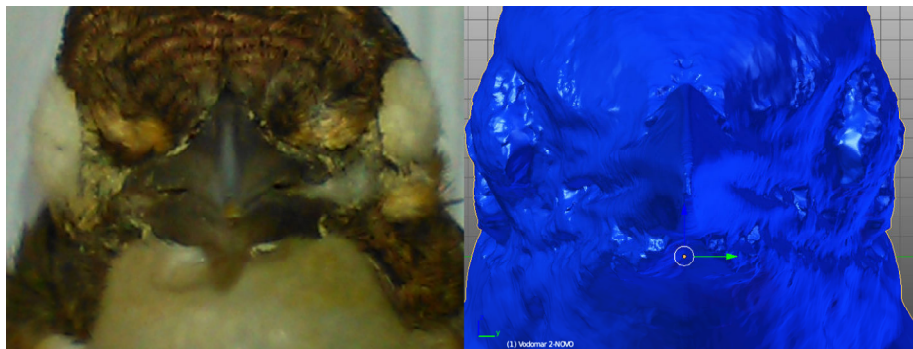


Слика 32. Интегрална слика 3D мрежног модела и модела тела водомара после и пре реконструкције (две преклопљене мреже)

Реконструисан мрежни модел је резултат испитивања облика помоћу ласерског скенирања и верификован је са узорком, слика 33.



(a)



(б)

Слика 33 Реконструисан 3D скениран модел и оригинал

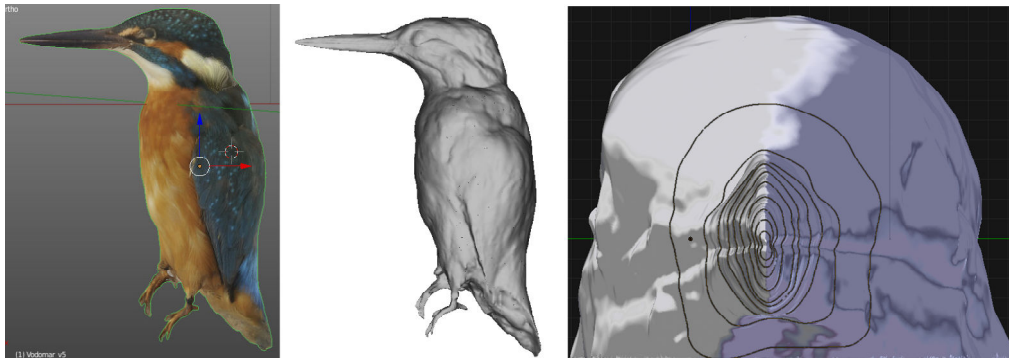
Нумерички модел добијен 3D скенирањем је довољно веран оригиналу и садржи бројне детаље, те се користи даље у процесу анализе облика кљуна водомара и расподела површина попречних пресека кљуна по дужини. Поступак мерења је обављен веома брзо и изузетно прецизно, иако услови снимања нису били прилагођени потребама. Но, за потребе биомимикрије и разумевања природних појава, добијени резултати су сасвим коректни. Основни проблеми у снимању су се показали код прелаза са малим радијусима, посебно на врху кљуна и хрбату доњаке, из разлога што је површинска структура рефлектујућа, што је донекле отежало процес снимања. У наставку истраживања је неопходно прилагодити услове снимања и извести већи број скенирања. Иста метода се може применити и на друге животињске врсте [156], што би допринело проширењу базе података природних облика за потребе примене биомимикрије.

4.2.6. Фотограметријско испитивање водомара

Метода блискодометне фотограметрије [112,115] изведена је фотоапаратом NIKON D700, а обрада података и креирање нумеричког модела водомара је обављена софтверима отвореног кода: VisualSFM [164] – за фотограметријску реконструкцију објеката, CloudCompare [165] – за обраду облака тачака и Blender [162].

Резултати фотограметријског снимања мужјака водомара су: нумерички модел тела (слика 34а, б и в), расподела површина попречних пресека кљуна по дужини (слика 35) и запремина од приближно 127 mm^3 , одређени помоћу

програма Blender.

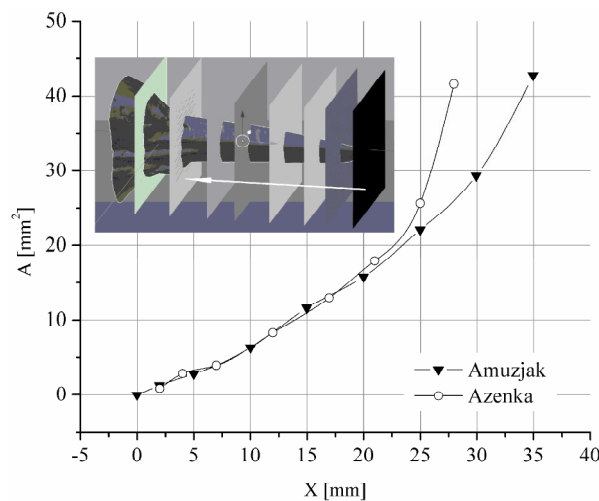


(а) тело водомара са текстуром (б) тело водомара без текстуре (в) глава са попречним пресецима

Слика 34 Нумерички модел мужјака водомара добијен фотограметријским мерењем [115]

Слика 35 приказује расподеле површина код мужјака и женке. Расподела површина на самом врху кљуна, до прве мерене тачке, је извршена простом екстраполацијом због недостатка поузданих података. Док је 3D скенирање самог врха било отежано због услова снимања, фотограметријском методом је утврђен отвор кљуна који је морао бити затворен попуњавањем контуре.

Анализа облика и расподеле површина кљуна мужјака и женке водомара се не разликују значајно на дужини од приближно 20 mm од врха кљуна. Ван овог опсега долази до издужавања кљуна код мужјака што се може тумачити прилагођењ и природној потреби да снажнији примерак може ефикасније да лови.



Слика 35 Расподела површина попречних пресека по дужини кљуна код нумеричких модела женке и мужјака водомара

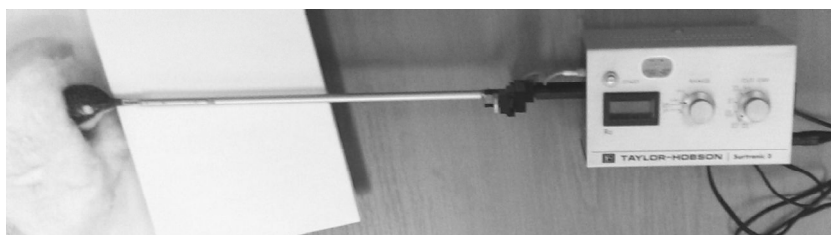
4.2.7. Мерење храпавости кљуна водомара

Мерење храпавости је извршено ради стицања нових сазнања о облику и квалитету површина кљуна водомара, провере претпоставке о постојању аеро- и хидродинамички глатких површина на кљуну водомара и одлучивања о методи креирања мреже.

Визуелним посматрањем и мерењем помоћу микроскопа утврђено је да су ефективни профили кљуна закривљени у свим правцима. Локална валовитост је присутна у свим правцима, али изразито истакнута дуж кљуна, такође уочени су и испрекидани канали, периодичне промене профила у попречном пресеку.

Мерење средње храпавости профила је обављено профилометром TAYLOR HOBSON, ВТИ ВС, слика 36. Дијамантски врх слободно клизи по површни у задатом правцу, слика 36б, док електронски уређај са механизмом региструје вертикални померај врха и претвара га у електронски податак. Резултати се приказују на дигиталном показивачу након обраде електронских података и бележе се на додатном уређају за континуално праћење.

За мерење је изабрана путања дужине 2 mm и „Cut-off“ параметар од 0.25 mm. Верификација уређаја је извршена пре мерења помоћу плочица за калибрацију познате храпавости.



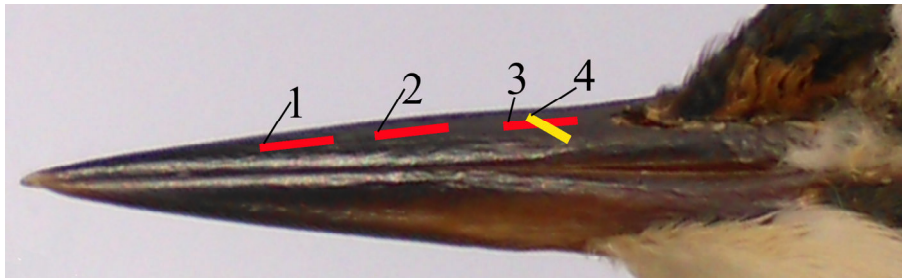
(a)



(б)

Слика 36 Поставка за мерење уређајем TAYLOR HOBSON, ВТИ ВС

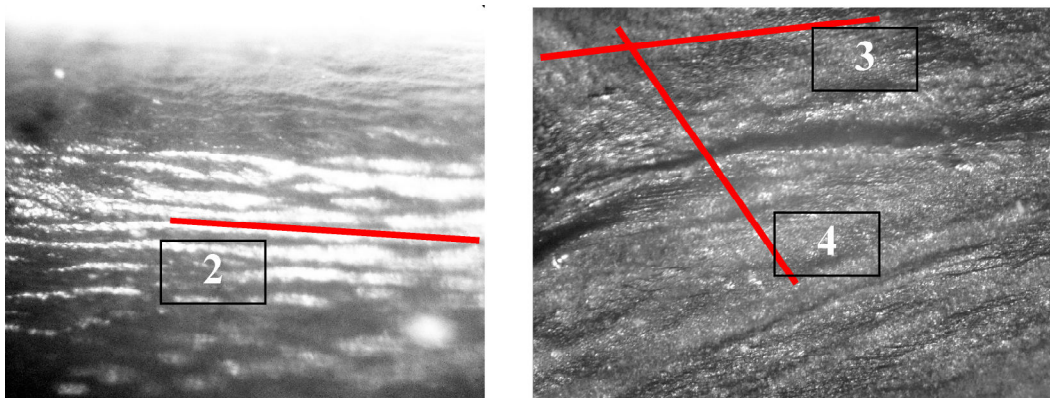
Музејски узорак женке водомара је постављен на начин који омогућава мерење у изабраној дужини хода мерне руке од 2.5 mm , слика 36б. Мерна места, односно, правци мерења (слика 37) одабрани су у складу са снимцима са микроскопа и могућностима приступа мерним местима, мм, (слика 38).



Легенда:

(1) мм ближе врху, (2) мм на средини, (3) мм ближе корену и (4) мм укосо

Слика 37 Мерна места храпавости по површини кљуна женке водомара



(а) око мм2

(б) око мм3 и мм4

Слика 38 Изабрани детаљи површина снимљени оптичким микроскопом, са увећањем 40 пута, са знацима зона мерења храпавости

Израчунате вредности висине првог низа центроида мреже Δu за равну плочу показује табела 2, док табела 3 приказује средње измерене вредности Ra_{sr} на кљуну водомара. Према испитивањима Адамса и др. (Adams et al.) [138] еквивалентни калибар пешчаног зрна се може дефинисати са $K_s = 5.863 Ra_{sr} [\mu m]$.

Табела 2 Приближне вредности висине центроида Δy првог низа ћелија нумеричке мреже, за равну плочу при условима струјања ваздуха и воде

L_{ref} [m]	V [m/s]	Re_{Lref} vazduh [-]	Re_{Lref} voda [-]	y^+ [-]	Δy_{vazd} [m]	Δy_{voda} [m]
0.04	0.6	1306	23904	30	0.01319	0.39560
0.04	6	13065	239044	30	0.00155	0.04663
0.04	10	21775	398406	30	0.00097	0.02902
0.19	0.6	6206	113546	30	0.01474	0.44217
0.19	6	62061	1135458	30	0.00174	0.05212
0.19	10	103435	1892430	30	0.00108	0.03244

Табела 3. Средње вредности храпавости Ra_{sr} , стандардна девијација и еквивалентни калибар пешчаног зрна, K_s

Ред.бр.	Ra [μm]	Десна страна			Лева страна		
		мм1*	мм2*	мм4*	мм1*	мм2*	мм3*
1		0.53	0.63	4.33	0.58	0.92	0.86
2		0.62	0.84	4.41	0.62	1.01	0.87
3		0.56	0.63	4.5	0.61	1.03	0.63
4		0.6	0.87	4.54	0.7	1.1	1.01
5		0.57	0.64		0.63	1.23	0.93
6		0.7	0.77		0.63	0.97	0.98
7		0.7	0.7		0.64		1.02
	Ra_{sr} [μm]	0.611	0.725	4.445	0.63	1.043	0.9
	SD	0.053	0.086	0.075	0.022	0.081	0.097
	K_s [μm]	3.5848	4.254	26.061	3.693	6.117	5.276

*Легенда: (мм1) ближе врху, (мм2) на средини, (мм3) ближе корену и (мм4) укосу

Најмање израчунате вредности Δu за референтну дужину кљуна и усвојене брзине обрушавања износе 0.00097 m за ваздух и 0.02902 m за воду, табела 2, што је више него измерена просечна храпавост од приближно 0.7 μm , табела 3.

Просечна вредност Ra мерена дуж кљуна на делу ближе врху је 0.62 μm , а на другој половини кљуна, ближе корену, 0.88 μm . Укупна просечна храпавост дуж кљуна је 0.75 μm . Просечна вредност Ra мерена косо у односу на линију кљуна је 4.44 μm . Површина кљуна водомара је усвојена за аеро- и хидродинамички глатку површину.

Са циљем да се изврши правилан избор улазних података и избор погодног турбулентног модела с обзиром на храпавост зидова водомара и воза, обављено је CFD истраживање и валидација нумеричких метода на основу аеротунелског испитивања храпаве кугле [131] (Прилог 1).

Анализа резултата [131] је указала на потребу што прецизнијег одређивања стварне храпавости уколико постоји потреба за применом захтевних нумеричких метода (и одговарајућих ресурса), а које омогућавају прорачуне у зони бафер, $5 < y^+ < 30$, и ламинарног подслоја, $y^+ < 5$ (на пример SST) . У складу са потребама у овом и резултатима мерења усвојено је да је површина кљуна аеродинамички глатка површина, а такође и оквашене површине воза за велике брзине.

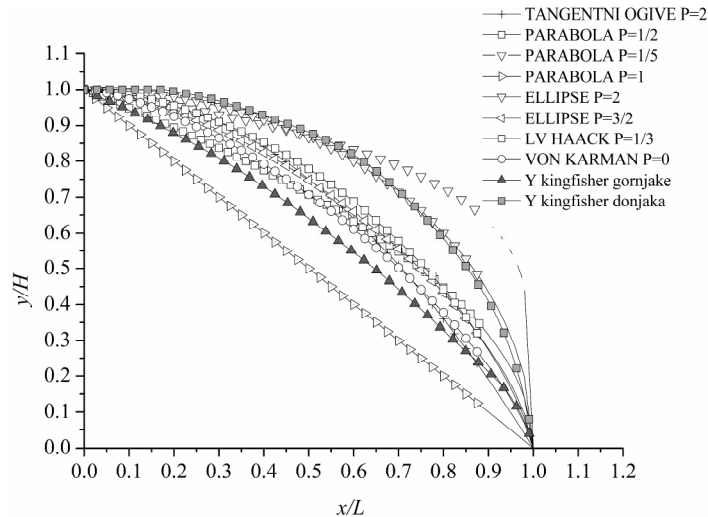
Употребом напреднијих ресурса могла би се урадити детаљнија истраживања посебно ако се ради о реалистичним случајевима са возом великих брзина са придодатим системима за смањење отпора, или моделирању микро-струјања над мањим изабраним сегментом површине, као што је површина кљуна водомара. Ови проблеми су предвиђени за будућа истраживања.

Поређење контура профила кљуна водомара и балистичких профила

Контуре горњаке и доњаке, у лонгитудиналном правцу, нормализоване према габаритима, упоређене су са профилима који се најчешће користе код балистичка тела (парабола, елипса, оживали и др.), слика 39.

Поређење је урађено за облике: тангентни оживал, параболоидни и елипсоидни облик и Хак и вон Карманов профил, Стројк (Stroick) [166] и Пејз (Paуza) [167]. Последња два су профили који су препоручљиви за примену при

великим брзинама због најмањег коефицијента отпора. Контура горњаке профила кљуна водомара се показала као најсличнија вон Кармановом профилу, док је доњака блиска елипсоидном профилу (параметар $P = 2$).



Слика 39 Поређење облика контура попречних пресека водомара и балистичких профила [166,167]

4.3. Тумачење резултата

Облици животиња из мора припадају класи оних са најмањим c_x у односу на запремину тела и услове пливања. Генерално, за примену биомимикрије на воз су погодни узорци предатора: ајкула, сабљарка, баракуда, кечига, штука и сл. а такође и облици делфина, кита убице и др. морских сисара.

Водомар из класе птица није једина врста птица која лови из обрушавања, али се кроз анализе облика биолошких узорака и њихових навика водомар истакао као птица која маневар лова изводи са великим успехом и под рискантним условима. Облик контура кљуна упоређен са профилима који се истичу минималним отпором, при суперсоничним брзинама, као што су Хак и вон Карманов профил, показује велике сличности. На основу тога је процењено да би контура водомара била погодна за даљу примену на дизајн био-инспирисаног воза.

4.4. Закључак

Приказан поступак избора и дефинисања облика полазних дизајна је, осим за водомара, у овом истраживању урађен на основу доступне литературе.

Облици животиња из мора припадају класи оних са најмањим c_x у односу на запремину тела и услове пливања. Генерално, за примену биомимикрије на воз су погодни узорци предатора: ајкула, сабљарка, баракуда, кечига, штука и сл. а такође и облици делфина, кита убице и др. морских сисара.

Водомар из класе птица није једина врста птица која лови из обрушавања, али се кроз анализе облика биолошких узорака и њихових навика водомар истакао као птица која маневар лова изводи са великим успехом и под рискантним условима.

Добијени су валидни и поуздани подаци за дизајнирање нумеричких модела који у овој фази задовољавају потребе дизајнирања. Примена облика на дизајне возова подразумева даље корекције облика. Мерења храпавости водомара, као критичног модела у избору, упућују да се зидови модела могу сматрати аеро- и хидродинамички глатким.

5. БИОМЕХАНИКА ВОДОМАРА ПРИ МАНЕВРУ ОБРУШАВАЊЕ – ЗАРАЊАЊЕ

На основу тумачења резултата визуелног прегледа, анализа мерења (3D скенинга и фотограметрије) и посматрања при лову описано је биомеханичко понашање природног феномена и изабрани су карактеристични попречни пресеци за примену на моделима за нумеричка и експериментална испитивања.

У исхрани водомара се појављују мање рибе, инсекти, пауци и сл. На чуваној територији рибу лови зарањањем са гране или понирањем са гњурањем и, у односу на друге врсте птица које лове на овај начин, карактеристично је да нема пловне кожице на ногама, [159,168-170]. У првом начину лова, водомар седи и чека плен тражећи га посебно прилагођеним погледом, и након проналажења зарања. Други начин је ризикантнији са могућим погубним последицама, се састоји од лебдења изнад водене површине, понирања када је плен пробажен и роњења до дубине на којој се плен налази. Иако највише обитава и лови у свежој хладној води, на свом путу је приморан да лови и у водама различитих густина – морској води или не сасвим бистрој води.

При лову се ослања само на вид, положај тела и специфичан облик кљуна и тела. Осим при лову, водомар прибегава цикличном лету са изненадним зарањањима када је нападнут од својих природних непријатеља [154,169].

Анализа биомеханике водомара при маневру обрушавање – зарањање има за циљ анализу тела и његовог оптерећења, при маневру, која је неопходна је ради избора врсте струјања, модела и постављања улазних параметара у нумеричким симулацијама.

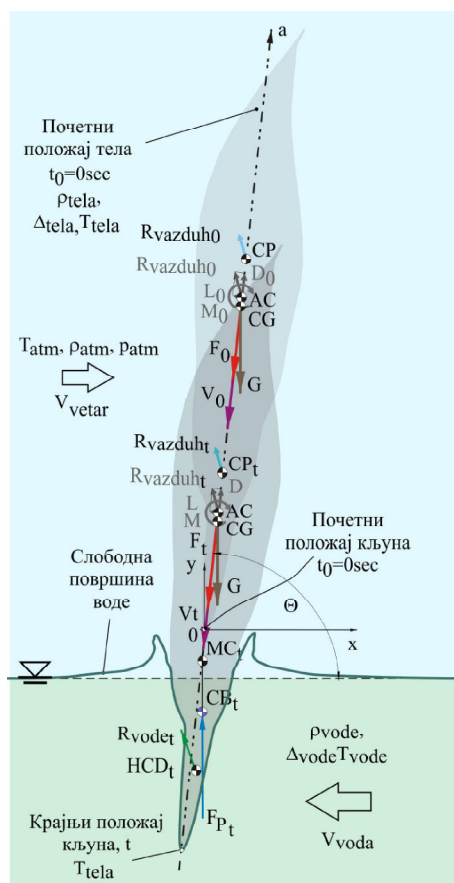
Испитивањем узорака водомара уочено је могуће струјање око кљуна водомара. При зарањању вода са површине прати површине кљуна. Оквашеност површина зависи од упадног угла између тела и површине воде. Што је упадни

угао већи, зарањање скоро вертикално, равномерније је квашење површине кљуна као и његово хидродинамичко оптерећење. При израњању птица под водом отвара кљун (некада и зарања са отвореним кљуном што овде није приказано), ротира се око латералне осе и израња са пленом попречно постављеним у полуотвореном кљуну. У периоду роњења водомар нема временских и просторних могућности управљања телом под водом, осим за израњање када се служи махањем крилима, али се опет тело транслира и ротира у лонгитудиналној равни око тежишта, а кљун око зглоба, ради отварања и затварања.

Како је маневар обрушавање – зарањање недовољно описан кроз доступну литературу из биологије или биомеханике, велики број непознаница је потребно премостити или усвојити да би крајњи резултат био реалистичан и поуздан. Да би се анализирали биомеханички проблем маневра и облик таласа воде у равни симетрије маневар обрушавање – зарањање је поједностављен, те је уместо 3D поставке (слика 24) издвојен и посматран попречни пресек у равни симетрије тела водомара. За ту сврху је претпостављено да водомар врши маневар са скупљеним крилима и затвореним кљуном и да су у равни симетрије позициониране репрезентативне тачке, тачке тренутног дејства сила. Овим поједностављењем је смањен број улазних параметара и олакшана метода решавања итеративним путем. Пошто је маневар обрушавање – зарањање динамичког карактера и захтеван за нумеричко решавање, интервал посматрања је ограничен на један сегмент. Изабрани временски интервал у маневру има за сврху да прикаже понашање слободне површине током зарањања кљуна водомара, који је од интереса за примену у биомимикрији, у условима сличним природним. Време посматрања започиње у тренутку, t_0 , када се врх кљуна водомара налази изнад слободне површине воде, на само 1 cm висине, а завршава су тренутку зарањања кљуна, t . У овом временском интервалу се подразумева да је водомар претходно већ заузео одговарајући коначан правац и успоставио потребну брзину и убрзање по правцу зарањања како би остварио успешно маневар. У физичком моделу маневра, водомар представља круто и недеформабилно тело које се, у посматраном временском интервалу, креће стабилно по правцу и под великим упадним углом. Како се кретање посматра од тренутка када је водомар окружен само једнофазним струјањем, ваздухом из атмосфере, до тренутка када је окружен

двофазним струјањем, ваздух и вода, усвојено је да је општи модел струјања двофазни. Такође, на свом путу водомар је попречно – смерно стабилан, што се закључује на основу посматрања правилног зарањања, без translација од правца кретања или изненадних ротација око тежишта, које доводе до промене правца кретања изазваних грешком у маневрисању или неким спољним утицајем у уздужном правцу (нестабилност би довела до кобних последица, што се у природи такође дешава).

Водомар у маневру обрушавање – зарањање доживљава инерцијална, хидростатичка, хидродинамичка и аеродинамичка оптерећења кљуна и тела, чији се дејство и интензитет мењају током времена, као што приказује слика 40.



Слика 40 Скица физичког модела 2D бионичког водомара при маневру

Маса водомара, m_{tela} је при зарањању практично непроменљива. Упадни угао, θ , је угао који образују праве a (осовина тела водомара која садржи центар масе, CG) и ниво мирне воде, лежи у интервалу од $45^\circ - 90^\circ$ (вертикално зарањање). Облик кљуна (слика 40) правилно распоређује струјање по косим равнима, обезбеђујући тако стабилност тела по правцу кретања, попречно -

смерну. Слика 40 истиче референтне тачке које су центри деловања резултантни сила на тело водомара, а то су: центар масе крутог тела водомара, CG ; аеродинамички центар, AC ; центар притиска, CP ; центар силе потиска воде, CB ; позиција попречног метацентра MC и тачка дејства резултујуће хидродинамичке силе, HCD . Оптерећење оквашених површина водомара је, за разлику од оптерећења брода на пример, потпуно несиметрично у свим случајевима – у лонгитудиналном правцу, а такође неке од сила, као што су силе вискозног трења и силе настале појавом скоковитих таласа у сталном су расту. Силе које делују на водомара, у општем случају, под претпоставком вискозног нестишљивог флуида, се могу навести према узроку појављивања :

(1) сила тежине водомара, G , делује у тачки CG ;

(2) резултанта аеродинамичке силе, делује у тачки CP , а настала је услед кретања дела или целокупног тела водомара кроз ваздух, $R_{vazduh}(t)$. Аеродинамичка сила се може трансферовати у тачку AC за коју је момент обрушавања не завистан од упадног угла. При том, као што показује слика 40 (сиве ознаке), трансфером у AC се интензитет и смерови сила не мењају, али се додаје одговарајући моменат настао трансфером сила. Овакво приказивање је практично из разлога што је AC фиксирана током времена;

(3) хидростатичка - сила потиска, $F_P(t)$, делује у тачки CB потопљеног дела тела водомара. Положај и интензитет $F_P(t)$ се мења са временом пратећи промену положаја водомара и величину и положај тежишта потопљене запремине (напомена: водомар физички припреми тело за зарањање затезањем мишића чиме се практично масе прерасподеле и принудно, осим природне прерасподеле променом самог положаја из лебдећег или стојећег у положај за обрушавање);

(4) резултујућа хидродинамичка сила, $R_{voda}(t)$, потекла од површинског и запреминског међудејства тела водомара са водом међу које спадају: вискозно трење и утицај граничног слоја око потопљеног дела тела, утицај површинског напона воде узгонског карактера, утицај турбуленције у струји воде, отцепљење струје воде, утицај гравитационих и скоковитих таласа, утицај струјања воде, отпор услед храпавости површина кљуна и тела водомара, отпор детаља на телу и кљуну (носни отвори и сл.), утицај размене топлоте између тела водомара и околине, отпор услед утицаја околине – мала дубине воде у коју зарања,

неравномерне расподеле густине по дубини воде, и др.

Из наведеног се види да је кретање водомара под водом праћено комплексним механизмом кретања флуида. За разлику од водомара, животиње које све време пливају под водом савладавају силу отпора, директно зависну од квалитета профила тела и брзине кретања, а која се у основи састоји од отпора изазваног расподелом притисака по оквашеним површинама тела – отпор облика, отпора у струји воде у близини тела праћен појавама граничног слоја или отцепљења струје – вискозни отпор и, грубо објашњено, отпора вртложног трага.

Сила пропулзије кретања, $F(t)$, је створена обрушавањем, принудним падом, из стања блиског мировању убрзавањем већим од природног слободног пада помоћу крила. Реалистично је претпоставити да из планирања или лебдења није могуће да водомар тако нагло промени и задржи линијски правац у обрушавању, но у овој анализи се претпоставља кретање по правцу због комплексности проблема.

У следећој фази, фази зарањања, кретање је неједнолико. При првом додиру кљуна са слободном површином воде ствара се нагло успорење тела услед судара са површином флуидног тела, приближно 800 пута веће густине од ваздуха, уз додатни утицај сила површинског напона. У врло малом временском интервалу непосредно после судара, реда величине мање од хиљадитог дела секунде, оптерећење кљуна је ударног карактера и највеће, потом се смањује у току зарањања како се флуид прерасподељује током струјања по комплексним површинама кљуна. Као последица дејства хидростатичке и хидродинамичких сила током зарањања долази до неједноликог успоравања, и то врло нагло успоравања у кратком периоду непосредно након удара, а потом блажег успоравања до момента досезања плена. У овој фази су значајни улазни подаци упадна брзина, V , брзина у тренутку додира са водом, и упадни угао, θ , јер фигуришу у изразима хидродинамичких оптерећења и дефинисању параметара кретања крутог тела водомара током нумеричког маневра обрушавања – зарањање.

Приказ разлагања сила по правцима референтног координатног система, са координатним почетком на врху кљуна xOy , изабраног у складу са захтевима нумеричких симулација, дат је као презентација комплексности феномена

маневра обрушавање-зарањање, описан је математички са (41) и (42)

а) транслацију по правцу x , у тренутку t ,

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = R_{vazduha-x} + R_{vode-x} = -L_{vazduha-x} + D_{vazduha-x} + L_{vode-x} - D_{vode-x}, \quad (41)$$

б) управно на њега, y , у тренутку t ,

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -G + F_{Pt} + R_{vazduha-y} + R_{vode-y}, \quad (42)$$

За разлику од животиња које живе у воденом окружењу, отпор кретању код водомара не садржава отпор у вртложном трагу од воде, али трпи оптерећење услед насталих скоковитих таласа и тренутно постојећих таласа и утицаја из околине – ветра, воденог тока и сл. Таласи које водомар ствара зарањањем су таласи који се једновремено шире и у правцу (супротног смера) и попречно на правац зарањања, с тим што је ширење попречно на правац зарањања значајно слабије. Таласи са стране доњаке и горњаке су сличног скоковитог карактера. Посматрање и снимци током зарањања водомара, у временском интервалу од додира кљуна са водом до потапања целог кљуна, региструју таласе који се шире у истом правцу, а супротног смеру од зарањања. Међутим, ови таласи нису значајније истакнути и лако видљиви, већином због транспарентности воде, угла извора светлости и брзине дешавања маневра, но треба имати на уму да су увек присутни макар и са slabим интензитетом.

5.1. Закључак

Биомеханички модел је направљен на основу врло малог броја доступних података. За потребе истраживања из области биомимикрије са водомаром и другим птицама, које лове на сличан начин, потребно је проширити број података мерењима у природи како би се добила прецизнија сазнања и разумели овако комплексни феномени. Посебно се предлажу даља истраживања водомара, блуна, чапљи и сл .

На основу биомеханичког модела дефинисан је начин и метода за примену у CFD. Изабран је нумерички модел VOF у 2D простору, и кружни облик домена, који представља животну околину водомара. Позиција водомара је изабрана блиско изнад слободне површине земље (на висини од 1cm).

6. БИОНИЧКИ 2D ВОЗ ВЕЛИКИХ БРЗИНА

Са циљем да се истраже основни био-инспирисани облици, за које аутор није нашао податке у доступној литератури, и да се скрати време истраживања у почетној фази дизајнирања прототипа, искоришћена су искуства из ваздухопловне праксе.

Испитано је 5 конфигурација 2D BHST при брзинама од 100 km/h – 500 km/h, у возњи пругом, и 2D BHST – водомар у слободном лету, до надзвучних брзина. Испитивање за конфигурацију BHST-водомар у слободном лету је обављено при два напада угла, и то $\alpha = 0^\circ$; 6° .

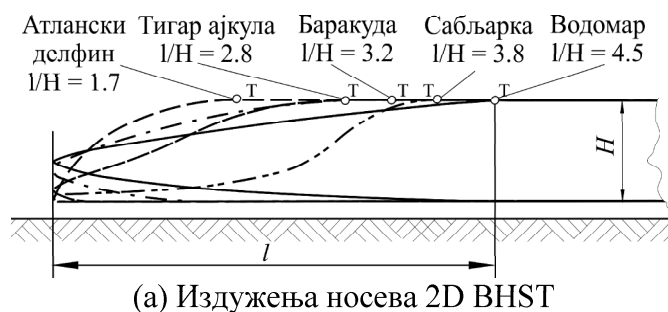
Примењене су нумеричке методе препоручене за испитивање ваздухоплова. На већим брзинама и при условима за које се очекује стишљивост струјања примењен је густински солвер, а у свим осталима притисни.

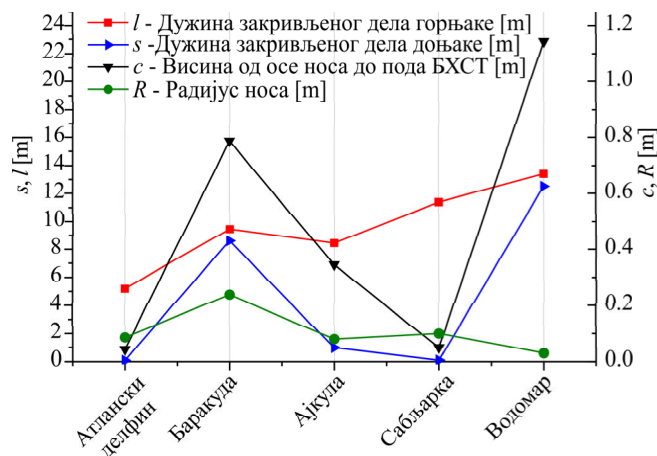
Испитивања различитих 2D конфигурација BHST на отвореној прузи и слободном лету су приказана у Прилозима 7-10 [170-172].

6.1. Геометрија 2D BHST

Геометрије модела које служе 2D нумеричким симулацијама BHST приказује слика 41 [171], Прилог 8.

Дизајн налик водомару има највеће издужење и високо подигнут нос изнад линије пода BHST, јер је контура кљуна уклопњена у габарите BHST. Врх носа је затворен са врло малим радијусом у односу на остале облике.



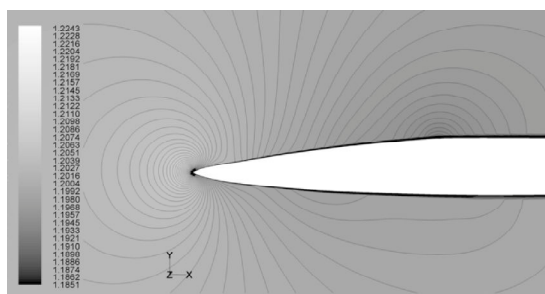


(б) Остали параметри

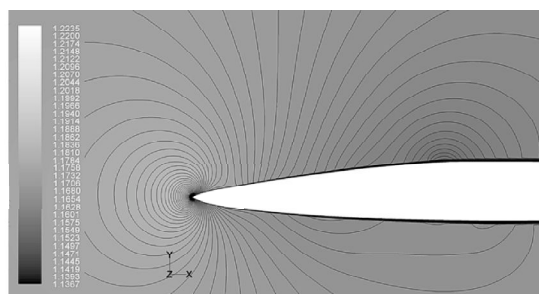
Слика 41 Параметри дизајна 2D VHST [171], Прилог 8

6.2. Резултати нумеричких испитивања 2D VHST

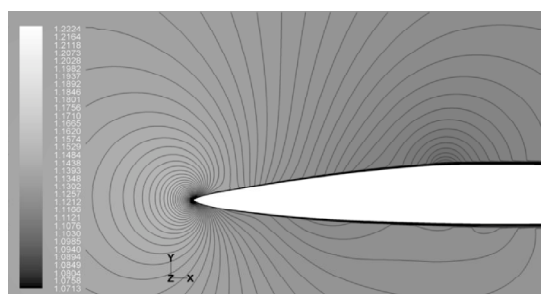
Са сврхом испитивања сличности струјања око кљуна водомара, из хидродинамичких тестова, и око VHST приказане су изо-густинске линије око 2D VHST за три конфигурације, и то: у слободном лету – подкритични режим (слика 42), у вожњи на отвореној прузи (слика 43), и у бесконачном тунелу (слика 44). Услови струјања стандардни, $M = 0.2, 0.3, 0.4$.



(a) $M = 0.2$

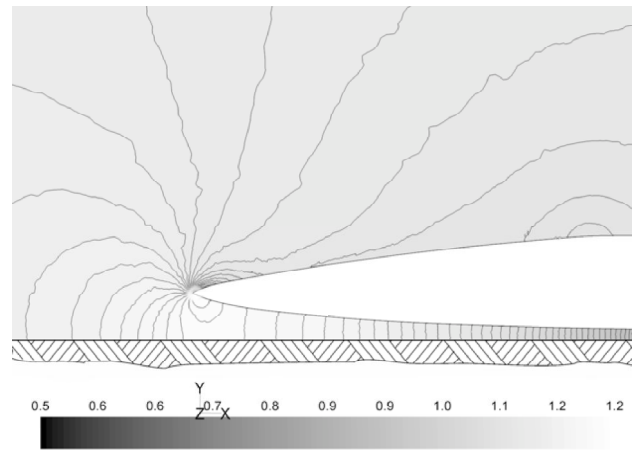
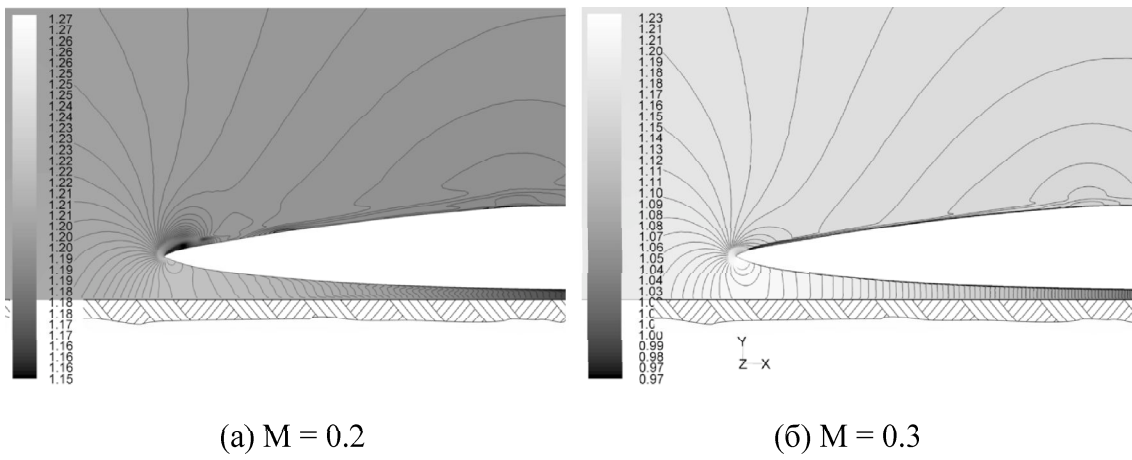


(б) $M = 0.3$

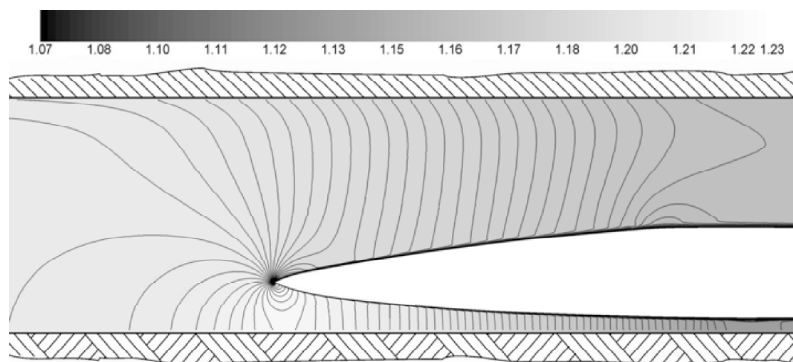


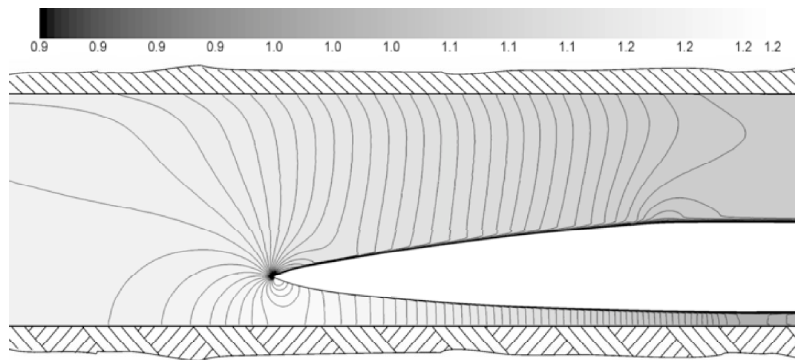
(в) $M = 0.4$

Слика 42 Изо-густинске линије око 2D VHST у слободном лету за три брзине

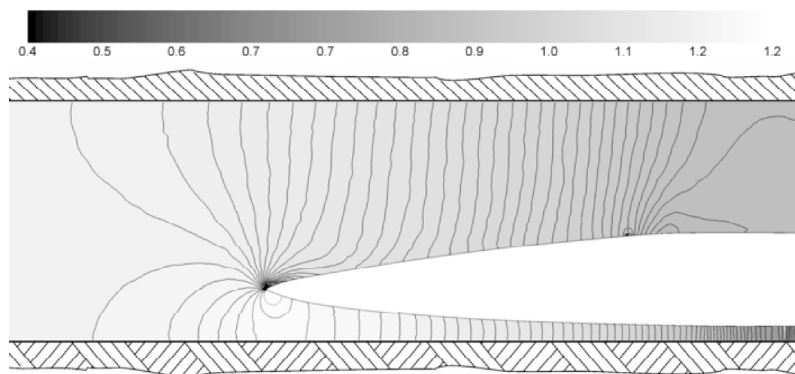


Слика 43 Изо-густинске линије око 2D BHST на отвореној пружи за три брзине





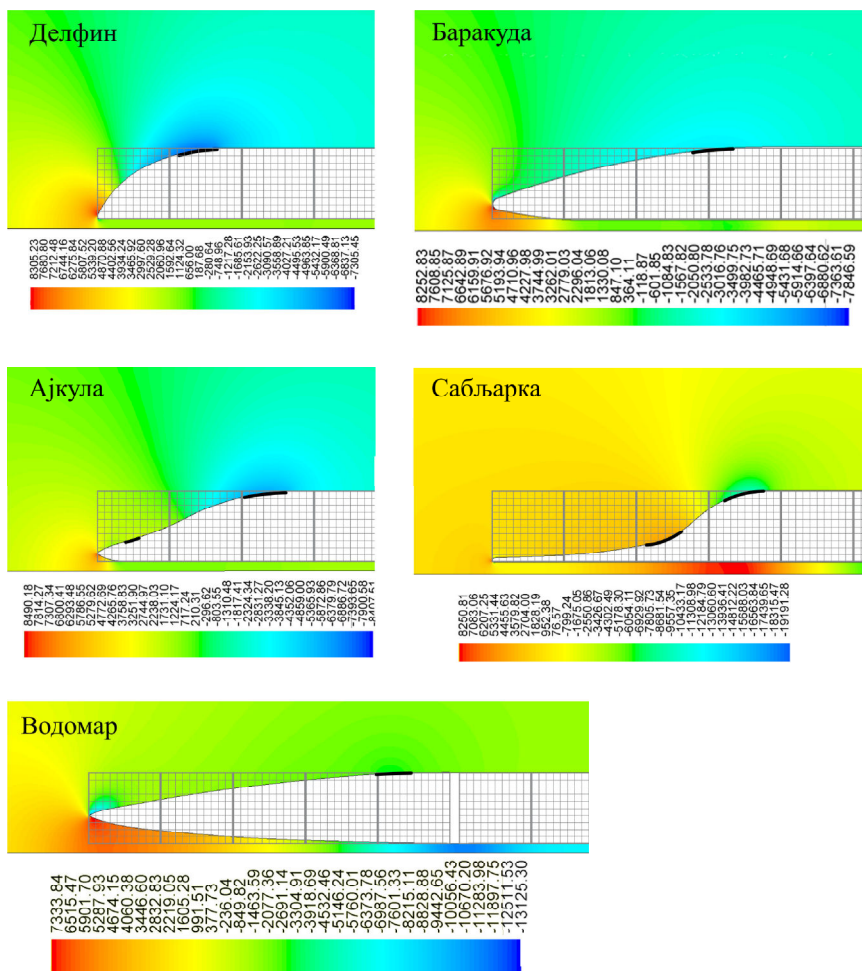
(б) $M = 0.3$



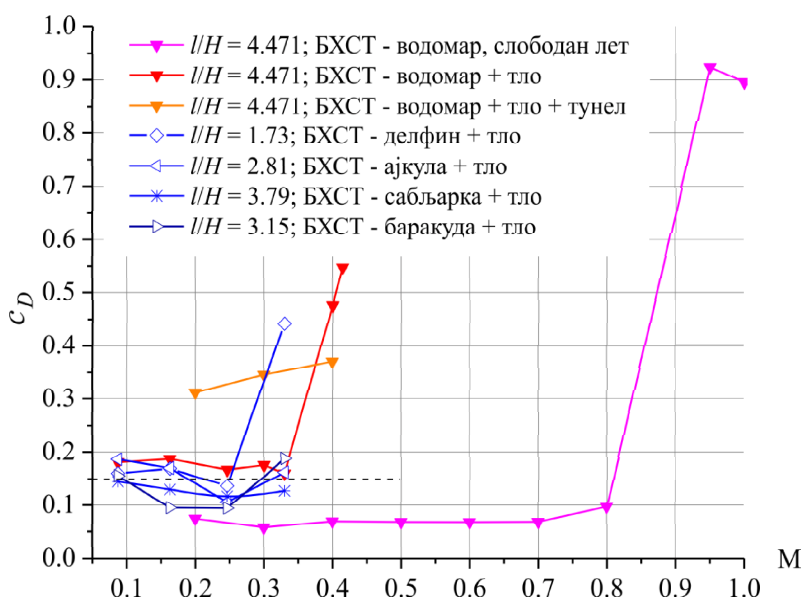
(в) $M = 0.4$

Слика 44 Изо-густинске линије око 2D BHST у бесконачном тунелу

Слика 45 приказује расподелу притисака по носу за различите облике BHST [27]. Слика 46 приказује c_x за различите облике и конфигурације BHST (са утицајем тла [170], на отвореној прузи и у тунелу – само BHST налик водомару). Према вредностима c_x и расподелама притисака за различите конфигурације извршен је избор најповољније.



Слика 45 Поређење расподела статичких притисака, $V = 400 \text{ km/h}$



Слика 46 Коэффициент отпора за различите конфигурације ВНСТ и брзине

6.3. Тумачење резултата

Изо-густинске линије у слободном лету BHST-водомар указале су на правилну расподелу струје са стране горњаке и доњаке, слика 42. Тачка зауставе се налази у зони врха носа.

Увођењем тла струја је делом ушла испод воза равномерно се распоређујући по висини канала, док је струја са стране горњаке створила услове за ламинарно отцепљење од самог врха у виду мехура, слика 43. Тачка зауставе је померена испод врха носа BHST. Ова појава је протумачена високим положајем носа од тла и кривином доњаке, што је утицало да се већа количина ваздуха прође испод BHST.

У тунелу, због ограниченог попречног пресека, односно, запречавања пресека бесконачног тунела возом, расподела изо-густинских линија је указала на померање тачке зауставе ка врху носа, док је при текућим условима струјања елиминисано ламинарно отцепљење, слика 44. Изо-густинске линије су управне на правац струје и са горњаке и са доњаке и различитих су густина појављивања низ струју, што је протумачено порастом брзине у каналу изнад горњаке и значајним успоравањем на почетку канала испод доњаке. Тачка зауставе је нешто изнад врха носа. Криве једнаких густина од врха носа низ струју имају врло сличне облике при различитим брзинама слободне струје. У горњем делу, од врха до отприлике $1/5$ дужине носа скрећу ка горњаци, а потом се исправљају и прате остале у каналу. Са повећањем брзине слободне струје изо-густинске линије су постављене све ближе горњаци и прате је на већем растојању (приближно до $1/7$ при $M = 0.2$, до $1/5$ при $M = 0.4$). Оно што је протумачено као негативна појава је подсисавање струје испод воза и стварање компресије, која на делу код репа воза чак доводи до појаве ударног таласа при $M = 0.4$. Из разлога појаве критичног струјања није вршено испитивање 2D BHST при већим брзинама, осим за конфигурацију у слободном лету.

Према резултатима из [170,171] протумачено је да се са порастом параметра l/H зона ламинарног струјања задржава на већој дужини, мерено од врха носа, и то је у значајној мери допринело смањењу c_x , у области брзина до $V = 400$ km/h, слике 47 и 48. Укупан c_x је збир отпора носа и репа, и она зависи и од струјања у

вртложном трагу, али и од дужине носа, с обзиром на површинско трење. При избору дизајна најмањи отпор је показао дизајн BHST – баракуда, али са великим променама вредности од брзине до брзине, слика 46, достижући вредност коју је исказао BHST – водомар при $V = 400 \text{ km/h}$. BHST – водомар показао мале промене у вредност на свим брзинама до $V = 400 \text{ km/h}$. Вредност c_D се показала устаљеном и у слободном лету, чак до $M = 0.8$, док је у тунелу c_x ове конфигурације растао са брзином, слика 46.

Расподела c_p у слободном лету BHST налик водомару показује неке од одлика аеропрофила, посебно на носном делу. У слободном лету доњака BHST – водомар показала је равномернију расподелу притисака са благим порастом, те се тумачи да је она са аеродинамичког становишта боља, али за практичну примену код класичног возног построја превише издужена.

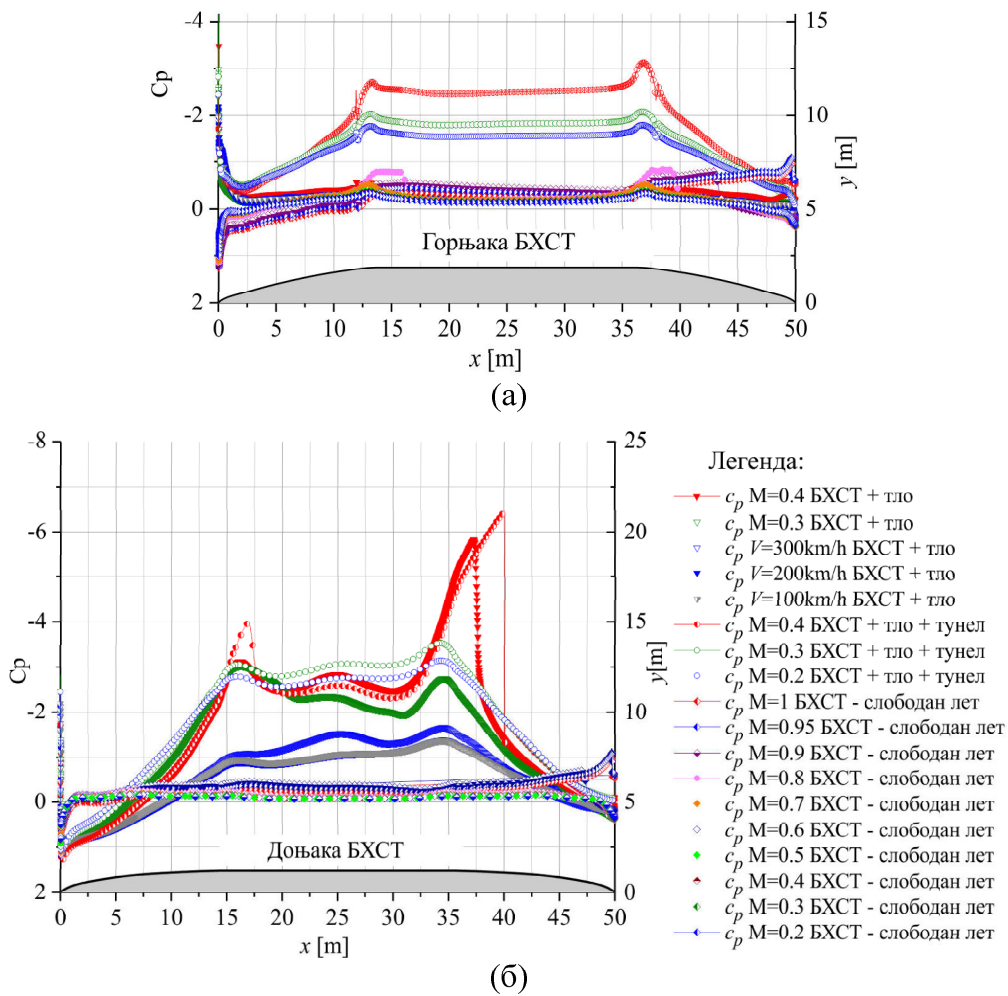
Код конфигурација са великом дужином равног дела пода BHST струјне слике су показале колебање притиска по дужини. Посебно код већих брзина (300 km/h, 400 km/h) уочена је неравномерна расподела притисака испод воза код конфигурација BHST – сабљарка, ајкула и водомар. За BHST – водомар, тачка зауставе је благо померена испод носа, међутим велика кривина доњаке усмерава велику количину ваздуха под воз, што је протумачено ефектом Вентури цеви, коју чини доњака BHST и тло, у области репа. Слично, али далеко блажи ефекта се појављује и код BHST – баракуда. Код BHST – сабљарка, из расподеле притисака протумачено је веће усмеравање струје под воз због неповољног облика контура горњаке.

За разлику од других конфигурација код BHST-водомар и баракуда вртложни траг је пратио тело, без великиког пада у статичком притиску на репу BHST.

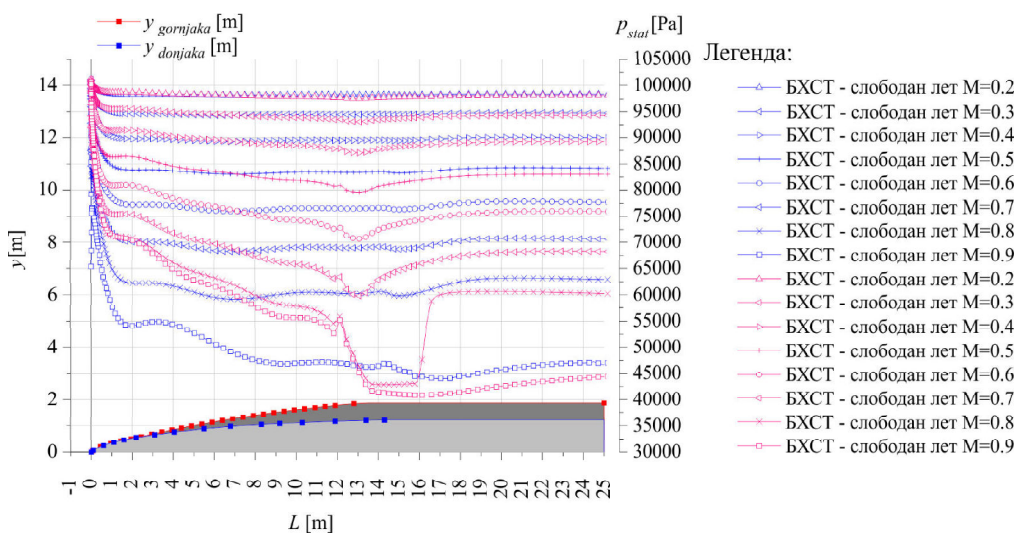
Сагледавајући више фактора, не само минималну вредност c_x , за даље истраживање су изабране конфигурације BHST – водомар и – баракуда као дизајни са највише потенцијала за креирање бионичког воза добрих аеродинамичких карактеристика.

Да би се боље учили недостатци дизајна, BHST – водомар је указало на места са недостацима у дизајну које је потребно кориговати код креирања 3D дизајна BHST. Сlike 47 и 48 приказују расподеле c_p и p при различитим M код

ВНСТ – водомар.



Слика 47 Расподела коефицијента притиска по површинама ВНСТ – водомар



Слика 48 Расподела статичког притиска по горњаци и доњаци ВНСТ – водомар у слободном лету, M = 0.2 – 0.9

Слика 47а показала је неправилности у расподели c_p симетрично са стране носа и репа, а на месту где је урађено свођење контуре водомара на тело ВНСТ. Сличне неправилности нису уочене са стране доњаке, па је ова појава протумачена као локални недостатак у дизајну, који није исказивао утицај кроз анализу при мањим брзинама и није био примећен у проверама дизајна.

Како на великим брзинама и најмања оштећења површине или контуре модела у стварном лету, аеротунелу или у нумеричким симулацијама узрокују нагле промене у расподели притисака покрећу и нежељене ефекте, од којих је најзначајнији локална појава критичног струјања ($M = 1$). Метода контроле квалитета контуре нумеричког модела ВНСТ помоћу анализе струјних параметара, у овом случају притиска, названа је „Маховом лупом“.

Слика 48 је резултат имагинарног случаја кретања ВНСТ у слободном лету при изузетно великим брзинама. Праћењем положаја (мерено од врха носа) на коме се први пут јавља пад притиска, са променом брзине од субсоничних до трансоничних, уочено је да се на месту приближно удаљено од врха носа $L = 12 \text{ m}$ налази извесно одступање профила од номиналног. Накнадном контролом квалитета облика ВНСТ у складу са налазима из овог дела испитивања, утврђено је да заиста постоји скоро неприметан скок по висини између тачака на контури у околини места спајања бионичког и прелазног дела. Одступање од номиналног профила на једном месту је реда величине неколико милиметара (дужина ВНСТ је 50 m). Недостатак на контури горњаке је утицао локално, и на изабраном опсегу брзина за ово истраживање није показао значајан утицај, али је сам случај показао неопходност провера дизајна не само на нивоу геометријског модела, већ и кроз нумеричке симулације применом Махове лупе, с обзиром да су са повећањем брзине параметри струјања изразито „осетљиви“ на грешке у дизајну. Како се дизајн ВНСТ–водомар у наставку истраживања модификује, а у жељеном опсегу брзина није показао значајан утицај на резултате, нису вршене даље корекције дизајна.

Према резултатима овог испитивања се препоручује да се 2D и 3D случајеви подвргну имагинарним условима испитивања и да се Маховом лупом претраже сви евентуални недостаци у контури. Локално изражени недостатци у виду локално изражених одступања од номиналног профила (не у смислу храпавости,

него појаве тачке/ивице након које је контура или истурена или заклоњена од струјања) потичу од методе конструисања контуре: контура из тачака или спајањем контура апроксимираних полиномом. У смислу унапређења начина конструисања контуре и контроле параметрима дизајна потребно је стално унапређивање вештина креирања површина, а предлаже се параметризација Бернштајновим полиномом, итеративним путем. Уочени недостатци у процесу дизајна ВНСТ морају бити исправљени пре наставка истраживања јер неће бити превазиђени касније при креирању нумеричке мреже и калкулацијама. Зависно од изабраних полазних података (дефинисаног броја и квалитета елемената мреже, брзине кретања и конфигурације поставе воз-пруга-тунел) недостатци могу усмерити анализу и закључке у погрешном смеру. Оваква или слична испитивања квалитета дизајна, ради елиминисања што већег броја утицаја грешки у дизајну на резултате испитивања, би требала са посебном пажњом да се примене при кретању воза кроз тунел, знајући да, према [4], при већим брзинама и већим вредностима запречавања тунела долази до појава локално трансоничне брзине и нормалног ударног таласа уместо компресионог.

На основу анализе резултата из овог дела истраживања протумачено је да су испитивања потврдила постављене хипотезе. Највећа одступања коефицијента отпора су реда величине 0.1, али се њихове вредности мењају за сваки дизајн на различит начин са порастом брзине. Заједничко за све испитане конфигурације је да се коефицијент отпора повећава са премашивањем граничне вредности од 300 km/h.

Један бионички дизајн посматран у више конфигурација и на изабраном опсегу брзина може бити оптимално аеродинамичко решење само на делу изабраног опсега брзина. Са друге стране неки други бионички изабрани дизајн може бити и боље и лошије решење на истом опсегу брзина, чак иако на први поглед резултати не указују на негативне утицаје. На пример, слика 46 показује $(c_x \text{ barakuda} < c_x \text{ vodomar})_{M < 0.2}$ и $(c_x \text{ barakuda} > c_x \text{ vodomar})_{M > 0.2}$, одакле би могло да се закључи да је боље решење биомимикрија са водомаром, али са друге стране поређењем струјних слика и расподела притисака може се уочити изузетно неповољна ситуација и присуство ударног таласа у каналу испод репа носа ВНСТ-водомар. Због неповољне струјне слике у каналу ВНСТ-водомар у дизајну

конципираном на простом пресликавању облика и положаја у односу на струју није оптимално аеродинамичко решење.

6.4. Закључак

Нови дизајн је пожељно тражити у комбинацији VHST – водомара и баракуде. Представљени био-инспирисани дизајни су замишљени као полазне контуре VHST у зони ограничене ширине дуж равни симетрије. Корекције су потребне на врху носа, у смислу спуштања врха носа ка тлу, уз повећање радијуса слично као код баракуде, јер је такав дизајн VHST показао погодну расподелу притисака и на носу и на репу. Ове мере би требале да уклоне појаву ламинарног отцепљења на врху носа и премештање тачке зауставе на страну горњаке, или у неутрални положај на самом врху носа. Од врха носа до премошћења – дела у коме се радијусом глатко премошћава био-инспирисана контура са телом воза, задржава се основна контура кљуна водомара и код дизајна 3D VHST, с тим да ће се посебна пажња посветити квалитету геометријских спојева контура. Исправљање контуре доњаке очекивано је да се побољша и уједначи расподела притисака са стране доњаке и тиме предупреди појава компресије изазвана дизајном.

7. КОМБИНОВАНА МЕТОДА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ СЛИЧНОСТИ СТРУЈАЊА

Комбинована метода за одређивање сличности струјања између струјања воде око кљуна водомара и ВНСТ – водомар има за циљ утврђивање методе којом би се дошло брже и лакше до полазних геометријских података и добрих аеродинамичким карактеристика будућег дизајна. Будући да је процес оптимизације постојећим методама врло захтеван по питању времена и ресурса, како да се креира полазни дизајн тако и оптимизација истог, овим радом је представљена метода за дефинисање почетног дизајна за даљи процес оптимизације, овом или неком другом методом.

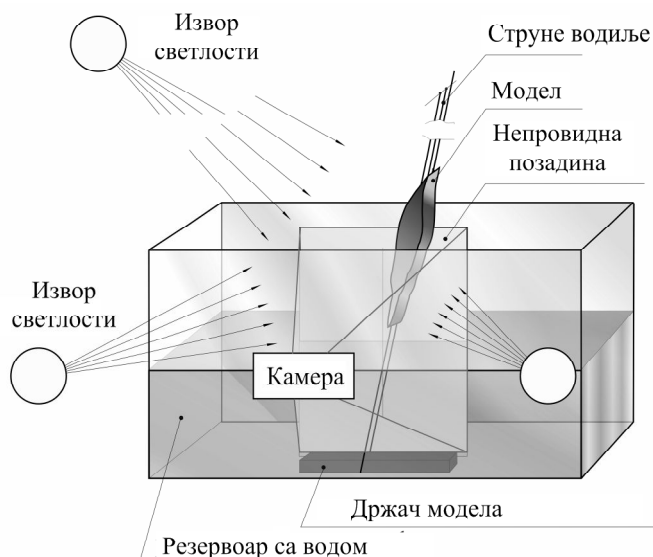
Комбинована метода за одређивање сличности струјања се састоји од хидродинамичких испитивања 2D модела водомара, према искуствима из бродоградње, и нумеричких симулација над 2D бионичким водомаром и ВНСТ – водомар. Испитни услови за модел водомара $V_0 \approx 0.6 \text{ m/s}$, 6 m/s и 10 m/s , а за ВНСТ-водомар брзине од $M = 0.2 - 0.4$, у конфигурацијама у слободном лету, на отвореној пружи и у бесконачном тунелу. Конфигурација ВНСТ – водомар у слободном лету је испитана и при два нападна угла. Резултати хидродинамичког испитивања су верификовани сликама из природе.

Истраживања из овог рада су на примеру водомара одредила редослед примене метода и дала приказ резултата у смислу критеријума према којима се може проценити да ли је примењен бионички дизајн погодан за наставак истраживања. Према резултатима комбиноване методе за одређивање сличности струјања предложено је и проширење методе хидрауличке аналогije у области подкритичних струјања, која није довољно заступљена у пракси.

7.1. Хидродинамички експеримент

Хидродинамичка испитивања су основа за утврђивање сличности струјних поља: воде око кљуна и ваздуха око бионичког воза. Такође, резултати хидродинамичких испитивања су коришћени за верификацију нумеричких и експерименталних резултата, а они су са друге стране верификовани поређењем са природним феноменом.

Хидродинамичка испитивања су извршена зарањањем различитих модела 2D бионичког водомара из слободног пада у воду. Поставу за испитивање приказује слика 49, која је израђена по угледу на хидродинамичка испитивања у бродоградњи [82,83].



Слика 49. Постава за хидродинамичка испитивања

У стаклену посуду равних страница, испуњен водом до око 275 mm дубине, постављена је позадина са градуисаном мрежом. На дну суда постављен је држач најлонских струна и преко њих је положен сунђер за амортизацију удара и превенцију оштећења модела. Изван суда је постављен метални држач модела, на чијем крају су причвршћене најлонске струне за позиционирање модела као и струна за отпуштање модела, на висини од 40 cm. Између модела и стакала суда остављен је слободан простор од по 1 mm са сваке стране да би се обезбедио несметан пад модела у воду, уз претпоставку да постојање овог простора није

утицало значајно на резултате испитивања. С чела суда, усмерено ка позадини модела постављена су два рефлектора ($2 \times 150 \text{ W}$), а у висини модела и камера Camera Samsung ES 95 на посебном носачу. камера је постављена на аутоматски режим рада (30 кадрава/секунди). Графичка обрада је обављена помоћу софтвера PaintNet, а квантификација података помоћу софтвера отвореног кода PlotDigitizer.

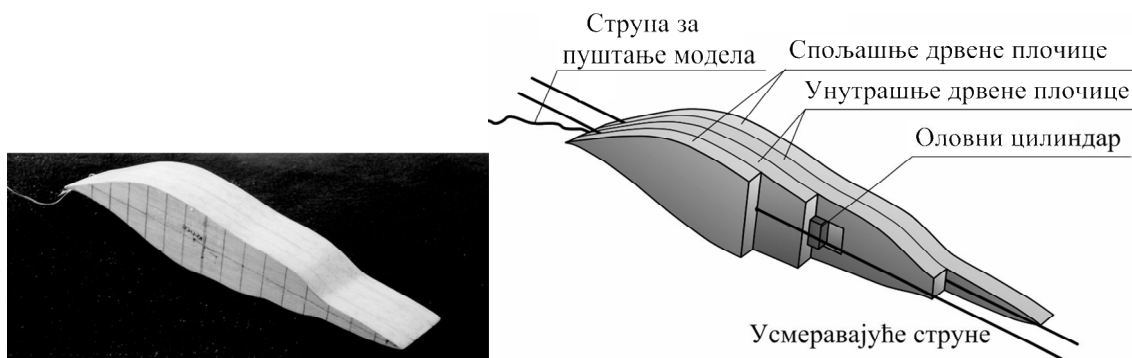
За сваки тест су мерени температура воде и ваздуха и атмосферски притисак. Снимање је вршено од тренутка када је модел још увек био привезан за држач, па све до тренутка када се зауставио на дну или је извађен из воде.

Понављањем снимака и анализом кадрава израчуната је приближна брзина кретања модела, у тренутку додир са водом, која представља улазни податак за нумеричке симулације. Просечна брзина модела у слободном паду, у тренутку додир са водом је $0.6 - 1.8 \text{ m/s}$, са процењеном грешком до $\pm 10\%$.

Испитни модел водомара

За нумеричка и експериментална хидродинамичка испитивања је креиран јединствен нумерички модел. Лонгитудинални попречни пресек водомара (слика 24) је екструдирани за 32 mm . Дефинисани подаци о маси и положају центра масе усвојени су као референтни за 3D модел.

На основу пар пробних модела различитих маса, израђених од истог материјала, израђен је испитни дрвени модел водомара за хидродинамичка испитивања. Слика 50 приказује конструкцију испитног модела. Модел је ручно израђен од четири ламеле балзе (средње класе „А“ рез), стандардног авио-моделарског материјала. Средње дрвене плочице, на месту прорачунатог центра масе за 3D бионички модела водомара покривају оловни ваљак који симулира масу и положај центра масе водомара (118 g , $50 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$). Симетрично у односу на лонгитудиналну раван симетрије, између средњих и спољних плочица, израђени су канали, пречника 0.5 mm , целом дужином модела. Кроз сваки канал се провлачи по најлонска струна (0.1 mm) за контролу упадног угла при паду модела у воду. Једна најлонска нит је везана на крају репа за отпуштање модела.



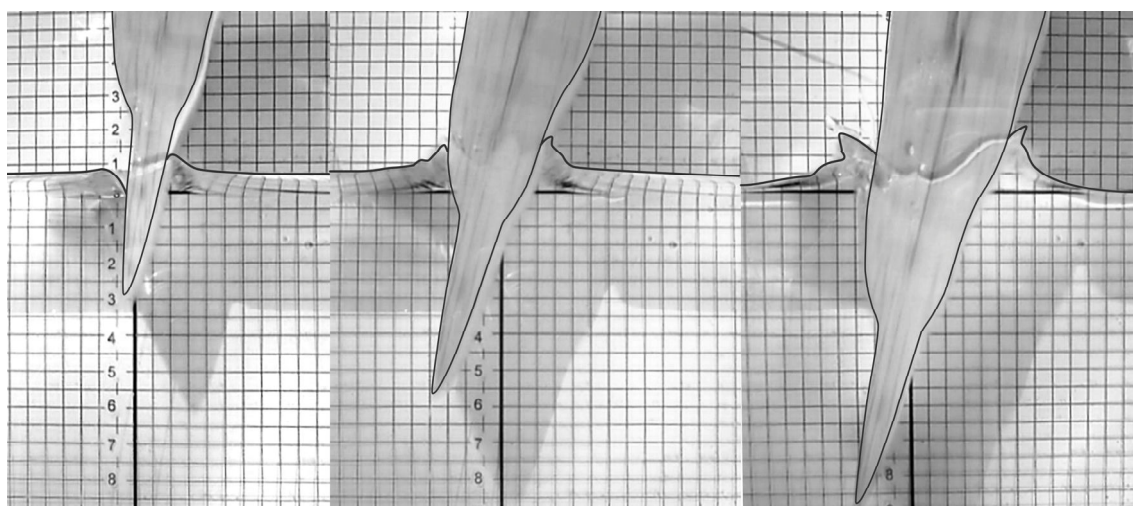
(а) дрвени 2D модел (в)) конструкција дрвеног модела

Слика 50 Изглед бионичког модела за експериментална хидродинамичка испитивања

Бионички модел водомара је пуштан из положаја према случају из природе, слика 23б, угао осе тела према површини воде $\theta \approx 83^\circ$, и у слободном паду.

7.1.1. Резултати хидродинамичких испитивања бионичког водомара

Слика 51 приказује урањање бионичког водомара под углом $\theta \approx 83^\circ$, а слика 52 под углом $\theta \approx 0^\circ$, при условима $T_{\text{вода}} = 26^\circ\text{C}$, $T_{\text{ваздух}} = 27^\circ\text{C}$, $p_{\text{атмосферски}} = 100\ 800\ \text{Pa}$. Слика 52 приказује кадрове зарањања симетричног модела профилисаног према горњаци кљуна водомара, $V_0 \approx 0.6\ \text{m/s}$.

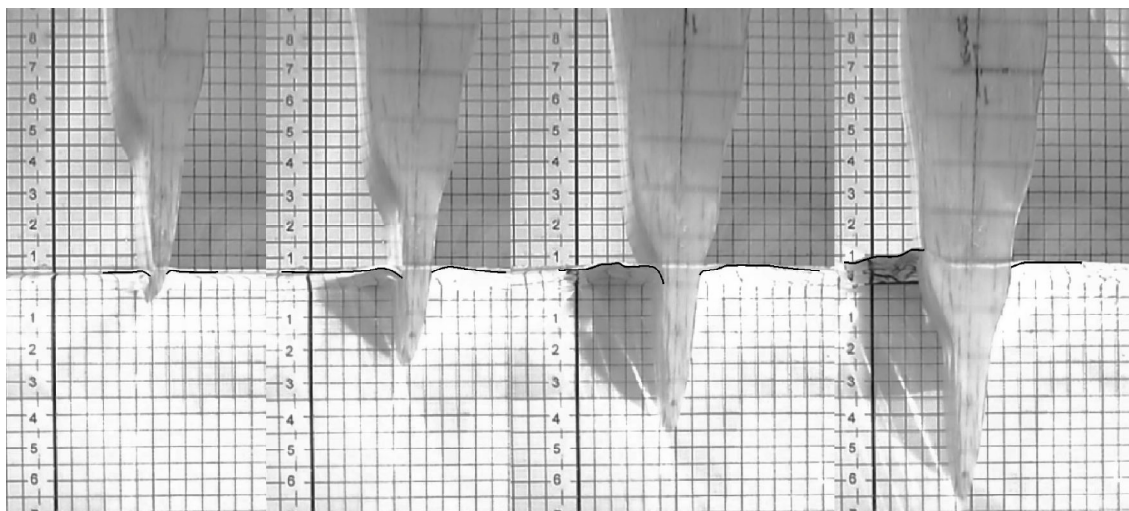


(а)

(б)

(в)

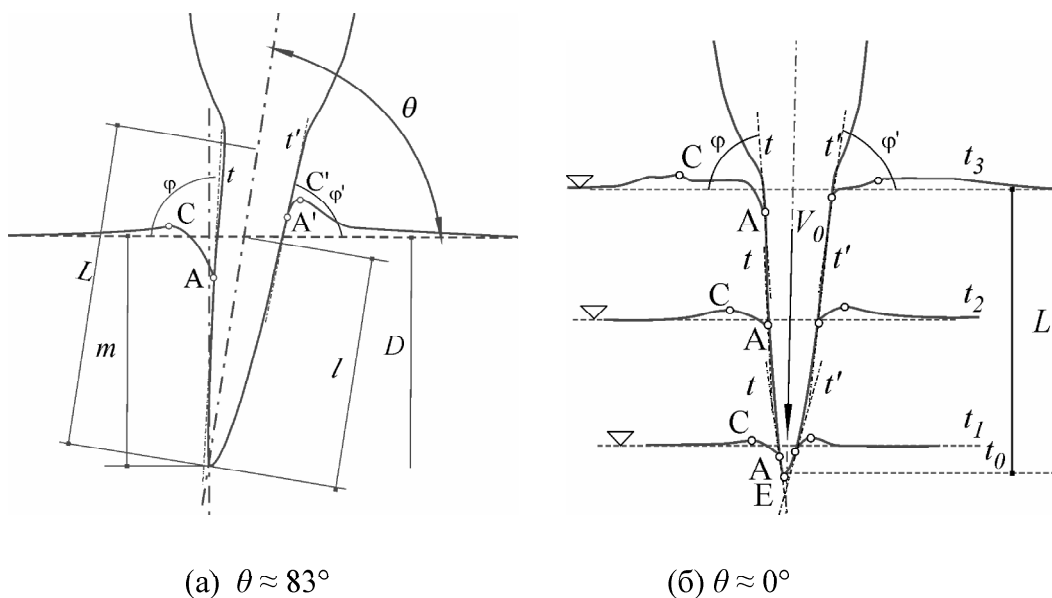
Слика 51 Кадрови зарањања бионичког модела водомара у чисту воду, $V_0 \approx 0.6\ \text{m/s}$, $\theta \approx 83^\circ$, (а) зароњен кљун до $\approx 2/3$ дужине кљуна (б) зароњен чеони део главе (в) зароњена глава и део леђа



Слика 52 Кадрови зарањања бионичког модела водомара у чисту воду, $V_0 \approx 0.6 \text{ m/s}$, $\theta \approx 0^\circ$,

7.1.2. Тумачење резултата хидродинамичких испитивања

Поређење облика таласа за два угла зарањања, θ , при истој упадној брзини $V_0 \approx 0.6 \text{ m/s}$, приказује слика 53.



Слика 53 Поређење облика таласа за два различита θ , $V_0 \approx 0.6 \text{ m/s}$

За случај када је $\theta \approx 83^\circ$, угао локалне тангенте на контуру модела водомара у тачкама додира су одређене графички са слике. На месту одвајања таласа од контуре, тангента на контуру је $\varphi \approx 93^\circ$, а $\varphi' \approx 79^\circ$, слика 53а. За последицу се

талас по горњаци, при $\theta \approx 83^\circ$, одвојио на месту испод површине, и подигао се благо изнад нивоа воде. Таласи имају благо закривљене контуре без карактеристичних круница истањених крајева или наглог задебљања, која могу јавити при интензивном отцепљењу таласа од површине. Над горњаком је незнатно подигнут ниво воде у односу на мирну површину, што није случај и код горњаке. У односу на дубину базена, D , слика 53а, врх таласа је издигнут над горњаком, у тачки C , за $0.005 D$, у тачки се одваја од површине у A на $0.019 D$ испод нивоа површине. Са стране доњаке, врх таласа C' је изнад нивоа за $0.018 D$, а одваја се изнад нивоа воде у A' на $0.009 D$.

Слика 53б показује случај када је $\theta \approx 0^\circ$. Отклони локалних тангенти на горњаци, φ , и доњаци, φ' , мењају вредности током времена, од $t_0 - t_3$, пратећи контуру, али су сада, у вертикалном паду, на горњаци – $t_1: \varphi \approx 82.1^\circ$; $t_2: \varphi \approx 87.2^\circ$ и $t_3: \varphi \approx 85.9^\circ$; на доњаци – $t_1: \varphi' \approx 74.5^\circ$; $t_2: \varphi' \approx 83.6^\circ$ и $t_3: \varphi' \approx 81.6^\circ$. У складу са нагибом тангенти, дубином зарањања и локалном ширином попречног пресека оквашеног дела кљуна, и облик таласа се мења у времену. У свим тренутцима изражана је симетричност облика таласа, за разлику од зарањања под углом. Тако, у односу на укупну дубину, D , у тренутку t_1 тачка C се налази изнад нивоа воде за $0.002 D$, тачка A на $0.004 D$ испод нивоа. У тренутку t_2 , тачка C се налази изнад нивоа воде за $0.004 D$, тачка A на $0.002 D$ испод нивоа, и у тренутку t_3 тачка C се налази изнад нивоа воде за $0.006 D$, тачка A на $0.009 D$ испод нивоа.

На сликама 53а и 53б (t_2) су приказане сличне ситуације при различитим θ . Уочљиво је да су таласи код вертикалног пада симетрични са обе стране водомара и сличних облика, али нешто веће висине него над горњаком, код зарањања под углом. Место одвајања, A , се налази ближе површини, него код зарањања под углом са стране горњаке. Када се упореде облици таласа са стране горњака, локално растојање таласа од правца вертикале је веће у случају зарањања под углом, него што је то случај код вертикалног пада. При истој брзини зарањања, веће локално растојање од вертикале до контуре узроковало је подизање таласа, а тиме и веће вертикално удаљење тачака C и A од површине воде, слика 53.

Облици таласа се могу протумачити као резултат подкритичног струјања воде на страни горњаке и надкритичног струјања са стране доњаке кљуна водомара у зарањању под углом, слика 53а, а резултати показују сличну

физикалност појаве као примери из [103]. Несиметричност облика таласа (горњака–доњака) је присутна на сличан начин као и у експерименту са падом клина у воду са сталном брзином и угаоном брзином [104].

Према облицима таласа, при вертикалном зарањању, протумачено је да је са обе стране кљуна присутно подкритично струјање. Присуство оштрог врха, конвексног облика профила, на издужењу L/H до 4.4, обезбеђен је угао отклона локалних тангенти према вертикалном правцу од пар степени, чиме није унет поремећај који би довео до отцепљења таласа од површине по читавој дужини кљуна, при датим условима, као што показује слика 53б.

Слика 53 указује да слободна површина воде не прати контуре бионичког водомара у подкритичном режиму. Историја развоја таласа показује да је одвајање таласа у подкритичном режиму испод нивоа слободне површине и да положај тачке одвајања зависи од релативног положаја тачке на контури где се талас одваја у односу на правац вертикале (одстојање и нагиб локалне тангенте на профил контуре), при истој упадној брзини $V_0 \approx 0.6$ m/s. Слика 53а показује место тачке A испод нивоа и нагиб локалне тангенте већи од правог угла. Тренутно место тачке A се налази на делу контуре који, при зарањању у воду при $\theta \approx 83^\circ$, заузима приближно вертикални положај. Посматрајући историју догађаја, протумачено је да део контуре до око $1/3$ дужине, зарањајући приближно вертикално, делује на воду као клип који се врло споро креће и тиме не уноси поремећај у смислу стварања изражених таласа. Слика 53б показује да и у случају вертикалног пада под условом да је контура врло издужена (посматрајући само профил брзина са једне стране вертикалног правца). Облик контуре, дефинисан локалним положајима тангенти на профил у тачкама додира таласа и модела, обезбеђује такође врло споро напредовање горњаке и доњаке управно на површину воде ($V_A \ll V_0$). И у овом случају површина модела представља нека врста клипа који се креће довољно споро ($V_A \ll V_0$) да не ствара изражено издизање таласа изнад нивоа мирне површине. Сличности у случајевима $\theta \approx 83^\circ$ и $\theta \approx 0^\circ$, $V_0 \approx 0.6$ m/s, кроз историју развоја подкритичног струјања, се огледају у томе да мањи ϕ утиче на повећање локалне брзине воде у правцу мирне површине, локално одстојање A од вертикалног правца утиче на повећање брзине у правцу мирне површине воде, затим, у оба случаја тачке одвајања таласа од

модела су испод нивоа мирне воде када је $V_A \ll V_0$, врхови таласа су врло мало издигнути, тачке одвајања A су ближе нивоу слободне површине што је већа брзина кретања у правцу мирне површине воде, V_A , док се висина таласа повећава такође са порастом V_A . Када растојање A' од вертикалног правца пређе вредност од око 30% локалне дужине профила кљуна и $\varphi' \approx 80^\circ$, као што је то случај са стране доњаке, струјање постаје надкритично. Тада се тачка A' издиже изнад нивоа воде и пратећи њу тачка C' формирајући изражен облик таласа.

У смислу примене профила на VHST, облик кљуна водомара се показао као пожељан за даља истраживања. Положај VHST – водомар према слободној струји ваздуха при малој брзини зарањања из вертикалног или благо нагнутог правца, слика 53б, су усвојени као меродавни за даљу примену. Према облицима таласа створених из вертикалног зарањања, контура једне стране (горњаке или доњаке) представља најбоље дизајнерско решење, уколико се правац вертикалног зарањања посматра као површина тла (потенцијално струјања), међутим овакво решење због велике издужености профила води техничко-технолошким проблемима у реализацији за конвенционални тип шинског возила. Но, слична истраживања су добродошла при дизајнирању Маглев возова, код којих је велико издужење носног дела воза изводљиво због другачијег типа погона, односно, положаја VHST – тло.

7.1.3. Закључак

Хидродинамички експерименти су приказали физикалност појаве и кретања таласа насталих зарањањем бионичког модела водомара комплексне геометрије, представљајући струјну слику у 2D простору, за лонгитудинални попречни пресек водомара. Резултати истраживања су показали сличну физикалност појаве као што је приказују примери из доступне литературе при паду тела облика клина у воду или пројектила. Због недостатка сличних примера из доступне литературе детаљније поређење није било могуће.

Свакако за потпуно упознавање са физикалношћу природне појаве и креирања детаљнијег математичког модела неопходан је наставак истраживања како у 2D, тако и у 3D простору са моделом водомара. Наставак истраживања се

предлаже пре свега у правцу испитивања 2D симетричних бионичких модела. За постизање прецизнијих резултата пожељна је употреба 3D штампаних или стеролитографских модела високог квалитета израде, са варијацијама параметара дизајна, масе модела и услова струјања, испод 5 m/s. Посебна пажња би требала да се посвети зависности параметара дизајна од полазне брзине зарањања (слободан пад и принудно кретање) као и локалних вредности које дефинишу таласе воде. Не мање значајно је и експериментално и нумеричко истраживање са моделима различитих нивоа квашљивости и различитих радних флуида (на пример у уљу уместо у води, у сланој води и сл.) како би се изразила детаљнија зависност параметара који описују подкритично струјање, односно, облик таласа.

Боља прецизност података би се постигла употребом брзе камере са вишом резолуцијом слике или увођењем напредније методе за дефинисање топографије слободне површине, као што је на пример PIV метода [101].

Област примене хидрауличке аналогije за подкритична струјања није довољно развијана с обзиром да је њена примена била понајвише у областима критичних струјања, а у смислу субституције врло скувих аеротунелских испитивања при високим маховим бројевима за наменску индустрију. Овим истраживањем су, са новим сазнањима у области подкритичних струјања, отворена нова питања и идеје за будућа истраживања и примену у области индустријског дизајнирања возова великих брзина.

7.2. Нумеричко - хидродинамичка испитивања модела водомара при зарањању у воду

У складу са CFD теоријом, препорукама за решавање сличних проблема и очекиваног облика слободне површине воде, нумеричка хидродинамичка испитивања су сматрана динамичким двофазним струјним проблемом под утицајем гравитације [92]. Посматран је нумерички бионички модел водомара у кретању кроз две фазе.

За нумеричке симулације су сви елементи, потребни за дефинисање мреже, постављени у равански простор. У истој равни је креирана и површинска мрежа. Програмски је изведено извлачење елемената мреже по дубини простора, како би

се добили квази-тродимензионални облици неопходни за извођење калкулација. За потребе представљања бионичког модела, као крутог тела које се креће кроз две флуидне фазе, употребљена је UDF функција. Моделирање струјања се односи на дефинисање параметара који описују деформисање тзв. динамичке мреже, у делу простора око нумеричког модела, моделирање мултифазног струјања и моделирања турбуленције.

Геометријска поставка

Припрема геометрије домена у ком су изведене нумеричке симулације хидродинамичког експеримента употребљена је апликација ANSYS Fluent Geometry Modeler [92].

Бионички модел водомара је описан раванском контуром. Координате тачака контуре, у везаном координатном систему, су похрањене у форматираној текстуалној датотеци. Координатни почетак је постављен на врху кљуна. Као такав, бионички модел је импортован у апликацију и смештен у принципијелни координатни систем, непокретни, након чега су око модела конструисани домен и под-домен. Домен је кружног облика, пречника $D = 0.75$ m. Координатни почетци везаног и принципијелног координатног система се поклапају у почетном тренутку, $t = 0$ s (пре почетка кретања). Површина домена је подељена хоризонтално на три дела: небо, околину и воду, а искоришћени су као основа за дефинисање граничних услова при нумеричким симулацијама. У зони око модела конструисан је под-домен. Облик под-домена је одређен из неколико покушаја, почев од једноставних геометријских облика до капљичастог облика. За сваки од облика су изведене комплетне нумеричке симулације са циљем да се одреди облик за који ће се добити најбољи приказ интерфејса фаза током виртуелног маневра обрушавања-зарањање, с обзиром на ширину под-домена, дубину зарањања и величину елемената мреже. Величина елемената мреже у под-домену је од посебног значаја, а с тежњом да буде што мања, у овом раду је изабрано компромисно решење како би се: (1) испратиле значајне динамичке промене удела фаза у зони кљуна, (2) оптимизовали параметри за калкулацију у условима велике заокупљености расположивих ИТ ресурса и (3) створио што бољи приказ слободне површине воде у што финијој резолуцији.

Изабран је капљичасти облик под-домена, укупне висине $h = 0.272\text{m}$ и ширине $w = 0.218\text{ m}$. Под-домен је графички подељен са више попречних правих линија које су искоришћене у процесу креирања нумеричке мреже као „носачи“ чији је циљ да олакшају правилно распоређивање елемената у смеру од бионичког модела ка границама под-домена. Правилно распоређивање елемената у под-домену је значајно за управљање расподелом елемената дуж контуре бионичког модела (са већом густином мреже при врху кљуна) и постизање што оптималнијих вредности параметара мреже, што касније обезбеђује бољу конвергенцију резултата.

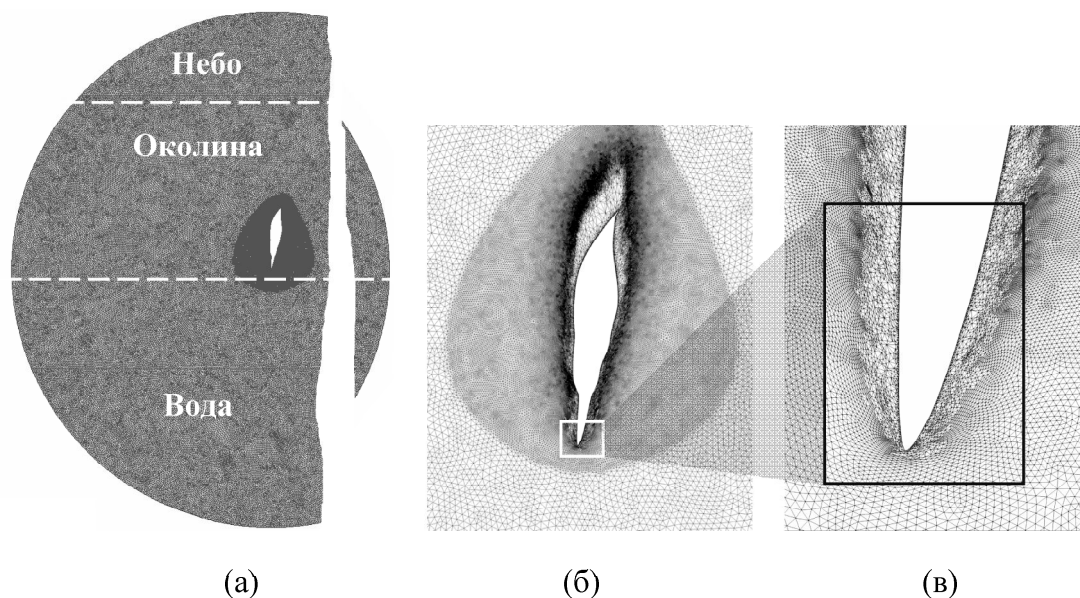
Мрежни модел

Креирање нумеричке мреже је извршено помоћу Mesh Application, ANSYS Fluent [92,93]. У складу са предвиђеним солверима, изабран је концепт рада са динамичком мрежом те је усвојена неструктурисана мрежа по целокупној површини домена састављена само од троуглова. За полазну поставку при дефинисању елемената мреже изабрана је метода испуне елементима са прилагођавањем облику („Patch Conforming“). Напредна функција прилагођавања квалитета мреже облицима суседних објеката („Proximity and Curvature“) је укључена са следећим параметрима: а) фино подешавање релевантног центра елемената („Relevance Centre“), благ и споро прелаз из зоне са фином у зону са грубом мрежом, на глобалном нивоу. Најмања димензија елемента мреже је ограничена на 0.5mm , док је максимална 5 mm , у општим поставкама. Пратећи контуру бионичког модела водомара, елементи мреже су уређени од најситнијих, на врху кљуна, до најкрупнијих, на репу, задржавајући фактор раста елемента по правцу расподеле („Bias factor“) од 1.1. По контури је укупно распоређено 4000 елемената. Потребно је напоменути да је део мреже испуњен водом у нумеричким симулацијама дубљи него што је то случај код хидродинамичког експеримента, али то не представља проблем за процес верификације и анализе резултата, јер се у реалности гравитациони таласи обликују у складу са дубином канала, док је приступ у нумеричким симулацијама сасвим другачији. У нумеричким симулацијама се прати облик интерфејса између фаза који ни на који начин није завистан од дубине дела домена испуњеног водом. Мрежни модел је креиран тако

да задовољава критеријуме квалитета мреже, односно, минималну почетну деформисаност елемената.

Након креирања мреже у домену према општим поставкама, извршено је додатно уситњавање елемената мреже у под-домену. Сврха уситњавања елемената мреже је превазилажење прекомерних деформација елемената током кретања модела („превртање на наличје“) које проузрокује појаву негативних запремина елемената у близини врха кљуна и насилни прекид калкулација. Користећи пет равни, са фактором раста 2, постигнута је најмања запремина у домену од $1.2597 \text{ e-}09 \text{ m}^3$, с обзиром на стабилност мреже, изабран временски корак калкулација и временско трајање самих калкулација. С обзиром на планирано коришћење динамичке мреже у симулацијама, није вршено додатно прилагођење мреже у граничном слоју („Inflation Layer“).

Као крајњи резултат креирана је мрежа са 478 560 троугаоних елемената, екструдираних у дубину за 10 mm. Квалитет мреже је описан следећим параметрима: највећа пропорција димензија елемената – 3.12, фактор закривљења елемената – 0.73 (усвојен за коректан с обзиром да је модел водомара великог издужења).



Слика 54 Нумеричка мрежа (а) домен са својим деловима, $t=0 \text{ s}$ (б) детаљ: мрежа у под-домену након деформисања, t (в) увеличан део деформисане мреже око врха кљуна, у тренутку t

Нумерички прорачун

Мултифазно струјање је сачињено од две фазе, воде и ваздуха, и да би задовољавале услове VOF модела, сматра се да ни у једном тренутку не продиру једна у другу. Унутар домена, у свакој његовој ћелији, променљиве величине су запремински удели фаза – воде и ваздуха, које деле један сет једначина одржања количине кретања, чиме се промене њиховог интерфејса прате током временског интервала посматрања.

Према биолошким изворима у току маневра обрушавања-зарањање водомар развија брзине од 4.5 m/s до 11 m/s [73-75]. У овом истраживању су посматрана три случаја маневра обрушавања-зарањање. Ови случајеви се међусобно разликују по брзини кретања бионичког водомара у тренутку додира са водом при: (а) $V_0 = 0.6$ m/s, која одговара брзини кретања бионичког модела у хидродинамичком експерименту; (б) $V_0 = 6$ m/s, која одговара претпостављеној просечној брзини кретања водомара у природи и (в) $V_0 = 10$ m/s, која одговара највећој претпостављеној брзини кретања водомара у природи.

Калкулације су изведене као нестационарне, засноване на одређивању притиска укључујући: утицај гравитације, апсолутне брзине у 2D простору. За калкулације су употребљени 6DOF и VOF модели, уз подршку UDF функције за дефинисање динамике кретања и карактеристика крутог тела водомара.

За решавање везе притисак-брзина коришћен је алгоритам SIMPLE из разлога услова кретања модела и робусности алгоритма. Евалуација градијената и дериватива је урађена употребом Green-Gauss Node-Based методе. За притиске је усвојена метода дискретизације PRESTO!, а надаље су густина, момент количине кретања, турбулентна кинетичка енергија и њена дисипација дискретизовани шемом првог реда, док је за запремински удео укључен алгоритам Geo Reconstruction.

При калкулацијама, у различитим фазама маневра, вариран је временски корак, према препорукама [92], при чему је најкраћи 0.00005 s, примењен у временској зони око тренутка удара кљуна у воду. Временска зона која обухвата тренутак удара у воду је критична с обзиром на брзину и начин деформисања динамичке мреже. Код дужих временских интервала, у овој зони, деформације мреже бивају толике да се мрежа „преврће“ на местима блиско врху кљуна и тада

је вредност запремина контролних ћелија мреже негативна. Временски корак се повећава након постизања стабилног облика интерфејса и као такав задржава до краја калкулација.

Код мултифазног VOF модела, изабрана је експлицитна формулација параметара удела фаза и имплицитна формулација за силе на телу. За примарну фазу одабрана је вода, док је секундарна – ваздух. Обе фазе су сматране нестишљивим, без продора унутар посматране контролне запремине, што је обезбедило јединствене особине и јединствен интерфејс између фаза. Особине воде, густина и брзина простирања звука, су дефинисане кроз UDF функцију, док је вискозитет дефинисан кроз стандардан интерфејс са стандардним вредностима. Ваздух је описан стандардним вредностима, при радном притиску од $p_{radni} = 101\ 325\ Pa$.

Моделирање турбуленције је урађено употребом стандардног вискозног $k-\epsilon$ модела, са усвојеним стандардним моделом за решавање расподеле брзина у граничном слоју блиско зидовима и општим вредностима параметара.

Гранични услови су дефинисани у складу са поделом домена (слика 54) и то „pressure-outlet“ – за ваздух и мешавину, по спољној граници дела домена „небо“, док су остатак граница домена и тело водомара сматрани стационарним зидовима, који су аеродинамички, глатки али истовремено не дозвољавају проклизавање.

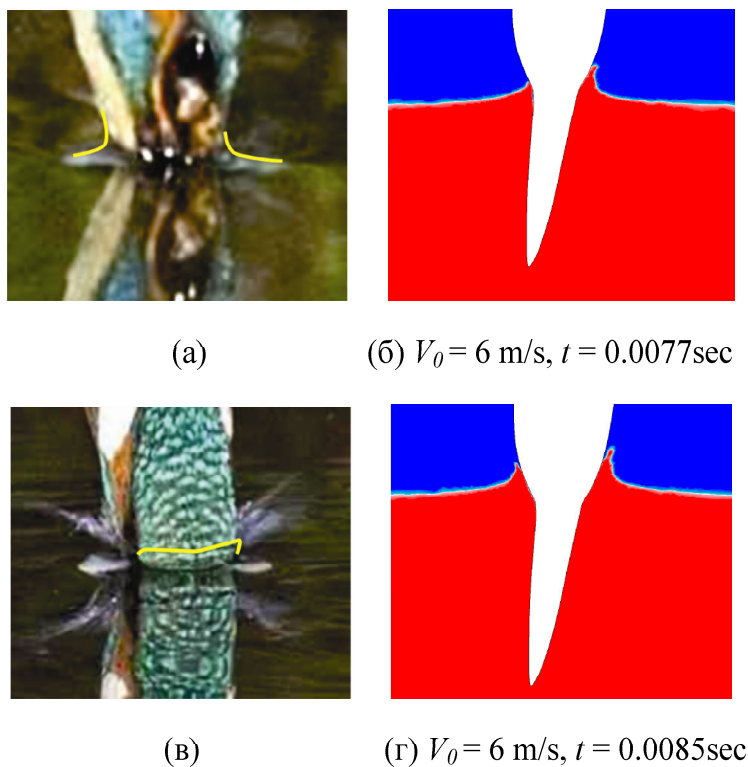
Динамичка мрежа је деформабилна у времену, а креирана је двема методама: углачавањем и премрежавањем. За методу углачавања мреже задатим условима је омогућено: нулто деформисање опружне карактеристике и потпун повратак на стање пре деформација. Нулта опружна карактеристика је усвојена зато што тело водомара након зарањања наставља са праволинијским кретањем, аналогно стварању оштећења на глисерима насталим услед замора материјала [82]. Опружна карактеристика мреже дефинисана је и бројем итерација како би се постигао критеријум конвергенције са толеранцијом од 0.001. Тако је за $V_0 = 0.6\ m/s$ изабрано 1000, док је за $V_0 = 6\ m/s$ изабрано 2000 итерација по сваком унутрашњем циклусу калкулација. Премрежавање, као основа за наменско и контролисано деформисање мреже, односи се на ћелије мреже уз оквашену површину модела, са фактором закривљења ивећим од 0.7, а врши се у

секвенцама на сваких 5 итерација (слика 54).

UDF функција придодаје неопходне податке и зависности VOF моделу, а садржи следеће: положај центра масе бионичког модела водомара (у овом раду је усвојен положај дефинисан као за 3D модел равномерне расподеле густине); матрицу момената инерције за дефинисан центар масе; податке о води, као другој фази (густину и брзину простирања звука за изабране радне услове); почетну брзину тела по правцу, положај и орјентацију тела, као и угаону брзину.

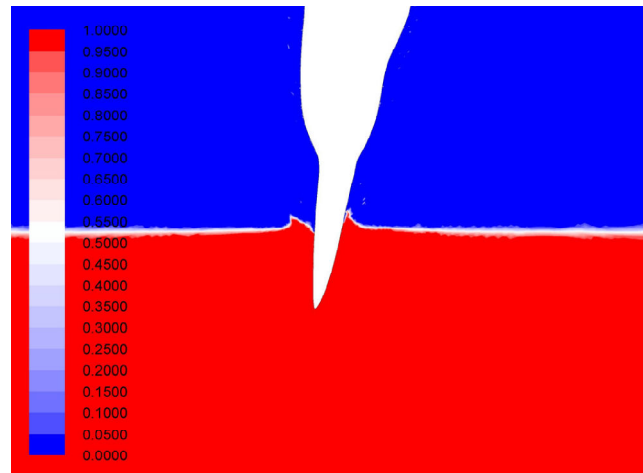
7.2.1. Верификација нумеричких симулација

Верификација резултата нумеричких симулација је обављена у односу на слике из природе при $V_0 = 6 \text{ m/s}$, слика 55

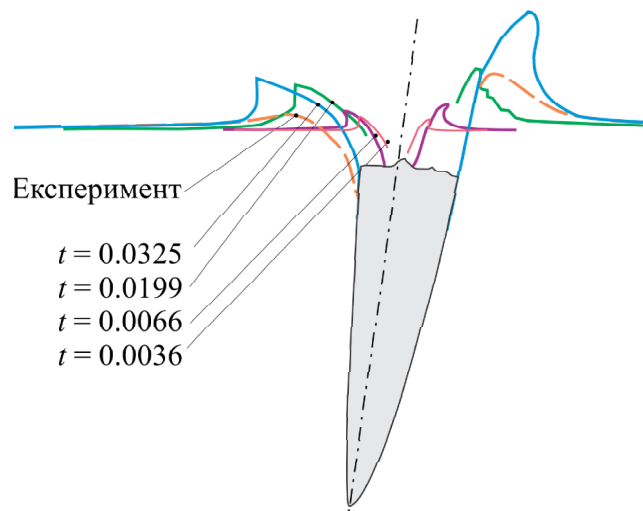


Слика 55 Верификација резултата нумеричког експеримента са природним догађајем: $V_0 = 6 \text{ m/s}$, (а,б) природни догађај (б,г) нумеричке симулације

Верификација резултата нумеричких симулација је обављена и са хидродинамичким тестом при $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$, слика 56б.



(a) $t_{rel} = 0.0325$ s



(б) у периоду $0.0159s < t_{rel} < 0.0195s$ и верификација са експериментом
(наранџаста испрекидана линија)

Слика 56 Облик слободне површине воде из нумеричких симулација, $V_0 = 0.6$ m/s

7.2.2. Тумачење резултата верификације

Упоредивањем облика таласа који је формиран након зарањања водомара у воду из природе, у погледима са стране и одозго на главу, и облика слободне површине за двофазно струјање, уочена је велика сличност. Таласи истакнути жутиим линијама, слика 55а,в, и граница слободне површине воде у симулацијама, при претпостављеној $V_0 = 6$ m/s, показале су да су таласи над кореном кљуна са стране горњаке приљубљени уз тело и да прате контуру, осим на самом врху. На овој

позицији, таласи воде прате контуру главе чија се ширина нагло повећава у односу на контуру кљуна, и чије су локалне тангенте више отклоњене од правца вертикале у односу на контуру кљуна, на месту таласа за $\varphi \approx 73^\circ$, слика 55б. Са стране доњаке, локалне тангенте су додатно отклоњене од вертикалног правца и на том месту назире се почетак отцепљења таласа. Отцепљење таласа у природи, слика 55а, се такође не види, иако је правац тангенте нагнут за $\varphi \approx 23^\circ$, према површини воде. При поређењу слика из природе, с чела, и нумеричке симулације, слика 55в,г (жута линије је граница тек отцепљеног таласа) уочена је сличност облика таласа што је верификовало нумеричку методу за даљу примену. Интензивније отцепљење је присутно са бочних страна у зони очију.

Верификација нумеричке методе (слика 56б, $t_{rel} = 0.0325$ s) са хидродинамичким експериментом је показала извесна одступања у геометријском облику таласа. Талас добијен у експерименту је мање висине у односу на површину воде, али се простире на приближно истој дужини од контуре модела и одваја се од његове површине на приближно истом месту као и у нумеричким симулацијама. Појава је протумачена као последица локалне структуре мреже и поставке података за дефиницију понашања динамичке мреже. Наиме, динамичка мрежа је врло осетљива на промене параметара којима се управља обликом локалних ћелија у близини модела од корака до корака у процесу премрежавања. Скраћивање времена трајања временских корака у поставци субрутине премрежавања могло би допринети мањим деформацијама локалних ћелија између временских корака.

Поређење је надаље урађено у условима врло мале брзине, $V_0 = 0.6$ m/s, што такође може представљати проблем у критичном тренутку удара кљуна о површину. Уколико у том тренутку, са постављеним параметрима, није започето формирање таласа на реалистичан начин, оно ће у истом смислу и наставити. Од посебне важности је напомена да нумеричке симулације представљају струјање у само једној равни, лонгитудиналној равни симетрије водомара ради анализе облика и понашања таласа у поједностављеном случају.

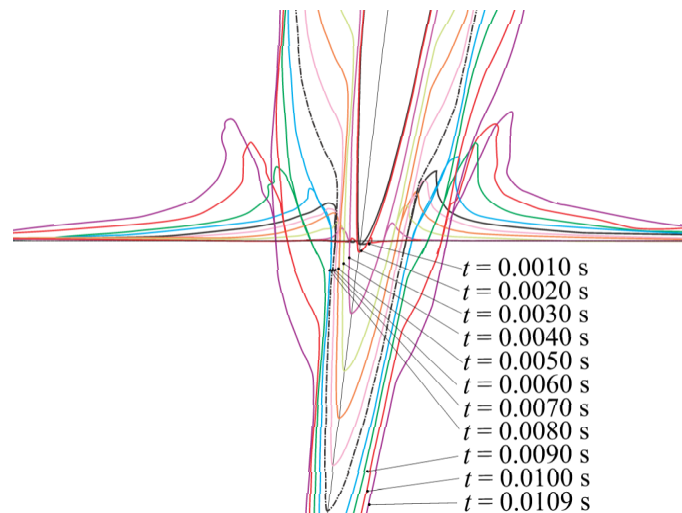
У реалном случају, имајући у виду комплексну геометрију кљуна прекривену микроканалима, који одводе струју са брега кљуна, струјање воде је комплексно и за потребе анализирања реалног струјања око водомара мора се

испитати 3D модел са што вернијом реконструкцијом облика. Ова истраживања су ван оквира овог рада, али су у плану наставка истраживања из области бионике ради разумевања феномена и унапређења метода истраживања и дизајнирања.

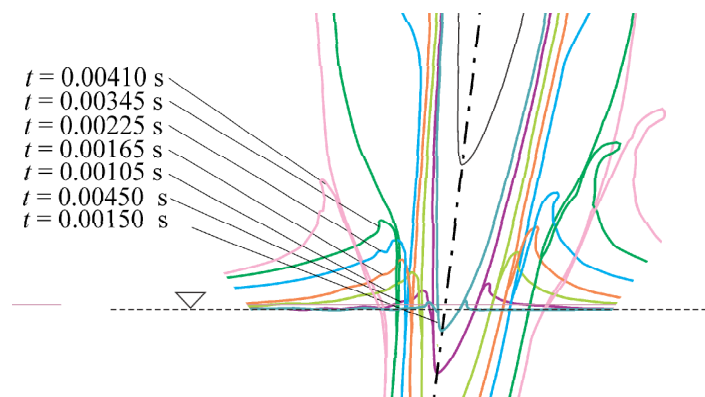
Како се у даљој анализи користе нумерички резултати који су верификовани за брзину сличну природном догађају, приказана поређења су прихваћена као валидна. Одступања облика таласа при $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$ утичу на строжије критеријуме услова струјања, што је позитивно у смислу даљих анализа.

7.2.3. Резултати нумеричких симулација

Резултати нумеричких симулација за три брзине су приказани на сликама 56 (верификација), 57 и 58, кроз временску историју промена облика слободне површине.

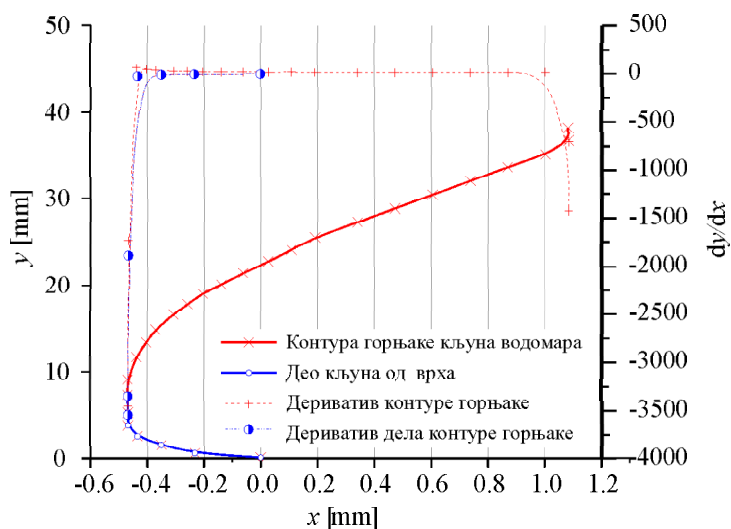


Слика 57 Облик слободне површине воде при $V_0 = 6 \text{ m/s}$, $0.0010\text{s} < t_{rel} < 0.0109\text{s}$



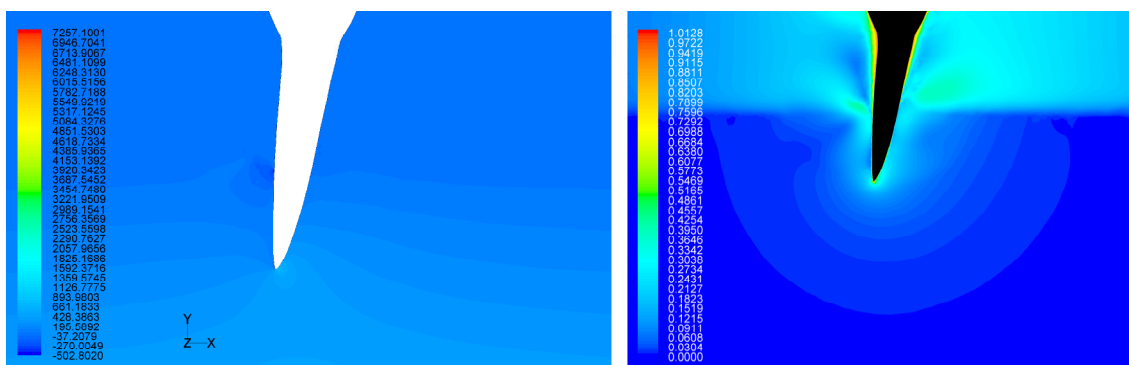
Слика 58 Облик слободне површине воде при $V_0 = 10 \text{ m/s}$, $0.0015\text{s} < t_{rel} < 0.00410\text{s}$,

Контура горњаке кљуна у односу на координатни систем везан за површину мирне воде и градијент промене ординате показује слика 59.



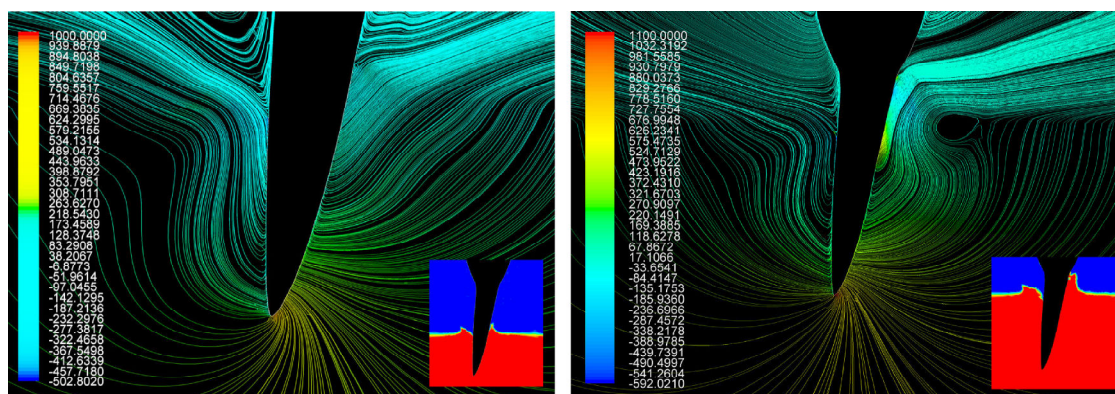
Слика 59 Контура горњаке водомара и градијенти контуре, $\theta \approx 83^\circ$

Расподеле параметара струјања и векторе брзина при упадној брзини од $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$ показује слика 60, а при $V_0 = 6 \text{ m/s}$ слика 61.



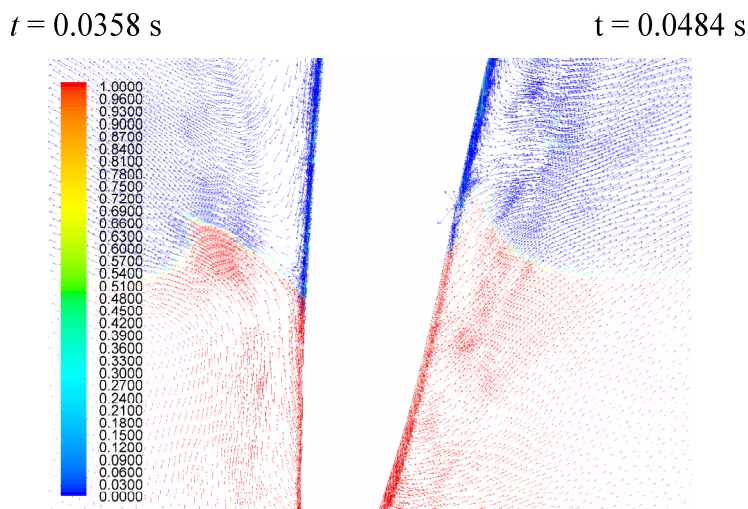
(а) расподела p , $t = 0.0358 \text{ s}$

(б) расподела V , $t = 0.0358 \text{ s}$

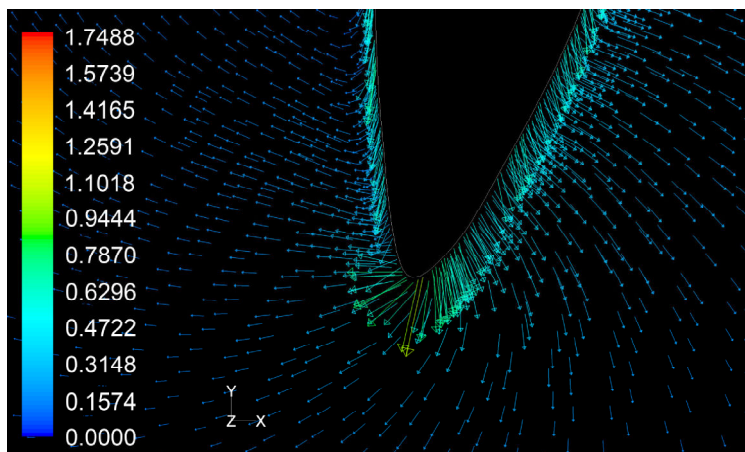


(в) путање флуидних делића према p ,

(г) путање флуидних делића према V ,

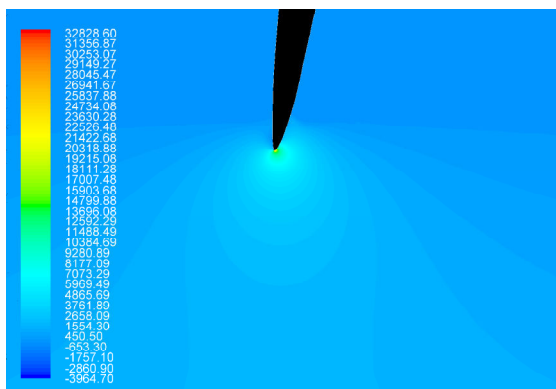


(д) вектори брзина у области врхова таласа, $t = 0.0358$ s
(увеличани прикази обојени по уделу фаза)

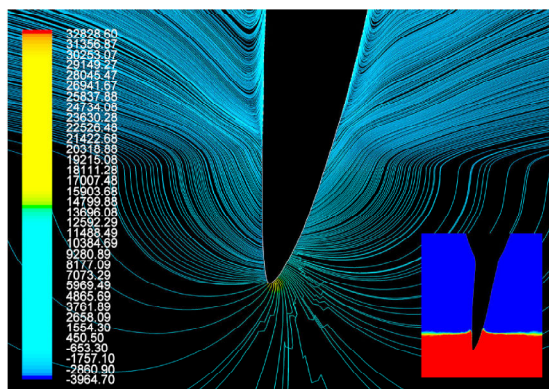


(ђ) вектори брзина око врха кљуна

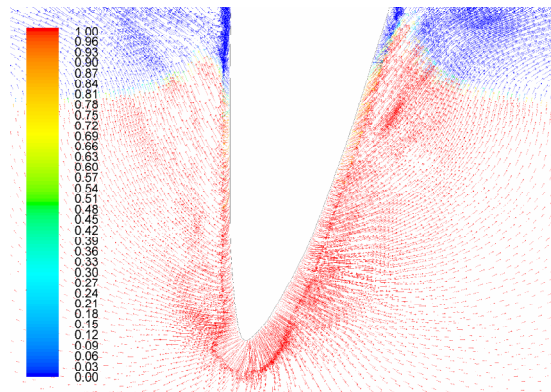
Слика 60. Приказ расподеле параметара струјања, $V_0 = 0.6$ m/s



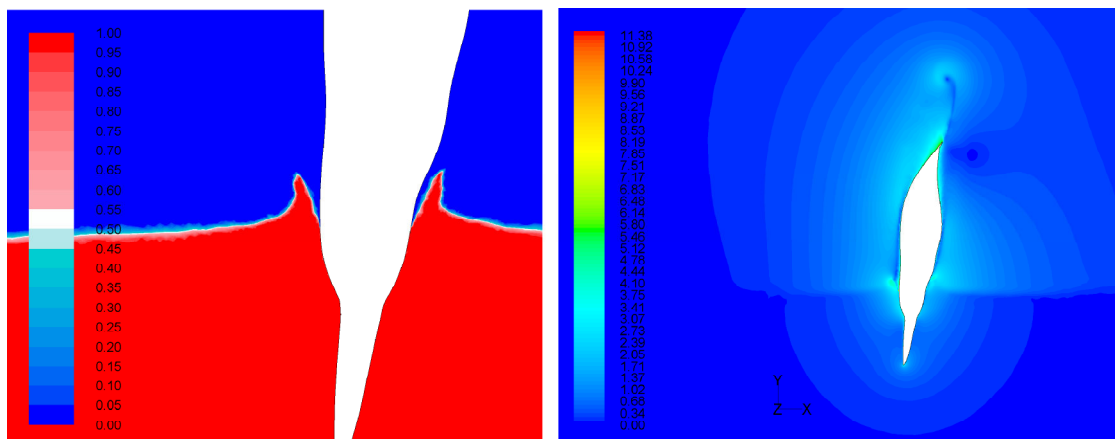
(а) расподела p , $t = 0.0029$ s



(б) путање флуидних делића, $t = 0.0029$ s



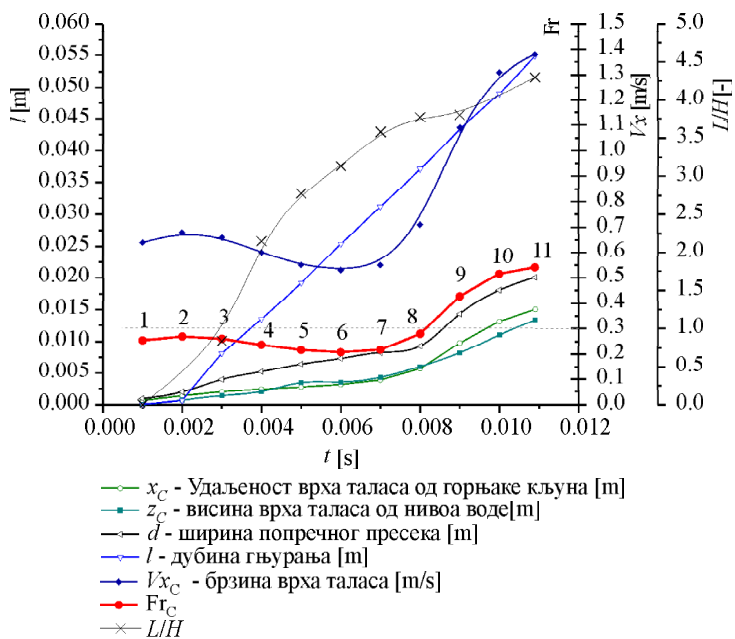
(в) вектори брзина обојени према флуидним фазама, $t = 0.0029$ s



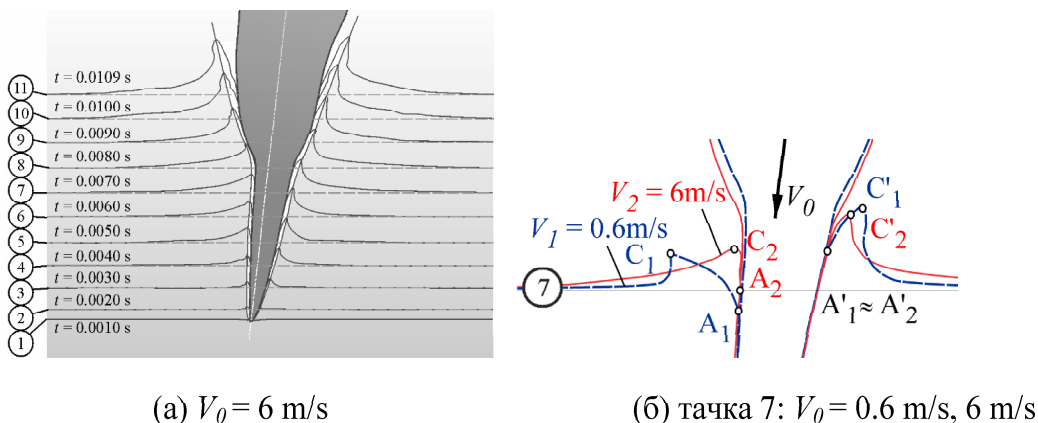
(г) зароњења главе, $t = 0.0109$ s

(д) расподела брзина, $t = 0.0109$ s

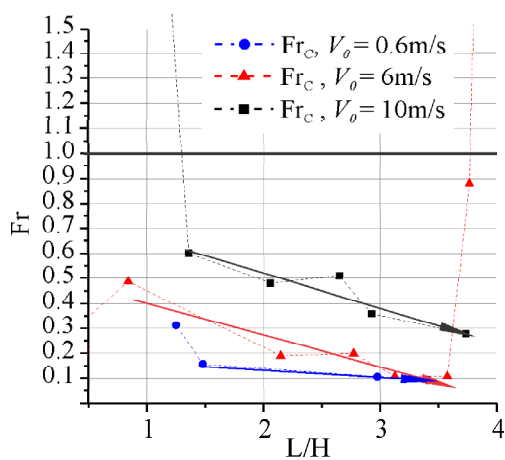
Слика 61. Нумеричка симулација природног догађаја, $V_0 = 6$ m/s



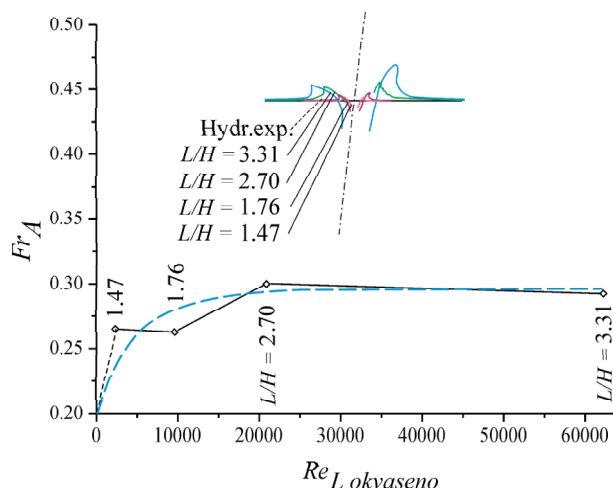
Слика 62 Временска историја промене параметара таласа, $V_0 = 6 \text{ m/s}$



Слика 63 Временска историја развоја таласа



Слика 64 Зависност промене Fr_C од L/H за оквашени део тела



Слика 65 Функција зависности Fr_A (тачка додира) од Re_L , $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$

7.2.4. Тумачење резултата нумеричких симулација

Према резултатима нумеричких симулација природног догађаја, у коме водомар изводи маневар обрушавање- зарањање, при три изабране брзине $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$, 6 m/s и 10 m/s (слике 56-58), протумачено је да струјање воде и формирање таласа зависи приоритетно од полазне брзине у маневру и контуре модела, при истом правцу зарањања. Нумерички резултати су у складу са хидродинамичким испитивањима и показују да је подкритично струјање при најмањој брзини, $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$, слика 56 и 58, стално присутно са стране горњак кљуна као и облик таласа.

За случај зарањања при брзини $V_0 = 6 \text{ m/s}$, који одговара природном догађају представљеном у 2D простору, струјање мења карактер кроз историју догађаја. Слика 57 приказује историју развоја таласа. Издизање таласа изнад нивоа воде и померање тачке одвајања A до положаја блиског нивоу мирне површине, присутно је све време, све до приближно $1/2$ оквасене дужине кљуна.

У зарањању са брзином од $V_0 = 10 \text{ m/s}$, издизање таласа се није показало значајним само у зони око врха кљуна убрзо након додира, $t = 0.0015 \text{ s}$, слика 58.

Слика 59 приказује коте контуре горњак и градијенте у односу на апсису, што је од значаја за разумевање механизма развоја таласа. До дужине од $1/8 L$, растојања тачака на контури од вертикалног правца се повећавају. Од врха кљуна, по правцу зарањања, у дужини од приближно $1/8 L$ до $1/4 L$, контура прати

вертикални правац. Надаље контура пресеца вертикални правац, а тачке контуре се удаљавају од истог. Облик контуре горњаке водомара, примењен правац зарањања и распоред тачака на контури су обезбедили сталност вредности локалних градијента у односу на мирну површину воде, осим у зонама око самог врха и корена кљуна, до висине од приближно 35 mm од нивоа мирне воде.

Из анализе историје развоја таласа за три брзине зарањања и расподеле градијената на контуру кљуна, за даљу примену је издвојен део контуре од врха до крајње висине на којој је градијент још увек равномерно распоређен, $l = 35 \text{ mm}$ (слика 59). По правцу кретања, даље од изабраног места, долази до проширења попречног пресека и наглог повећавања висине таласа, иако су таласи и даље приљубљени уз површину модела. Историја развоја таласа је на сликама 56-58 обухватила шири временски интервал како би се у будућим испитивањима дефинисао погодан облик кабине воза за велике брзине и да би се стекла нова сазнања из биомеханике водомара.

Слика 60 даје приказ изабраних параметара струјања и вектора брзине при $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$, у тренутку $t = 0.0358 \text{ s}$. Расподела p у води је равномерна у слојевима, који су приближно паралелни са мирном површином. Испод самог врха носа примећује се звонасти облик зоне једнаког p и положај тачке зауставе на врху са стране доњаке. Најнижа вредност p је уочена у зони одвајања таласа од тела, што је протумачено наглим скретањем струје ваздуха између тела водомара и одбијања од самог таласа. Слика 60б приказује расподелу брзина у обе струјне фазе. Брзина флуидних делића воде је највећа у зони врха кљуна. Област у којој се флуидни делићи крећу је полукружног облика са вредношћу од око $V = 0.03 \text{ m/s}$ на ободу области. Поређење путања флуидних делића је приказано за два тренутка: $t = 0.0358 \text{ s}$ и 0.0484 s , односно, када је кљун зароњен до половине дужине и када је зароњен скоро у целости. Таласи у оба положаја имају врло сличан облик и са стране горњаке и са стране доњаке. Сличност облика путања флуидних делића у води се показала само са стране горњаке, што је протумачено као последица сталности подкритичног режима струјања са стране горњаке. Са стране доњаке путање флуидних делића се мењају и збијају у зони врха таласа. Увеличан приказ вектора брзина за $t = 0.0358 \text{ s}$ показује правце брзина кретања флуидних делића и нападној тачки на врху кљуна. Израз нападне тачка је изабран

у складу са концептом кретања који је обрнут од уобичајено коришћеног у аеро- и хидродинамици. У представљеним примерима нумеричких симулација, флуид мирује, а модел се креће и покреће флуидне делиће из стања мировања. Зависно од дубине зарањања и положаја посматраних тачака на оквашеној површини бионичког модела, локалне брзине су по правцу смеру и интензитету у складу са расподелом притисака, односно, расподелом

У нападној тачки је локална брзина флуидних делића највећа, слика 60ђ, по смеру и правцу једнака упадној брзини, али мањег интензитета (зависно од тренутне дубине зарањања). Од места нападне тачке, у уској области највишег локалног притиска са стране доњаке, долази до поделе струје воде на два тока. Један ток обилази врх кљуна и нападну тачку, и учествује у формирању таласа изнад горњаке, док други току учествује у формирању таласа изнад доњаке.

Поређењем путања и вектора брзина флуидних делића примећено је да флуидни делићи уз саму површину бионичког модела бивају потиснути у правцу кретања, на кратком растојању, након чега нагло скрећу од бионичког модела и надаље ка слободној површини закривљеним путањама. Сустицање флуидних делића воде, у сваком временском тренутку понаособ, формира слободну површину воде. Слободна површина воде је формирана под условима да се флуид сматра нестишљивим, његово струјања безвртложним и да је на граничној површини (интерфејс између фаза) задовољен гранични услов једнакости притисака по граничној површини.

Повећање брзине на $V_0 = 6 \text{ m/s}$ променило је и расподелу p у води, слика 61а. Области једнаких притисака су сужене и припијене у близини површине, а простиру се у звонастом облику у дубину воде. Испод самог врха кљуна формиране су области једнаког притиска кружног облика које се међусобно приближавају испод самог врха кљуна. Путање флуидних делића сада не показују велику закривљеност у облику, као што је то био случај код $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$. Кроз простор мењају облик од лучног, у обласи око врха кљуна, до кратких правих линија, унутар самих таласа, слика 61б. У области око нападне тачке, вектори брзина су показали уједначен интензитет, док су правци дејства вектора блиски управном на локалну површину, слика 61в. Као и у случају десетоструко мање брзине, напредовање кљуна у дубину ствара два тока, са скоро истог полазног

места на доњаци. Облици путања су врло слични са обе стране кљуна, изузев на врху доњаке где се флуидни делићи померају најпре у дубину, а до површине стижу у далеко већем луку и на већем растојању од кљуна него флуидни делићи са стране горњаке. Слика 61г,д показује и тренутак зарањања главе, облик таласа и расподелу брзина, $V_0 = 6 \text{ m/s}$, $t = 0.0109 \text{ s}$. У овом тренутку таласи су се отцепили од главе водомара. Природни маневар обрушавања – зарањање има за циљ да прикрије присуство птице за плен, барем за време колико је потребно да птица зарони до плена. Флуидни делићи у посматраном случају имају најмању брзину од око 0.3 m/s у у дубину до приближно двоструке дужине зароњеног дела тела (око 120 mm), што је са друге стране блиско половини уобичајене дубине на којој водомар лови у природи, како наводе извори .

Облици таласа и расподела притисака око зароњеног дела тела, добијени при $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$ и 6 m/s (слике 60 и 61), су у складу са литературом из [77,78,83].

При анализирању параметара струјања око бионичког модела водомара кроз обе фазе, занемарен је утицај ваздушне струје на облик таласа. Стандардна аеродинамичка испитивања подразумевају потпуно сличност између физичких модела – кретање модела кроз мирну атмосферу и обрнуто, кретање флуида око модела у стању мировања. Међутим у неким случајевима, као што је овде приказан маневар обрушавања – зарањање сличност није потпуна. Део домена испуњеног ваздухом се граничи са делом испуњеним водом. При кретању водомара кроз ваздух, флуидни делићи прате кретање контуре модела на извесном кратком растојању и потом се удаљавају од контуре, зависно од брзине обрушавања, приближно управно на правац кретања. У близини саме површине воде, флуидни делићи ваздуха су спречени у даљем кретању, те скрећу нагло од контуре водомара, а потом обилазе талас воде, настављајући путањом која им обезбеђује најмањи отпор (путања најмање потребне енергије). У овом истраживању струјање ваздуха је, путем примене турбулентног модела, унело поремећај притиска у области око водомара, те је гранична површина дефинисана на основу једнакости притиска на површини воде и локалног атмосферског притиска, $p_{vode} = p_{lokalno}$. Како се ради о вредностима од неколико Pa , утицај је видљив само кроз промену брзине, која блиско површини воде износи око 0.2 m/s са стране доњаке и око 0.15 m/s са стране горњаке, $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$, слике 60б,д.

Слика 62 приказује временску историју промена Fr_C , V_C (врха таласа) и геометријских параметара при $V_0 = 6$ m/s. Подаци са дијаграма су одређени графичким путем. Брзина таласа је променљива током времена и зависи од локалних геометријских параметара бионичког модела у трнутном положају, односно, временском тренутку. У периоду почетка маневра, од удара кљуна о мирну површину до првог тренутка за који је могао јасно талас да се издвоји из области граничне површине, нису узети подаци. Слика 63а показује историју развоја таласа и поређење при две брзине на приближно истом месту (тачка 7: $t = 0.007$ s). Праћењем вредности параметара струјања и геометријских параметара, и историје развоја таласа, протумачено је да се таласи врло споро удаљавају од локалне површине модела са обе стране, приближно симетрично, на целокупној дужини кљуна (тачке 1-7). Насупрот томе висина таласа се повећава кроз време, али се тачка одвајања таласа скоро и не помера у односу на ниво мирне воде (у вредности делова милиметра), као што показује слика 57. Поређење положаја таласа у једном тренутку, показало је да се на дужини кљуна таласи при обе брзине ($V_0 = 0.6$ m/s, 6 m/s) одвајају блиско или испод нивоа мирне површине (слика 63б, тачка А). Према резултатима при $V_0 = 6$ m/s, слика 62, по дужини кљуна, Fr_C има вредности у интервалу 0.2 – 0.25 (слика 62, тачке 1 – 7), те је протумачено да се струјање над горњаком, при $V_0 = 6$ m/s, може сматрати подкритичним према критеријуму $Fr_C < 1$ [87].

Слика 64 приказује поређење Fr_C за три брзине од геометријског параметра L/H . Код све три брзине зарањања уочене су три области. Области изван граница $1 < L/H < 3.5$ се односе на зарањање врха кљуна и касније корена и главе кљуна и нису од интереса. Унутрашња област $1 < L/H < 3.5$, код све три брзине, показује пад у вредностима ($Fr_C = 1.5 - 1$ при $V_0 = 0.6$ m/s, $Fr_C = 0.5 - 0.1$ при $V_0 = 6$ m/s и $Fr_C = 0.6 - 0.3$ при $V_0 = 10$ m/s). При $V_0 = 0.6$ m/s пад вредности, од приближно 0.05, је минималан и без скоковитих промена, што указује на минималну промену облика и интензитета таласа кроз историју догађаја. Оваква расподела Fr_C са L/H представља прихватљиве услове за даљу примену хидрауличке аналогије. На интервалу $2 < L/H < 3.5$ при $V_0 = 0.6$ m/s и 6 m/s, $0.05 < Fr_C < 0.1$, с тим да је у делу $2.2 < L/H < 2.8$ $Fr_C \approx \text{const}$. При $V_0 = 10$ m/s су већа одступања у односу на $V_0 = 0.6$ m/s, $0.35 < Fr_C < 0.3$.

Подаци које даје слика 64 су употребљени као критеријум за избор услова струјања у даљем истраживању. Како хидрауличка аналогија резултира сличности Fr у води и M у ваздуху, $V_0 = 10 \text{ m/s}$ је искључена из разматрања, јер је $0.6 < Fr_C < 0.3$. Посматрано кроз сличност са M , услови зарањања би дали приказ струјног поља око BHST у условима стишљивог струјања, већ у области око врха носа BHST. Услови кретања BHST су изабрани у границама $0.2 < M < 0.4$, и у складу са тим је одређен за избор брзине зарањања по критеријуму $Fr_C < 0.4$, који се односи на $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$ и 6 m/s . Избор је сужен на упадну брзину $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$.

Слика 65 показује зависност промене Fr_A од Re_L којом су повезани брзина кретања тачке одвајања таласа, брзина зарањања и геометријски параметри оквашеног дела кљуна у води, при $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$. Овакво поређење има за циљ постављање строжијег критеријума при одабиру услова кретања и геометрије модела.

7.3. Критеријум избора услова испитивања и геометријских параметара модела

Са циљем да се комбинована метода за утврђивање сличности струјања примени и на друге облике бионичких модела (симетричних или 2D BHST) и у другим инсталацијама, од значаја је да се истакне критеријум према ком се изабирају услови струјања и геометријски параметри модела за даљу примену у биомимикрији. Како је показано у хидродинамичком експерименту, облик таласа зависи од облика модела, ударне брзине, дубине суда и др.. Код нумеричких симулација, због другачијег приступа при одређивању облика слободне површине воде, дубина суда није од значаја. Оба типа експеримента су од значаја, јер се међусобно допуњују и дају шире информације о посматраним појавама.

Према резултатима из овог истраживања, у уопштеном случају за изабрани бионички модел произвољне геометрије, потребно је извршити више мерења са варирањем ударне брзине, упадног угла, густине флуида, масе модела и дубине суда према нивоу мирне површине воде. Из резултата добијених варирањем услова струјања, изабира се она комбинација која резултира минималном променом Fr_C (одређен према брзини врха таласа) са променом геометријских

параметара дизајна под оквашеним површинама модела, односно, кроз историју догађаја. Када је изабрана комбинација услова испитивања, врши се анализа зависности Fr_A (одређен према брзини тачке раздвајања таласа од модела) у функцији Re_L под оквашеним површинама модела. На овај начин су повезани параметри који утичу на стварање таласа са параметрима дизајна, опет кроз историју догађаја.

На примеру из овог истраживања слика 64 је послужила за сужавање избора брзине при удару и геометријских параметара, за фиксирану дубину воде, с обзиром да је и сам експеримент изведен као биомимикрија са реалним природним догађајем. Услов за избор ударне брзине V_0 (0,6 m/s, 6 m/s и 10 m/s) је Fr_C , чија је вредност приближно стална, и минимална. Резултати су показали да Fr_C узима најмање вредности, $Fr_C < 0.3$, при ударној брзини од $V_0 = 0.6$ m/s, и то на интервалу вредности геометријских параметара $1.5 < L/H < 3.5$ (практично по целој дужини кљуна).

За изабрану ударну брзину $V_0 = 0.6$ m/s сада је посматрана је зависност Fr_A од Re_L , слика 65. Хоризонтална компонента брзине тачке А, при $V_0 = 0.6$ m/s, је обезбедила сталну вредност, $Fr_A < 0.3$, у интервалу $20\ 000 < Re_L < 60\ 000$ (референтна је оквашена дужина кљуна) што одговара геометријским параметрима $1.27 < L/H < 3.31$.

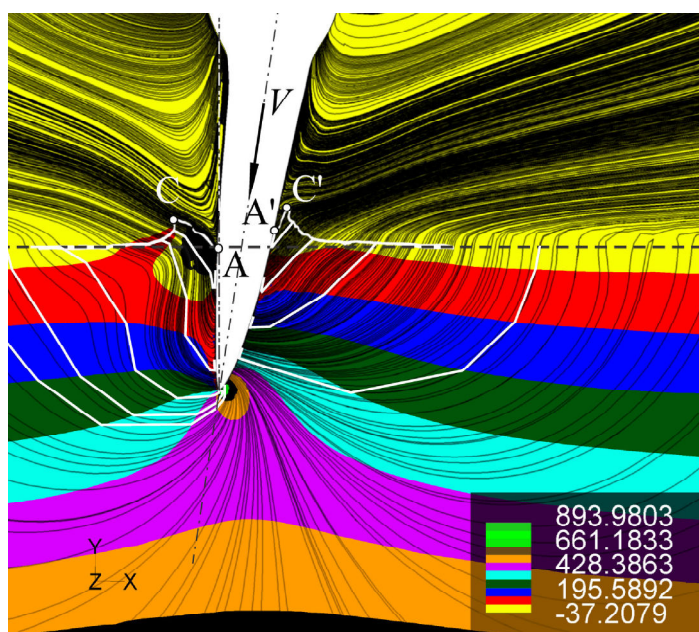
За овако изабране услове струјања извршена је анализа таласа и касније је примењена хидруличка аналогија за геометријски сличан модел ВНСТ у слободном лету и при вожњи пругом. Како се у овом раду посматрају подкритична струјања, према односима параметара струјања за воду и ваздух код критичног и надкритичног струјања разлике вредности параметара струјања услед разлика за k су занемарене, према Гилмор и др. [100].

Приказани случај је имао за циљ да да нова сазнања о природном феномену и сличности струјања са ВНСТ – водомар, међутим препорука је да се истраживања прошире и на друге бионичке облике моделе већих димензије модела (и дубине воде) како би се из хидродинамичких тестова добили прецизнији резултати. Унапређење инсталације у смислу поставке модела, контроле кретања и брзине модела су добродошлеи планирају се за наставак истраживања.

7.4. Начин формирања таласа

Комбиновањем резултата (слика 60) је протумачен механизам формирања таласа око кљуна водомара у подкритичном режиму, слика 66. Комбиновани су прикази расподеле притисака у води и путање флуидних делића при стандардним условима и $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$.

Пратећи путање флуидних делића уочено је да контура водомара у кретању гура пред собом флуидне делиће на извесном растојању (слика 66, бела линија). Флуидни делићи испрва прате правац кретања, а са губитком енергије у пољу воде, скрећу са правца и удаљавају се од површине модела.



Слика 66. Комбиновани приказ формирања таласа при $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$

Како флуидни делићи теже да досегну равнотежни положај на слободној површини, они пролазе кроз области са различитим притисцима по најкраћим путањама. При $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$, области једнаких притисака су приближно еквидистантне у целом пољу, осим испод кљуна, а то омогућава краће путање флуидним делићима до равнотежног положаја. У случају $V_0 = 6 \text{ m/s}$, слика 61а, области једнаких притисака су звонастог облика у домену, а испод самог врха кљуна затворене елипсасте криве. Флуидни делићи проласком кроз области једнаких притисака сада морају да пролазе дужи пут, од врха кљуна ка слободној

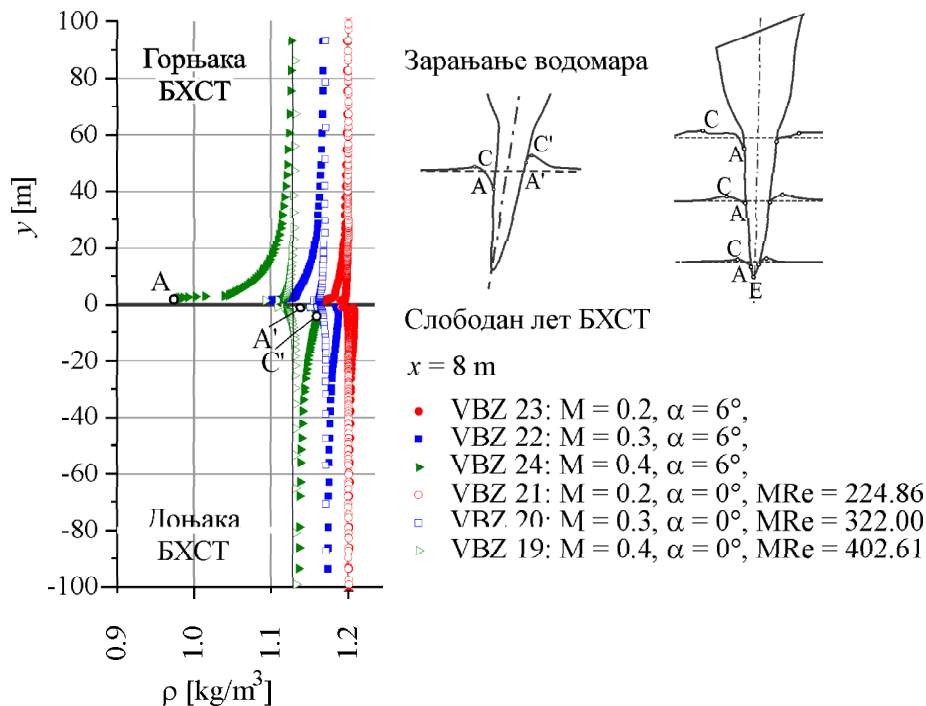
површини, по лучним путањама у дубини поља, за разлику од путања добијених при мањој брзини. У области око кљуна, путање флуидних делића су краће и ближе вертикалном положају, него што је случај при мањој $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$, због тога што су око кљуна уске области једнаких притисака, слика 61а.

Нумеричке симулације реалистично су прикале облике таласа, слика 66. Но, за постизање прецизнијих резултата потребно је наставити истраживања са изменом услова струјања, нумеричких параметара и параметара саме мреже.

7.5. Сличности струјања флуида око водомара и ВНСТ

Аналогија између догађаја зарањања водомара и ВНСТ је изведена на ВНСТ – водомар, с тим да је правац зарањања на пренет у виду правца кретања воза.

Слика 67 приказује расподелу густине по висини, на сличном месту као код нумеричких хидродинамичких тестова, $x = 8 \text{ m}$, у слободном лету ВНСТ.



Слика 67 Сличност струјања између таласа воде око кљуна водомара и расподеле густина на истом релативном растојању од врха кљуна за два напада угла ВНСТ

При нултом нападном углу, $\alpha = 0^\circ$, расподела густина је приближно симетрична и односу на правац кретања (у складу са променом контуре), док при

$\alpha = 6^\circ$, задржава облик сличан таласима воде (детал у углу слике), посматрано на месту $x = 8 \text{ m}$ (приближно на месту за која је мерена висина таласа у хидродинамичким тестовима и нумеричким симулацијама).

При брзини $M = 0.2$, $\alpha = 0^\circ$, $x = 8 \text{ m}$, добијена расподела густина по вертикалном правцу је показала сличност са обликцима таласа који је створио бионички модел у вертикалном паду, слика 67. Облик таласа такође је зависан од облика контуре према правцу струјања. Локална густина ваздуха изнад горњаке BHST је за $\rho_A \approx -0.006 \rho_0$, а $\rho_A \approx -0.005 \rho_0$, при чему се са обе стране вредности повећавају до ρ_0 , кроз поље по висини (негативне вредности означавају да је $\rho_A < \rho_0$).

При брзини $M = 0.2$, $\alpha = 6^\circ$, $x = 8 \text{ m}$, локална густина $\rho_A \approx -0.0022 \rho_0$, а испод доњаке $\rho_A \approx 0.0069 \rho_0$. Вредности густина прате облике таласа воде у смислу да се над горњаком вредности ρ повећавају до ρ_0 , док се под доњаком вредности смањују до ρ_0 .

При брзини $M = 0.4$, $\alpha = 0^\circ$, $x = 8 \text{ m}$, локална густина $\rho_A \approx -0.027 \rho_0$, а испод доњаке за $\rho_A \approx -0.015 \rho_0$, при чему се са обе стране вредности повећавају до ρ_0 , кроз поље по висини.

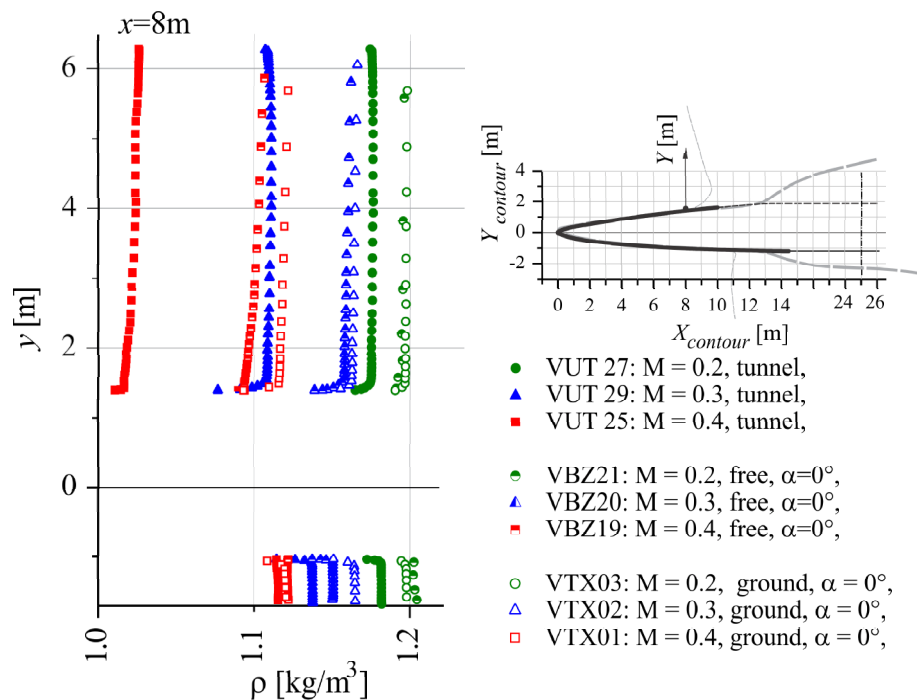
При брзини $M = 0.4$, $\alpha = 6^\circ$, $x = 8 \text{ m}$, $\rho_A \approx -0.118 \rho_0$ при чему се вредности повећавају до ρ_0 , кроз поље по висини. Испод доњаке су сада изражене вредности у A' и C' : $\rho_{A'} \approx 0.009 \rho_0$, док је $\rho_{C'} \approx 0.028 \rho_0$.

Како се у истраживању посматрају случајеви подкритичних струјања, при различитим брзинама приказала се очекивана сличност струјања. Поређење зарањања под углом (слика 53) и слободног лета BHST $M = 0.2$, $\alpha = 6^\circ$, $x = 8 \text{ m}$ (слика 67) показало је велику сличност и тиме потврдило комбиновану методу као валидну за сврху дизајнирања полазних дизајна BHST на основу поређења облика таласа. Према критеријуму за процену параметара дизајна, према условима кретања истакнут је значај положај тачке одвајања таласа од контуре модела, A , при чему је за услове подкритичног струјања по контури потребно да се она налази испод или у висини нивоа мирне површине воде. Хидродинамички експериментални и нумерички тестови су дефинисали положај A на контури бионичког водомара на приближно $0.019 D$ при $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$, односно $0.2 < Fr_C < 0.1$. Податак добијен нумеричким симулацијама за BHST у слободном

лету $M = 0.2$, $\alpha = 6^\circ$, $x = 8$ m, на горњаци је $\rho_A \approx 0.022 \rho_0$.

Имајући у виду да је геометријска сличност BHST са кљуном водомара задржана до дужине од 14 m, уз корекцију врха носа (замењена је радијусом ради испуњења препоручених норми за квалитет мреже) и да је циљ истраживања анализа могућности и прецизности примене аналогije, као и њено проширење, између природног догађаја и жељеног бионичког дизајна, резултати су протумачени као прихватљиви, а комбинована метода као применљива у сврху испитивања нових дизајна BHST.

Слика 68 показује расподела густина по вертикалним линијама на 8 m од врха носа за различите конфигурације 2D BHST и три брзине при нултом напредном углу.

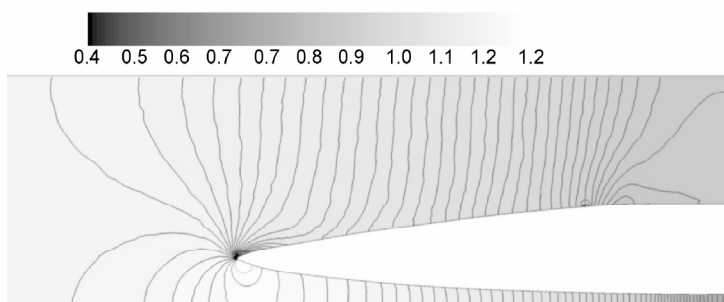


Слика 68 Расподела густина по вертикалним линијама на 8 m од врха носа за различите конфигурације 2D BHST (слободан лет, отворена пруга, тунел) и брзине $M = 0.2, 0.3, 0.4$

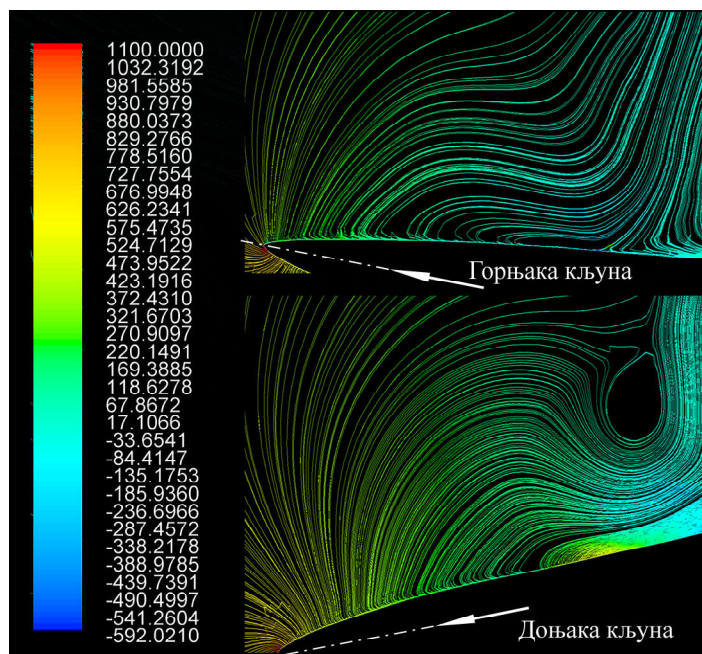
Најмање вредности локалних густина су се приказале за конфигурацију BHST у тунелу. Вредности густина у тачки A на горњаци BHST у тунелу при различитим брзинама су: $M = 0.2 - \rho_A \approx -0.010 \rho_x$; $M = 0.3 - \rho_A \approx -0.03 \rho_x$ и $M = 0.4 - \rho_A \approx -0.017 \rho_x$. Добијене вредности су у релативном односу 10 пута веће од истих код хидродинамичког експеримента, што је протумачено утицајем ограничења

простора око ВНСТ, односно губитка геометријске сличности два физичка модела. Расподела густина са стране горњаке у свим конфигурацијама слична је облику таласа воде, у смислу да су на геометријски сличном месту, $x = 8 \text{ m}$, по свим брзинама $\rho_A < \rho_x$ и $\rho_C < \rho_x$ слика 68.

Посматрањем изо-густинских линија изнад горњаке ВНСТ у различитим конфигурацијама и условима струјања, запажена је сличност облика изо-густинских линија код конфигурације ВНСТ у тунелу са путањама флуидних делића воде код зарањања водомара по косој путањи, слика 69.



(а) изо-густинске линије, ВНСТ у тунелу



(б) путање флуидних делића, $V_0 \approx 0.6 \text{ m/s}$

Слика 69 Сличност између путања флуидних делића воде и изо-густинских линија над горњаком ВНСТ у тунелу

Сличност је изражена у области носног дела горњаке. У простору испред зауставне тачке, изо-густинске криве су постављене тако да започињу на плафону тунела, а сустичу се на месту врха носа – зауставној тачки. У области изнад самог врха носа, изо-густинске линије се такође сустичу у зауставној тачки, али заузимају приближно вертикални правац, управан на правац струје, са удаљењем од контуре. Иза зауставне тачке, изо-густинске се сустичу у зауставној тачки, а њихова закривљена путања, налик путањама флуидних делића стоји приљубљено уз горњаку, до приближно 1/4 дужине дела носа, који је дизајниран биомимикријом са водомаром. Низ контуру, на делу до приближно 1/2 бионичког дизајна, изо-густинске линије су сличне са путањама флуидних делића у области врха таласа. Како су све изабране брзине подкритичне, код свих се појавио врло сличан распоред изо-густинских линија и из тог разлога утицај брзине на облик изо-густинских линија није помињан у опису.

Појава сличности између изо-густинских линија и путања флуидних делића је протумачена начином кретања флуидних делића испод површине и услова хидрауличке аналогије. Хидрауличка аналогија обезбеђује сличност слободне површине воде и густине ваздуха, посматраних у релативном односу на референтне вредности – дубину мирне воде и стагнациону густину. У замрзнутом тренутку, при подкритичним условима, $Fr_C < 1$, контура слободне површине воде је формирана од флуидних делића који су дошли из области са истим притиском, али под различитим правцима нагиба и са различитим брзинама. Кретање флуидних делића који чине слободну површину воде је последица промена услова струјања кроз историју догађаја, а који зависе од ударне брзине и облика контуре бионичког модела (слика 66). На слободној површини воде влада једнакост притисака између локалне атмосфере и воде. Но, флуидни делићи пошто се физички нађу на слободној површини не престају да се крећу, према нумеричким резултатима (што показују вектори брзина флуидних делића по слободној површини) све док се довољно не удаље и изгубе енергију, и на месту даље од места удара где је мирна површина воде.

Путање флуидних делића, слика 69, се састоје од великог броја флуидних делића који заузимају релативан положај у односу на мирну површину воде, односно, дубину. Сличност са изо-густинским линијама је потражена у

замишљеном положају низа флуидних делића из области једнаких притиска, а који припадају различитим путањама, али заузимају релативне положаје у облику замишљених подводних таласа, чија контура чини границу између флуидних делића у слојевима са једнаким локалним притисцима. У замрзнутом тренутку, један удаљен флуидни делић од места зарањања, иако није директно уз контуру, био је по путањи померен од стране суседног. Флуидни делићи по путањи су, гледано уназад кроз историју, померени од суседног на истој путањи редом све до првог који је директно покренут дејством модела о воду при зарањању. Релативан положај флуидних делића, према локалној дубини, је очекиван да се односи једнако као релативан однос густина у струјном пољу према стагнационој вредности. На овај начин је покушано да се хидрауличка аналогија прошири и да се пронађе сличност између струјања испод површине воде и у струјном пољу око BHST у тунелу. Како није задовољен услов геометријске сличности, због присуства тунела који ограничава струјање, није очекивана потпуна сличност. Једнакост изо-густинских линија и путања флуидних делића је постављена као додатни услов сличности код конфигурације BHST у тунелу, с обзиром да је сличност таласа воде и расподеле густина по облику и положају карактеристичних тачака, али не и у релативних вредности које описују. Премошћавањем описана два физичка модела хидрауличком аналогијом, на описан начин, се желело да се постигну сигурнији закључци у првој фази дизајнирања, када се изабрани дизај испитује хидродинамичким експерименталним и нумеричким методама у 2D простору.

Као крајњи резултат, у овом истраживању је усвојено премошћење хидрауличком аналогијом при процени расподеле густине око 2D BHST у тунелу, а одатле и осталих параметара струјања, без обзира на непрецизности самих вредности. Нумеричке симулације су значајно помогле у анализи струјања испод површине воде, што без употребе високотехнолошке опреме није могуће извести у хидродинамичком експерименту

7.6. Закључак

Хидрауличка аналогија поставља сличност између облика слободне површине воде у каналу са променом густине у струјању кроз геометријски сличан простор, у релативним односима према равнотежним, односно, зауставним вредностима, параметара слободне површине – струје. Овај део истраживања је изведен како би се упоредио природни догађај маневра обрушавање – зарањање водомара, физикалност појаве таласа, и пронашла сличност струјања са бионичким дизајном ВНСТ у различитим конфигурацијама на прузи и слободном лету.

У овом истраживању је тражен релативни однос између параметара струјања, облика таласа у води, расподеле густина око ВНСТ, и параметара дизајна, при подкритичним условима, како би се на основу хидродинамичких испитивања и применом хидрауличке аналогије могло проценити да ли дизајн може дати задовољавајуће аеродинамичке карактеристике.

Сличност струјања код водомара и ВНСТ, добијена као резултат комбиноване методе – хидродинамичких испитивања, нумеричких симулација и применом хидрауличке аналогије су показала да је са довољном тачношћу одсликано струјање на ВНСТ, очекивано из хидродинамичких тестова са бионичким моделом и да се део контуре водомара до корена може усвојити као полазни дизајн горњаке носа ВНСТ у даљем истраживању. Прелаз са контуре кљуна водомара на контуру тела ВНСТ, изведен радијусом који тангира обе контуре, показао се добрим решењем с обзиром да производи равномерну расподелу притисака дуж ВНСТ.

Унутар струјних поља је такође уочена сличност између путања флидних делића, у води, и распореду изо-густинских линија, у струји испред посматране тачке на контури ВНСТ. Хидрауличка аналогија је проширена и на анализу струјног поља у подкритичним режимима струјања ВНСТ у тунелу код код није постојала очигледна сличност струјања, па је било неопходно потражити додатни услов сличности кроз премошћење хидрауличком аналогијом.

У овом истраживању је моделовано 2D струјање са циљем да би се већ на основу релативно једноставнијих модела, који су по времену и ресурсима мање

захтевни, могло одлучити о наставку употребе одређеног дизајна.

Свакако, наставак истраживања уз употребу прецизне опреме за експериментална мерења и визуелизацију струјања (PIV, LDA, брзе камере високе резолуције), варирање улазних параметара, дубине и поставке у нумеричким симулацијама дало би и прецизније податке, као и бољу сличност. Такође, се предлаже у будућим истраживањима проширење програма на хидродинамичка и нумеричка истраживања модела BHST са варирањем параметара дизајна и њихово испитивање у различитим конфигурацијама, како би се задовољио потпуно услов геометријске сличности на целој дужини модела.

8. БИОНИЧКИ 3D ВОЗ ВЕЛИКИХ БРЗИНА

8.1. Прелиминарна нумеричка испитивања воза за велике брзине

Прелиминарна нумеричка испитивања воза за велике брзине су изведена за воз у кретању отвореном пругом, при брзинама до 200 km/h. Испитиване су конфигурације са и без аеродинамичких кочница [9-13].

Изабрани су стационарни услови струјања, стационарни модел воза и покретни модел тла. На основу прелиминарних испитивања су одређени: минимални потребни габарити домена, гранични међусобни положај воз-тло, метода креирања мреже са зонама од утицаја, оквирне вредности улазних података за нумеричке симулације и сл..

Прелиминарна нумеричка испитивања [9-13] и истраживања приказана у [4,34,40,43-61] и др., су била основа за дефинисање метода и поставки проблема за испитивање 2D, 3D BHST и SHST.

8.2. Аеротунелска испитивања SHST

Аеротунелска испитивања стандардног бионичког воза за велике брзине, SHST, су обухватила мерење расподеле температура по површинама модела, визуелизацију струјања по површинама модела, и мерење отпора модела у присуству тла.

Циљ овог дела истраживања је да се одреде зоне ламинарног и турбулентног струјања тако што би се захтевна мерења расподела притисака око и по површинама модела [22,113] заменила мерењем расподеле температура. Резултати ИЦТ мерења су верификовани визуелизацијом струјања. Са друге стране циљ је био се аеротунелским испитивањима верификује нумеричка метода. Свакако детаљна аеротунелска испитивања су незаменљив и најмеродавнији

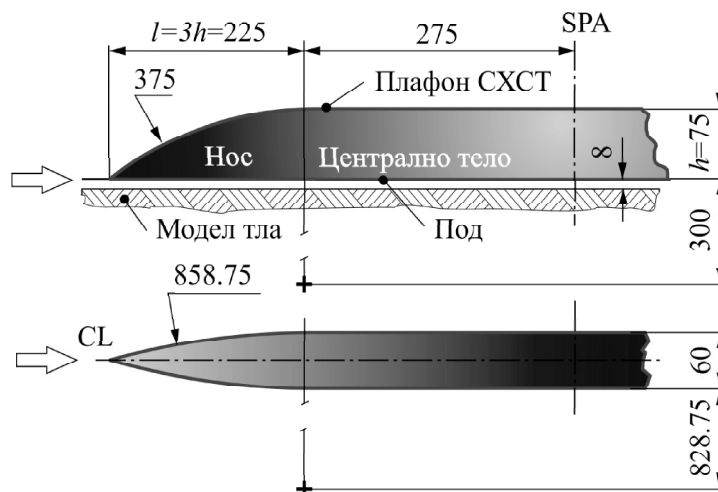
извор информација о аеродинамичким карактеристикама модела.

Циљ испитивања је био и да се уведе у аеротунелску праксу мерење расподеле температура помоћу ИЦ термографије у подкритичном режиму, испитају могућности методе и на тај начин скрати време и умање трошкови у односу на стандардне методе аеротунелских испитивања у почетној фази дизајнирања прототипова.

Испитни модел

Модел SHST је дизајниран према геометријским параметрима природних облика риба баракуде и делфина према истраживањима 2D био-инспирисаних дизајна BHST [27,172,173] (Прилози 7,10,11). Такође, облик и габарити SHST су такви да се могу једноставно извести и одговарају аеротунелским захтевима [113].

Слика 70 приказује геометрију SHST размере прилагођене за испитивања у аеротунелу Т-32. Модел SHST, је израђен према 3D нумеричком моделу, дизајниран у PRO/Engineer CAD/CAM софтверу. Модел SHST је предвиђен за мерење силе отпора, визуелизацију струјања и термографска снимања, те је из тог разлога израђен од липовог дрвета, премазан заштитним слојем и црном бојом.



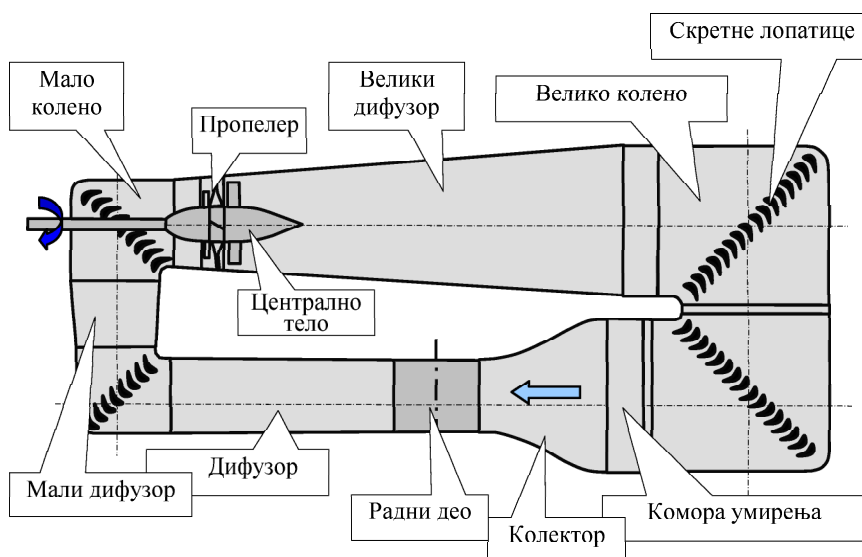
Слика 70. Стандардни бионички воз за велике брзине SHST

Модел је израђен комбинованом технологијом, машински и ручно, са тачношћу од ± 0.5 mm. Модел је полиран како у међуоперацијама тако и након nanoшења завршног слоја боје како би се површина фино матирала и уједначила за потребе снимања током визуелизације и термографских мерења.

Аеротунел

У овом раду је дат приказ малог подзвучног аеротунела Т-32, ВТИ ВС, који је употребљен за истраживања [113,172,173]. Аеротунел Т-32 је затвореног типа са полу-отвореним радним делом. Користи и као секундарни стандард за испитивања различитих мерних уређаја или освајање нових метода мерења, пре свега због квалитета струје у радном опсегу, приступачности, функционалности и мањих трошкова истраживања у односу на друге аеротунеле у ВТИ. Детаљан опис, карактеристике и примери експеримената су приказани у [113,151].

Конструкцију трубе аеротунела приказује слика 71.



Слика 71. Шематски приказ подзвучног аеротунела Т-32

Конструкција овог типа обезбеђује временски неограничен рад са контролисаном брзином струје ваздуха, али без хлађења ваздуха током рада. Дизајн трубе, а посебно колектора, саћа и пропелера обезбеђују струју високог квалитета. Контрола услова струјања се изводи ручно према индикатору брзине струје променом броја обртаја пропелера.

Аеротунел је опремљен следећим системима: мерним системом за мерење услова струјања у радном делу, спољашњом аеродинамичком шест-компонентном аеровагом за мерење аеродинамичких оптерећења модела, системом за мерење расподеле притисака, системом за прикупљање података са електричних мерних

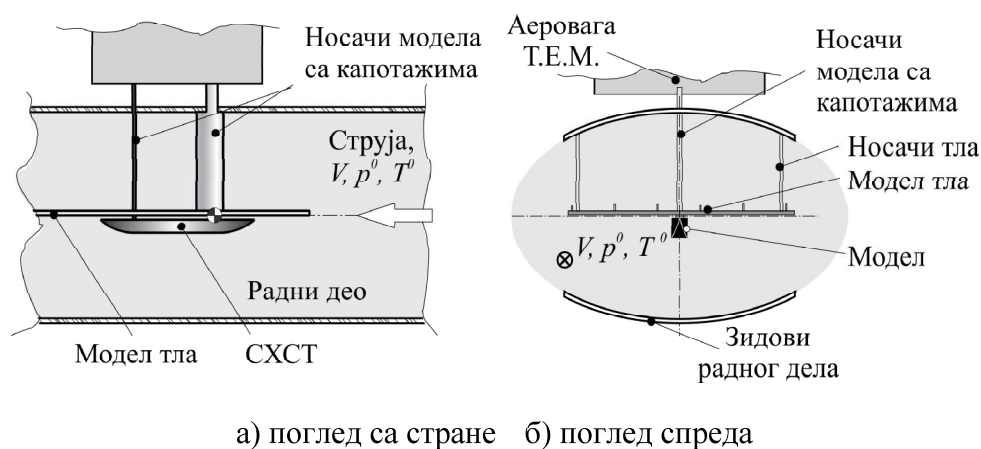
уређаја и комплетом за визуелизацију као и других комплета неопходних за праћење квалитета струје и мерења (напр. комплет за одређивање фактора турбуленције са куглом и др.).

У аеротунелу се мере атмосферски притисак, брзина из мерења разлике зауставног и статичког помоћу Питот цеви и примарног мерног система, и температура у радном делу.

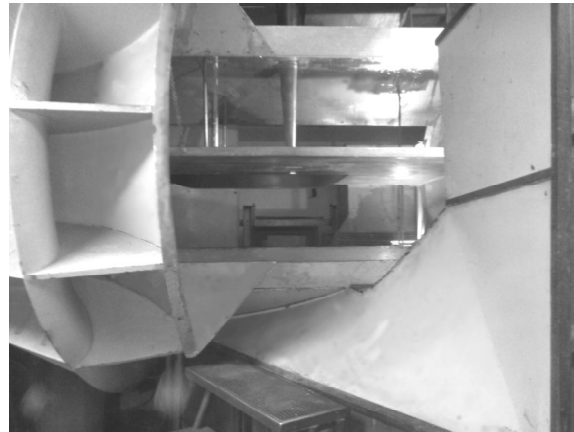
Квалитет струје у радном делу је описан фактором турбуленције $TF = 1.14$, одређен турбулентном куглом. Допринос одступања брзине од номиналне вредности, $\Delta V/V_{RD}$, угловност струје, $\Delta\alpha$, и промена коефицијента притиска дуж радног дела су такође занемарљиве (одступања мања од 1%) [152,153].

Постава за мерење

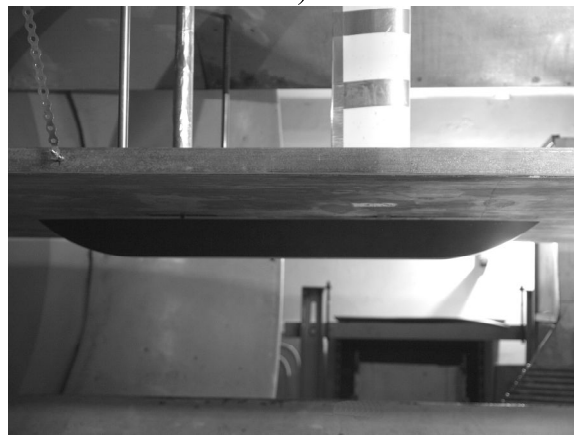
Слика 72 је шематски приказ поставе модела SHST и земље, а слика 73 приказује снимке поставе. Искоришћен је постојећи модел тла аеротунела Т-32, који нема опрему за контролу граничног слоја.



Слика 72. Шематски приказ поставе модела SHST у присуству модела земље



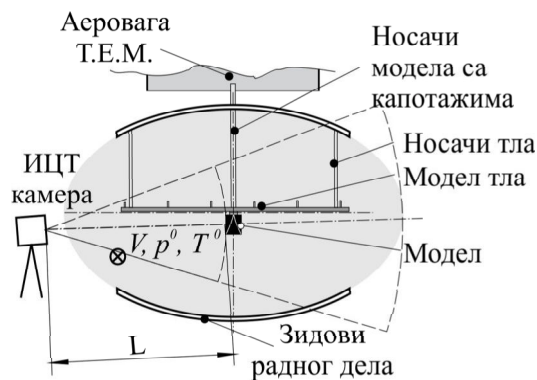
а)



б)

Слика 73. Постава модела SHST са тлом у радном делу

Снимање температурске расподеле по моделу SHST је обављено у по први пут у аеротунелу Т-32 (слика 74). Термографска камера је постављена на носач ван радног дела, тако да видно поље камере захвата бочну и део доње стране модела и део тла. Управно растојање од објектива камере до бочне стране модела је $L = 2 \text{ m}$.



Слика 74. Постава модела за термографска мерења

Мерење отпора SHST

Аеровага Т.Е.М: је електро-механички мерни уређај који мери разложено аеродинамичко оптерећење модела на три силе и три момента, за три осе локалног координатног система [113]. Раздвајање компоненти се врши механички, док се елиминација међуутицаја обавља кроз баждарење аероваге и касније математичким апаратом кроз специјализоване програме. Координатни почетак координатног система аероваге се назива виртуелним центром аероваге и он представља место дејства резултантне силе за који је аеровага конструисана.

Према својој конструкцији ова аеровага је типа са мерним рамовима [113]. Сваки од ових рамова на себи носи везне и мерне елементе са мерним ћелијама, оријентисане у смеровима дејства појединих оптерећења и момената.

Оптерећење аероваге се срачунава за виртуелни центар аероваге у складу са матрицама калибрације и међуутицаја компоненти. Специјализованим програмима се оптерећење преводи из координатног система аероваге са почетком у виртуалном центру, до аеродинамичког координатног система, уобичајено у аеродинамичком центру испитног модела.

Бездимензиони аеродинамички коефицијенти сила и момената се израчунавају из измерених компоненти аеродинамичког оптерећења, за познате референтне геометријске величине – дужину модела, b , и површину попречног пресека, S , према, за измерене параметре струјања

$$\begin{aligned} c_x &= \frac{R_x}{q \cdot S}, & c_y &= \frac{R_y}{q \cdot S}, & c_z &= \frac{R_z}{q \cdot S}, \\ c_l &= \frac{M_x}{q \cdot S \cdot b}, & c_m &= \frac{M_y}{q \cdot S \cdot l}, & c_n &= \frac{M_z}{q \cdot S \cdot b}, \end{aligned} \quad (43)$$

где су: c_x - коефицијент отпора, c_y – коефицијент бочне силе, c_z – коефицијент узгона, c_l – коефицијент момента ваљања, c_m – коефицијент момента пропињања и c_n – коефицијент момента скретања, $q = \rho V^2/2$, означава динамички притисак струје нестишљивог ваздуха у радном делу, при чему су: ρ густина ваздуха и V брзина струје. Од интереса за ово истраживање је само одређивање c_x .

Тачност мерења аеровагом директно зависи од примењеног оптерећења и прецизности поставке модела, општих карактеристика и конструкције, мерног опсега, поступка калибрације аероваге и др.

Термовизијска мерења

Истраживање SHST је послужило да се испитају могућности примене методе ИЦТ у подзвучном тунелу Т-32 и направи предикција зоне транзиције ламинарног у турбулентни гранични слој по моделу. У првом делу испитивања је испитана могућност примене модела, постава модела и услови испитивања. У другом делу су извршена мерења расподеле температуре по моделу, визуелизација струјања, мерење отпора и нумеричке симулације. Услови испитивања при ИЦТ мерењима су исти као и услови код визуелизације струјања, на опсегу брзина од $V = 10 \text{ m/s} - 60 \text{ m/s}$, корак 10 m/s . Детаљан опис методе мерења расподеле температуре са визуелизацијом и део резултата су дати у [113,172,173] и Прилозима 10 и 11.

За испитивања је коришћена ИЦ камера за индустријске намене FLIR E40 (Прилог 5). Карактеристике камере су: резолуција $160 \times 120 \text{ px}$, укупан број пиксела 19200 px , термална осетљивост $< 0.07 \text{ }^\circ\text{C}$, тачност мерења $\pm 2\%$ или $2 \text{ }^\circ\text{C}$, нижи температурни опсег мерења од $(-20) \text{ }^\circ\text{C}$ до $120 \text{ }^\circ\text{C}$, виши температурни опсег мерења $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $650 \text{ }^\circ\text{C}$, ортика стандардна $25^\circ \times 19^\circ$, нехлађени болометар и фреквенција снимања 30 Hz .

Снимање термограма је обављено преко лаптоп рачунара, ради накнадне обраде. Обрада термограма је вршена на рачунару помоћу апликативних софтвера FLIR Tools и FLIR RESEARCH IR. Вршено је мерење температуре по површинама модела, мерење по изабраним мерним линијама и направљени су дијаграми са интервалским приказима који истичу различите области на термограму у изабраним интервалима температура.

Визуелизација струјања

Визуелизација струјања у овом испитивању је обављена коришћењем уљане емулзије у две технике: презимазивањем целокупне бочне површине модела и наношењем тачкица емулзије на бок и плафон воза, и на део модела земље [172]. Снимци из визуелизације су направљени професионалним CANON фотоапаратом. Снимање је вршено појединачно, по устаљењу услова струјања, а за исте услове струјања при којима је вршено мерење отпора модела и температура.

Састав уљане емулзије је: 30 ml парафинског уља, 5 ml олеинске киселине и 10 g финог праха TiO_2 . Уљана емулзија је припремљена у две варијанте, без и са

олеинске киселине. Емулзија је мешана миксером, а својства су проверена наношењем на вертикалну металну површину. Квалитет је постигнут када се тачкице емулзије на вертикалној равни задрже без цурења 1-2 min. Овај састав емулзије је утврђен искуствено и показао је врло добре резултате и у другим аеротунелским испитивањима и на већим подзвучним брзинама у аеротунелу Т-35 [101,131,152,153].

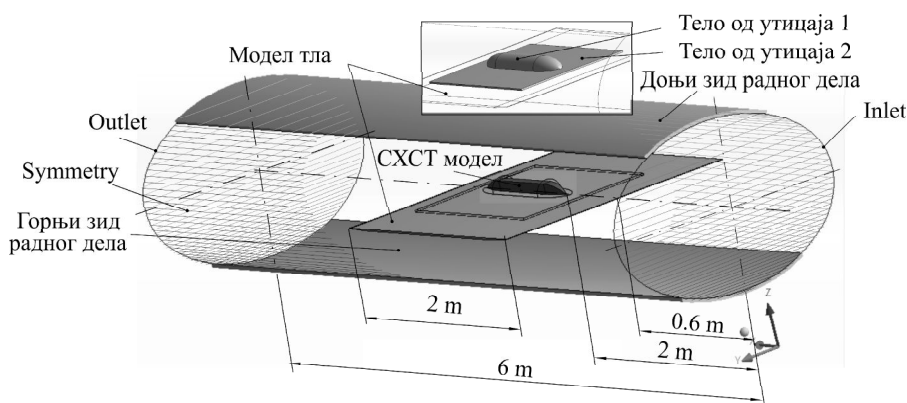
Нумеричке симулације за SHST

Нумерички модел је веран виртуелни модел поставе за испитивање у радном делу Т-32, с тим да је домен радног дела продужен на 6 m због потреба нумеричких метода, слика 17. На месту где је радни део Т-32 отворен, нумерички део је затворен виртуелном контуром, а тло дотиче виртуелну контуру са обе стране тако да пресеца домен на два дела.

Нумеричке симулације су изведене у CFD пакету ANSYS Fluent. Нумерички модел SHST је увезен у ANSYS Designer Application, за потребе креирања нумеричке мреже око SHST. Исти модел је био и основа за израду аеротунелског модела.

Нумеричка мрежа

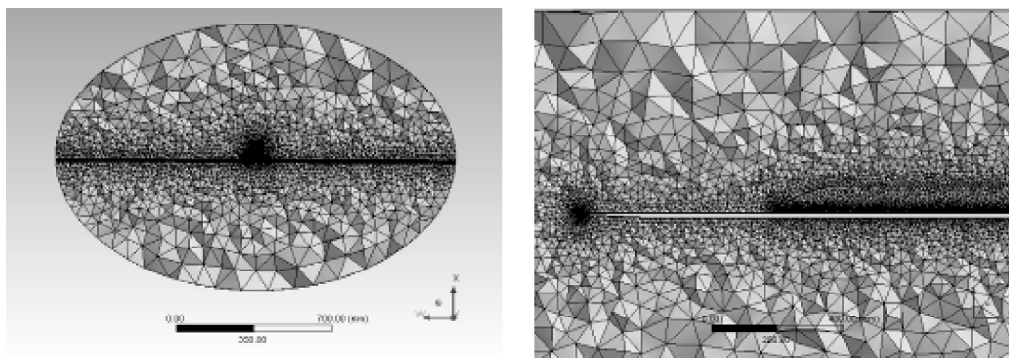
Нумеричка мрежа је креирана у пакету за прављење мрежа ANSYS Mesher. Слика 75. приказује шест типова граница у нумеричком домену: нумерички модел SHST, под и плафон радног дела, тло и зидови радног дела са условом симетрије струјања (струјање прати контуре зидова и лонгитудинално је са осом радног дела), улазни и излазни пресек.



Слика 75. Границе нумеричког модела

Нумеричка мрежа је неструктурирана у домену, док је уз сам модел структурирана у оквиру нумеричког граничног слоја . Мрежа има уситњене ћелије по површинама воза, окова и тла, а попуњавање домена је извршено са стандардним степеном ширења ћелија од површина воза и тла ка спољашњости домена.

Слика 76 приказује мрежни модел који се састоји од 1 270 607 ћелија. Највећа вредност односа страница елемената је око 57 (Aspect Ratio), а закривљење облика (skewness) је распоређено тако да је највећи број елемената , њих 30% са степеном закривљености 0.27, 0.13 – 26% , 0.31 – око 20%, остале вредности су значајно мање и процењено је да неће значајно утицати на резултате.



(а) поглед с преда

(б) поглед са стране

Слика 76. Мрежни модел

Нумеричка метода у примени

Нумеричке симулације су урађене помоћу НСЈ усредњене према Рејнолдсовом моделу за стишљиво струјање. Овакав метод омогућава исправан прорачун и у области нестишљивог струјања и омогућава приказивање температурске расподеле по површинама модела.

Употребљен је густински солвер, за стационарну промену брзине, турбулентни модел је S-A укључујући и једначину енергије. Радни флуид је ваздух третиран као идеални гас. Гранични услови дефинишу воз као зидове од калцијум карбоната (најближи по термалним својствима боји којом је обојен стварни модел и саставни део боја са највећим уделом у запремини), модел тла је од дрвета, а плафон и под радног дела су од алуминијума, као у реалном

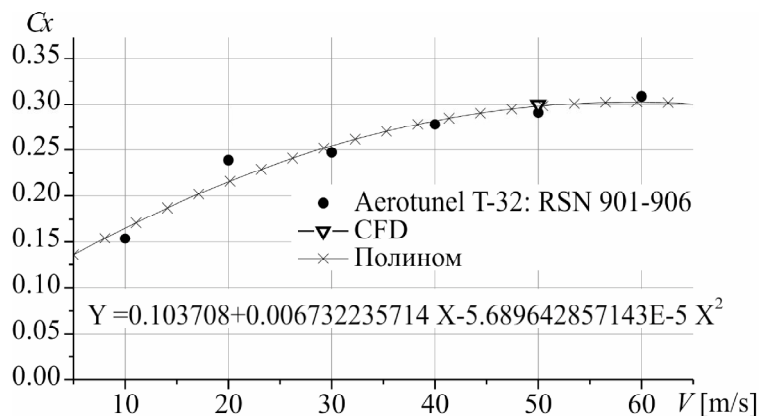
експерименту. Бочне стране су дефинисане са симетричним граничним условима – струја ваздуха је лонгитудиналног правца са радним делом. Улазни пресек је дефинисан као далеко поље притиска (Pressure Far Field, PFF), он дефинише услове струјања на бесконачном растојању од модела, M и статичке услове. Излазни пресек као излаз у поље статичког притиска (Pressure Outlet, PO).

Метода решавања је имплицитна, тип флукса Roe-FDS (Roe Flux-Difference Splitting, Roe-FDS). Изабране методе дискретизације су: за градијенте Green-Gauss Node Based, за струјање и турбулентни модел метода другог реда, али тек пошто је у почетној фази ради лакшег започињања процеса конвергенције употребљена метода првог реда. Решење конвергира након отприлике 2200 итерација, с тим да је употребљена и мулти – мрежна тзв. FMG (Full Multigrid, FMG) иницијализација за подзвучно струјање ради бољег проналажења полазног решења, а тиме и брже конвергенције резултата [92].

8.2.1. Резултати испитивања

Верификација резултата

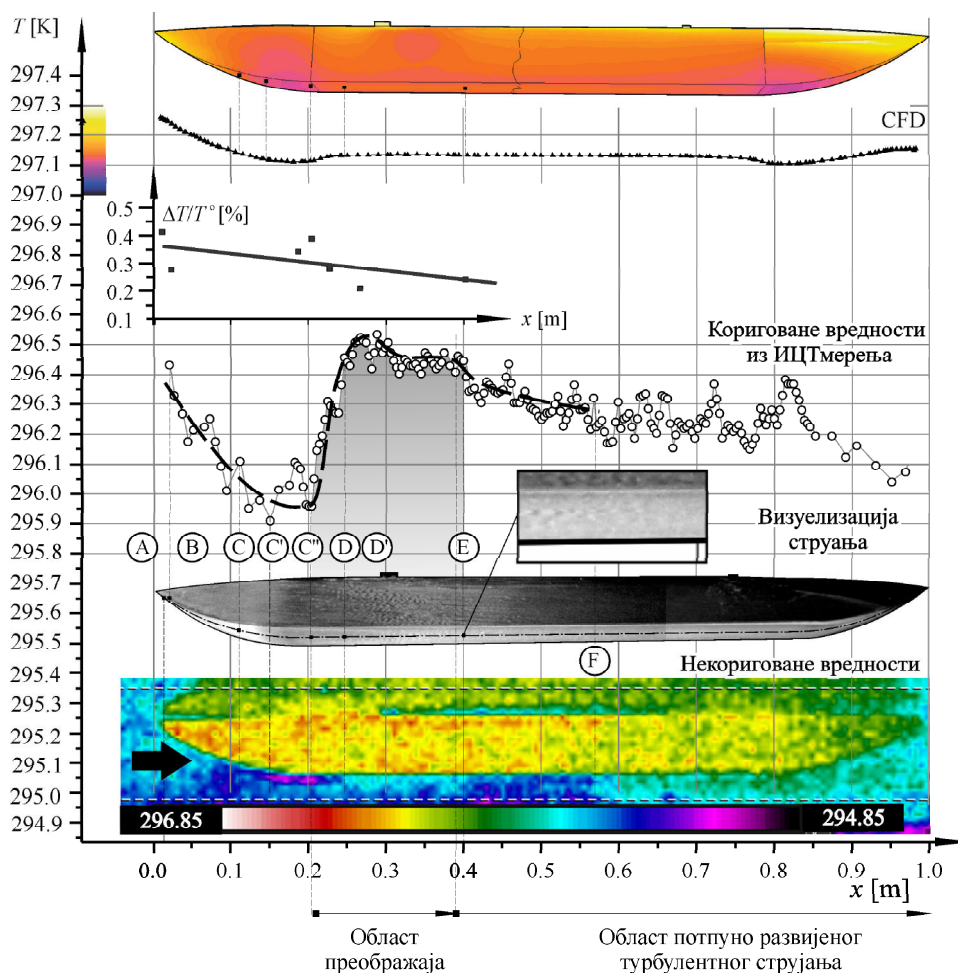
Слика 77 приказује поређење c_x у функцији V за модел SHST у присуству тла без система за одсисавање граничног слоја, у експерименту и нумеричким симулацијама. Према добијеним вредностима c_x при $V = 50$ m/s резултати нумеричких симулација су верификовани, слика 77.



Слика 77. Поређење c_x у функцији V за модел SHST

Резултати термографских мерења

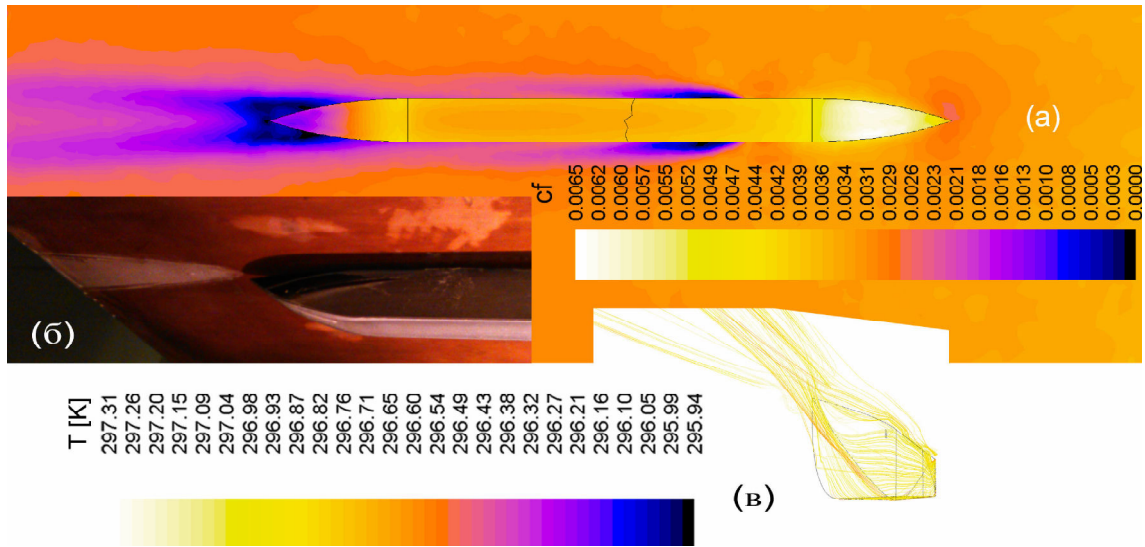
Опис методе мерења расподеле температуре са визуелизацијом струјања, примењених у аеротунелу Т-32, део резултата испитивања и закључци су приказани у [172] (Прилог 10), док је део резултата испитивања са мерењем, визуелизацијом и нумеричким симулацијама дат у [173] (Прилог 11). Слика 78 показује комбинацију експерименталних и нумеричких резултата (коригованих и некоригованих) површинске расподеле температуре.



Слика 78. Поређење резултата мерења и нумеричких вредности T , $V = 50 \text{ m/s}$

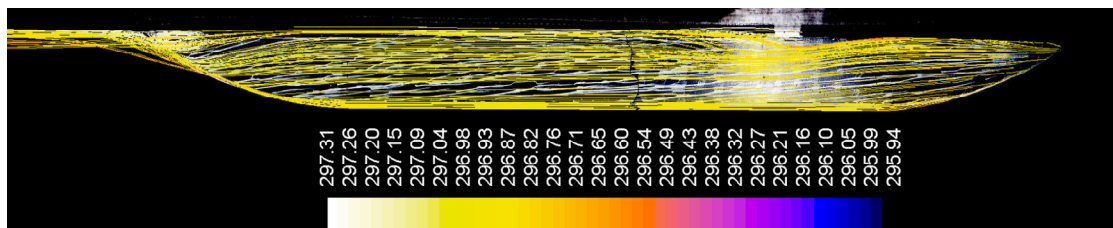
Верификација резултата је обављена и кроз поређење струјних слика по површинама модела SHST обављено уљаном емулзијом и путања флуидних делића у нумеричким симулацијама [173]. Слика 79 приказује део верификације резултата при $V = 50 \text{ m/s}$. Слика 79а приказује расподелу c_f у погледу на плафон

(нумерички резултати), слика 79 приказује траг емулзије на моделу тла, и путање флуидних делића обојене према температурама, у областима: по тлу, по боку, плафону воза и у вртложном трагу иза воза.



Слика 79. Верификација дела расподеле c_f из нумеричких симулација са струјном сликом по репу и тлу иза модела, $V = 50 \text{ m/s}$

Слика 80 упоредо приказује трагове емулзије по боку (беле линије) и путање флуидних делића (жуте линије) обојене према температурама, при $V = 50 \text{ m/s}$.



Слика 80. Поређење трагова уљане емулзије (беле линије) са путањама флуидних делића из нумеричких симулација обојених према температурама у струјном пољу (жуте линије), $V = 50 \text{ m/s}$

8.2.2. Тумачење резултата

Нумеричке симулације и мерења показују исту физикалност појава, детектују тачку преображаја на истим позицијама са стране бока и плафона SHST.

Разлике у вредностима су протумачене као последица избора полазних

параметара за нумеричке симулације, пре свега материјала којим је модел обложен, и методе мерења (поставке за мерење и полазних података за термокамеру). Термографија као метода се показала врло ефикасном, с тим да је потребно прилагођавање методе аеротунелу и моделу. Верификација са визуелизацијом, из [173] (Прилог 11), је показала да се термографска метода може користити код аеротунелских испитивања и при подзвучним брзинама.

Према резултатима, термографија се показала као поуздана метода за карактеризацију струјања по површинама модела [173] (Прилог 11). Такође, примењена нумеричка метода са густинским солвером, при подзвучним брзинама, је верификована визуелизацијом и термографским мерењима. Иако одступања у самим вредностима добијених помоћу две методе постоје, њихова комбинована употреба приказује детаље у струјном пољу и вредности параметара који се не би могли на други начин проценити, осим класичним и захтевним методама.

Поређење дела расподеле c_f а на моделу тла, трагова уљане емулзије и путања флуидних делића обојених према вредности локалне температуре у струјном пољу, слика 79, показала је добро слагање на основу чега је протумачено да нумеричке симулације реалистично одражавају струјну слику по моделу и у његовој околини. Реалистичан приказ путања флуидних делића из нумеричких симулација са визуелизацијом уљаном емулзијом, показала је и слика 80. Путање флуидних делића обојене према температури прате струјнице уљане емулзије по свим површинама модела. Уочено је мање одступање по углу пропињања које се у практичном смислу може занемарити, а разлика је протумачена као последица збира утицаја малих разлика између изабраних улазних података и реалних вредности (избор солвера, избор гаса, избор материјала модела и тла, фактор турбуленције и др.)

8.2.3. Закључак

Аеротунелска испитивања SHST су показала неопходност примене ИЦ термографије, пре свега због једноставности и цене коштања испитивања у односу на класичне методе испитивања у граничном слоју, као што су мерење статичких притисака по моделу, чешљевима са Питот сондама и сл. [113,151]. Иако су

потребна додатна унапређења опреме и модела тла, помоћу аеротунелских истраживања са мерењем температуре и нумеричким симулацијама је дефинисано место преображаја из ламинарног у турбулентно струјање [173]. Ово је посебно значајно код извођења нумеричких симулација методом RANS код којих није могуће прецизно одредити тип струјања око BHST. Примена густинског солвера, турбулентног модела и једначине енергије омогућили су карактеризацију струјања.

Праћење промена нумеричких вредности расподеле температура и коефицијента површинског трења, као и одређивање места преображаја по површинама SHST, са довољном поузданошћу се може применити и на имагинарну конфигурацију 3D BHST, у условима возње кроз тунел, ради карактеризације струјања на исти начин.

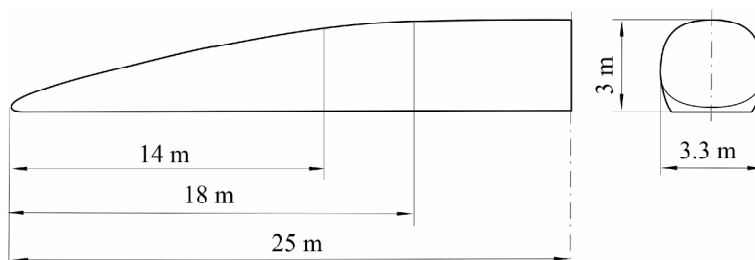
8.3. Нумеричке симулације за ВНСТ у проласку кроз тунел

Нумеричке симулације су изведене за 3D ВНСТ при проласку кроз тунел са циљем процене дизајна при вожњи у критичним условима и ради потврде примењене комбиноване методе описане у овом раду која је послужила као основа за финализацију дизајна 3D ВНСТ. Калкулације са применом клизне мреже су изведене у серијском процесу и са једноструком тачношћу.

Геометрија 3D бионичког воза за велике брзине

Геометрија 3D ВНСТ се састоји од две локомотиве једнаких геометрија, сучељених крајева, укупне дужине 50 m, слика 81. Дужина носа профилисана биомимикријом је 14 m, док је укупна дужина носа воза 18 m. Површина попречног пресека је 8.839 m^2 , а запречавање тунела $R = 0.22$. У уздужном попречном пресеку је одређена комбинованом методом заснованом на хидруличкој аналогји. ВНСТ

Контура у уздужном попречном пресеку представља комбинацију контуре водомара са укупним издужењем 1:6 и дела контуре облика радијуса, којим је изведено „глатко“ свођење између контуре водомара у тела ВНСТ. Врх носа је у односу на кљун водомара коригован, затварањем контуре кљуна радијусом, из технолошких разлога и бољег дефинисања елемената мреже по површинама ВНСТ.

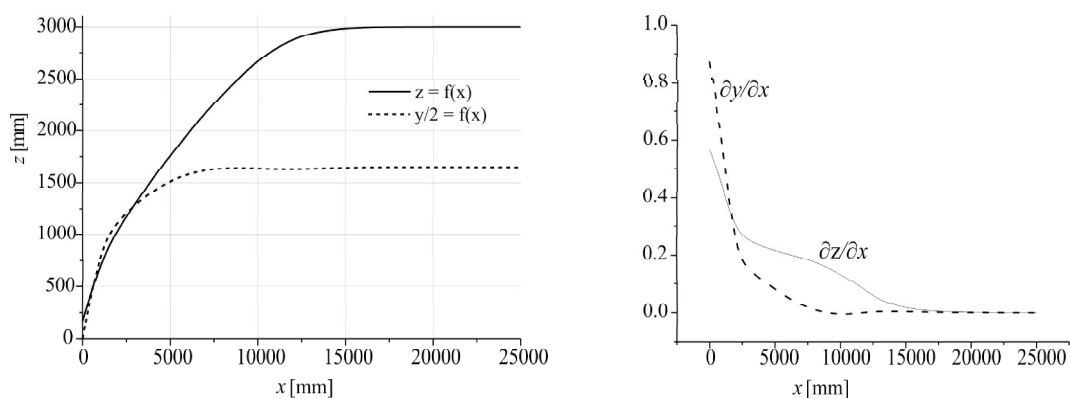


Слика 81 Геометрија 3D ВНСТ

Вертикална пројекција ВНСТ је изведена као комбинација дела елипсе на врху носа, налик врху кљуна водомара (слика 29б) дела контуре доњаке водомара (фото-документација), а свођење са телом ВНСТ је такође изведено радијусима,

као у случају 2D модела. Вертикална пројекција контуре (бочна изводница) је сужена на дужини која одговара сведеној контури у бочној пројекцији, слика 82а.

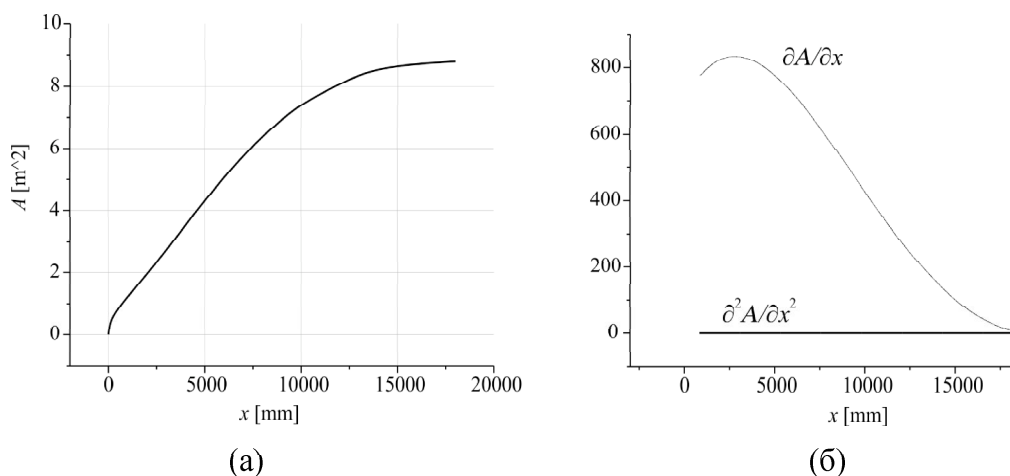
Сужавање контуре у вертикалној пројекцији се одражава на локалну величину и расподелу површина попречних дуж носа ВНСТ. Променама места над којим се изводи сужавање бочне изводнице и величина сужења бочне изводнице вршена је прерасподела вредности површина локалних попречних пресека све док није постигнута расподела нормализованих површина попречних пресека блиска елипсоиду. Ова корекција је урађена по угледу на правило површина које се примењује код објеката који лете суперсоничним брзинама, а са циљем да се приђе оптималној расподели површина, у нормализованом облику.



(а) контуре горњаке и бочне изводнице (б) расподела $\partial z/\partial x, \partial^2 z/\partial x^2$ по

Слика 82 Контуре горњаке и бочне изводнице највеће ширине

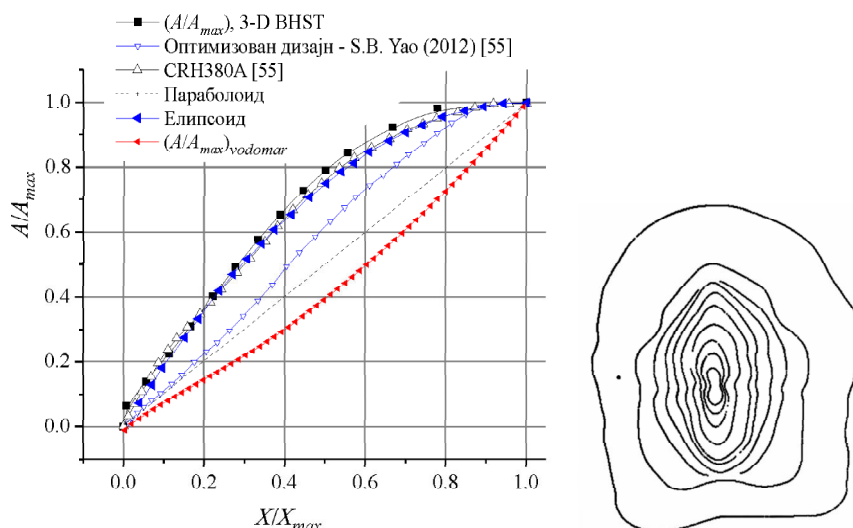
Поређење расподела површина приказује слика 83.



Слика 83 Расподела површина за 3D ВНСТ

Дизајн 3D VHST има нормализовану расподелу површина блиску елипсоидном облику, слика 84. Даље усавршавање метода креирања параметарских површина и корекције дизајна у будућим испитивањима су добродошле како би се постигла расподела површина ближа расподели параболоида, за који [4,55,60] наводе као облик најближи оптималном, слика 84.

Слика 84 приказује поређење расподеле нормализованих површина, A/A_{max} , у функцији нормализоване дужине носа различитих HST, X/X_{max} . Из поређења се може протумачити да је нормализована расподела површина 3D VHST врло блиска расподели елипсоидног облика носа HST, блиска изведеном дизајну CHR380A [55] са највећим одступањем од приближно 5% на интервалу 0.4 – 0.8 X/X_{max} .



Слика 84 Поређење нормализованих расподела површина [55]

Дизајн 3D VHST је у поређењу са дизајном HST Шинкансен серије 700 показао сличности у расподели A/A_{max} [56]. Контура расподеле A/A_{max} за Шинкансен серије 700 се састоји, грубо описано, од три правца и од контуре VHST се највећа разлика примети на три места, и то: на месту 0.17 X/X_{max} од $\Delta(A/A_{max}) \approx 5\%$; на месту 0.6 X/X_{max} од $\Delta(A/A_{max}) \approx -6\%$ и на месту 0.77 X/X_{max} од $\Delta(A/A_{max}) \approx 3\%$.

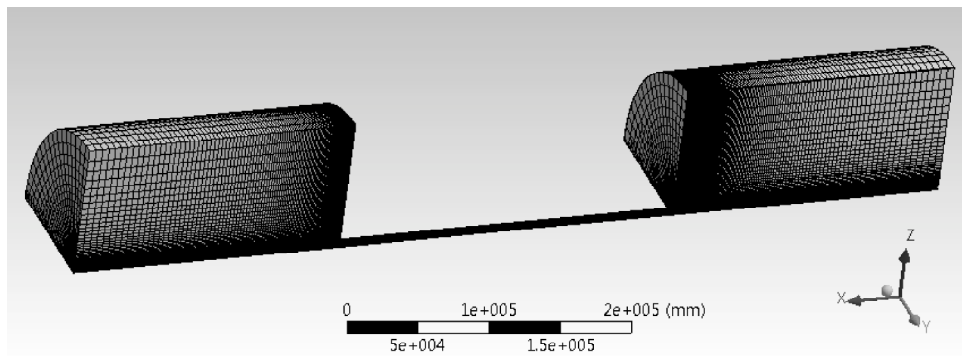
Свакако верификација са изведеним дизајнима не потврђује и сличност аеродинамичких карактеристике VHST, али говори о томе да се метода биомимикрије, на овом стадијуму примене и поређења, већ показала коректном и прихватљивом за дефинисање дизајна VHST.

Мрежни модел

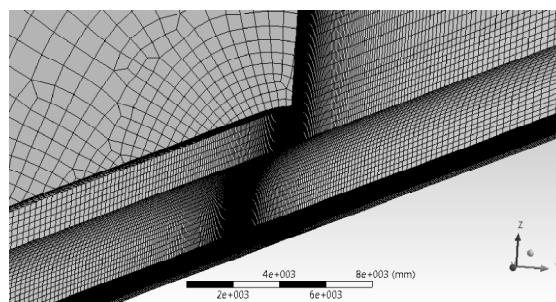
Шема распореда мрежних елемената је приказује слика 85. Део домена „inlet“ и „outlet“ су подељени на по две целине. Структуру мреже приказује слика 86. Мреже је креирана као и у претходним случајевима кроз пакет ANSYS Meshing Application. Мреже су креиране над деловима домена према начину кретања, и то засебно за стационарни део и клизну мрежу. Касније у процесу калкулација стационарна и клизна мрежа су комбиноване у јединствен систем. Засебно за сваки део мреже дефинисан је начин кретања, гранични услови и интерфејс.



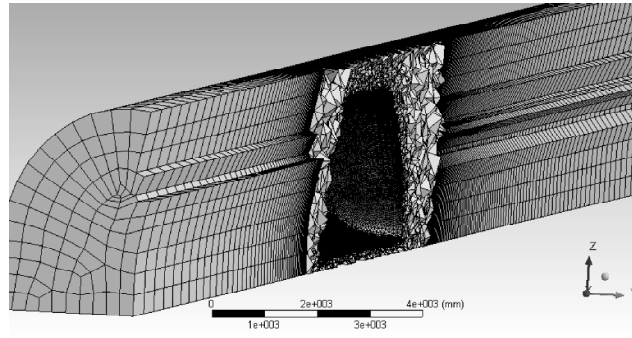
Слика 85 Шема распореда мрежних елемената



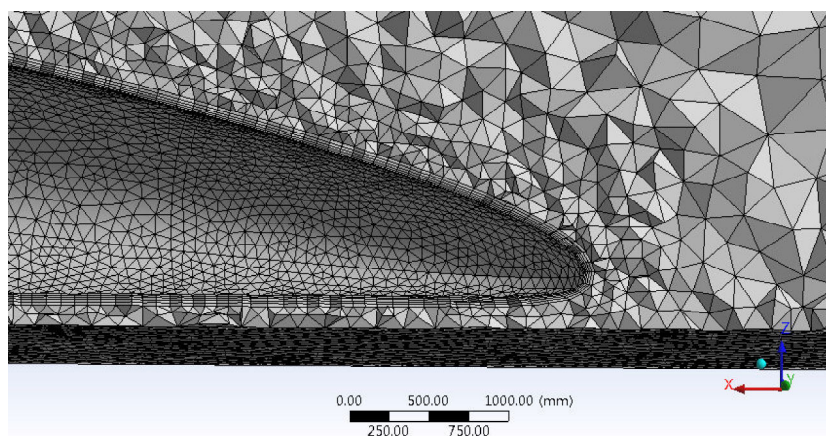
(а) поглед на мрежу у целом домену



(б) непокретна мрежа



(в) делови покретне мреже



(г) детаљ мреже на области око врха носа BHST

Слика 86 Приказ модела клизне мреже BHST –тунел

Мрежа је, осим у делу око модела BHST, структурисана. Структурисана мрежа је креирана употребом стандардног алата „sweep“. Алат „sweep“ омогућава оптимално попуњавање изабраних делова домена елементима правилног облика у правилном распореду, при чему се значајно умањује укупан број елемената мреже. Мањи број елемената мреже у случају захтевних нумеричких симулација, као што је примењен модел са клизним мрежама, директно утиче на смањење процесорског времена и трајање калкулација.

Висина домена је нешто већа од полупречника 100 m, колико износе полупречници улазног и излазног пресека. Укупна дужина мреже је 500 m. Тунел се налази у централном делу домена, дужине једнаке 5 дужина воза, 250 m. Тунел је висок 5.8 m и широк 8 m. Модел BHST је удаљен од тла за укупно 0.4 m.

Полупречник клизне мреже је 2.3 m, а њена база је удаљена од тла за 0.2 m. Почетна позиција воза је на 50 m испред улаза у тунел (1 дужина BHST).

Централни део непокретне мреже је једнаких димензија као непокретни део тунела, а остатак попуњава домен, слика 86а,б. Унутар централног дела мреже смештен је покретни део мреже, клизна мрежа. На овај начин је омогућено да се клизна мрежа помера у времену у односу на непокретну, и излази ван ње.

Клизна мрежа је подељена на три сегмента, слика 86в, где један сегмент окружује модел BHST а друга два попуњавају домен покретне мреже. Део мреже око самог BHST модела је произведен методом прилагођавања мреже која у резултату попуњава простор тетра- и хексагоналним елементима неједнако распоређеним у простору. Да би се добила што већа прецизност резултата око BHST модела је креиран нумерички гранични слој („Inflation Layer“), без тела од утицаја.

Укупан број ћелија непокретне и клизне мреже је близу 2 000 000. Непокретни део мреже сачињава приближно 1 200 000 елемената. Величина мреже је прилагођавана, кроз пробне симулације, максималним потенцијалима ресурса као основном ограничавајућем услову у овом делу истраживања.

Квалитет мреже се може описати основним параметрима. Највеће издужење елемената мреже је 176, присутно на занемарљивом броју елемената по ободима домена уз сам улаз и излаз. Издужење од 9.81 присутно је код 97.7% елемената и прво следеће по величини 27.4 код 1.67% елемената. Закривљеност елемената мреже је око 0.041 код 83.1% елемената, а 0.125 код 8% , остале вредности су присутне код занемарљивог броја ћелија.

Нумеричке симулације

Примењен је густински солвер за нестационарни случај струјања из разлога што је у одабраном интервалу брзина очекивана велика промена параметара струјања настала услед стишљивости ваздуха. Ваздух је третиран као идеалан гас, задржавајући константну вредност вискозности са променом температуре. За основна истраживања примењене су Ојлерове једначине за невискозни флуид, док су корекције изведене за вискозни флуид. У оба случаја је укључене једначина

енергије. Коришћени су следећи улазни подаци код примене турбулентног модела за вискозни флуид:

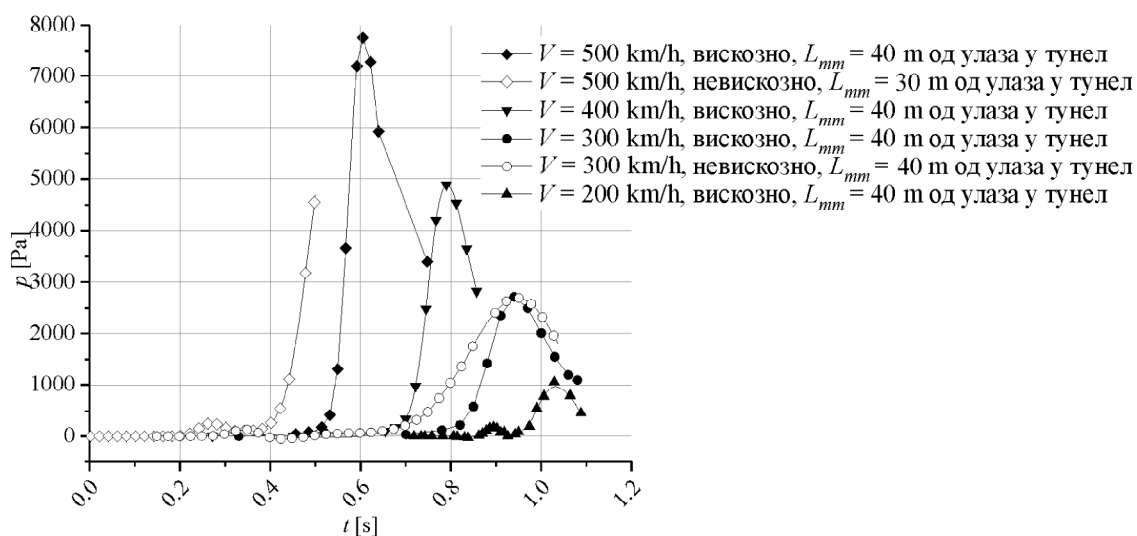
- турбулентни модел за вискозно струјање је $k-\varepsilon$ Realizable, са укљученом опцијом NEWF за третман струјања у близини зидова, јер је исти најпогоднији за примену код мрежа са издуженим облицима елемената уз површину модела.
- мрежни модел је транслиран за -350 m, како би се омогућило кретање клизне мреже на дужини потребној да BHST изађе из тунела
- Брзина клизне мреже једнака је тренутном случају
- радни услови $p_o = 101\,325$ Pa, $T_o = 288.15$ K
- спољашњим површинама домена је додељен гранични услов „Pressure Outlet“, код ког је познат притисак по граници. Како се ваздух у домену не креће, притисак по спољашњим површинама домена (и непокретне и клизне мреже) је једнак атмосферском.
- интерфејс је дефинисан по клизној површини између непокретног и покретног дела мреже облика тунела. Струјне промене се очекују у областима испред, у и на излазу из тунела. Калкулације струјних промена унутар домена се обављају почевши од површине модела BHST (гранични услов зид, без проклизавања), кроз клизну мрежу, затим кроз интерфејс и надаље кроз непокретну мрежу.
- метода решавања је имплицитна
- изабран тип флукса је Roe-FDS
- просторна дискретизација:
 - за градијенте GGNB
 - за струјање, кинетичку енергију и дисипацију турбулентног струјања – II реда низ-струју
 - формулација нестационарног струјања – I реда имплицитна
- Контрола решења
 - Курантов (Courant) број – 2
 - за кинетичку енергију и дисипацију турбулентног струјања – 0.8
 - турбулентну вискозност – 1
- временски корак, TS , код случајева невискозног струјања – $TS = 0.0025$ s,

са 15 унутрашњих итерација, код вискозног струјања – $TS = 0.0055$ s, са 5 унутрашњих итерација

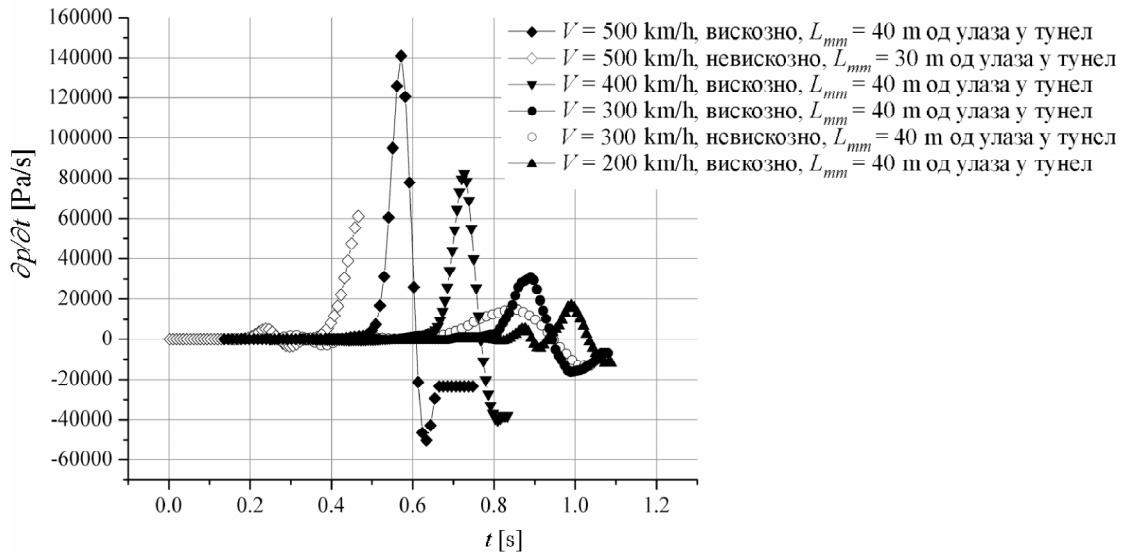
Велики број прикупљених података из ANSYS Fluent, организованих у облику форматираних датотека, је приређен за даљу обраду помоћу бесплатних верзија програма Total Commander, Visual Studio Express и MS Excel. Посебним кодом је од излазних датотека, добијених из нумеричких симулација проласка 3D BHST кроз тунел, креирана претражива база података по различитим параметрима (положај мерног места, време, притисак, и др.).

8.3.1. Резултати испитивања 3D BHST у проласку кроз тунел

Слика 87а приказује промене вредности p и $(\partial p / \partial t)$, слика 87б, по времену, за брзине $V \leq 500$ km/h, добијене нумеричким симулацијама за 3D BHST, за невискозно и вискозно струјање.



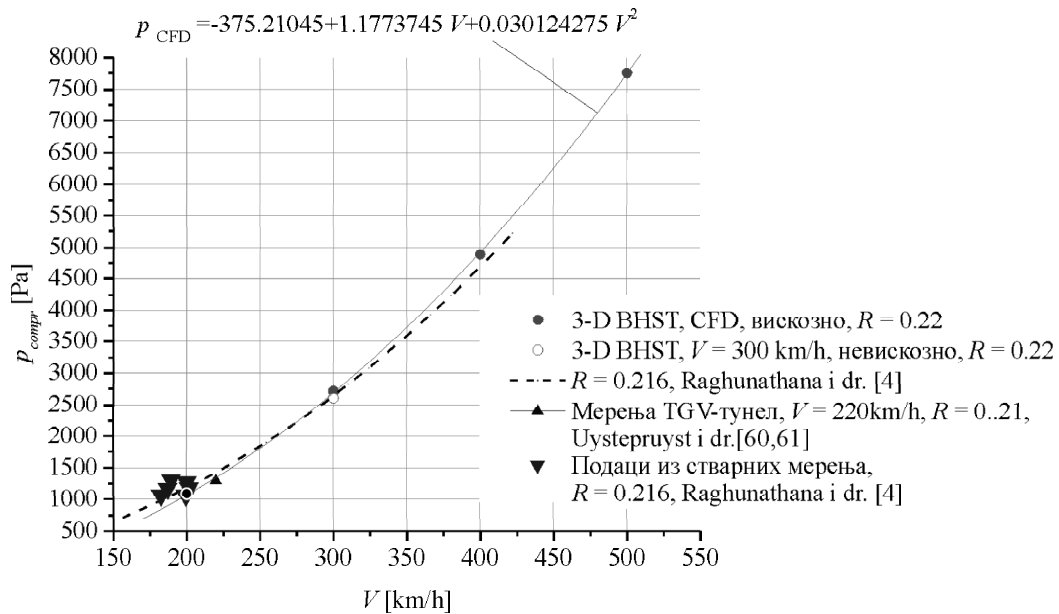
(а) промена p на фиксираним мерним местима унутар тунела у функцији времена



(б) промена $(\partial p / \partial t)$ по времену

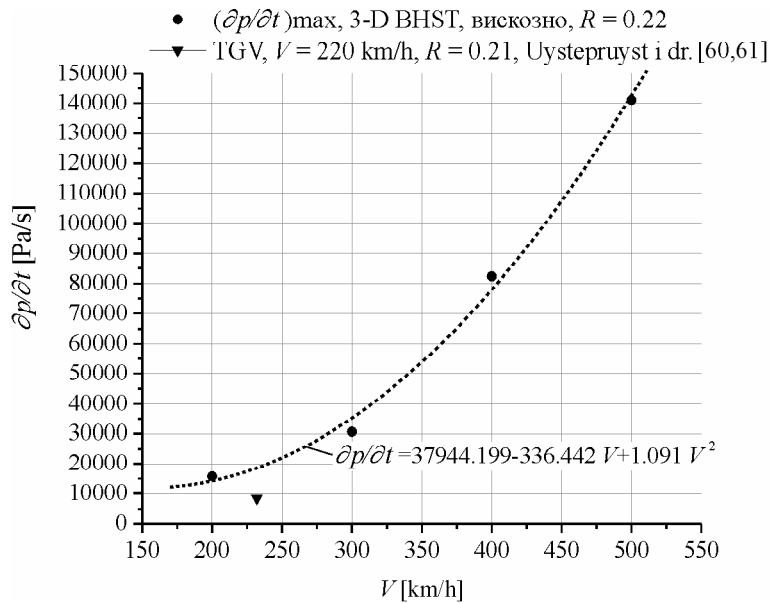
Слика 87 Промена притисака и градијената притисака кроз историју догађаја мерени у фиксираној тачки унутар тунела

Слика 88 приказује поређење p_{max} из нумеричких симулација (слика 87а) са резултатима из стварних мерења [4], у функцији брзине кретања, $V \leq 500$ km/h .



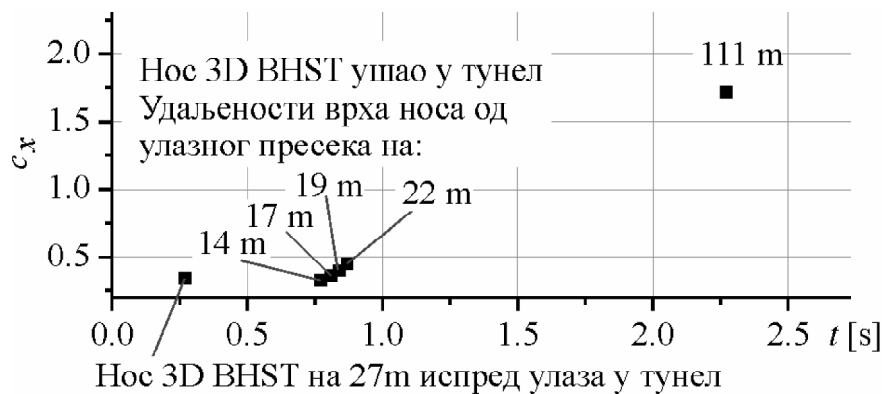
Слика 88 Поређење p_{max} за 3D BHST у проласку кроз тунел из нумеричких симулација са калкулацијом [4] и мерењима [60,61], $V \leq 500$ km/h

Слика 89 приказује $(\partial p / \partial t)_{\max} = f(V)$, $V \leq 500$ km/h за нумеричке симулације са вискозним флуидом.



Слика 89 Промена $(\partial p / \partial t)_{\max}$ са брзином кретања, вискозно струјање, $R = 0.22$, и резултати из мерења за HST TGV, $V = 220$ km/h, $R = 0.21$ [60,61]

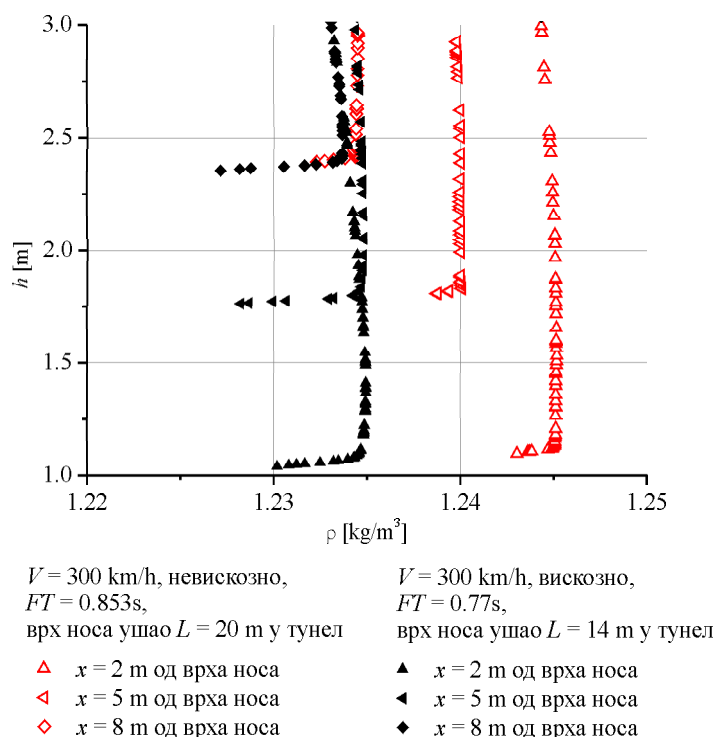
Слика 90 приказује промену c_x по времену, односно, положају 3D BHST при $V = 300$ km/h.



Слика 90 Вредности c_x за 3D BHST на отвореној прузи и у проласку кроз тунел, $V = 300$ km/h

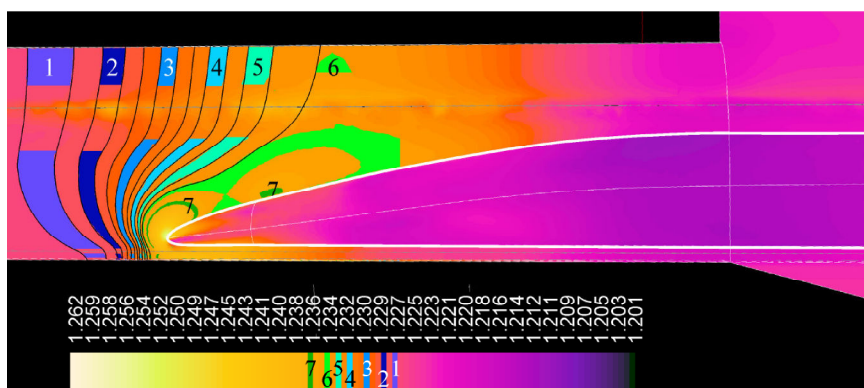
Слика 91 приказује расподелу ρ по висини, од површине модела на изабраном месту, до висине 3 m, у зони у којој се очекује појава критичног

локалног струјања. Изабрана су три места на контури 3D VHST дизајнирана биомимикријом ($x = 2 \text{ m}$, 5 m , 8 m , мерено од врха носа).



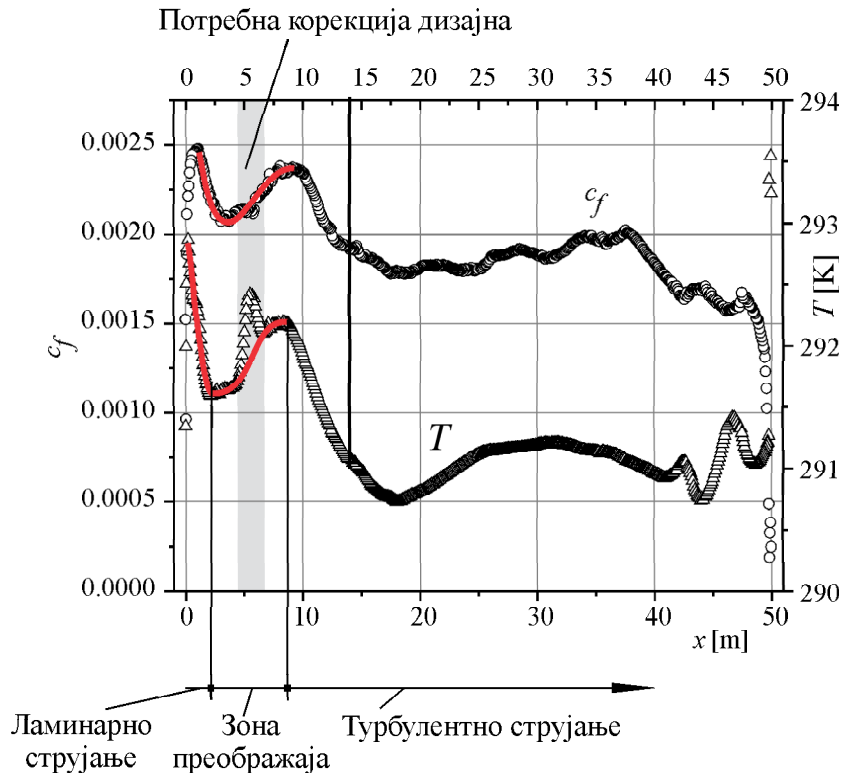
Слика 91 Распореда ρ по висини, код невискозног и вискозног струјања, $V = 300 \text{ km/h}$ (извршена корекција резултата помоћу специјализованог подпрограма)

Слика 92 приказује расподелу изо-густинских линија у равни симетрије око 3D VHST, при брзини $V = 300 \text{ km/h}$, у тренутку када се врх носа VHST налази на растојању $L = 14 \text{ m}$ од улаза у тунел ($FT = 0.77 \text{ s}$).



Слика 92 Изо-густинске линије у равни симетрије око 3D VHST у тунелу, $V = 300 \text{ km/h}$, $FT = 0.77 \text{ s}$, нос је ушао у тунел $L = 14 \text{ m}$

Слика 93 приказује расподелу коефицијента трења, c_f , и T по горњаци 3D BHST у равни симетрије при брзини $V = 300 \text{ km/h}$ у тренутку када се врх носа BHST налази на растојању $L = 14 \text{ m}$ од улаза у тунел ($FT = 0.77 \text{ s}$).



Слика 93 Расподела коефицијента трења c_f и T по горњаци у равни симетрије, $V = 300 \text{ km/h}$, вискозно, протекло време $FT = 0.77 \text{ s}$, нос је ушао у тунел $L = 14 \text{ m}$

8.3.2. Тумачење резултата

Резултати испитивања 3D BHST су анализирани са два полазишта. Са једне стране су посматрани параметри струјања p_{max} и $(\partial p / \partial t)$ у времену и као функције брзина кретања воза, док су са друге стране анализирани расподела густина и изо-густинских линија.

Како је изабрана оперативна брзина $V = 300 \text{ km/h}$ при овој брзини је испитана расподела притисака за невискозни и вискозни флуид. Уочено је да су у оба случаја вредности p_{max} , добијене у тачки унутар тунела, приближно једнаке по вредности, $(p_{max})_{300} = 2709 \text{ Pa}$, али су њихове расподеле у времену доста

различите, слика 87а. Код примењеног модела са невискозним флуидом, p_{max} је постигнут у дужем временском интервалу, за приближно 0.1 s већем него што је то случај код вискозног струјања и са блажим трендом промене вредности, слика 87а. Слична појава је примећена и при брзини $V = 500$ km/h. Како је циљ увођења вискозног струјања био да се изврши кориговање вредности параметара струјања, у оквиру овог истраживања корекција је изведена на временском интервалу стварања компресионог таласа у тунелу. На основу ових вредности и потребе да се изврши анализа струјања, направљен је избор да се корекције вискозним струјањем примене за наставак истраживања при брзинама $V = 200$ km/h – 500 km/h.

Слика 87а показује значајну зависност вредности p_{max} и расподеле p од брзине кретања на интервалу $V = 200$ km/h – 500 km/h. Вредности p_{max} се крећу у интервалу од $(p_{max})_{200} = 1055$ Pa при $V = 200$ km/h, до $(p_{max})_{500} = 7754$ Pa при $V = 500$ km/h, за вискозно струјање. Вредности p_{max} су у значајном порасту са порастом брзине кретања, а бивају достигнуте у све краћем времену такође са порастом брзине кретања. Функције расподела p са порастом брзине кретања имају стрмији карактер. Према [4] вредности p_{max} су зависне од брзине воза, геометрије воза (дужине и површине попречног пресека) и тунела (дужине, површине попречног пресека и облика улазног и изласног пресека), запречавања тунела, врсте шина, односно, облика подлоге унутар и ван тунела и др., али не зависе од облика носа HST.

Расподела $(\partial p / \partial t)$ по времену дала је квантитативни приказ промене притиска у времену. Утицај облика носа HST се одражава на вредности и облик криве расподеле $(\partial p / \partial t)$, те служи као један од критеријума за процену квалитета дизајна [4,56,57]. Резултати испитивања VHST су показали тренд повећања вредности $(\partial p / \partial t)$, слика 87б. Вредности $(\partial p / \partial t)$ су значајно различите у случајевима вискозног $(\partial p / \partial t)_{300} = 30\,671$ Pa/s, и невискозног струјања, $(\partial p / \partial t)_{300} = 14\,929$ Pa/s при $V = 300$ km/h, што је протумачено као последица изабраних улазних параметара за калкулације. Према подацима са слика 87б протумачено је да за услове вискозног струјања, реалистичног случаја, дизајн

BHST мора да се подвргне даљем процесу оптимизације.

Посматрано на целом опсегу брзина, $(\partial p / \partial t)$ узима вредности од $(\partial p / \partial t)_{200} = 16\,675 \text{ Pa/s}$ до $(\partial p / \partial t)_{500} = 140\,963 \text{ Pa/s}$ са трендом раста од најмање до највеће брзине. Поређењем резултата уочено је да су $(\partial p / \partial t)_{200}^{viskozno} \approx (\partial p / \partial t)_{300}^{neviskozno}$, док су $(\partial p / \partial t)_{200}^{viskozno}$ веће од очекиваних што такође указује на могућност утицаја улазних параметара на ток и резултате прорачуна.

Зависност промене p_{max} од брзине за различите конфигурације воз-тунел и поређење са теоријским и мереним вредностима из литературе показује добро слагање на интервалу брзина $V = 200 \text{ km/h} - 400 \text{ km/h}$, слика 88. Вредности p_{max} из нумеричких симулација за вискозно струјање се разликују од вредности са теоријске криве [4] и то за приближно $(\Delta p_{max})_{200}^{CFD-teorija} \approx -98 \text{ Pa}$, $(\Delta p_{max})_{300}^{CFD-teorija} \approx 47 \text{ Pa}$, $(\Delta p_{max})_{200}^{CFD-teorija} \approx 200 \text{ Pa}$. Функција зависности p_{max} од брзине је другог степена али је благо заротирана око тачке која одговара $V = 330 \text{ km/h}$, што је може бити последица и вредности добијених теоријским путем и примењене нумеричке методе. Посматрајући вредности из мерења које су меродавне за процену квалитета дизајна BHST и изабране нумеричке методе, може се протумачити да је вредност из симулација блиска вредностима из мерења са стварним возовима као што приказују [4,56,57] за слично запречавање тунела. Такође је протумачено да је утицај изабраног густинског солвера минималан те да су добијени резултати валидни у поређењу са стварним мерењима.

У литератури је пронађен ограничен број реалних случајева са којима се може извршити директно поређење, тако да је у овом раду извршено поређење зависности $(\partial p / \partial t)_{max}$ од брзине са једним случајем. Крива зависности $(\partial p / \partial t)_{max}$ од брзине кретања је апроксимирана функцијом другог степена брзине. Разлика $(\partial p / \partial t)_{200}^{CFD-TGV} \approx -7000 \text{ Pa}$ је протумачена разликом у конфигурацијама возова и тунела, брзини кретања и примењеним солвером. Посматрајући вредност из нумеричких симулација (слика 89 и слика 87) предлаже се проширење дизајна експеримента како би се испитао феномен промене $(\partial p / \partial t)_{max}$ и прецизније

одредила зависност $(\partial p / \partial t)_{\max}$ од брзине, као и квалитет дизајна ВНСТ на основу ове вредности.

Према добијеним резултатима и поређењу са подацима из литературе може се протумачити да се дизајн 3D ВНСТ квалификовао за даљи процес оптимизације. Унапређења дизајна експеримента су неопходна, унапређење ИТ ресурса, као и унапређења и проширења истраживања са различитим нумеричким методама коригованих употребом турбулентних модела.

Слика 90 приказује да се вредност коефицијента укупног аеродинамичког отпора c_x на отвореној прузи (на 27 m испред тунела) до положаја (времена) уласка дела носа дизајнираног биомимикријом, у дужини од 14 m приближно једнака ($\Delta c_x \approx 0.0102$). Даљим напредовањем, све док у тунел не уђе скоро читава локомотива, у дужини 22 m, $\Delta c_x \approx 0.12$. Аутор није пронашао адекватне случајеве из стварних мерења. Према анализи из [4] протумачено је да тренд промене притиска прати тренд промене c_x , али директно поређење није могуће због неусаглашености параметара и приказа (исказан укупни отпор кретању, веће дужина тунела и композиције и др.).

Слика 91 приказује кориговане вредности густина у области граничне површине клизне мреже изведене по препоруци [92] помоћу специјализованог подпрограма покренутог из текстуалног корисничког интерфејса. Одступања од вредности која су присутна у графичком приказу солвера према [92] нису стварна одступања, а корекције података дају у резултату коректне вредности. Ради детаљнијег анализирања квалитета дизајна 3D ВНСТ обављена је анализа расподеле густина по висини тунела, почев од површине горњаке до границе клизне мреже где је очекивано место за промене. Слика 91 пореди расподеле густина у два положаја ВНСТ у односу на улазни пресек при оперативној брзини $V = 300 \text{ km/h}$ за примењен вискозни и невискозни флуид. Бионички дизајниран део носа је $L = 14 \text{ m}$, до дужине $L = 18 \text{ m}$ је извршено свођење на профил локомотиве радијусом, док је $L = 20 \text{ m}$ на делу локомотиве константног попречног пресека. Имајући ове податке у виду, може се протумачити да у обе позиције носа, у односу на улаз тунела ($x = 2 \text{ m}, 5 \text{ m}, 8 \text{ m}$, мерено од врха носа), на свим локалним позицијама, у првом реду ћелија мреже $\rho_{lok\ povrs} < \rho_{max}$ у блиском окружењу, у области граничног слоја код вискозног струјања. Такође, уочљиво је

да су вредности $\rho_{\max} \leq \rho_{tunnel}$ у свим позицијама, осим код вискозног струјања на позицији $x = 8 \text{ m}$, слика 91. Облик расподела густина на приказаним местима не указује на појаву локално критичног струјања у 3D случају. Расподеле густина су сличне по облику одговарајућима на горњаци 2D BHST на месту $x = 8 \text{ m}$, слика 67 ($M = 0.2; 0.3$), у ком је струјање ограничено.

Даља анализа се односи на распоред изо-густинских линија у равни симетрије тунела ограничене дужине, када је у тунел ушао бионички дизајниран део воза. Аутор није пронашао у [92] начин кориговања резултата на ниво континуалног сликовног приказа расподела параметара струјања, тако да су видљиви трагови нумеричких грешака по линији интерфејса (између непокретне и клизне мреже). У сврху кориговања и анализе резултата, а у складу са објашњењем произвођача [92], у области која обухвата интерфејс (делом у кроз област непокретне и делом кроз област покретне мреже) извршено је ручно премошћавање вредности како би се приказао феномен.

Изнад носа 3D BHST уочен је карактеристичан облик обротог „S“, што је протумачено последицом присуства подкритичног струјања, слика 92, уколико се посматра сличност са путањама флуидних делића на горњаци 2D бионичког водомара, изо-густинских линија изнад горњаке 2D BHST. Свакако струјне слике у случајевима 2D и 3D струјања су значајно различите, те се кроз анализу расподеле густина и изо-густинских линија може само нагласити сличност, но добијени резултати потврђују да је биомимикрија у 3D случају дала допринос квалитету дизајна, као и да је оправдан наставак истраживања и проширење дизајна експеримента на струјања у 3D простору уз примену комбиноване методе за одређивање сличности струјања.

У наставку истраживања се препоручује проширење дизајна експеримента са 3D бионичким водомаром и 3D BHST.

Изо-густинске линије у области испред носа су континуалне криве (слика 92, линије 1 – 5). Изнад носа у близини оквашене површине изо-густинске линије су дисконтинуалне, док су нешто даље, у пољу изнад носа, континуалне, као и у струјном пољу испред. Слика 92 показује да је прекид изо-густинских линија изнад горњаке BHST настао над површином у зони од $4 \text{ m} < x < 6 \text{ m}$ што није очекивано, на основу расподеле изо-густинских линија око 2D BHST добијених

комбинованом методом за одређивање сличности струјања. Анализом је протумачено да дисконтинуитети највероватније потичу од неправилности у дизајну 3D BHST.

Са циљем провере овог тумачења су анализирани расподели коефицијента трења, c_f , и T у равни симетрије BHST. Слика 93 показује дисконтинуитете у расподелима c_f и T . За BHST чији нос је ушао у тунел до дужине $L = 14$ m, при $V = 300$ km/h, минималне вредности c_f и T дефинишу почетак зоне преображаја струјања на око 2.5 m од носа BHST. Позиције при којима су $c_{f\ max}$ и $T_{\ max}$ су очекиване позиције потпуног преображаја у турбулентно струјање, слика 78 и Прилог 11. Анализа вредности $c_{f\ max}$ и $T_{\ max}$ показала је да је $T_{\ max}$ достигнута доста ближе, на удаљености од 5 m – 6 m од врха носа, слика 93. У истој области благо је измењен и c_f , док је $c_{f\ max}$ на растојању $x \approx 8$ m. Са друге стране на растојању од $x \approx 8$ m уочљив је други врх у расподели T .

У складу са анализом и закључком из [173] (Прилог 11), протумачено је да постоје неправилности облика горњаке која су довела до неочекиваног скока у расподели T , у области 5 m – 6 m од врха носа, слика 93. Направљена је поновна анализа дизајна и уочена су одступања од жељеног облика.

Метода која је анализирањем облика и расподеле изо-густинских линија, c_f и T , довела до индикације и лоцирања места неправилности у дизајну може се препоручити као додатна метода за контролу квалитета конструисаног дизајна.

8.3.3. Закључак

Дизајн 3D BHST је у кроз нумеричка испитивања показао слагање у вредностима максималних притисака са теоријским и мереним на опсегу брзина $V = 200$ km/h – 500 km/h. Добијени градијенти притисака нису могли бити адекватно упоређени са подацима из литературе због великих разлика у параметрима, брзинама струјања, геометријском облику воза и тунела. Расподеле притисака и градијената притисака су показале очекиван карактер промене, зависност од квадрата брзине кретања воза.

Уочена је и сличност у расподели густина по висини тунела на три позиције са расподелима добијеним у 2D простору за бионички модел водомара и BHST.

Сличност расподела густина и изо-густинских линија је показала оправданост примене методе биомимикрије и комбиноване методе. Детаљнија анализа захтева проширење обе методе и ИТ ресурса за одређивање сличности струјања и премошћење сличности за струјање у тунелу.

Анализа c_f и T ради карактеризације облика указала је на одступања од облика (око 2mm) на основу скоковите промене T_{max} у зони где се очекивао регуларни преображај струјања. Закључено је да је у даљим истраживањима потребно извршити редизајн VHST и поновити испитивања. Овакав начин се показао једноставним за примену и лоцирање одступања контура од оптималних, у конструкцијском смислу. Контрола квалитета дизајна путем провере параметара струјања, који су можда и најосетљивији на промене облика контуре, c_f и T препоручљива је и применљива и за друге врсте дизајна HST, како у тунелу тако и у возњи на отвореној прузи.

Из анализа резултата закључено је да је 3D VHST довољно добро аеродинамички дизајниран да би се квалификовао за полазни дизајн у даљем процесу оптимизације кроз наставак истраживања.

9. ЗАКЉУЧЦИ

У овој дисертацији је приказана методологија дизајнирања возова великих брзина, која се заснива на биомимикрији, а која укључује низ метода примењених за:

- дефинисање и избор природних облика,
- одређивање сличности струјања,
- избор услова, критеријума и параметара оптималног аеродинамичког дизајна возова,
- конструисање дизајна воза,
- нумеричког испитивања дизајна,
- верификације резултата сопствених истраживања (нумеричких и експерименталних) и истраживања из доступне литературе.

На основу анализа различитих облика животиња и њихових животних навика избор је сужен на две групе. Прва група су животиње из мора, из групе предатора (ајкула, сабљарка, баракуда, кечига, штука и сл) и делфина, који се углавном крећу карангиформно, и чији облик тела има C_{xmin} у односу на запремину тела и услове пливања. Из групе птица изабран је водомар, који је послужио као био-инспирација при дизајнирању воза Шинкансен, Јапан.

Водомар је за потребе примене биомимикрије, стицања нових сазнања о облику и маневру обрушавања – зарањање, којим лови, детаљно испитан различитим методама (фото-документација, 3Д скенирање, фотограмetriја, микроскопска, мерење храпавости). Реконструисан модел је потом модификован и искоришћени за анализу и моделирање биомеханике водомара, хидродинамичких испитивања и нумеричких симулација мултифазног струјања. Испитивања су показала да су нормализоване расподеле координата контура горњака и доњака водомара блиске нормализованим расподелама контура балистичких и профила који се препоручују за надзвучни лет са минималним отпором. Добијени

реконструисани модели су доброг квалитета за потребе биомимикрије, што је потврдило коришћене методе мерења узорака из природе у поступку дефинисања био-инспирисаних облика. Обзиром да су природни облици неправилни, изузетно комплексни, и у смислу облика и карактеристика површина, једном методом мерења није могуће добити исправан облик, већ мултидисциплинарним испитивањима и реконструкцом комбинованих модела.

Постављене хипотезе су потврђене, што у научноистраживачком смислу значи неопходност укључивање и других научних области и других савремених метода како би се проширило мултидисциплинарно истраживање, зависно од изабраних и доступних природних узорака.

У раду су приказана нова сазнања о биомеханици кретања водомара и дизајну његовог кљуна, такође и животиња из мора, са жељом да се скрене пажња на важност сарадње кроз мултидисциплинарне тимове, прикупљање нових информација и даље унапређење сазнања о биомеханици, животу и облику приказаних, али и многих других животиња. Знање и разумевање природних разлога и услова који су довели до специфичних облика различитих животиња је дуготрајан процес, али и једини који може дати исправне полазне основе и критеријуме за избор узорака и дизајна за примену, или доношење других одлука у процесу примене биомимикрије као методе оптимизације воза за велике брзине, али и других превозних средства. За потребе примене биомимикрије, разумевања биомеханике и моделирања облика и кретања изабраних узорака, од велике користи би било проширење истраживања у области биологије, посебно дефинисања основних облика појединих животиња, као и опсежнија мерења параметара облика, понашања и услова који описују кретање у природи, База података са наведеним подацима би се искористила за дефинисање улазних података за даља нумеричка и експериментална истраживања. Такође, из испитивања је закључено да је неопходна примена савремених прецизних мерних уређаја и напреднијих ИТ ресурса.

Испитивања 2D BHST су показала да су за вожњу отвореном пругом, до брзине 300 km/h, најпогоднији облици BHST – водомара и – баракуде и да комбинација параметара (издужење, положај носа и др.) ова два дизајна има потенцијала за примену на дизајн у равни симетрије код 3D BHST. Основни

недостатак који конфигурације BHST – водомара, код ког је примењен дизајн кљуна водомара геометријски сличан положају кљуна у односу на воду при маневру обрушавања – зарањање, је у појави ламинарног отцепљења на врху носа и појави ударног таласа испод репа воза при брзинама $M = 0.4$, како при возњи отвореном пругом тако и у тунелу. Остали дизајни су се показали неприкладним за даљу примену због великих коефицијената отпора или непожељне расподеле притисака. Испитивања BHST – водомара у слободном лету су указала на неопходност провере дизајна, не само методама које нуде програми за параметарско моделирање, већ и кроз праћење струјних параметара који указују на недостатке дизајна. У раду је приказана метода названа „Махова лупа“ код које је BHST – водомара подвргнут испитивању у имагинарним условима, слободном лету до брзине $M = 0.9$. Анализом расподеле статичких притисака на горњаци и доњаци профила лоцирано је место на ком контура одступа од номиналне вредности. На крају су дефинисани основни параметри контуре 3D BHST, и то исправљање контуре доњаке, позиционирање врха носа на најнижу тачку, примена биомимикрије са горњаком кљуна водомара и свођење контуре водомара на контуру тела воза радијусом.

Комбинована метода за одређивање сличности струјања слободне површине воде при зарањању водомара и струјања око 2D BHST се састоји од хидродинамичких експеримената и нумеричких симулација мултифазног струјања. Комбинована метода је заснована на хидрауличкој аналогiji, при чему је метода хидрауличке аналогije у овом истраживању примењена у подкритичном режиму струјања и на нови начин. Хидродинамички експеримент је верификован са природним феноменом, а нумеричке симулације са хидродинамичким експериментом. Хидродинамичким експериментом су дефинисани облици слободних површина воде при зарањању бионичког водомара при брзини $V_0 \approx 0.6$ m/s, под углом $\theta \approx 83^\circ$ и у вертикалном паду,. Из нумеричких симулација су за три брзине $V_0 = 0.6$ m/s, 6 m/s, 10 m/s, $\theta \approx 83^\circ$, одређени облици методом запреминских удела фаза. Такође, анализирано је и струјно поље испод површине воде, како би се на основу нумеричких симулација одредио начин на који се формирају таласи слободне површине воде. Резултат комбиноване методе, који има практични значај код дизајнирања методом биомимикрије, је критеријум

избора услова и геометријских параметара дизајна. За изабрани модел бионичког водомара и различите брзине зарањања уочено је да је подкритично струјање представљено појавом врло благих таласа слободне површине, који започињу одвајање од површине кљуна испод или врло близу нивоу слободне површине док се врхови таласа не истичу значајно изнад површине воде. Зависност израчунатих Fr_C од L/H за оквашени део тела при различитим брзинама је показала минималне и приближно непроменљиве вредности при брзини $V_0 = 0.6 \text{ m/s}$, те је искоришћена као први критеријум, критеријум за избор услова испитивања (опсега брзина) за испитни бионички модел. При овој брзини израчунате вредности Fr_A (тачка додира) од Re_L су показале незнатне промене при вредностима Re_L које одговарају параметри дизајна $2.7 < L/H < 3.31$. Критеријум за избор дизајна који ће проузроковати подкритичне промене на слободној површини воде је критеријум сталности Fr_A (тачка додира) при изабраним условима кретања, при којима не долази до појаве изразених врхова таласа. Комбинована метода је на лак и брз начин успела да дефинише параметре дизајна L/H бионичког водомара за одређене услове зарањања, при којима не долази до појаве изразених таласа. На исти начин овом методом се могу испитати и други дизајни али уз препоруку да се унапреди метода мерења са уређајима за прецизније снимање као што су брзе камере, и ИТ ресурси за захтевне нумеричке симулације мултифазног струјања.

Помоћу комбиноване методе за одређивање сличности струјања, анализом расподеле притисака и путања флуидних делића испод површине воде дефинисан је и начин формирања таласа слободне површине воде при зарањању водомара. Слободна површина воде је формирана од флуидних делића са дефинисаним путањама. Путање флуидних делића започињу на површини кљуна водомара, док се са друге стране састају и формирају слободну површину воде. Кроз време, зарањањем кљуна све дубље у воду, флуидни делићи се померају од површине кљуна и путују по путањама, које су дефинисане нивоима једнаких притисака, тако да кроз време, флуидни делићи покренути кљуном из стања мировања „гурају“ испред себе оне који још нису у кретању, и тако редом све док не дођу до слободне површине и пратећи је не изгубе енергију далеко од места зарањања.

Комбинована метода за одређивање сличности је кроз поређење релативних односа параметара струјања, облика таласа у води и расподеле густина у струјном

пољу око BHST показала да постоји сличност између облика слободне површине воде око кљуна водомара у меневру обрушавање – зарањање и расподеле густина по вертикалном правцу у струјном пољу око BHST.

Анализа сличности струјања воде око бионичког водомара и ваздуха око BHST је показала да сличност струјања постоји у подкритичном режиму. Сличност струјања се односи на сличности у расподелама висина контуре слободне површине воде, у односу на тренутни положај водомара при зарањању и мирну воду, и расподелу густина управно на правац кретања BHST, посматрану на месту сличном месту појаве таласа и у односу на густину у струјном пољу. Такође, у условима непотпуне геометријске сличности, уочена је сличност између путања флуидних делића испод површине воде и изо-густинских линија у струјном пољу око BHST при проласку кроз тунел. Сличност струјања постоји на целом опсегу брзина са врло малим разликама, због тога што су услови струјања подкритични. На овај начин је „премошћена“ сличност струјања за два не потпуно слична модела, што је врло чест случај у пракси.

Комбинована метода за одређивање сличности струјања је мултидисциплинарна метода која се може применити и на друге облике испитиних модела и услове струјања. Кроз будућа испитивања се препоручује унапређење методе укључивањем уређаја за прецизно мерење топографије слободне површине воде, мерења вектора брзина и визуелизацију путања флуидних делића као што су на пример брзе камере, PIV или LDA. Такође прецизнији подаци из нумеричких симулација би се остварили уз употребу напреднијих ИТ ресурса.

Модел 3D BHST је креиран на искуствима теорије и праксе која се стандардно примењује у ваздухопловној индустрији. Основна контура бионичког дизајна смештена је у равни симетрије. Бионички дизајн у лонгитудиналној равни симетрије је изведен према закључцима испитивања 2D BHST. Основна контура је инспирисана горњаком кљуна водомара, под воза је паралелан са моделом тла, а врх носа је креиран у виду радијуса, а бионички део контуре је радијусом спојен са контуром тела воза. У погледу одозго, с обзиром на комплексни дизајн дефинисана је бочна изводница, чија је пројекција у врху изведена налик врху кљуна водомара и потом је сведена делом контуре доњаке кљуна и кривом до

споја са телом воза. Са циљем да се постигне расподела површина 3D BHST блиска оптималној, вршена је измена облика кривине бочне изводнице, по угледу на методу једнаких површина која се примењује ради смањења отпора профила при надзвучним брзинама. За дизајн у стварној величини, са издужењем носа 6, постигнута је нормализована расподела површина попречних пресека блиска елипсоиду (за оптимални облик у литератури се наводи параболоид) и изведеном дизајну CHR380A и Шинкансен серије 700. У анализу је укључена и нормализована расподела површина кљуна водомара добијена фотограметријом. На основу поређења са вредностима из литературе, нормализоване површине кљуна су мање од оптималних (параболоид) што указује да дизајн кљуна водомара није препоручљив дизајн у природном облику.

Дизајн 3D BHST креиран биомимикријом је испитан нумеричким симулацијама при проласку кроз тунел, при брзинама $V = 200 \text{ km/h} - 500 \text{ km/h}$. Нумеричке симулације са клизним мрежама су омогућиле праћење струјних параметара у времену. Изабран је интервал времена од почетка кретања, кретање отвореном пругом, до тренутка када је нос BHST ушао у целости у тунел. У овом интервалу је очекивано да се појави нагли пораст вредности притиска и његовог градијента, мерен на зиду тунела. Посматрано у времену, притисци прорачунати на зиду тунела су достигали вршне вредности у складу са брзином кретања. Мање брзине кретања су узроковале мање и спорије промене притиска на мерном месту.

Зависност максималних вредности притисака у тунелу од брзине кретања добијена нумеричким симулацијама је врло блиска теоријској, на интервалу брзина $V = 200 \text{ km/h} - 500 \text{ km/h}$. Пораст притиска на мерном месту у тунелу је функција квадрата брзине кретања. Вредности притиска добијене на интервалу времена током ког нос воза прилази и улази у тунел су у складу са вредностима из стварних мерења наведених у доступној литератури при брзини $V \approx 200 \text{ km/h}$. Вредности градијента притиска, на истом посматраном интервалу су при брзини $V \approx 200 \text{ km/h}$ мање од добијених стварним мерењима. Поређења резултата из нумеричких симулација за вискозно и невискозно струјање су показала сличност у појавама и максималној вредности притиска при $V \approx 200 \text{ km/h}$, но нису потврдиле очекиване вредности градијента притисака на изабраном интервалу брзина.

За модел 3D BHST је анализирана и сличност струјања у равни симетрије, када је нос ушао у тунел, са струјањем воде око кљуна водомара, на сличним местима. Уочено је да постоји сличност расподеле локалне густине по правцу управном на правац кретања, и облика слободне површине око кљуна, те је закључено да је струјање, посматрано на сличним местима, подкритично и у случају 3D BHST. Изо-густинске линије су, као и у случају 2D BHST у бесконачном тунелу, облика обрнутог слова „S“, нешто другачије распоређене али присутне. Код 3D BHST су уочени прекиди изо-густинских линија блиско површини модела, што је накнадним проверама дизајна и струјних параметара коефицијента отпора и температуре, протумачено као последица неправилности у дизајну.

Према добијеним резултатима за 3D BHST закључено је да се дизајн креиран биомимикријом као методом аеродинамичког дизајнирања воза за велике брзине, може посматрати као полазни дизајн за даљи процес оптимизације, јер је у поређењу са изведеним дизајнима и испитивањима показао добре аеродинамичке карактеристике при критичним условима кретања кроз тунел.

Кроз испитивање 3D BHST, биомимикрија се потврдила као метода избора за аеродинамичко дизајнирање. Препоручује се наставак истраживања уз оптимизацију параметарског моделирања воза и проширење експеримента, , увођењем најсавременије мерне опреме за прецизније одређивање полазних података неопходних за комплексни прорачун.

На основу резултата истраживања закључено је да се биомимикрија као метод дизајнирања показала као научно оправдан метод, оптималан, брз и практично изводљив начин за оптимизацију дизајна у односу на друге методе у примени. Биомимикрија као метода аеродинамичког дизајнирања је пре свега мултидисциплинарна метода, и за будућа истраживања неопходно је користити најсавременије методе и опрему за одређивање улазних параметара. Поред ефикасности у процесу примене биомимикрије за добијање финалног дизајна, може се истаћи и уштеда у времену, ресурсима и трошковима истраживања који су уобичајено највећи у првим фазама израде прототипова.

Метода биомимикрије за аеродинамичко дизајнирање воза великих брзина се показала као оптимална метода, која штеди време и смањује трошкове у раној

фази развоја дизајна. Отворила је врата многим питањима, али је истовремено створила и могућности за истраживања из области које до сада нису биле укључене у процесу дизајнирања возова за велике брзине.

9.1. Нова научна информација

Модел примене биомимикрије као методе за аеродинамичко дизајнирање воза за велике брзине је изведен према алгоритму у коме се помоћу комбиноване методе за одређивање сличности струјања, извођењем експерименталних и нумеричких испитивања долази до крајњег резултата – бионичког дизајна.

Истраживање, анализа резултата и закључци су дали следеће нове научне информације и научни допринос:

- у приступу и посматрању животињских јединки и њихових навика, у смислу прикупљања, анализе и примене података за биомимикрију на возове за велике брзине
- експериментално и нумерички дефинисане геометрије различитих животињских узорака, са параметрима дизајна представљају организоване податке, који се могу употребљавати и са другом наменом у областима аеродинамике превозних средстава или балистике биомимикријом.
- по први пут је кроз једну методу – комбиновану методу за одређивање сличности струјања, и њене елементе, посебно хидродинамичка истраживања, обављено испитивање бионичког облика и дизајнирање ВНСТ. Иако су појединачни елементи методе у употреби у научној и стручној пракси дуго времена, њихова примена није никада комбинована на овај начин и анализирана са сврхом аеродинамичког дизајнирања возова. Нова метода дизајнирања возова за велике брзине дефинише редослед и начин примене експерименталних и нумеричких испитивања, методу анализе и критеријуме према којима је створена метода која је оптимизирана за употребу у научне и индустријске сврхе. Приказана комбинована метода за одређивање сличности струјања је практична за примену, изводљив на доступним ресурсима која је у крајњем резултату

овог истраживања дефинисала дизајн који се може употребити за даљу оптимизацију понављањем овог поступка уз унапређења модела, мерних метода и поступка обраде података или неком од других метода које су данас у примени.

- нумеричка метода удела запреминских фаза код двофазног струјања – VOF је у овом истраживању примењена по први пут у истраживањима из области биомеханике за одређивање параметара кретања тела и реакције у виду таласа створених зарањањем тела у воду. Анализа облика таласа је показала је детаље који су недостајали код хидродинамичких испитивања. Синтеза различитих метода испитивања је показала неопходност њихове употребе кроз мултидисциплинарна истраживања. Као део комбиноване методе, приказан је и нови приступ у верификацији нумеричке методе са хидродинамичким и природним догађајем.
- анализа резултата из мултидисциплинарних истраживања је приказала потпуно нов начин у приступу процесу анализе,
- постављени су критеријуми према којима се сужава избор бионичких или других дизајна, а добијени на основу једне – комбиноване методе што значајно доприноси смањењу времена и трошкова при дизајнирању.
- један од доприноса је и дизајнирање референтног бионичког модела за аеродинамичка испитивања, чијим истраживањима са измењеним параметрима се очекују нови доприноси у области аеродинамичке оптимизације облика,
- уведена је нова метода за истраживање струјања по површинама модела у подзвучном аеротунелу (Т-32, ВТИ) помоћу ИЦ термографије. Изведена су мерења расподеле температура, а након верификације са визуелизацијом струјања извршена је и карактеризација струјања. Метода је применљива и на све друге моделе, и услове струјања у подзвучној, око– и надзвучној области струјања,
- нумеричка метода са клизним мрежама је примењена за решавање комплексног струјања око воза у тунелу. Анализа резултата 3D бионичког воза, дизајнираног комбинованом методом за одређивање

сличности струјања, је указала на неопходност примене вискозног струјања за детаљна испитивања параметара струјног поља, и одређивање расподела густина у равни симетрије и изо-густинских линија – једног од критеријума оправданости коришћења одређеног бионичког облика,

- уведене су нове методе квалитета дизајна који су засновани на анализи параметара струјања, осим постојећих метода кроз CAD/CAM.
 - прва метода је названа „Маховом лупом“ у којој је BHST постављен у имагинарни слободни лет при високим подзвучним и надзвучним брзинама, довољно прецизна метода да се лако лоцира место дисконтинуитета на контури
 - друга метода је праћење расподеле изо-густинских линија, која грубо лоцира место дисконтинуитета на контури
 - трећа метода за лоцирање одступања контура дизајана од номиналних је метода анализе расподеле c_f и T у изабраној равни, прецизна метода. Недостатак методе је у потешкоћама при дефинисању контуре на 3D моделу за приказ струјних параметара у случајевима комплексних дизајна.

Нова метода дизајнирања воза за велике брзине дефинише редослед и начин примене експерименталних и нумеричких испитивања којима се може доћи за најкраће време, уз најмања средства и доступне ресурсе до концептуалног дизајна. Примењене нумеричке методе за одређивање аеродинамичких и хидродинамичких карактеристика дизајна воза за велике брзине, код нестационарног струјања, су: динамичке и клизне мреже и модел слободних површина.

Методе експерименталне аеродинамике и хидродинамике у овој дисертацији добијају потпуно нов начин примене и представљају део методе, при чему уједно служе анализи резултата истраживања и верификацији резултата нумеричких симулација зависно од фазе рада.

9.2. Отворена подручја истраживања

За потребе развоја и унапређења предложене оптимизације методом биомимикрије саме методе дизајнирања као и методе оптимизације дизајна неопходно је и подржано детаљније биолошко, биомеханичко, механичко и хидродинамичко истраживање маневра обрушавања са гњурањем, за водомара и сличне врсте, који би у резултату дали следеће међузависне податке:

- морфолошке и биолошке податке о посматраном живом примерку,
- детаљне податке о облику и димензијама кљуна и тела, као и процена центра масе при маневру обрушавања са гњурањем,
- квашљивост и храпавост површине кљуна, доступних препарираних примерка врсте
- истраживање механичких особина кљуна
- прецизније податке о принудном кретању тела водомара – брзини обрушавања у функцији почетне висине и крајње дубине зарањања, уз мерене тренутне податке о температури околине, температури и густини воде
- прецизније податке о брзини у тренутку додира са површином воде,
- видео-, фото- или термографску визуелизације струјања и тела водомара, изнад и подводом, које би дале прецизније податке о облику и висини круне скоковитог и радијалних таласа, у кључним тренутцима током маневра, у односу на кљун и тело

Предлаже се проширење комбиноване методе за одређивање сличности струјања у смислу увођења већег броја параметара дизајна.

Овим радом се предлаже проширење основне шеме развојног дела PLM система, и увођење знања и вештина стечених кроз интердисциплинарна научна истраживања и различите гране индустријске делатности. У смислу укључивања биомимикрије у процес дизајнирања кроз постојеће системе научно заснованог управљања животним циклусом производа, као што је на пример ScLM (Scientific Lifecycle Management, ScLM) [174] који укључује научне области као што су био-науке, хемије и науке о материјалима, свакако је неопходно укључивање мултидисциплинарних тимова, научно-истраживачких кадрова из области

биологије, механике флуида, физике, хемије, био-хемије, физичке-хемије, психологије и многих других једнако важних на истом задатку.,

Феномен маневра обрушавања–зарањање је, како је показало ово истраживање, потребно и даље детаљно истраживати кроз мултидисциплинарни рад, пре свега јер се сам феномен значајно разликује од аеро- и хидродинамичких феномена код стандардних испитних модела и метода.

Наставак испитивања са дигитализованим оптичким микроскопом, придодатим и прилагођеним осветљењем и са различитим увеличањима значајно би допринео квалитету резултата, анализи и примени у области биомимикрије као једна од метода за смањење отпора струјању. Прикази објашњавају феномен маневра обрушавања-зарањање у микро размери и дају добру основу за проширење будућих истраживања и у области механике флуида у микроканалима.

Визија ове докторске дисертације, је да се створи нова карика у процесу развоја производа, када се говори о индустрији шинских возила, која би укључивала постојећа и нова знања и искуства из различитих научних и индустријских делатности као што су: биологија, шинске и ваздухопловне индустрије, бродоградње, информационих технологија и других, са тежњом креирања возова за велике брзине, био-инспирисаног дизајна, произведен од нових лаких материјала са превлакама, конструкције љуске, који обезбеђује живот у складу са природом и здрављем човека. Новостечена знања би истовремено била доступна и употребљива и повратно, у гранама индустрије које су допринеле стварању новог дизајна.

9.3. Вредновање рада

У истраживању су употребљене постојеће методе мерења, али су мултидисциплинарни приступ и редослед по први пут представљен у овом истраживању са сврхом примене биомимикрије као методе за дизајнирање воза. По корацима је изведена верификација примењених метода (нумеричких или експерименталних) , но у литератури није пронађен довољан број података и анализа које би потврдиле све представљене анализе и закључке, пре свега у смислу примене хидрауличке аналогije, испитивања у 2D простору и комплетни

подаци за конфигурацију 3D BHST тунел. Са циљем унапређења методе биомимикрије и комбиноване методе као методе аеродинамичког дизајнирања добродошла су нова истраживања која би донела собом и нова сазнања о природним феноменима, могућностима нових метода испитивања и пројектовања.

У овом истраживању је испуњен циљ, креиран је дизајн биомимикријом, квалификован за даљи процес оптимизације, али свакако могућности истраживања су практично неограничене и да је ово истраживање тек први корак у низу.

Избор биолошких облика и сазнања о навикама јединки, који је направљен према доступним подацима и описима, свакако не треба да остане једини оквир у коме се врши претрага и анализа облика и животних навика. Мултидисциплинарни тимови свакако треба да имају и стручњаке из области биологије палеонтологије и др. који значајно могу допринети сагледавању облика, економичности кретања и лова за сврху примене у биомимикрији.

Код маневра обрушавања – зарањање се сусрећемо са комбинованим феноменима за комплексну геометрију, већ у сусрету са дводимензионалним проблемом. Комплексност феномена је захтевала примену више испитних метода, комбинованих у једну – комбиновану методу, али се утрошак времена и средстава за испитивања показао далеко мањим у примени, са добитком на доброј предвидљивости аеродинамичких перформанси BHST и ефикасност у поступку дизајнирања, него што је процењен утрошак код испитивања и анализе класичним и статистичким методама (напр. Парето или генетским алгоритмима обраде резултата).

Хидродинамички експерименти, као неизоставни део методе, су показали своју практичност, брзину добијања резултата. У потпуности су приказали физикалност промене, која није бити одсликана на други начин у контролисаним условима. Нумеричке методе примењене за одређивање облика слободне површине при истим условима као у хидродинамичком испитивању, иако дуготрајнија од експеримената дала су неопходна сазнања о понашању флуида испод слободне површине. Истраживање је показало да постоје сличности не само између облика слободне површине и струјних параметара на истом локалном месту, већ да за сличан локални положај на контури водомара у ограниченом

простору бесконачног тунела постоје сличности између путања флуидних делића у дубини воде при хидродинамичком тесту и исо-густинских линија око носа BHST. Ово је помогло при процени дизајна у условима проласка 2D BHST кроз тунел, као додатни критеријум сличности.

Хидродинамички експерименти и нумеричке симулације су дали нова сазнања о повезаности облика слободне површине, положаја и брзине тела водомара у маневру обрушавања зарањање, посматрано кроз градијенте ординате контуре у позицији за менавар. Експерименти изведени овом методом из доступне литературе су третирали, у складу са својом сврхом само расподелу површине појединих облика попречних пресека или себи-сличних. Резултати из овог истраживања су одсликали на прави начин физикалност појаве са сличним радовима. Резултати хидродинамичких експеримената и симулација су показали, кроз верификацију, да је метода поуздана и прецизна за потребе примене у бионици.

Примена проширене хидродинамичке сличности кроз предложену комбиновану методу испитивања, која је у овом раду кључна за дизајнирање биомимикријом, даје као резултат обресе дизајна који се потом испитује CFD методама у критичним условима при проласка кроз тунел. Конфигурација BHST–тунел је критична по основама струјних феномена, односно, заштите животне околине те овим радом је предложено приоритетно испитивање таквих конфигурација, и то у опсезима брзина блиских максималним захтеваним. На овај начин се финализација дизајна изводи само варирањем геометријских параметара у оквиру већ грубо дефинисаних обреса, при граничним условима вожње, док се према литератури примењују методе дизајнирања које мењају комплетан концепт, најчешће испитан у условима вожње на отвореној прузи.

Истраживања у 2D простору су показала потенцијале за наставак у будућим пројектима и указала на потребна унапређења од дефинисања облика модела, израде и контроле експерименталног модела до примене нових технологија и ресурса за прикупљање података. Примењене нумеричке методе су показале поузданост, а почетни услови, потребе за прилагођењима и стицању нових сазнања о природним догађајима.

Истраживања природног догађаја, био-инспирисаних 2D BHST су

потврдила хипотезе из овог истраживања. Изабрани дизајни се не могу искључиво посматрати као добри или лоши за примену на возове великих брзина. Процена могућности примењених дизајна показало се да зависи од почетних захтева (избора дела дизајна за примену у бионици, уклапања природног облика у глобалне димензије VHST, начина брзине кретања, конфигурације VHST и др.). Процена дизајна пре свега треба да се посматра у односу на полазне техничко-технолошке захтеве, према којима исти дизајн оптималан или не, по неком од критеријума за све оперативне брзине. Једноставнији облици као што је VHST-делфин су једноставнији за пројектовање, производњу и истраживање али се у овом истраживању нису показали оптималним за употребу при оперативним брзинама преко 300 km/h. Са друге стране VHST-водомар је показала добре аеродинамичке особине у области око носа у 2D конфигурацији, али и критична струјања око репног дела. VHST-водомар дизајн такође захтева додатне корекције кроз будућа истраживања.

Свакако приказане методе и анализа резултата дају основне смернице и критеријуме за наставак истраживања у области. Будућа истраживања имају на располагању велике могућности од истраживања већег броја природних узорака до унапређења елемената комбиноване методе, и аеротунелских испитивања.

Аеротунелска испитивања расподеле температура, којом је проширена палета мерних метода у аеротунелима код нас, показала се у овом истраживању да се у фази израде полазних дизајна као поуздана метода, којом су на врло брз начин измерени параметри и визуелизоване области у струјању. На овај начин стандардна мерења у граничном слоју као што су мерења статичких притисака по површинама или тоталних, по висини граничног слоја, одлажу се за примену у завршној фази дизајнирања прототипа. Усклађена са нумеричким симулацијама, аеротунелска испитивања са визуелизацијом струјања добила су на још већем значају како у фази мерења тако и у фази верификације резултата.

Испитни модел SHST је уведен ради лакшег праћења промена у струјном пољу при малим брзинама због свог једноставног дизајна, са циљем да се кроз будућа истраживања, изменама параметара дизајна могу сагледати промене струјних параметара. Нумеричке симулације SHST у имагинарном аеротунелу су показала добро слагање са експериментима и дала ближи увид у струјну слику

око модела, тако да се препоручују у раним фазама разраде дизајна ВНСТ.

Испитивања 3D ВНСТ су показала да је у поступку дизајнирања неопходна анализа параметара струјања, као саставног дела процеса контроле дизајна, а да се најпрецизније и најефикасније могу лоцирати места дисконтинуитета контура нумеричким испитивањима на земљи или у слободном лету Маховом лупом, и то пре свега праћењем расподеле коефицијента трења и површинске температуре.

10. ЛИТЕРАТУРА

- [1] ***, High speed rail – Fast track to sustainable mobility, International Union of Railways (UIC), ISBN 978-2-7461-1887-4, November 2010.
- [2] Yanase, N. 2010 Necessities for future high speed rolling stock, International Union of Railways, Report January 2010., ISBN 978-2-7461-1931-4
- [3] ***, Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Stock and Train Operation of Railways, International Union of Railways, (приступ 12.2014.) sa goo.gl/yzq0em
- [4] Raghunathana, R.S., Kimb, H.-D., Setoguchi, T. 2002 Aerodynamics of high-speed railway train, *Progress in Aerospace Sciences*, 38, 469–514.
- [5] Давидовић, Б., Лучанин, В. 2001 *Хидродинамички преносници за железничка возила*, Машински факултет, Београд
- [6] Davidović, M., Linić, S., Janićijević, A., Nedić, Z., Mioč, U. 2011 Fuel Cells Based on Some Proton Dynamics Properties of H₂O₂ Compound, In *Contemporary Materials II–1*, 40 -44 (doi:10.5767/anurs.cmat.110201.en.040D)
- [7] Davidovic, M., Sredic, S., Adakovic, A., Linic, S., Kutin, M., 2011 Similarity and Differences in Porosities of Two Available Minerals on Balkan Montmorillonite and Zeolite, V Међународна конференција „Savremeni materijali 2011.“, 2-3. jul, Banja Luka, Republika Srpska
- [8] Davidovic, M., Linic, S., Nedic, Z., Sredic, S., Kutin, M. 2011 Comparison of Structure and Homogeneity of Minerals in Balkan Peninsula, Thirteenth Annual Conference YUCOMAT 2011. , September 5-9, Herceg Novi, Crna Gora
- [9] Puharić, M., Linić, S., Matić, D., Lučanin, V. 2011 Determination of Braking Force of Aerodynamic Brakes for High Speed Trains, *Transactions of Famena* XXXV (3), 57-66

- [10] Puharic, M., Matic, D., Linic, S., Ristic, S., Lucanin, V. 2014 Determination of Braking Force on the Aerodynamic Brake by Numerical Simulations, *FME Transactions*, 42 (2), 106-111, doi:10.5937/fmet1402106P, http://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol42/2/02_mpuharic.pdf
- [11] Linić, S., Matić, D., Puharić, M., Ristić, S. 2011 Efficiency determination of the aerodynamic brakes for different train's speeds, proceedings of the Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, B-09, 5-8 July, Vlasina Lake, Serbia, 304-311
- [12] Vasović, I., Maksimović, M., Puharić, M., Matić, D., Linić, S. 2011 Structural Analysis of Aerodynamic Brake of High-Speed Train, *Scientific Technical Review*, 61 (2), pp.10-15
- [13] Пухарић, М., Лучанин, В., Ристић, С., Линић, С. 2010 Примена аеродинамичких кочница на возове, *Истраживања и пројектовања у привреди*, 8 (1), 13-21
- [14] Радосављевић, А., Лучанин, В. 2004 *Основни отпор кретања железничких возних средстава*, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд
- [15] Lucanin, V.J., Mirjana, P.A., Milkovic, D.D., Golubovic, S.D., Linic, S.Lj. 2012 Determining the influence of an air wave caused by a passing train on the passengers standing at the platform, *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 19 (3), 299-313
- [16] Liu, Z., Long, Z., Li, X. 2015 *Maglev Trains: Key Underlying Technologies*, *Springer Tracts in Mechanical Engineering*, Springer-Verlag GmbH Berlin, 2-11, ISSN 2195-9862
- [17] Davidović, M., Kutin, M., Linić, S., Mioč, U., Nedić, Z., Sredić, S., Nikolić, A., Jovanović D., and Pissis, P. 2011 Nanocomposites Based on Natural Materials In *Advances in Diverse Industrial Application of Nanocomposites*, (Ed. Reddy, B.) 37-56, InTech ISBN 978-953-307-202-9, doi: 10.5771/14865
- [18] ***, japan-product.com/ads/nippon-sharyo-ltd
- [19] Garcia, A. 2010 *High speed, energy consumption and emissions*, International Union of Railways (UIC), ISBN 978 2 7461 1900 0
- [20] ***, Transport Research, COST 318, Interactions between High-Speed Rail and Air Passenger Transport, Final Report, European Cooperation in the field of

- Scientific and Technical Research, EU projekat, 1998., Belgija, ISBN 92-828-3674-6
- [21] ***, Technical Regulatory Standards on Japanese Railways, Railway Bureau Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, March 31.2012
- [22] Puharić, M., Lučanin, V., Linić, S., Matić, D. 2012 Research of Some Aerodynamic Phenomenon of High Speed Trains in Low Speed Wind Tunnel , The 3rd International Scientific and Professional Conference CORRIDOR 10 – A sustainable Way of Integrations, October 25th , Belgrade, Serbia, 220-226
- [23] Baker, C., Gilbert, T.,Quinn, A. 2013 Aerodynamic pressures around high-speed trains: the transition from unconfined to enclosed spaces, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F *Journal of Rail and Rapid Transit*, 227 (6), 609-622
- [24] Bar-Cohen, Y. 2006 *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*, Taylor & Francis Group, New York, USA, ISBN 0-8493-3163-3
- [25] Рашуо, Б. 2014 *Бионика у дизајну*, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд (ел. књига)
- [26] Миљевић, М. 2007 *Методологија научног рада*, скрипта, Универзитет у Источном Сарајеву, Филозофски факултет, Пале
- [27] Linić, S., Rašuo, B., Kozić, M., Lučanin, V., Puharić, M. 2014 Comparison of numerically obtained 2D flow fields for the bionic high speed train concept designs inspired with aquatic and flying animals, Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies – ОТЕН 2014, Military Technical Institute, 9-10 October, Belgrade, Serbia, 44-49, ISBN 978-86-81123-71-3
- [28] ***, Shinkansen, A half-century journey, shinkansen.the-japan-news.com/ (приступ 05.05.2015.)
- [29] Sheppard, S. 2012 Interview - Eiji Nakatsu: Lecture on Biomimicry as applied to a Japanese Train, AUTODESK, goo.gl/fBYHYu (приступ 07.07.2016.)
- [30] Maeda, T. Protecting the Trackside Environment, *Railway Technology Today* 9, *Japan Railway & Transport Review*, 22, 48–57

- [31] McKeag, T. How one engineer's birdwatching made Japan's bullet train better, <http://www.greenbiz.com/blog/2012/10/19/how-one-engineers-birdwatching-made-japans-bullet-train-better> (приступ 12.12.2014.)
- [32] ***, "Shinkansen Train-Ask Nature " The Biomimicry 3.8 Institute, <http://www.asknature.org/product/6273d963ef015b98f641fc2b67992a5e> (приступ 06.08.2013)
- [33] Kobayashi, K., JFS Biomimicry Interview Series: No.6 "Shinkansen Technology Learned from an Owl?-the Story of Eiji Nakatsu" JFS Biomimicry Interview Series , Japan for Sustainability, http://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id027795.html (приступ 2013)
- [34] Orellano, A. 2010 Aerodynamics of High Speed Trains, Vehicle Aerodynamic Lecture, KTH, Stockholm, Sweden
- [35] ***, AREMA, Manual for Railway Engineering
- [36] Trani, A.A. CEE 3604, Rail Transportation: Addendum, Rail Resistance Equations , Virginia Tech, http://128.173.204.63/courses/cee3604/cee3604_pub/rail_resistance.pdf
- [37] Evaluation of the Energy Efficient Technologies for Rolling Stock and Train Operation of Railways, Final Report, International Union of Railways, Berlin, March 2003.,
- [38] Schmid, R., A review of methods to measure and calculate train resistances, *Journal of Rail and Rapid Transit*, Print ISSN: 0954-4097, Online ISSN: 2041-3017
- [39] Trani, A.A., CEE 3604, Rail Transportation: Addendum, Rail Resistance Equations , Virginia Tech, http://128.173.204.63/courses/cee3604/cee3604_pub/rail_resistance.pdf
- [40] Ed. Hucho, W.-H. 1987 Aerodynamics of road vehicles : from fluid mechanics to vehicle engineering. Butterworth-Heinemann, , ISBN 0-408-01422-9
- [41] Anderson, J. Jr. 1982 *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA
- [42] Liepmann, H. W., Roshko, A. 1957 *Elements of Gasodynamics*, Galcit Aeronautical Series, John Wiley and Sons, New York, USA

- [43] Baker, C. 2014 A review of train aerodynamics Part 1 – Fundamentals, *The Aeronautical Journal*, 118 (1201)
- [44] Baker, C. 2008 The Flow Around High-Speed Trains, BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, July 20-24, Milano, Italy
- [45] Baker, C., Gilbert, T. Quinn, A. 2013 Aerodynamic pressures around high-speed trains: the transition from unconfined to enclosed spaces, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F *Journal of Rail and Rapid Transit*, 227 (6), 609-622., 10.1177/0954409713494947
- [46] Zonglin, J., Matsuoka, K., Sasoh, A., Takayama, K. 2002 Numerical and Experimental Investigation of Wave Dynamic Processes in High-Speed Train/Tunnels, *Acta Mechanica Sinica (English Series)*, **18** (3), 209-226
- [47] Maeda, T., Iida, M., Murata., K., Hukuda, T. 2000 Micro Pressure Waves Radiating From a Tunnel Portal and Their Mitigation, The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering 27-30 August, Nice, France
- [48] Saito, S., Iida, M., Kajiyama, H. 2011 Numerical Simulation of 1D Unsteady Compressible Flow in Railway Tunnels, *Journal of Environment and Engineering*, 6 (4), 731-738
- [49] Martínez, A., Vega, E., Gaite J., Meseguer, J. 2008 Pressure Measurements on Real High-Speed Trains Traveling Through Tunnels, BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, July20-24, Milano, Italy, 1-11
- [50] Hieke, M., Gerbig, C., Tielkes, T., G. Degen, K. 2011 Assessment of micro-pressure wave emissions from high-speed railway tunnels, 9th World Congress on Railway Research, May 22-26, Lille, France
- [51] Suzuki, M., Nakade, K. 2013 Multi-Objective Design Optimization of High-Speed Train Nose, *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 6 (1), 54-64
- [52] Ku, Y.-C., Kwak, M.-H., Park, H.-I., Lee, D.-H. 2010 Multi-Objective Optimization of High-Speed Train Nose Shape Using the Vehicle Modeling

- Function, AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4 - 7 January, Orlando, Florida
- [53] Iida, M., Matsumura, T., Nakatani, K., Fukuda, T., Maeda, T. 1997 Effective Nose Shape for Reducing Tunnel Sonic Boom, *QR of RTRI*, 38 (4), 206-211
- [54] Lee, J., Kim, J. 2008 Approximate Optimization of High-Speed Train Nose Shape for Reducing Micropressure Wave *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 35 (1), 79-87
- [55] Yao, S. B., Guo, D. L., Yang, G. W. 2012 Three-dimensional aerodynamic optimization design of high-speed train nose based on GA-GRNN. *Sci China Tech Sci*, 1-13, doi: 10.1007/s11431-012-4934-2
- [56] Schetz, J. A. 2001 Aerodynamics of High-Speed Trains, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 33, 371–414
- [57] Yoon, T. S., Lee, S., Hwang, J. H., LEE, D. H., 2001 Prediction and Validation on the Sonic Boom by a High-speed Train Entering a Tunnel, *Journal of Sound and vibration*, 247 (2), 195-211, doi:10.1006/jsvi.2000.3482, available online at www.idealibrary.com
- [58] Sebesan, I., Tarus, B. 2012 Experimental determinations of the aerodynamic drag for vehicles subjected to the ground effect, *INCAS Bulletin*, 4 (2), 99 – 110
- [59] Kikuchi, K., Iida, M., Fukuda, T. 2011 Optimization of Train Nose Shape for Reducing Micro-pressure Wave Radiated from Tunnel Exit, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 30 (1), 1-19
- [60] Uystepuyst, D., William-Louis, M., Creusé, E., Nicaise, S., Monnoyer, F. 2011 Efficient 3D Numerical Prediction of the Pressure Wave Generated by High-Speed Trains Entering Tunnels, *Computers & Fluids*, 47, 165–177
- [61] Réty, J.-M., Grégoire, R. Numerical simulation of the pressure wave generated by a train enters a tunnel, 2002 TRANSAERO - A European initiative on transient aerodynamics for railway system optimisation, results of the Brite/Euram project Transient aerodynamics for railway system optimisation, 225–238
- [62] Vincent, J.F.V. 2006 Applications — Influence of Biology on Engineering, *Journal of Bionic Engineering*, 3 (3), 161–77

- [63] Lepora, N. F., Verschure, P., Prescott, T., J 2013 The state of the art in biomimetics *Bioinspir. Biomim.* 8 (1) 013001
- [64] Dou, Z., Wang, J., Chen, D., 2012 Bionic Research on Fish Scales for Drag Reduction, *Journal of Bionic Engineering*, 9 (4) 457–464
- [65] Nesteruk, I., Passoni, G., and Redaelli, A. 2014 Shape of Aquatic Animals and Their Swimming Efficiency, *Journal of Marine Biology*, 2014, Article ID 470715, 9 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/470715>
- [66] Webb, P.W. 1975 Hydrodynamics and Energetics of Fish Propulsion, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, Bulletin 190, Dep. of the Environment Fisheries and Marine Services, Ottawa, Canada
- [67] Videler, J.J., 1993 Fish Swimming, Springer-Science and Business Media, B.V., ISBN 978-94-010-4687-9
- [68] ***, Отворена галерија слика и видео база на Интернету
- [69] Fish, F.E., Rohr, J.J. 1999 Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance, Technical Rep. 1801, SSC San Diego, San Diego, USA, August.
- [70] Fish, F.E., Hui, C.A. 1991 Dolphin swimming-a review, *Mammal Rev.*, 21 (4), 181-195
- [71] Hamilton James, C., <http://charliehamiltonjames.com/kingfishers/0sdfvwt1o9h61er8ww69pl65vwwow2>, <http://charliehamiltonjames.com/kingfishers/ky7h8axfb0z6keuspchebmwsrx79jf>
- [72] Sawyer P. 2011 Mirror image: Kingfisher barely causes a ripple as he dives into the water, (ed. Wildlife Photography/Solent, via Daily Mail) from: goo.gl/B14OKP, with a written permission (приступ 22.02.2016.)
- [73] Mall, L., 2016 Интервју Alan McFadyen, A Perfect Photo of a Kingfisher, (приступ 01-06-2016), <http://www.wired.com//01/alan-mcfadyen-kingfisher-dive/>
- [74] Cooke, M. T. 1937 Flight Speed of Birds, *Cirkular* 428 ,United States Department of Agriculture, Washington
- [75] Burland, L. J. 1947 Air Speed of Belted Kingfisher *The Wilson Bulletin*, 59 (2) 0113

- [76] Liang, J., Yang, X., Wang, T., Yao, G., Zhao, W. 2013 Design and Experiment of a Bionic Gannet for Plunge-Diving, *Journal of Bionic Engineering*, 10 (3) 282–291
- [77] Wang, T. M., Yang, X. B., Liang, J. H., Yao, G. C., Zhao, W. D. 2013 CFD based investigation on the impact acceleration when a gannet impacts with water during plunge diving, *Bioinspir. Biomim.*, 8 (3) 036006
- [78] Yang, X., Wang, T., Liang, J., Yao, G., Chen, Y. Shen, Q. 2012 Numerical Analysis of Biomimetic Gannet Impacting with Water during Plunge – Diving, Proceedings of the IEEE International Conference of Robotics and Biomimetics (ROBIO), December 11-14, Guangzhou, China, 569 – 574
- [79] Worthington, A. M., Cole., R. S. 1897 Impact with a liquid surface, studied by the aid of instantaneous photography *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 194 175–99
- [80] Mallock, A. 1918 Sounds produced by drops falling on water *Proc. R. Soc. Lond. A*, 95, 138–143
- [81] May, A. 1951 Effect of surface condition of a sphere on its water-entry cavity. *J. Appl. Phys.*, 22, 1219–22
- [82] Faltinsen, O., 2005 *Hydrodynamics of High-speed Marine Vehicles*, Cambridge University Press, New York
- [83] Zhang, Y., Zou, Q., Greaves, D., Reeve, D. A 2010 Level Set Immersed Boundary Method for Water Entry and Exit, *Commun. Comput. Phys.*, 8 (2), 265-288
- [84] Von Kármán, T. 1929 The impact on seaplane floats during landing, NACA TN 321, 309–13
- [85] Wagner, H. 1932 Uber Stossund Gleitvergänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten Zeitschrift fuer Angewandte, *Mathematik und Mechanik*, 12 193–215
- [86] Dobrovol'skaya, Z. N. 1969 On some problems of similarity flow of fluids with a free surface, *Journal of Fluid Mechanics*, 36, 805-29
- [87] Krause, E. 2005 *Fluid Mechanics – With Problems and Solutions, and an Aerodynamic Laboratory*, Springer, Germany, ISBN 3-540-22981-7

- [88] Hereman, W., 2012 Shallow water waves and solitary waves, In *Mathematics of Complexity and Dynamical Systems* (ed Meyers R. A.) Springer, New York, USA 1520-32
- [89] Ghazizade-Ahsaei, H., Nikseresht, A. H. 2013 Numerical Simulation of Two Dimensional Dynamic Motion of the Symmetric Water Impact of a Wedge, *IJMT*, 1 (1), 11-22
- [90] Alexandru, I., Brizzolara, S., Viviani, M., Couty, N., Donner, R., Hermundstad, O., Kukkanen, T., Malenica, S., Temarel, P., 2007 Comparison of experimental and numerical impact loads on ship-like sections, In *Advancements in Marine Structures* (ed Guedes, S.C., and Das, P.K.), Taylor and Francis, UK, 339-49
- [91] Hirt, C., Nichols, B., 1981 Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *J Comput Phys*, 39, 201–25
- [92] ***, 2009 ANSYS Fluent 12 документација: Корисничко упутство и теоријски приручник (Userguide, Theory Guide), ANSYS Fluent
- [93] Материјали са предавања: Introduction to ANSYS FLUENT, ANSYS Meshing and ANSYS Design Modeler, предавач др Dimitris Sofialidis, 2010.
- [94] Ghadimi, P., Feizi Chekab, M. A., Dashtimanesh, A. 2014 Numerical simulation of water entry of different arbitrary bow sections, *Journal of Naval Architecture & Marine Engineering*, 11, 117-129
- [95] Preiswerk, E. 1940 Application of the Methods of Gas Dynamics to Water Flows with Free Surface, Part I. Flows with No Energy Dissipation, NACA TM 934
- [96] Preiswerk, E., 1940 Application of the Methods of Gas Dynamics to Water Flows with Free Surface, Part II. Flows with Momentum Discontinuities (Hydraulic Jumps) , NACA TM 935
- [97] Orlin, W. J., Lindner, N. J., Bitterly, J. G. 1949 Application of the Analogy Between Water Flow with a Free Surface and Two-Dimensional Compressible Gas Flow, *Langley Memorial Aeronautical Laboratory*, Report 875, Washington D.C.
- [98] Rao, J.S., V. Rao, V.R., Seshadri, V. 1983 Hydraulic Analogy for Isentropic Flow Through a Nozzle, *Dcf Sci J.*, 33 (2), 97-111
- [99] Rao, J.S. 1991 *Turbomachine Blade Vibration*, New Age International

- [100] Gilmore, F.R., M.S. Plesset, Crossley, H.E.JR. 1950 The Analogy between Hydraulic Jumps in Liquids and Shock Waves in Gases, Reprinted from *Journal of Applied Physics*, 21 (3), 243-249
- [101] Ristić, S. 2007 Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels, Part I – Non optical Methods, *Scientific Technical Review*, LVII (1),
- [102] Lee, M., Longoria, R.G., Wilson, D.E. 1997 Cavity dynamics in high-speed water entry, *Phys. Fluids*, 9 (3),
- [103] Truscott, T.T., Epps, B.P., Belden, J. 2014 Water Entry of Projectiles, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 46, 355–78
- [104] Xu, G.D., Duan, W.Y., Wu, G.X. 2010 Simulation of water entry of a wedge through free fall in three degrees of freedom, *Proc. R. Soc. A*, 466, 2219–2239
- [105] Cengel, Y.A., Cimbala, J.M. 2010 *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2nd Ed., McGraw-Hill
- [106] Kumar, V., Ng, I., Sheard, G. J., Hourigan, K., Fouras A. 2009 Hydraulic Analogy Examination of Underexpanded Jet Shock Cells using Reference Image Topography, 8th International Symposium on Particle Image Velocimetry – PIV09, August 25-28, Melbourne, Australia
- [107] Lavicka, D., Polansky, J., Boiron, O., Study and Comparison of Results of Experimental and Numerical Solutions for Hydraulic Analogy, 5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics – HEFAT2007, Sun City, South Africa, Paper number: LD1
- [108] Arendze, Z., Skews, B. W. 2008 Experimental and Numerical Study of the Hydraulic Analogy to Supersonic Flow, *R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering*, 24 (2), 9-15
- [109] Sinha, S., Seneviratne, P. 1996 Part to Art In *Reverse Engineering*, (Ed. J. Hoschek and W. Dankwort), B. G. Teubner, Stuttgart, Germany, 7-18
- [110] уредник Полић, С., 2015 Препоруке за стварање и управљање дигиталном фото-документацијом у институцијама заштите културног наслеђа Србије, Централни институт за конзервацију, ISBN 978-86-6179-039-3
- [111] Мајсторовић, В., Живковић, С. 2015 *Интеграција производних информационих технологија у дигиталном окружењу*, Јединствено удружење Србије за квалитет, Београд

- [112] Полић-Радовановић, С., Ристић, С., Јегдић, Б., Николић, З. 2010 *Методолошки и технички аспекти примене нових техника у заштити културне баштине*, Институт Гоша и Централни институт за конзервацију, Београд
- [113] Linic, S., Mrkalj, N., 2017 *Wind Tunnel Design and Testing: Low-Speed*, Institute Gosa, Belgrade, Serbia, ISBN 978-86-86917-23-2
- [114] Živković, S. 2016 Quality Management of Aeronautical Surfaces Manufacturing, *Management Studies*, 4, (1), 16-32
- [115] Linić, S., Aleksić, M., Polić, S., Ristić, S., Radojković, B., Raković, M., 2017 Photogrammetric Determination of the Shape and Surface Texture of the Kingfisher Beak, Book of Abstracts – International Scientific Conference “Objectives of Sustainable Development in the Third Millennium”, ECOLOGICA, Belgrade, Serbia, 20 – 22 April, 71
- [116] Angelopoulou, E., Wright, J. R. Jr., 1999 Laser Scanner Technology, *Technical Reports (CIS)*, 74, http://repository.upenn.edu/cis_reports/74
- [117] Artioli, G. 2010 Scientific Methods and Cultural Heritage: An introduction to the application of materials science to archaeometry and conservation science, Oxford University Press Inc., New York
- [118] Friess, M. 2012 Scratching the surface? The use of surface scanning in physical and paleoanthropology, , JASs Invited Reviews, *Journal of Anthropological Sciences*, 90, 7-31, doi 10.4436/jass.90004
- [119] Lanman, D., Taubin, G. 2009 Build Your Own 3D Scanner: 3D Photography for Beginners, SIGGRAPH, Course Notes
- [120] Pauly, M., Mitra, N. J., Giesen, J., Guibas, L., Gross, M. 2005 Example-Based 3D Scan Completion, CSTR-03 Jan/05 4/29/05, Stanford HCI Group
- [121] Консултације са др Славицом Ристић, дипл. физичар, научни саветник, Институт Гоша, Београд
- [122] Spring, K.R., Davidson, M.W. Microscope Optical Components, <https://micro.magnet.fsu.edu/primer/anatomy/components.html> (приступ 09-2016)
- [123] Spring, K.R., Parry-Hill, M., Davidson M.W. Geometrical Construction of Ray Diagrams

- <http://www.olympusmicro.com/primer/java/components/characteristicrays/index.html>
- [124] ***, ISO 4287: Surface texture: Rules and procedures for the assessment of surface texture
- [125] Hoffmann, K.A., Chiang, S.T. 2000 *Computational Fluid Dynamics*, Volume I, (4th Ed.), Engineering Education System, Wichita, Kansas, USA
- [126] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. 1995 *An Introduction to computational fluid dynamics*, The Finite Volume Method, Longman, London
- [127] Козић, М. 2013 Примена нумеричке динамике флуида у аеронаутици, *Научнотехничке информације*, L (3), Војнотехнички институт, Београд, Србија
- [128] Чантрак, С., Лечић, М., Тоћић, А. 2009 *Механика флуида*, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, Србија
- [129] Anderson, J.D. 2009 Governing Equations of Fluid Dynamics In *Computational Fluid Dynamics An Introduction* (Ed. Wendt, J.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [130] Schlichting, H. 1979 *Boundary-Layer Theory*, 7th Edn., McGraw-Hill, New York, ISBN 0-07-055334-3
- [131] Linić, S., Ristić, S., Stefanović, Z., Kozić, M., Ocokoljić, G. 2015, Experimental and Numerical Study of Super-Critical Flow Around the Rough Sphere, *Scientific Technical Review*, 65 (2), 11-19
- [132] Customer Stories – Institute Gosa, SimTec 10 Years, Anniversary Book, SimTec Software and Services, 78-80, <http://simtec-10-years.s3-external-3.amazonaws.com/index.html>
- [133] Kozic, M., Ristic, S., Puharic, M., Linic, S. 2014 CFD Analysis of the Influence of Centrifugal Separator Geometry Modification on the Pulverized Coal Distribution at the Burners, *Transactions of Famena*, 38 (1), 25-36
- [134] Kozic, M.S., Ristic, S.S., Linic, S.Lj., Hil, T., Stetić-Kozic, S. 2016 Numerical Analysis of Rotational Speed Impact on Mixing Process in a Horizontal Twin-Shaft Paddle Batch Mixer with Non-Newtonian Fluid, *FME Transactions*, 44 (2), 115-124

- [135] Matić, D., Puharić, M., Linić, S., Ristić, S. 2010 Numerička simulacija disperzije загађивача i vrelog vazduha u oblasti iznad glavne palube jednog FPSO broda, *Ekologica*, 58, UDC:502, ISSN 0354-3285
- [136] White, F.M., 1991 *Viscous Fluid Flow*, 2nd Ed., McGraw-Hill
- [137] Mohrig, D. 2004 Conservation of Mass and Momentum, Sedimentary Geology, Fall 2004. MIT OCW.. https://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-planetary-sciences/12-110-sedimentary-geology-fall-2004/lecture-notes/l2_mass_mom_cons.pdf (приступ 17.11.2016)
- [138] Adams, T., Grant, C. 2012 A Simple Algorithm to Relate Measured Surface Roughness to Equivalent Sand Grain Roughness, Avestia Publishing, *International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, 1 (1), 66-71
- [139] Lee, M., Longoria, R.G., Wilson, D.E. 1997 Ballistic Waves in High-speed Water Entry, *Journal of Fluids and Structures*, 11 (7) 819-844
- [140] Kozić, M., Ristić, S., Katavić, B., Linić, S., Prvulović, M. 2017 Numerical and experimental study of temperature distribution on thermal plant coal mill walls, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Online 23-MAR-2017, DOI: 10.1002/ep. 12599 (Online ISSN: 1944-7450)
- [141] Kozić, M., Ristić, S., Katavić, B., Linić, S., Ristić, M. 2015 Determination of the Temperature Distribution on the Walls of Ventilation Mill by Numerical Simulation of Multiphase Flow and Thermography, Proceedings of 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, June 15-17, Arandjelovac, Serbia, F2c, 1-8, ISBN 978-86-7892-715-7
- [142] Ристић, С., Полић-Радовановић, С. 2013 Термографија у заштити културне баштине, Институт Гоша, Београд, Србије, ISSN 978-86-86917-16-4
- [143] Simon, B., Filius, A., Tropea, C., Grundmann, C. 2010 IR-Thermography for Dynamic Detection of Laminar-Turbulent Transition, 18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, July 4-7, (2016) Lisbon, Portugal
- [144] Carlomagno, G.M., Cardone, G., Infrared thermography for convective heat transfer measurements, *Exp Fluids*, 49, 1187–1218

- [145] Crawford, B.,-K., Duncan Jr., G.-T., West, D.,-E., Saric, W.,-S. 2013 Laminar-Turbulent Boundary Layer Transition Imaging Using IR Thermography, *Optics and Photonics Journal*, 3, 233-239, dx.doi.org/10.4236/opj.2013.33038
- [146] Anderson, J.D., Jr. 1991 *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering, 2nd Ed.
- [147] Lienhard IV, J., Lienhard V, J. 2008 *A Heat Transfer Textbook*, Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts
- [148] ***, User's Manual, FLIR Exxx series, FLIR Systems, Pub.No. 7559597, December, 2010
- [149] Gaussorgues, G., 1994 *Infrared Thermography*, Springer Science+Business Media
- [150] Pereira, J.D., 2011, *Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments*, Nova Science Publishers, Inc., New York
- [151] Pope, A., Harper, J. 1966 *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, Wiley
- [152] Ristić, S., Linić, S., Samardžić, M., 2017 Turbulence Investigation in the VTI's Experimental Aerodynamics Laboratory, *Thermal Science*, 21, Suppl. 3, pp. S629-S647
- [153] Ristić, S., Linić, S., Samardžić, M., 2015 Presentation of the Facilities, Methods and Results of Turbulence Investigation in the VTI's Wind Tunnels, (Eds. Čantrak, Đ., Lečić M., Čočić, A.) The book of Abstracts on Turbulence Workshop – International Symposium, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, 31st – 2nd September, pp 14
- [154] Пухарић, М. 2009 *Аеродинамичка истраживања возова*, Институт Гоша, Београд, Србија
- [155] Baker, C.J., Brockie, N.J. 1991 Wind tunnel tests to obtain train aerodynamic drag coefficients: Reynolds number and ground simulation effects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 38, 23-28
- [156] Gemmell, B.J., Costello, J.H., Colin, S.P., Stewart, C.J., Dabirie, J.O., 2013 Danesh Tafti, and Shashank Priya, Passive energy recapture in jelly fish contributes to propulsive advantage over other metazoans, *PNAS* October 29, 110 (4), g/cgi/doi/10.1073/pnas.1306983110

- [157] Dumont, E. R. 2010 Bone density and the lightweight skeletons of birds *Proc. R. Soc. B.* 277 2193–98
- [158] ***, Правилник о проглашењу и заштити строго заштићених и заштићених дивљих врста биљака, животиња и гљива, "Службени гласник РС", бр. 5/2010 и 47/2011); преузето са сајта Завода за заштиту природе Србије, http://www.zzps.rs/novo/index.php?jezik=sr&strana=propisi_podzakonski_akti, (приступ 07-08-2016)
- [159] Лична комуникација и консултације са Марком Раковићем, биолог, кустор орнитолог, Природњачки музеј Баоград
- [160] Heribert Cypionka, PICOLAY, <http://www.picolay.de> (pristup 01-11-2015)
- [161] ***, dotPDN LLC, Paint.NET, <http://www.getpaint.net> (pristup 01-11-2015)
- [162] ***, Blender, Blender Foundation, <http://www.blender.org> (приступ 16-10-2016)
- [163] ***, MeshLab, National Research Council – CNR, Italy, <http://www.meshlab.net> (приступ 16-10-2016)
- [164] Wu, C. 2011 VisualSFM: A Visual Structure from Motion System, <http://ccwu.me/vsfm/>, (приступ 16-10-2016)
- [165] ***, CloudCompare, <http://www.danielgm.net/cc/> (приступ 16-10-2016)
- [166] Stroick, G., 2011 Nose Cone & Fin Optimization, Off We Go Rocketry, Tripoli Minnesota
- [167] Kemal Payza, Nose Cone Spread Sheet, Nevada AeroSpace Science Associates (NASSA), <http://www.rimworld.com/nassarocketry/fabrication/nosecones/spreadsheet.html> (приступ 15.07.2016.)
- [168] Ryser, F.A., Dewey, J. 1985 *Birds of the Great Basin: A Natural History*, University of Nevada Press, US
- [169] Carnaby, T. 2008 *Beat about the Bush: Birds*, Jacana Media
- [170] Linic, S., Rasuo, B., Kozic, M., Lucanin, V., Bengin, A. 2015 Drag-Coefficient Behavior of the Bio-Inspired High Speed Train Design, Proceedings of 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, June 15-17, Arandjelovac, Serbia, G3d, pp.1-10, ISBN 978-86-7892-715-7

- [171] Linić, S., Rašuo, B., Kozić, M., Lučanin, V., Bengin, A. 2016 Aerodynamics of the High Speed Train Bio-inspired by a Kingfisher, Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2016, Military Technical Institute, 6-7 October, Belgrade, Serbia, 41-46, ISBN 978-86-81123-82-9
- [172] Ristić, S., Linić, S., Ocokoljić, G., Rašuo, B., Lučanin, V. 2016 A High Speed Train Model Testing in T-32 Wind Tunnel by Infrared Thermography and Standard Methods, Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2016 Military Technical Institute, 6-7 October, Belgrade, Serbia, 35-40, ISBN 978-86-81123-82-9
- [173] Linić, S., Ocokoljić, G., Ristić, S., Lučanin, V., Kozić, M., Rašuo, B., Jegdić, B., 2017 Boundary Layer Transition Detection by Thermography and Numerical Method Around Bionic Train Model in Wind Tunnel Test, *Thermal Science*, Online First (00), 302-302, doi: TSCI170619302L
- [174] ***, Dassault Systèmes, Delivering Scientific Innovation in the Age of Experience, goo.gl/OKEDfJ, приступ 31.05.2016.

11. ПРИЛОЗИ

ПРИЛОГ 1.

Experimental and Numerical Study of Super-Critical Flow Around the Rough Sphere

Suzana Linić¹⁾
Slavica Ristić¹⁾
Zoran Stefanović²⁾
Mirko Kozić³⁾
Goran Ocokoljić³⁾

This paper presents the experimental and numerical research on the sphere model with the goal of prediction of a flow behaviour in a presence of the surface roughness. Results indicate the problems and suggest the solution for engineering practice. The similarity of the numerical and wind tunnel flows was reached by an application of a combination of the intentionally introduced turbulence intensity in a numerical flow as well the artificial roughness of the model, for a reason of restricted requirements of the turbulence modelling.

Key words: aerodynamics, wind tunnel, numerical simulation, sphere, rough surface, fluid flow.

Nomenclature

V	– Velocity in the test section, m/s
M	– Mach number in the test section
MRe	– Mega Reynolds number, $Re \cdot 10^6$
D	– Diameter of a sphere, m
A	– Exposed cross-section area of the sphere, m^2
α	– Model angle of attack, $^\circ$
β	– Model yaw angle, $^\circ$
φ	– Polar angle of a local measuring point in a longitudinal cross-section of the sphere, $^\circ$
p_0	– Stagnation pressure, Pa
p	– Static pressure, Pa;
D	– Drag force, N;
cD	– Drag coefficient
q	– Dynamic pressure, Pa
TI	– Turbulent intensity of the flow in the test section, %
e	– Absolute roughness of the model surface, m
e/D	– Relative roughness of the model surface

Introduction

The aim of this work was to explore the possibility of prediction of the flow and drag coefficient behaviour of the rough sphere, and hence to somewhat support solving similar problems in practice, like those linked to small continual surface damages. The continual surface damages may be in a form of low-height roughness created by corrosion, erosion, even dirt rose over the external wetted surfaces or unreachable flow zones. Characteristic for these types of surfaces is the fact that such small imperfections, if they are out of the bounds of heights that are considered as aerodynamically smooth, could not be modelled.

The test model was selected to be a sphere, a fundamental test body, commonly used for a subsonic wind tunnel flow quality measurement and assessment of the wind tunnel turbulence factor. The sphere was in a focus of many researchers even since the early findings, from the XVII century, in the field of fluid mechanic as noted in the review of experimental tests of the sphere by Riabouchinsky [1] and later Krumins [2], who collected aerodynamic characteristics of the smooth sphere in subsonic and supersonic flows, as a function of the Reynolds and Mach numbers and various other effects. The sphere's aerodynamic sensitivity to the flow character due to the Reynolds number variations and the surface roughness were theoretically considered by A. F. Zxhm [3] and experimentally tested and described among first by Wieselsberger [4], Schlichting [5], Achenbach [6, 7], and after Batchelor [8], Hoerner [9], with the purpose to standardize and correlate test results from the wind tunnels.

Nowadays, researchers (Constantinescu et al. [10, 11], Jones and Clarke [12]) find convenient to predict the flow by the computational fluid dynamics (CFD), but in a number they treated the cases in a range of low Reynolds numbers. A flow past sphere at moderate and high Reynolds numbers were numerically explored by Fornberg [4] and Achenbach [6,7]. As well, the exploring of the rough spheres was implemented in the field of aerodynamics of the sport balls by Mehta and Pallis [14], Cross [15] and Kensrud [16]. However, the CFD solutions need the validation through the wind tunnel experiments, as well as the visualizations, which were presented by Taneda [17] and Cross [18].

In the VTI wind tunnels the sphere is included in various experiments, both for the pressure and force measurements, the flow quality, as well the imaging by the optical and non-optical techniques. The purpose of the non-optical flow

¹⁾ Institute Gosa, Milana Rakica 35, 11000 Belgrade, SERBIA

²⁾ University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, 11020 Belgrade 35, SERBIA

³⁾ Military Technical Institute (VTI), Ratka Resanovića 1, 11132 Belgrade, SERBIA

Correspondence to: Suzana Linić; e-mail: sumonja@yahoo.com

visualizations, in this work given around the sphere, is a verification of the experimental data measurement while, described by Ristic [19-22]; the optical visualization techniques are able to determine quantitative values of the flow parameters either of the flow around the sphere or in the complex flow, such is in the axial fan [23].

Anderson and Uhlherr [24] explored one of the influenced factors, the roughness, to the flow quality and the drag coefficient level. Nowadays, researchers present the experimental methods of the “smart morphable” model surfaces with the intention to control the aerodynamic drag [25].

The gates for new solutions in a field of turbulent flow over the rough surfaces, especially the sphere, are still open because the reported results in all had also many others influenced factors which made the flow over the sphere the complex problem, in the range of critical and super-critical regimes in digression to a simple design.

In this work the aerodynamic sensitivity of a sphere is represented through the numerically obtained aerodynamic drag coefficients and the flow field compared to those obtained in the VTI wind tunnel testing.

The well-known problems, connected to the flow over the rough sphere, are presented for the practical use of the research and numerical simulations. Here the attention is put on the overall drag coefficient, in a low turbulent stream, rather than the flow behavior in a wake, as well as its time dependence. Thus, the intention is to define a valuable method and experience for implementing it to the tasks like being a high-speed train experiment design or testing of the ventilation mill’s elements of the thermal plant.

Flow Over a Sphere and the Influence Factors

Following the drag coefficient values, from the almost motionless to $MRe=1$, the phases of a characteristic flow behavior are followed from one to another (Fig.1). The flow at very low MRe is creep with no separation. Afterwards, the laminar flow regime is present, up to $MRe \approx 0.3$, characterized with the laminar boundary layer, early separation and a wide wake. Viewing the sub-critical region close to a critical, the separation position is $\varphi \approx 80^\circ$, in a range $MRe \approx 0.05 - 0.16$ and from here with MRe growing up to 0.25 the separation point is moving downstream, to $\varphi \approx 90^\circ$, and continues in the same manner to a value of about 108° , at $MRe \approx 0.3$, according to the experiments made by Achenbach, after which the separation point holds the stabile position at $\varphi \approx 120^\circ$. From the point $MRe \approx 0.3$ the critical regime begins, during which with MRe is growing to end regime value of about 0.4, the drag coefficient suddenly decreased from about 0.47 to 0.06, passing the critical value of 0.3 at $MRe=0.385$. Over the critical flow regime, the flow transforms and here the turbulent boundary layer impacts a delayed separation as well as shrinking in the wake. In the super-critical regime, the pressure is recovering, the flow in the wake becomes more organized and the drag coefficient is increased. Results reported by Achenbach are tracing the phenomenon, but they did not report all the test details like the turbulence level was needed for CFD validation.

The turbulent flow shows similar behaviour if it is streaming over the rough sphere, depending on the rough height (described in a form of a relative roughness related to the sphere diameter). One may note that the influence of the model roughness may be ignored for laminar flows. Achenbach [7] reported that with the increase of the relative roughness the pre-critical and critical regimes begin earlier and the drag coefficient drop is less than for the smooth

sphere. Furthermore, the separation point movement with Reynolds number variations has a milder trend of increasing but in values – smaller. For example, if the roughness is $e/D=0.0025$, a critical drag value of $c_{D,critical} = 0.3$ occurs at $MRe \approx 0.13$, with a corresponding value of $\varphi \approx 112^\circ$, while the separation occurs later, $\varphi \approx 120^\circ$ at a very beginning of the super-critical regime.

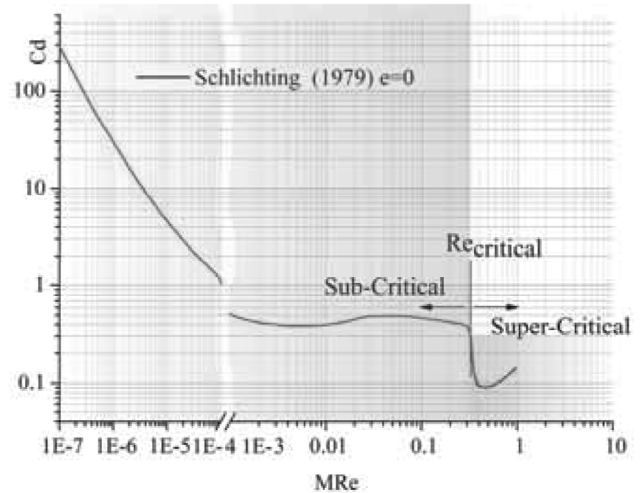


Figure 1. Drag coefficient of the sphere vs MRe of a free stream by Schlichting [5]

Significant flow phenomenon, either in the wind tunnel or numerical simulations, is the turbulence intensity, Tu . Just because the sphere is highly sensitive to the flow regimes it is used for the examination of the flow quality in the wind tunnels. This featured influenced parameter impacts on the flow over the sphere changing the drag coefficient function against the Reynolds number. If the wind tunnel characteristic turbulence intensity, for a certain operating regime, is higher, the resulting aerodynamically smooth sphere critical drag regime will be displaced to a lower range of the Reynolds numbers, even if a very small difference to free air exists. Thus, one may experience the false respond in case of a low flow quality in the wind tunnel.

The combination of irregularities and surface quality of the model shape, as well as the wind tunnel flow quality, is experimental reality about which the special care is always taken to keep the resulting errors as low as possible.

On the contrary, to reach the requirements of the flow similarities of the model and a prototype, the turbulence may be intentionally introduced for special requirements. For the purpose of the inlet or local turbulence creation various additional devices are introduced. Meshes over the entire cross section of the test section are producing the artificial turbulence over the smooth model. Impediments may be placed over the model surfaces, locally as strips of Carburundum or wires, at a position of assumed flow separation point acting on the following flow and pressure distribution or spread all over the wetted model surface. A successful combination in the experiment is one that closely represents the flow similar to real case of a prototype and that is a target, the best guarantee to prediction of the prototype aerodynamic characteristics.

The idea of introducing the roughness and the turbulence intensity is used also in the numerical simulations for reaching the similar flow quality over the model for complex problems. In this research, the intentionally introduced variable turbulence intensity and the sphere roughness, are used with the purpose of prediction of the wind tunnel results of CFD and thus help in solving other similar problems. In a frame of

the available resources and time, the obtained results gave a very good prediction and correspondence.

Wind tunnel test of the sphere

Experimental studies of the sphere were done in a large subsonic wind tunnel, T-35, at the VTI Experimental Aerodynamic Division. Through the standard flow quality procedure the pressure sphere test was also performed, after some modifications of the facility and the model was subject to force/moments and pressure measurements as well as the flow visualization.

The large subsonic wind tunnel, T-35, is a closed circuit, continual type of the wind tunnel with the octagonal test section (4.4m wide, 3.2m high and 5.5m long). The cross section area of the test section is 11.93m². In this study the test section with a sting model support system was used. For this wind tunnel configuration the experiments may be run in a range of $M=0.1-0.52$, in the test section, while only an axial fan is used, and in a range of $M=0.52-0.8$ if the injector system aids the fan by pressurization of the inflow, up to 1.52bars of stagnation pressure. Operational envelope in a fan-only regime is achieved by varying the RPM of the fan and a blade pitching angle, keeping stagnation pressure on the atmospheric level, while by using the injector system the pressure is added for achieving the highest capacity. In Figures 2a and 2b the wind tunnel T-35 sketch is presented.

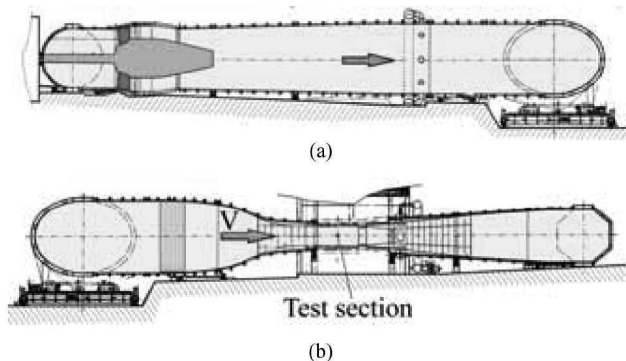


Figure 2. Wind tunnel T-35 cross-sections along the large diffuser (a) and the test section (b)

The test model was the pressure sphere, Fig.3, manufactured of duraluminium in a diameter of 110mm, mirror-polished. The sphere was mounted in the centre of the test section by the sting, 38mm in diameter, via adapter to a model support strut (Fig.4). The sting and the sphere were placed in zero incidence position.

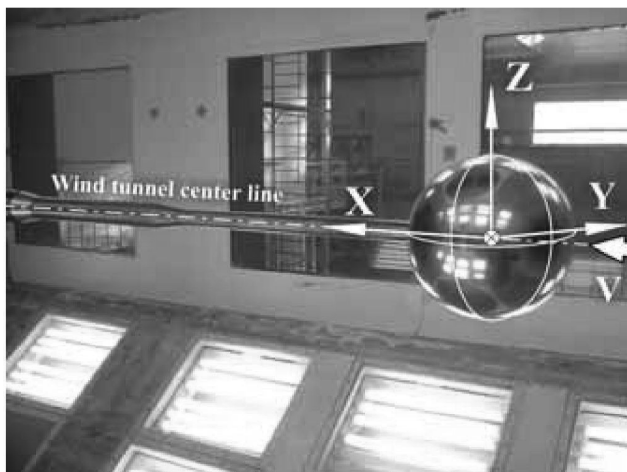


Figure 3. Pressure sphere in the T-35 test section

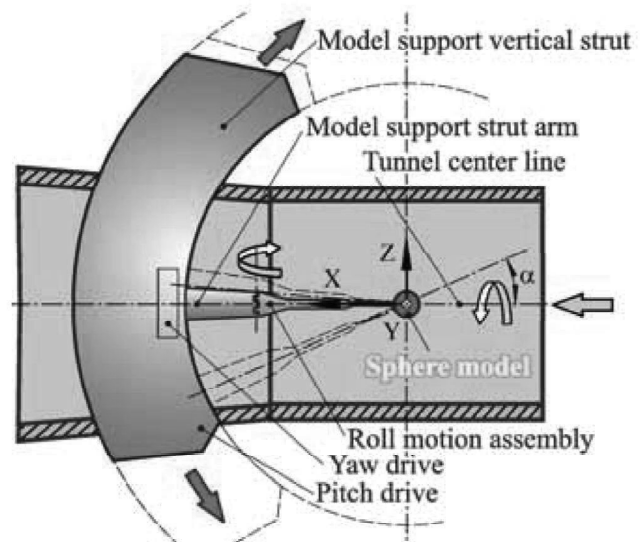


Figure 4. Model support system in the T-35

The experimental tests contained the force and moment measurements on the sphere and the flow visualization at three Mach numbers: $M=0.1$; 0.14 and 0.18. Flow conditions were set, in the fan-only regime, by a power unit control system. A primary measurement system forwarded data of the flow conditions, both to the power unit control system and to a data acquisition system. Mach number and stagnation pressure regulation are better than 0.7%. In general, an excellent flow quality of the T-35 is described with the following parameters: the longitudinal and transversal Mach number distributions have a standard deviation better than 0.005 and 0.006, respectively, below $M < 0.4$, while the flow direction differs about 0.1° . Turbulence intensity, obtained by a hot wire anemometry, is about 0.1%, in a range of $M < 0.5$.

For each run sequence, the force and moment measurements were done by the internal six-component VTI balance, an in-house product, whose nominal drag force range is 850N.

Flow visualization was done for the flow transition and flow separation estimation by using an oil emulsion technique. The holes for pressure measurements and a space near the balance were covered by the Sellotape and uniformly coated with a creamy paste of an emulsion, by a sponge, for each test run individually. The emulsion mixture consisted of 10g of TiO_2 , 30cm³ of Kerosene and 3cm³ of oleic acid. The pre-run coated sphere is shown in Fig.5.

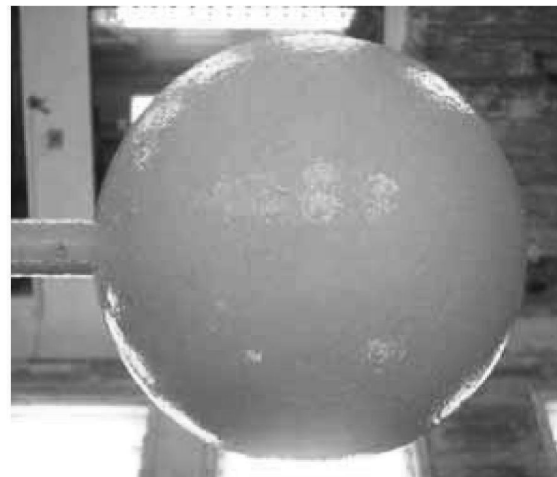


Figure 5. The sphere in the T-35 test section coated with the emulsion

Signals from all of the transducers and measuring devices

were synchronized with the time base of the digital chronometer with the purpose of data segmenting. The data acquisition system consists of 64-channel system of the NEFF 620/600 under the control of the VAX 8250 computer. Model positioning was controlled by a PC. Data reduction was also made by VAX 8250 computer using standard software for data reduction of the VTI wind tunnels.

Processed data gave the base for calculation of the flow parameters and dimensionless coefficients for the further use in the study. The drag coefficient is defined as in Eq.1

$$C_D = \frac{D}{qS} \quad (1)$$

Duration of the wind tunnel flow acceleration, steadying the flow and data acquisition, necessary for the force and moment measurement, was prolonged until the emulsion was almost dry. Flow traces on a surface were photographed from a close distance after the wind tunnel run.

Numerical Simulations

Numerical simulations were done by the ANSYS Fluent 12 computation fluid dynamic software. The geometry of a numerical domain and the model were prepared in the Design Modeler. The real scale model, a sphere of 110mm in diameter, was placed inside the cylinder of 3m in diameter and 5m long. One ellipsoid-like body was constructed around the sphere to be a body of influence. By the Meshing Application the meshing operation was done with the following parameters: meshing method – automatic- patch conforming; advance size function – curvature; smoothing – high; transition – fine; minimal size – 0.1mm; maximal face size – 95.7mm and maximum tetrahedral size – 191.46mm; growth rate – 1.2. Inflation covered the sphere, selecting the first layer thickness option. The first layer height was 1mm (to cover the double rough height); 10 layers with 1.05 growing rates. The statistical values numbered 1949508 mixed elements of the mesh, the skewness of maximum 0.79 (average 0.21) and an aspect ratio of element dimensions of 9.3. In Fig.6 a half of the meshed domain is presented, while in Fig 7 a detail of the sphere and body of influence mesh are shown. Fig 8 details the view of the inflation layer around the rough sphere in the cross-section. The face element size over the rough sphere is 0.5mm and the element size inside the body of influence is defined with 5mm. Values were selected after the grid independence checks except the first layer height.

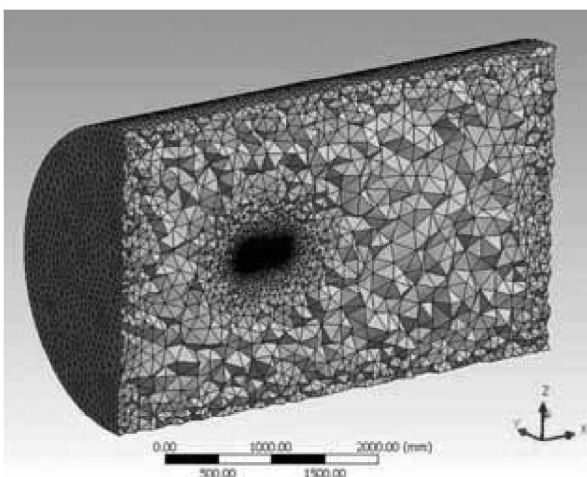


Figure 6. One half of the meshed numerical domain

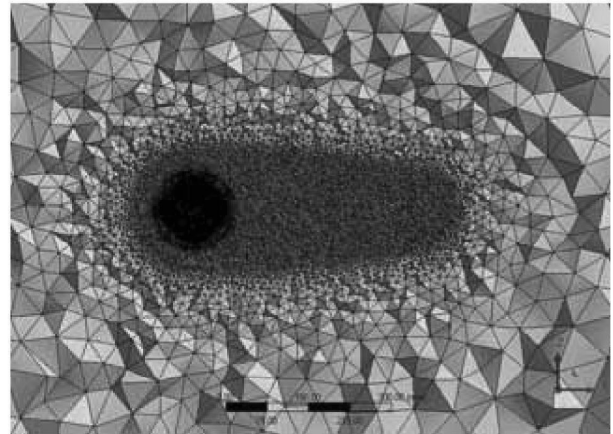


Figure 7. Meshed sphere and the body of influence

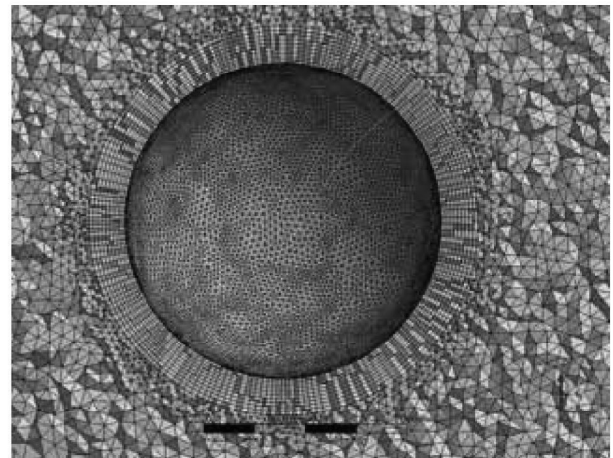


Figure 8. The rough sphere and inflation layer in cross-section

The selected absolute roughness, in each cell of the first inflation layer, according to the CFD recommendations, should be placed into a zone of the first centroid, which leads to the first layer height larger than a double roughness height (Fig.9). This condition, applied to turbulent models as a Transition SST, causes questionable results, because the basic requirements are in connection just after the height of the first inflation layer. In this work one example of this problem is presented to compare.

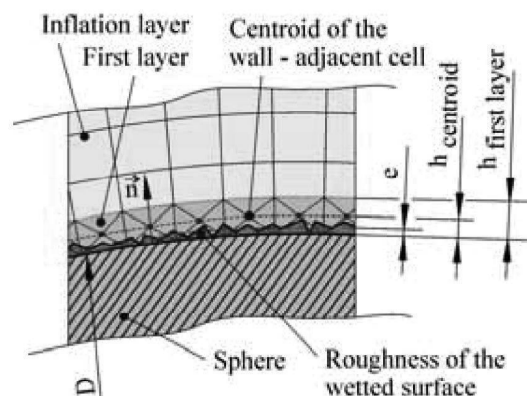


Figure 9. Geometry parameters in the inflation layer over the rough sphere

For setting the material and boundary conditions, BC, data from the wind tunnel tests were adopted as an initial guess: air properties operational and gauge pressure, temperature, flow velocity. The turbulence intensity was set for the inlet and outlet BC in the same manner and the sphere was defined as a wall of different absolute roughness due to cases. A cylinder

outer surface was defined as a symmetry BC. These data were used as parameters for a discussion of the result.

Numerical simulations were steady-state, incompressible, of pressure-based type run under the same solution methods and controls. A pressure-velocity coupling scheme was PISO, for the time consumption reduction. First 60 iterations were run in the first order spatial discretization and continued with the second order. Under the relaxation the factors were as listed: pressure – 0.3, momentum – 0.7, turbulent kinetic energy – 0.8, turbulent dissipation rate 0.8 and turbulent viscosity – 1. Averaged number of iterations for all the cases was from 4000 to 6000.

The Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulence model $k-\varepsilon$ Realizable, with two-layer based Non-Equilibrium wall function, was used for its benefits in solving the shear flows with a boundary-layer or a massive flow separation [26], and has a good convergence behavior and is time saving, which is important for industrial applications.

Standard $k-\omega$ is an appropriate choice in expected cases of the free shear, complex boundary layer with a reverse pressure gradient and separation as well as the early transitional flows [26]. Similar good properties shear also the Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$ turbulent model, but its suitability degrades with a distance from the wall. Afterwards, the Transitional SST model was used as the most accurate RANS, Reynolds Stress models, for the flow separation prediction. Requirement for the accurate use of this model is referred to a wall-adjacent cell's centroid, y^+ , to be less or equal to the unit.

Results and Discussion

The presented results of the rough sphere are selected from the wide series of experiments with the pressure sphere in the wind tunnel T-35, at moderate Reynolds numbers. The smooth and rough sphere was tested in the wind tunnel while only the rough sphere was tested by the numerical simulations. Initially, the sphere tests were performed to visualize the flow pattern after drying the emulsion, while forces and moments were also measured in that phase, thus they represent the values for the rough sphere. In Fig.10 drag coefficients, from the wind tunnel tests and numerical simulations, were correlated at the equal Reynolds numbers.

The drag coefficient curve, plotted for the mirror-polished sphere (Fig.10 ◆), was obtained by the wind tunnel tests, under the turbulent intensity less than 0.1%, while the curve (Fig.10 ■) refers to the rough sphere.

In the range of the MRe from 0.34 to 0.39, the drag coefficient curve for the smooth sphere indicated the actual region of the critical flow, a segment of the drag crisis region.

However, for the wider range of MRe , from 0.28 to 0.5, containing also the previously mentioned, the rough sphere induced, as expected, the opposite character of the flow. The values of the drag coefficients were changing in the range from $c_D=0.2805$, for $MRe=0.282$, to $c_D=0.3252$, for $MRe=0.489$ and, if joined, they would create an almost perpendicular curve to the one of the smooth sphere. Actually, the results from the wind tunnel were considered as the spot values, not joined in a function, because from the flow visualizations it may be seen that the dried coating is thinner as MRe is higher. Actually, the free flow vanishing of the coating material differs from case to case, depending on an initial emulsion layer thickness, flow character and the flow velocity and duration. The measure of the coating thickness could be estimated only by a visual inspection, because of the softness and non-uniformity of the coating structure over the sphere wetted surface.

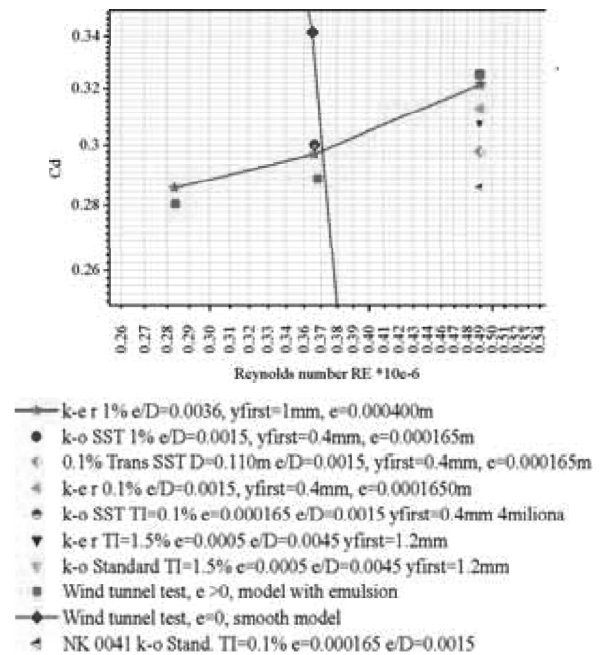


Figure 10. Drag coefficient vs. Reynolds number diagram from the wind tunnel and numerical simulation tests

Further on, comparing the relation of values of the smooth (Fig.10 ◆) and rough (Fig.10 ■) sphere, it was indicated that while the smooth sphere experienced the sudden drag reduction, induced by the transition from the laminar to turbulent flow, followed with the delayed and unstable separation, the rough sphere experienced super-critical flow with a slight increase of the drag coefficient with MRe . By that means, it was indicated that the critical drag region, of the rough sphere, was displaced to a region of significantly lower MRe , in relation to the smooth sphere. The pressure drop occurred and the flow, at selected MRe , was fully turbulent, not only in the wake, but also in the boundary layer of the sphere.

From the front side of the sphere, the suspension left the deposit with winding and crossing troughs, which indicated the turbulent flow character in a local boundary layer. Opposite, on the rear side the deposit was uniformly distributed, which indicated the presence of the stabile reverse turbulent flow. Naturally, these flow behaviours were expected, due to the fact that after the sphere experienced super-critical flow, the wake consisted of a large number of smaller vortices, mutually interacting as well with the surrounding flow while forming a sort of a wake tube.

The flow visualization images in Figures 11-13 were shown for three different test cases, in accordance with the measurements of the smooth sphere, at the velocities of $M=0.1$, 0.14 and 0.18 ($MRe=0.282$, 0.362 and 0.489), respectively. Freeze flow patterns on the photos, made after the wind tunnel stopped, evidenced polar angles of the flow separation of approximately $\varphi_{WT} \approx 105^\circ$, 110° and 115° , in order for listed MRe . In figures a zone of the ordered flow traces may be seen, from the stagnation point to the nearness of the separation zone, the zone of the separation and a zone of the wake initialization. The zone of the transition is hardly defined because of the structure of the coating. A flow character changes in some elements from one of the smooth sphere, but it still represents the key points. Wavy separation line occurred mostly because of the roughness and imperfections in the coating thickness produced by depositions of TiO_2 emulsion. Wave trace left uniformly covered rear surface of the sphere that showed the uniform

turbulent flow in the wake. As the emulsion was applied by hand for each wind-on phase, the differences in a coating thickness affected the resulted thickness of the coating from the test, but even so they did not change key data significantly, but influenced the wind-on duration needed for emulsion drying.

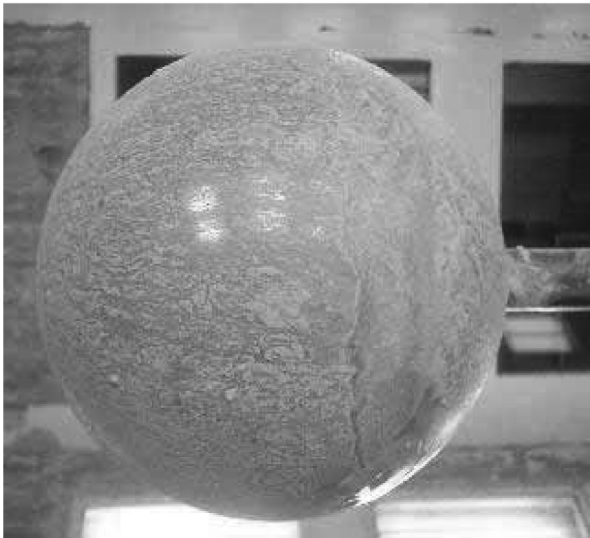


Figure 11. Flow visualization with oil emulsion at $M=0.1$

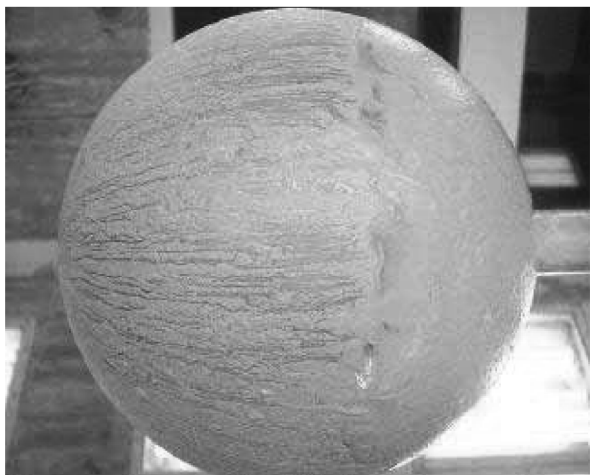


Figure 12. Flow visualization with oil emulsion at $M=0.14$

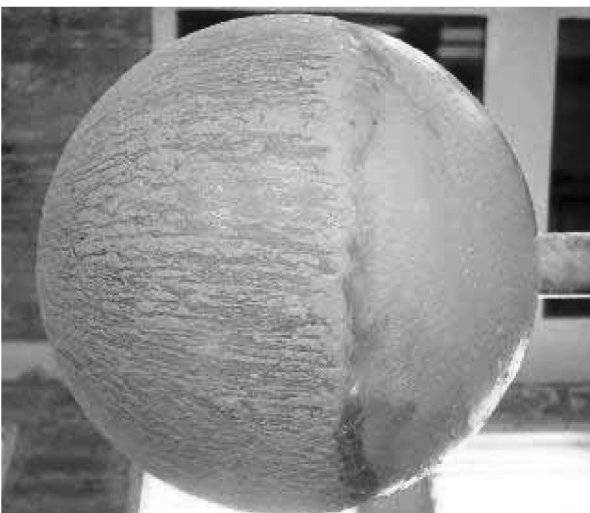


Figure 13. Flow visualization with oil emulsion at $M=0.18$

Throughout the numerical examination of the flow around the rough sphere and verification by the wind tunnel tests the following parameters were varied: surface roughness, e ; inlet and outlet velocity, V , and turbulence intensity, Tu . Turbulent models in use were $k-\epsilon$ Realizable, $k-\omega$ Standard and SST and Transitional SST (please see Table 1 with the illustrated differences between numerical and experimental data).

The influence of the inlet turbulence intensity, from the entire three test Reynolds numbers, was assumed to be the smallest at the largest velocity ($MRe=0.489$) and for that condition a number of parameter settings were combined. The idea, in the base, is similar to intentionally induce transition in a boundary layer over the model in the wind tunnel by additional devices. Hence, in case of a numerical examination of the sphere we had the advantage to vary the turbulence intensity level and the roughness height; these were used as numerical devices for controlling the flow similarity to wind tunnel ones. The coating discontinuity was represented through the roughness height averaged in value over the surface.

The combination of the parameters did not restrict the use of the non-realistic cases, hence the simple coping of the wind tunnel flow and model parameters was not expected to be given the good correlation of the results, in the first place because of the roughness definition in both cases and also the requirements for the y^+ witch dictated the height of the first layer of an inflation. In other words, in the presence of a roughness the requirements of the turbulence models for the first layer height could not be met simultaneously.

Table 1. Comparison of the numerical and wind tunnel results, $MRe=0.489$

Test	1	2	3	4	5
RSN	NK 004	MK 006REZ	NKX 800	MK 008REZ	NK 006
MRe	0.489	0.489	0.489	0.489	0.489
V [m/s]	66	66	66	66	66
Turb. model	Trans SST	$k-\epsilon$ Realiz.	$k-\epsilon$ Realiz.	$k-\omega$ Stand.	$k-\epsilon$ Realiz.
Tu [%]	0.10	1.50	0.10	1.50	1
ϵ [m]	0.000165	0.0005	0.000165	0.0005	0.0004
e/D	0.0015	0.0045	0.0015	0.0045	0.0036
y_{first} [mm]	0.0004	1.2000	0.0004	1.2000	1.0000
c_D	0.2979	0.3074	0.3127	0.3072	0.3214
Δc_D	-0.02727	-0.0178	-0.01247	-0.0182	-0.0038
Δc_D [%]	-8.3	-5.4	-3.8	-5.5	-1.1

Table 2. Comparison of the numerical and wind tunnel results for $MRe=0.282, 0.362$ and 0.489

Test	5	6	7
RSN	NK 006	NK 200	NK 300
MRe	0.489	0.362	0.282
V [m/s]	66	48	37
M	0.18	0.14	0.1
Turb. model	$k-\epsilon$ Realiz.	$k-\epsilon$ Realiz.	$k-\epsilon$ Realiz.
Tu [%]	1%	1%	1%
e [m]	0.0004	0.0004	0.0004
e/D	0.0036	0.0036	0.0036
y_{first} [mm]	1.0000	1.0000	1.0000
y^+			
c_D	0.3214	0.2970	0.2857
c_{DWT}	0.3252	0.2888	0.2805
Δc_D	-0.0038	0.0082	0.005
Δc_D [%]	-1.1	2.8	1.8
ϕ_{WT} [deg]	≈ 105	≈ 110	≈ 115
ϕ [deg]	99	102	104
$\Delta \phi$ [deg]	6	8	11
$\Delta \phi$ [%] (of 180°)	≈ 3	≈ 4	≈ 6

The criteria of selecting the most successful combination of parameters was the flow field similarity, represented by the velocity vector distribution, wall shear stress and pressure

distribution, and the values of the drag coefficient. Comparison of the numerical and wind tunnel results, $MRe=0.489$ are shown in Table 1. After selecting the combination of parameters for the highest Reynolds number, from Table 1, those were adopted and for the two other tests, for the lower Reynolds numbers, whose results are presented in Table 2.

From Fig.10 and Table 1 it may be seen that the closest value of the drag coefficients, at $MRe=0.489$, $M=0.14$, was obtained in value of about 1%, for the combination of $k-\epsilon$ Realizable model, turbulence intensity about 1%, relative roughness of $e/D=0.0036$ and the first inflation layer thickness of 1mm. Other combinations in results gave differences from 3.8% to 8.3%, which are unacceptable. Large differences in drag coefficients are originated because the roughness height defined a height of the first layer. The Transitional SST turbulent model, which, commonly, is successfully solving the cases with a flow separation, under the condition of the smooth models, appeared to be inappropriate in the cases of rough models. The industrial $k-\epsilon$ Realizable model gave, in this examination, a better global perception of the flow around the sphere. One should be careful in reading the results, keeping the awareness that the images of the flow field around the rough sphere, under the selected conditions, from the stagnation point are not presenting the laminar flow as well as that the wake is not presented realistically – as highly turbulent flow, but with tidy and symmetrical streamlines. The origin lies in the numerical method.

In the case of $MRe=0.362$, $M=0.11$, from Fig.10, less combinations were applied, according to previous experiences. The similar results were obtained but now the difference in drag coefficients between the best combination and the wind tunnel is larger in comparison to $MRe=0.489$. Other combinations, from Fig.10, showed more concentrated results, but targeted over the wind tunnel values.

For the test with the $MRe=0.281$, $M=0.1$, only one parameter combination was used to check the trend of the drag coefficient changes.

Actually, we made an attempt to predict the best combination of the parameters by a simple linearization of variable parameters, as shown in Fig.14. Following the trend of a drag coefficient variation, with the MRe and roughness height, the aim was to intentionally produce the flow in numerical domain that would be similar to real and lead to drag coefficient obtained in the wind tunnel. Hence, this way did not give the expected results, but on the contrary, a significant lost occurred.

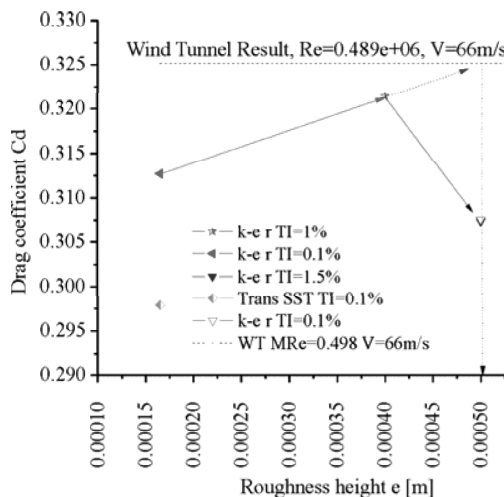


Figure 14. Drag coefficient as a function of roughness height obtained for different turbulent models and turbulent intensities

The curve, spline over the results for the combination of $k-\epsilon$ Realizable model, turbulence intensity about 1%, relative roughness of 0.0036 and the first inflation layer thickness of 1mm, followed the trend of a drag coefficient of the rough sphere in the wind tunnel, for the equal MRe , turbulence intensity of 0.1% and estimated roughness heights.

The polar angles at which the flow separates from the sphere surface, φ , in numerical simulations, were extracted from the first minimum of a skin friction coefficient over the sphere in longitudinal cross section (only a half of the sphere was observed for this purpose assuming symmetry in a steady flow). The comparison of the polar angles of the flow separation obtained numerically, φ , is given in Table 2, and is in a good agreement to the flow visualizations, φ_{WT} .

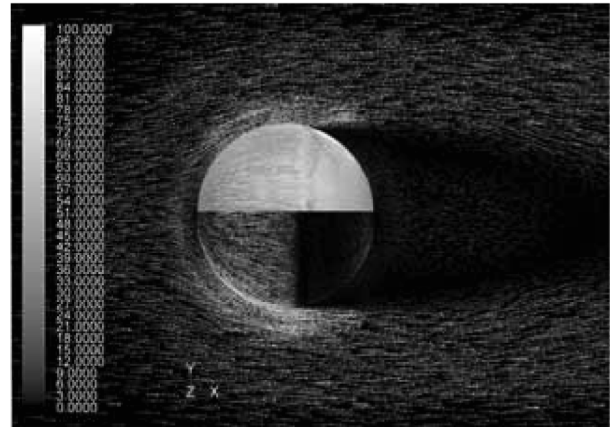


Figure 15. Overlap of the velocity vectors (Test 5) and the visualization at $MRe=0.489$, $M=0.18$

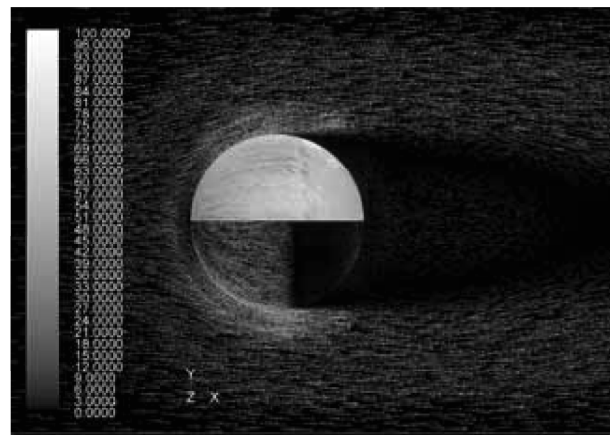


Figure 16. Overlap of the velocity vectors (Test 6) and the visualization at $MRe=0.362$, $M=0.14$

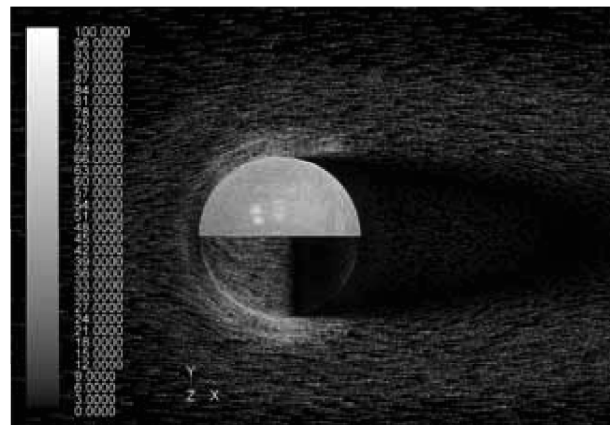


Figure 17. Overlap of the velocity vectors (Test 7) and the visualization at $MRe=0.281$, $M=0.1$

Increasing the Reynolds number, the results of the numerical simulations are closer to the wind tunnel's, described by differences of φ , from 6% to 3% of a half-circle. However, these results are presented in comparisons of the velocity vectors against the flow visualization images, for three $MRe=0.1; 0.14; 0.18$ in Figures 15-17 respectively. Even the flow fields' representations could not bring the exact values and relations; they confirmed the calculated results from the Table 2.

The used surface visualization method is very descriptive for the flow quality investigation at the test section, giving the valuable confirmation of the numerical results, while it is not expected to answer to the requirements of testing of the rough sphere.

It may be seen from the numerically estimated drag coefficients and the pressure distribution, in Fig.18, that the sphere, at $M=0.1, 0.14$ and 0.18 , is experiencing the turbulent flow, in the super-critical regime when the pressure in the sphere wake is recovering. For the selected boundary conditions and the roughness, numerical simulations predicted the flow well. Here, one may note that the used steady-state flow type in a combination with the RANS turbulent models are not able to predict the turbulent flow inside the wake, just the averaged values are available, but the key flow parameters are in a good agreement with the wind tunnel results. A more detailed study requires significantly larger resources.

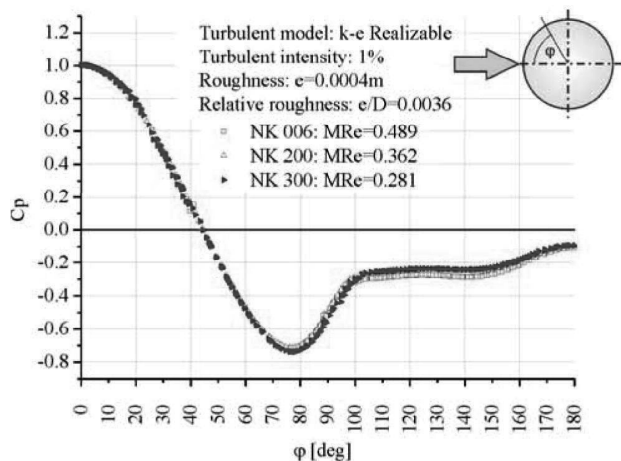


Figure 18. Pressure coefficient around the longitudinal half cross section obtained by the use of $k-\epsilon$ Realizable turbulent model, $Tu=1\%$ and $e/D=0.0036$, at $MRe=0.281, 0.362$ and 0.489

Furthermore, one may note a support-free configuration of the sphere in the numerical study. Introduction of the sting support was made to the level of the mesh when the number of elements increased to a number that can not be handled by the Solver, on the current resource. The absence of the sting support in a part resulted in the difference of the flow patterns and flow parameters of the numerical study in comparison to the wind tunnel data. So, it was assumed, according to the experience, that sting support system is introducing flow disturbance, especially in the range of critical Reynolds numbers, but numerically obtained differences are acceptable for the practical implementation of the presented results.

Concluding Remarks

The obtained differences of the results from the wind tunnel and numerical simulations are in the range of the engineering applications, but for the more detailed prediction of the flow in further studies, it is recommended to test the sphere in the wind tunnel covered with a fixed Carburundum coating, of different grains, and in a wider range of the Mach

numbers. Also, for further studies, the VTI intern-facilities tests and implementation of different measuring and visualization techniques will make a larger data base from which further numerical investigations and adjustments may be started.

As shown by the results, the turbulence model which accuracy was expected to be the highest, Transitional SST, as in the case of smooth models, in case of the rough models its applicability is restricted because of the high requirements of the numerical model that could not be reached.

Furthermore, the method of the emulated flow condition, under a criterion of reaching the flow similarity, by the selection of non-existed roughness and turbulent intensity, is applicable to the other objects, even assuming the higher level of accuracy, because of the fact that all the other streamlined and blunt bodies are less sensitive to the flow changes. Of course, for the practical problems which do not allow the fully experimental testing, the numerical simulations can be used as a confident extension tool, while in future researches a development of the additional numerical tools will help a closer prediction of the complex flows over the rough surfaces. In addition, the future numerical studies will examine the influence of the sting support on the flow over the rough sphere.

Acknowledgements

The authors express their sincere thanks to the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, for the financial support through the TR-35045, TR-35046 and TR-34028 (2011.- 2015.) projects.

The authors also express their gratitude to the Experimental Aerodynamic Laboratories of the Military Technical Institute, VTI, Belgrade, its management and staff for the support and execution of the experimental part of this research.

References

- [1] RIABOUCHINSKY,D.P.: *On the Resistance of Spheres and Elipsoids in Wind Tunnels*, NACA Technical Note No.44, 1921.
- [2] KRUMINS,M.V.: *A Review of Sphere Drag Coefficient Applicable to Atmospheric Sensing*, NOLTR-72-34, Naval Ordnance Laboratory Silver Spring, Maryland, 1972.
- [3] ZXHM, A.F.: *Flow and Drag Formulas for Simple Quadrics*, NACA Report No. 253, 1927.
- [4] WIESELSBERGER,C.: *New Data on the Laws of Fluid Resistance*, NACA No.84, 1922.
- [5] SCHLICHTING,H.: *Boundary-Layer Theory*, 7th edn., McGraw-Hill, New York, 1979, ISBN 0-07-055334-3.
- [6] ACHENBACH,E.: *Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers*, Journal of Fluid Mechanics, 1972, 54, pp. 565-575, doi:10.1017/S0022112072000874.
- [7] ACHENBACH,E.: *The Effects of Surface Roughness and Tunnel Blockage on the Flow Past Spheres*, Journal of Fluid Mechanics, 1974, 65, part I, pp 113-125.
- [8] BATCHELOR,G.K.: *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 2002, ISBN 0-521-66396-2, UK.
- [9] HOERNER,S.: *Tests of Spheres with Reference to Reynolds number - Turbulence and surface roughness*, NACA TM 777, 1935.
- [10] CONSTANTINESCU,G., CHAPELET,M., SQUIRES,K.: *Turbulence Modeling Applied to Flow over a Sphere*, AIAA Journal, 2003, 41 (9), pp.1733-1742.
- [11] CONSTANTINESCU,G., SQUIRES,K.: *Numerical investigations of flow over a sphere in the subcritical and supercritical regimes*, Physics of Fluids, 2004; Vol.16, No.5, DOI: 10.1063/1.1688325.
- [12] JONES,D.A., CLARKE,D.B.: *Simulations of Flow Past Sphere using a Fluent Code*, DSTO-TR-2232,, Australian Government, Department of Defence, Maritime Platforms Division, Defence Science and Technology Organisation Australia, 2008.

- [13] FORNBERG,B.L.: *Steady viscous flow past a sphere at high Reynolds numbers*, Journal of Fluid Mechanics, 1988, 190, pp. 471-489, DOI:10.1017/S0022112088001417.
- [14] MEHTA,R., PALLIS, J.M.: *Material and Science in Sports.Dynamics: Sport Ball Aerodynamics: Effects of Velocity, Spin and Roughness*, TMS, 2001, pp. 185-197.
- [15] CROSS,R.: *Sports ball aerodynamics*, Physics Department, University of Sydney, <http://www.physics.usyd.edu.au/~cross/TRAJECTORIES/Sports%20Balls.pdf>.
- [16] KENSURD,J.R.: *Determining Aerodynamic Properties of Sports Balls in Situ*, MSc Thesis, Washington State University, Department of Mechanical and Materials Engineering, August 2010. <http://baseball.physics.illinois.edu/KensrudThesis.pdf>.
- [17] TANEDA,S.: *Flow Visualization – Scientific Images*, SciPress, Tokyo, Japan, 2000. ISBN 4-88704-126-8
- [18] CROSS,R.: *Wind Tunnel Photographs*, Physics Department, University of Sydney, <http://www.physics.usyd.edu.au/~cross/TRAJECTORIES/Fluidflow%20Photos.pdf>.
- [19] RISTIĆ,S.: *Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels Part I – Non optical Methods*, Scientific Technical Review, ISSN 1820-0206, 2007, Vol.57, No.1, pp.39-49.
- [20] RISTIĆ,S.: *Flow visualization techniques in wind tunnels –optical methods (Part II)*, Scientific Technical Review, ISSN 1820-0206, 2007, Vol.57, No.2, pp.38-49.
- [21] RISTIĆ,S.: *A View in the Invisible*, Theoret.Appl.Mech.TEOPM7, Belgrade, Serbia, 2013, Vol. 40, No. 1, pp.87-119.
- [22] RISTIĆ,S.: *Vizuelizacija strujanja oko kugle metodom uljanih emulzija u aerotunelu T-35*, VTI, 2004.
- [23] ČANTRAK,Đ., JANKOVIĆ,N., RISTIĆ,S., ILIĆ, D.: *Influence of the Axial Fan Blade Angle on the Turbulent Swirl Flow Characteristics*, Scientific Technical Review, ISSN 1820-0206, 2014, Vol. 64, No. 3, pp.23-30.
- [24] ANDERSON, T.J., UHLHERR, P.H.T.: *The Influence of Stream Turbulence on the Drag of Freely Entrained Spheres*, 6th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Adelaide, Australia, 5-9 December 1977.
- [25] TERWAGNE,D., BROJAN,M., REIS,P.M.: *Smart Morphable Surfaces for Aerodynamic Drag Control*, Adv. Mater.2014, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2014., pp. 1-4. DOI: 10.1002/adma.201401403
- [26] ANSYS Fluent 12 Documentation

Received: 10.04.2015.

Accepted: 19.06.2015.

Eksperimentalno i numeričko istraživanje nadkritičnog strujanja oko hrapave kugle

Rad predstavlja eksperimentalno i numeričko istraživanje modela sfere sa ciljem predviđanja ponašanja strujanja u prisustvu hrapavosti površina. Rezultati ukazuju na probleme i predlažu rešenje za inženjersku primenu. Sličnost između strujnih slika dobijenih numeričkim putem i u aerotunelu je postignuta kombinovanim uvođenjem turbulencije u numeričkoj slobodnoj struji hrapavosti površine, zbog ograničavajućih zahteva turbulentnih modela.

Кljučне речи: aerodinamika, aerodinamički tunel, numerička simulacija, sfera, hrapava površina, strujanje fluida

Экспериментальное и численное исследование сверхкритического обтекания шероховатых шаров

Эта статья представляет собой экспериментальное и численное исследования модели сферы с целью прогнозирования поведения потока в присутствии неровностей поверхности. Результаты указывают на проблемы и предлагают решения для практического инженерного применения. Сходство между текущими изображениями, полученными численным моделированием и в аэродинамической трубе достигается за счёт смешанного введения турбулентности в численном свободном потоке и шероховатости поверхности, из-за ограничительных требований турбулентных моделей.

Ключевые слова: аэродинамика, аэродинамическая труба, численное моделирование, сферы, неровная поверхность, поток жидкости.

Recherches expérimentales et numériques du courant super critique autour d'une sphère rugueuse

Ce travail présente les recherches numériques et expérimentales du modèle de sphère afin de prévoir le comportement du courant dans la présence des surfaces rugueuses. Les résultats obtenus indiquent les problèmes et proposent les solutions pour l'application dans l'ingénierie. La similitude entre les images de mouvement obtenues par la voie numérique ainsi que dans la soufflerie aérodynamique a été réalisée en combinant l'introduction de la turbulence dans le courant numérique libre et la surface rugueuse à cause des exigences limitées des modèles turbulents.

Mots clés: aérodynamique, soufflerie aérodynamique, simulation numérique, sphère, surface rugueuse, courant des fluides.

ПРИЛОГ 2.

Invited paper

TURBULENCE INVESTIGATION IN THE VTI'S EXPERIMENTAL AERODYNAMICS LABORATORY

by

Slavica S. RISTIĆ^{a*}, Suzana Lj. LINIĆ^a, and Marija Dj. SAMARDŽIĆ^b

^a Institute Gosa, Belgrade, Serbia

^b Military Technical Institute, Belgrade, Serbia

Review paper

<https://doi.org/10.2298/TSCI160130187R>

Wind tunnels are the aerodynamic laboratories which task is to enable high quality and stable airflow in controlled volume, a test section, during run time, in order to study the effects of streaming around various aeronautical or non-aeronautical models (airfoils and bluff bodies with complex motorized or robotic constructions). The main requirement that leads to quality and reliable measurement results is a high flow quality in the test section: uniformity of the velocity and pressure fields along and across the test section, low turbulence level and low flow direction angularities or swirling. The knowledge of low parameters enables the exchange of the scientific and technical information, comparison of the experimental results from different wind tunnels and data scaling of the model to the real scale. The turbulence intensity TI significantly affects the wind tunnel results and reduction of turbulence is of the highest importance for the quality measurements. This paper presents the Experimental Aerodynamics Laboratory of the VTI in Belgrade, the equipment and methods of turbulence measurements in the test section stream and around different test models. Wind tunnel facilities maintain equipment and devices for sampling, acquisition and data reduction for various test types, from forces and moment measurements, over the pressure distribution measurements to the advanced measurements, followed with the appropriate flow visualization techniques. The modern instrumentation enables determine flow quality and its influence on tests and measurement results of static and dynamic model characteristics.

Key words: *wind tunnels, turbulence, aerodynamics, measurement, flow visualization*

Introduction

Implementation of the wind tunnels, for research and engineering, demands increasing aerodynamic characteristic accuracy to achieve better energy efficiency and transportation costs. An accuracy of the measured data in first depends on: testing flow quality, a test model design and precision of the measuring equipment.

Successful aircraft design needs very precise behavior prediction. Experimental aerodynamics gives the most accurate prediction or confirmation of the calculated aerodynamic parameters for the models in various sizes and in different flow conditions.

This paper presents the Experimental Aerodynamics Laboratory (EAL) of the Military Technical Institute (VTI) in Belgrade, the equipment and methods of turbulence investi-

* Corresponding author, e-mail: slavce@yahoo.com

gation in the test section stream and around different test models. The special attention is paid on description of flow quality and its influences on aerodynamic characteristic determination, sources of flow perturbations in the test section, turbulence characteristics of wind tunnels, modern equipment, and methods used in EAL for turbulent flow measurement and visualization. The results obtained in a number of turbulence experimental tests in the EAL are presented and illustrated with numerous diagrams and photographs.

Turbulence in the wind tunnel

Wind tunnels (WT) and water tunnels are the experimental facilities for research on the aerodynamic nature of scaled objects surrounded/submerged within an artificial free stream flow of desirable characteristics and low level of turbulence, to simulate atmosphere and obtain realistic results. Many factors influence measurements of the model aerodynamic characteristics, still turbulence is a major unknown and most influential factor.

The flow quality parameter describing turbulence is the turbulence intensity (TI), $Tu[\%] = u_{rms}/\bar{u}$, correlation between rms of stream longitudinal velocity fluctuations and mean velocity.

The turbulence in WT is disturbing the boundary layer – deforming a shape, stability, place of the transition and separation points, pressure distribution, and shock wave-boundary layer interactions [3]. The reported turbulence levels [1-3] increased with the increase of the WT Mach number (M) and unit Reynolds number (Re). The presence of turbulence, under certain conditions, is even capable to impact the tunnel operation [2].

The turbulence of free stream impact may be longitudinal and normal to the stream. In streamline direction, turbulence produces fluctuations of the dynamic pressure around the model, while in normal direction produces fluctuations of the model position. Furthermore, flow disturbance is composed from turbulence and noise [2]. Both velocity and pressures, as time dependent variables, are present with a difference in dominancy of effects: the unsteadiness of velocity is predominant in low speed WT and, in the contrary; pressure unsteadiness is dominant at supersonic and hypersonic range [1]. Large closed circuit and continuous type wind tunnels, like large subsonic WT of VTI produce a flow of small amplitude and low-frequency fluctuations. Empirically obtained requirements for the flow quality [4] pointed out that longitudinal fluctuations of velocity of 0.1% are considered as good flow quality property, even for basic tests of boundary layer transition. About '70s, several WT achieved very low TI levels, just about 0.02% to 0.05% [5].

The most sensitive aerodynamic characteristics under turbulence have a blunt body [6-8], especially sphere, thus it is used as a calibration standard for flow quality characterization in a range of M up to 0.4 [8]. The influence of local initiation of turbulence over the model with imperfections or roughness leads to a requirement of high quality model production [8].

Sources of turbulence in the wind tunnels

Requirements of basic characteristics of the WT tests, Mrkalj [9], together with WT type selection, Zotovic [10], in first defines the model, test section size and required flow characteristics, while all parts have the goal to support and prepare flow and measurement accuracy. Successful WT construction is a product of many compromises meeting acceptable costs.

For overcoming of the aerodynamic problems caused by free stream turbulence, of the major importance is the quality of WT design and details of calculations [11], in addition

with numerical simulations nowadays, which have to give the optimal dimensions and power supply that will produce the best flow quality and energy efficient facility. Afterwards, scaled the pilot WT building and testing are following, and finally building of the WT with special care and skills.

It may be resumed that main parts, that produce free stream turbulence are all the parts at which the pressure difference or sudden cross-section changes occur. Sisojev [2, 12] and Zotovic recommended the original calculation methods and applied it on the VTI wind tunnels. Major sources of turbulence in subsonic tunnels are: collector, settling chamber, propeller, corners and other devices.

At supersonic wind tunnels the turbulence intensity TI is decreased at the beginning, because of downstream choking, but with the increase of Mach number, for high Reynolds numbers, turbulence intensity TI returns the path of increase [1]. Inside intermittent wind tunnels [1], the diffuser is producing intermittent flow separation, and further on transport complex flow along the tunnel. Therefore, construction of the transonic WT [1] has to be made with attention to sonic choke device design, screens, honeycomb, corners and acoustic baffles, *etc.* The boundary layer transition and separation, as other flow phenomenon in the vicinity of a mode, are in major induced by noise. Pope [13] summarized that in transonic regimes WT produces a very high level of turbulence mainly because of the influence of reflected shock waves from the walls, diffusion pulsations shocks inside the pressure regulator of the intermittent wind tunnels.

Devices that intentionally create turbulence are used in testing with some of the purposes: aerodynamic characteristics of model under different free turbulence, testing of a model with fixed roughness for comparison of results, testing of a motorized model, ground effect testing, *etc.*

Turbulence measurements

Measurement techniques are selected according to the test velocity mainly. The imperative is to know the characteristics of the WT flow quality and the effects on measuring errors [1, 9, 10].

Measurements of TI at low speeds are made by sphere models (force and pressure type) [14], fig. 1(a), while with a velocity increase (over $M = 0.4$) the dominancy is taken by a cone model, hot-wire/hot-film, fig. 1(b), and optical non-destructive techniques. For the aim of validation, for different velocity ranges, tests in different techniques are overlapped. Hot-wire anemometer or direct measurement transducers are disturbing the flow and measures collected high frequency fluctuations of velocity, temperature, and static pressure (noise). Devices that do not disturb the flow, with or without introducing particles are: Laser Doppler anemometry (LDA) (supersonic), Particle image velocimetry (PIV) (subsonic/supersonic). Especial contribution to revealing and understanding of turbulence phenomenon, both; large- and small-scale gives flow visualization, example: large-scale turbulence by mesh, fig. 1(c).

Some turbulence reduction measures

Selection of type [10] and characteristics of future WT [9] and implementation of a detailed WT design calculation for specific needs are major pre-building turbulence reduction measures as well as development of a pilot wind tunnel. However, as possibly large test section is favorable, also the optimal elongated design for cones, radial corners, composition of the settling chamber items. Turbulence reduction measures might elongate the gross dimensions of a WT so necessary field area, much more constructional materials and building time

or power are needed. Again, costs led to compromises between construction and flow quality. For instance, screens of meshes may multiply in several different design stages of reduce turbulence gradually while producing decreased gross power loss in comparison to single screen of dense strings, or the plates have replaced the screens since a quite similar effect [5]. The wall perforation has double task – to prevent shock reflection and wall boundary layer suction. After building, turbulence reduction measures may be an addition, after existing settling chamber, if such an assessment reduces turbulence yet unaffordable.

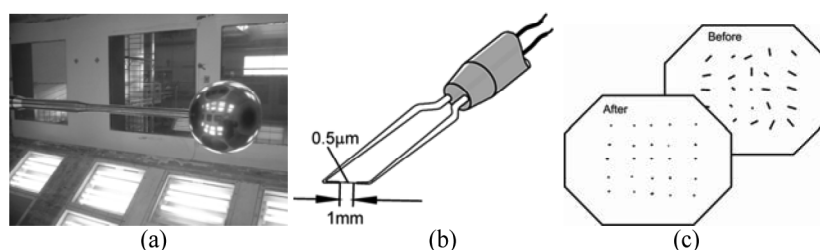


Figure 1. Small-scale turbulence measuring devices (a) sphere model in VTI T-35 WT (b) hot-wire and (c) sketch of a screen with tufts in the test section
(for color image see journal website)

The walls, model support and model finishing treatment and cleanliness of the WT tube in operation are also imperatives, both for preventing turbulence and for the test safety. The overall WT walls should have aerodynamically smooth surfaces, connections without significant convex details, covered concave or gap details, repaired small imperfections of tube surfaces, in one – all details and configuration/measuring support devices (pressure tubes, model part carriers and positioners etc.) that are not purposed for measurement should be immersed into wall/support/model contours.

Unfortunately, the ones made an unrecoverable construction mistake, causing unacceptable TI, cannot be repaired just moderate to a lower level or even leads to re-building. In cases that specific required turbulence level is not reachable in a facility, it is sometimes better even to change the facility.

Calibration and correction of the WT results

The WT measuring equipment (fig. 1) required for turbulence measurements is of the highest level of accuracy, WT calibration tests are wide and times consuming, furthermore, some of the effects are still a subject of research. All this leads to increased costs. In the practice, each WT has to be calibrated before putting into operation, as well after constructional changes. Test section calibration is presenting the flow field quality, characteristics, and parameters of flow along the test section over cross sections and providing the flow correction factors for the aerodynamic measurements. The basic WT calibration data are as follows: distribution and fluctuations of static, stagnation pressure and temperature; magnitude, distribution, fluctuation and direction of flow velocity and turbulence and noise, by means of intensity, length and time scale, at different positions over the cross section of a test section. Comparison of the available standard models [13, 16] from different institutions leads to verification and measures for adjustments and final validation of model aerodynamic characteristics are obtained in flight test.

Corrections due to turbulence are incorporated in two segments of the test. Measurements of flow parameters, in operating range, are corrected with data of all calibrated in-

fluences for the empty test section, as are angularity, turbulent intensity, *etc.* [17]. A test is usually compounded of a number of separated tasks with the goal of subtraction of a number of influences, for example of support system, with/without model propellers running, fig. 2(a) [18], open/closed inlet model, fig. 2(b) [19], *etc.* Tests may be run in schemes with involved mirrored configurations, fig. 2(c), use of the magnetic levitation, vertical free flight and similar, for mitigation of secondary effects.

Application of various test and correction techniques provide in high reliability of the WT results for a number of verifications, especially for theoretical calculations and numerical simulations because the flow quality at the research wind tunnels provides excellent flow quality. Furthermore, the WT are used as a secondary calibration standard, for example, testing of: a flow cell [20], an anemometer [21], a Pitot tube, *etc.*

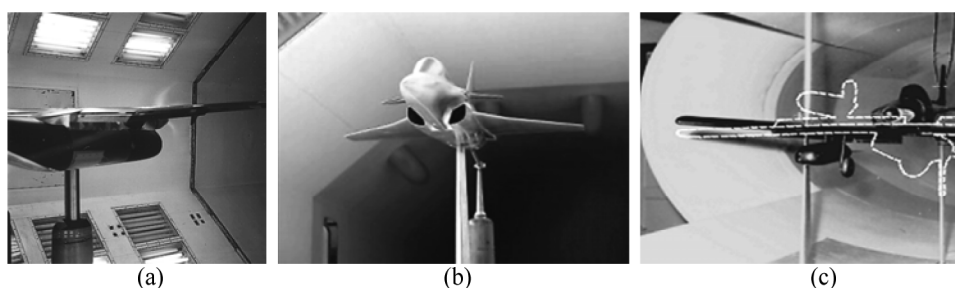


Figure 2. Examples of model configurations and support systems

A good estimation of aerodynamic coefficients and stability and control derivatives are of fundamental importance in the design and development process of an aircraft. Stability derivatives have a strong influence on aircraft and missile response to maneuver conditions. Generally, these coefficients and derivatives are obtained using theoretical methods and WT testing. Turbulence causes variations, of random nature, in the angle of attack (α), in the air-speed (V), and in all other variables of the dynamic model [22-25].

Experimental Aerodynamics Laboratory in the VTI

The Military Technical Institute (VTI) in Žarkovo is the largest national institution dedicated to the scientific and technical research. Since the establishment in 1946, it is continually developing. The Aeronautical Department employs state-of-the-art installations for designing and testing of the aeronautical and non-aeronautical models and devices [24]. Four divisions provide a task of scientific and technical support to the industry and the organizations on a national and international level: Aircraft Design, Avionics, Experimental Aerodynamics Laboratories and Structure Testing.

Significant clients of the VTI are: the Military of the Republic of Serbia, LAGG, IPTN, UTVA, Serbian Railways, and Central Hydrodynamic Institute CAGI in Moscow, *etc.* Wind tunnels are equipped with modern instrumentation, making possible various WT tests and measurements of static and dynamic model characteristics. Workshop facilities are equipped with CAD/CAM systems and CNC lathe and milling machines. VTI can also provide the complete design and building of wind tunnels, WT systems, and instrumentation for various types of tests.

The growth of VTI as a design center in the field of experimental aerodynamics was backed up by the development of WT facilities. The first WT was built in 1952, and the latest

one was the T-38 Trisonic WT in 1986. The VTI facilities were used to support Galeb G-2, Jastreb, Kraguj, Orao, Super Galeb G-4, Lasta and Super Galeb G-4M aircraft programs.

Wind tunnel facilities of the VTI

T-32 WT. Small low-speed wind tunnel is the oldest WT in use. It has a closed-circuit with semi-open, elliptic, test section (1.8 m \times 1.2 m, length 2.0 m). Driven by a DC motor of 91 kW, with manual control and continuous regime, it is running up to speeds of 72 m/s, while unit length Reynolds number is up to 5 million/m. The main equipment consists of external six-component balance, pressure and temperature transducers for flow and pressure distribution measurements, smoke generator. Data acquisition and data reduction system are available.

T-33 water tunnel. It is continuous close circuit tunnel, driven by DC motor of 91 kW and controlled manually. Maximal water velocity is up to 11 m/s and unit length Reynolds number up to 10 million/m. Test section is octagonal, dimensions are 0.5 m \times 0.35 m, length of 0.5 m. It is equipped with pressure transducers, thermometers, 2-D LDA system, TV system and other flow visualization devices.

T-35 WT. Large low-speed wind tunnel has a closed circuit of length 72 m and width 30.6 m, from the top, three changeable octagonal test sections of dimensions 4.4 m \times 3.2 m, length 5.5 m, with a cross-section area of 11.93 m², forming a flow of excellent quality. Mach number range: from 0.1 to 0.6 with fan only and atmospheric conditions, 0.6 to 0.8 with fan and injector running simultaneously while pressurized up to 1.52 bar. The unit length Reynolds number is up to 2.3 million/m. In continuous regime the WT is driven only by a fan, and if the injectors are added as a power supply running time is bounded to 120 s at M = 0.8. Fan drive is consisted of four AC motors of maximum continuous power of 7.2 MW, propeller of 23 variable pitch blades, rotating at 400 RPM. Injector system is fed with pressure up to 20 bars, through 8 nozzles in the tube. It is equipped with: six-component external TEM balance, multi-component internal balances, Scanivalves for pressure distribution measurements, stability derivatives apparatuses for pitch/yaw/roll and translation measurements, air intake testing rig, *etc.* Data acquisition and reduction systems are supported all the tests.

T-36 WT. The small trisonic wind tunnel is of an indraft type with square test section, dimensions of 0.25 m \times 0.25 m, length 0.6 m, with changeable walls - solid or fixed porosity perforated. It is driven by vacuum level of 0.1 bar. It is driven by vacuum tanks, MPR pumping unit and air dryer. Operational M is from 0.2 to 1.1, and over at 1.56, 1.86, 2.48, and 3.24. The maximal unit Reynolds number is up to 15 million/m. Single test run duration is up to 60 s. T-36 is equipped with: multi-component internal balances, side wall strain gauge balance, Scanivalves for pressure distribution measurements, Schlieren system, 2-D LDA system, data acquisition and reduction system, too.

T-38 WT. The large trisonic is the youngest (1986.), and the only one that was not designed and manufactured by national WT experts. The T-38 is of intermittent, blow-down tunnel type. Drive consists of two five-stage compressors, compressor drive of 3.8 MW AC motors, storage tanks of capacity 2600 m³ and pressurization up to 20 bars. Operational range is from Mach number 0.2 to 4.0 (controlled by the flexible nozzle) while the unit Reynolds number is: up to 140 million/m when 3D test section is in use and up to 62 million/m at M = 1 with the 2-D test section. The stagnation pressure range is from 1.8 to 16 bars. Run time is from 6 s to over 50 s depending on the test conditions. The three test sections are available for different operational ranges as follows: a) subsonic/supersonic with closed, solid walls, dimensions of 1.5 m \times 1.5 m square, length 4.5 m; b) transonic 3-D closed test section with var-

iable porosity perforated walls, dimensions $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ square, length 4.5 m, and c) subsonic/ transonic 2-D closed test section with variable porosity perforated walls, dimensions of $1.5 \text{ m} \times 0.38 \text{ m}$, length 1 m. Flow quality/ regulation over Mach number is 0.5% and for stagnation pressure: 0.3%, while noise is treated by LEHRT requirements. Equipment is capable of 3-D and 2-D force and moment measurements, pressure distribution, model dynamic derivative measurements [22-24] and flow visualization, consisting of: multi-component internal balances, Scanivalves and electronically scanned integrated transducers for pressure distribution measurements, wake traverse system for accurate 2-D drag measurements, stability derivatives apparatuses for pitch/yaw and roll measurements, air intake testing rig. The high-speed system for data acquisition and data reduction is in use.

Equipment, methods, and some results of turbulence investigations in EAL

Hot-film anemometer

The hot film anemometer with constant temperature (CTA) is a modular type produced by TSI, consists of: linearized anemometer, model 1054B, monitor and power supply modules, model 1051, RMS (DC) voltmeter, model 1076, hot-film and hot-wire probes; model 1232 wedge hot-film, model 1238 wedge hot-film 450 sensor edge, probe supports and accessories and FFT Analyzer. It is used for turbulence measurements in all WT in VTI.

The intensity of the longitudinal turbulence (Tu) in the T-38 wind tunnel, in a 3D test section with flat walls, in the range of M from 0.2 to 0.8, is presented in fig. 3. [26].

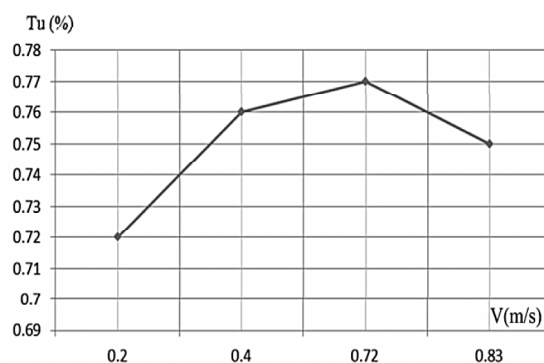


Figure 3. Longitudinal Tu in FN 3D test section in T-38 (1984)

LDA measurements of turbulence

Laser Doppler Anemometry (LDA) is an optical technique for measurements of velocity and turbulence in gas, liquid, and mixing fluids, flame, rotating machinery, in combustion, channels, chemically reacting flows, wave tanks, and wind or water tunnels. LDA systems are designed as compact or modular ones, with fiber optics or classical, for large distance and large area measurements or for micro applications [27-32]. The basic idea underlying LDA is to measure the velocity of tiny particles transported by the flow. If these particles are small enough, their velocity is assumed that of the stream and LDA provides a measure of the local instantaneous velocity, the mean velocity as well as the turbulent quantities.

Three LDA systems are used in the VTI laboratories, the first is one component, the second is two components LDA (separation of two components of velocity is achieved by polarization of He-Ne laser light). It can be used in a velocity range up to 300 m/s, measuring

point up 0.6 m from the front lens, fig. 4(a). The third system is 3D LDA, designed for VTI WT T-38 [33]. It is based on three colors of the Ar-Ion laser with 5 W power. The mirrors and prisms direct the beams leaving the transmitters to a common probe volume, fig. 4(b), at a suitable angle to resolve three simultaneous velocity components. This system is used for velocity measurement up to 750 m/s at distance up 2.7 m.

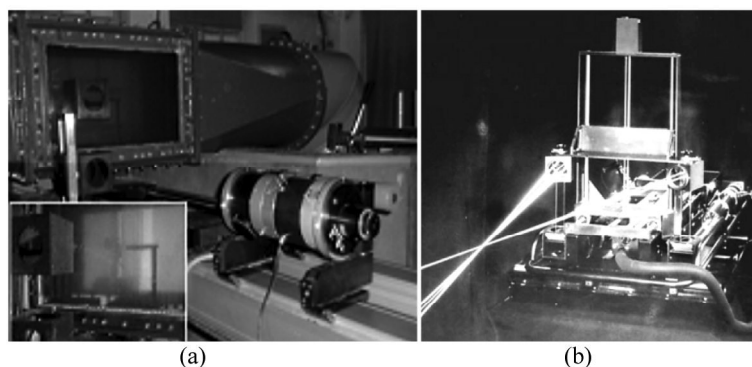


Figure 4. (a) 2-D LDA in T-33 and (b) 3-D LDA for T-38

The LDA velocity and turbulence measurement in the T-33 water tunnel. The calibration of water tunnel was made by the 1-D LDA system and compared with data obtain from Primary Measuring System (PMS), Pitot tube and rake. The velocity and TI distribution along horizontal and vertical line, crossing in tunnel axis, was measured. Special attention is considered to measurements in the boundary layer. The results for two velocities 1 m/s and 4.5 m/s are represented in figs. 5(a) and 5(b) [34, 35], comparative calibration diagrams V (m/s) and Tu (%) as the functions of numbers of motor rotation per minutes, and boundary thickness measured by LDA in the water tunnel.

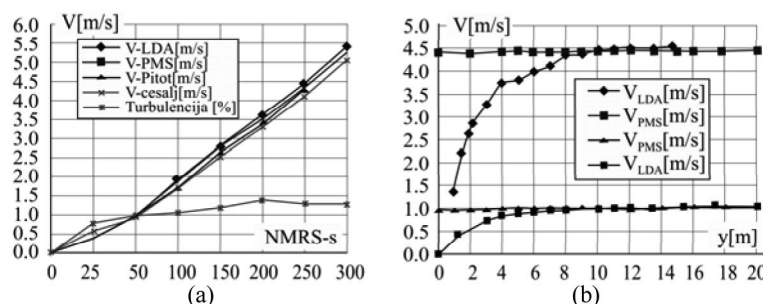


Figure 5. Calibration of the water tunnel by LDA measurement around a hydrofoil
(for color image see journal website)

The velocity and turbulence distribution around the central profile has been measured by 2-D LDA. The results of measurements have been used as data for making the velocity vector diagrams shown in figs. 6a and 6b, together with diagrams of velocities and turbulence intensities. The hydrofoil angle was $\alpha = 25^\circ$, the free stream velocity $V_\infty = 5.32$ m/s. These results are used for definition of boundary conditions in CFD [34-36].

The LDA measurements in the T-38. The calibrating results of the T-38 trisonic WT test section with 3-D LDA system are shown in fig. 7. Application of LDA in calibration of

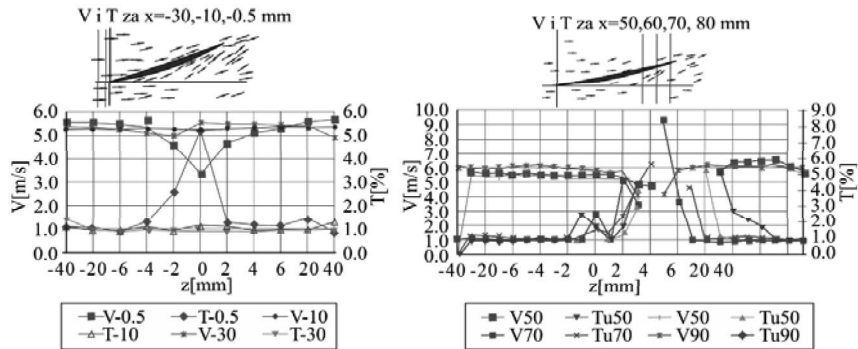


Figure 6. LDA velocity and turbulence measurements around hydrofoil in T-33, $V_\infty = 5.3$ m/s, $\alpha = 25^\circ$ (for color image see journal website)

the large test section has some advantages, but has disadvantages (expensive running time of a large WT, a large measuring distance, decreasing light intensity with the 4th power of the distance, vibrations either of the wind tunnel, the tested model or the LDA system), too.

The operational application of the LDA instrumentation requires a fully automatic measuring run, which includes a computer controlled traversing mechanism with high speed and short time of data acquisition. To optimize that, the laser intensity as well as the aperture of the receiving optics has to be increased. However, laser with a large power are non-stable in Gaussian mode and optics with large apertures are very expensive. To avoid this disadvantage, achieve the necessary improvement in sensitivity, and reduce the amount of unwanted scattered light, the forward arrangement can be used. Very often off-axis setups are preferred as long as measuring distance is not too large [37, 38]

Calibration of T-38 WT test section with 3-D LDA system, velocity and turbulence data are presented in fig. 7. The dashed line is expecting value of the velocity and the plane line is measurement values.

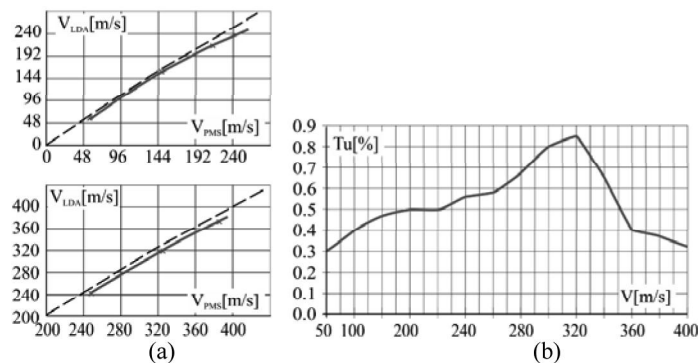


Figure 7. (a) Calibration of T-38 test section with 3-D LDA system, (b) longitudinal TI in T-38 WT determined by LDA measurements (for color image see journal website)

Investigation of turbulence by pressure and force measurement

The turbulence factor, TF, for low speed wind tunnels, is a free flow correction parameter of Reynolds number, for obtaining an effective Reynolds number, and commonly

spheres are used as standard test models. For the aim of validation of results, two types of spheres are used: a drag sphere and a pressure sphere. Models of standard dimensions, glossy finished [7, 14, 39, 40], made of wood, metal or plastic, are mounted in the test section, by sting support preferably. Glossy finish and accuracy of shape are oblique for turbulence influence measurements because roughness or shape deviations are causing unknown errors in readings and thus errors of turbulence factor. Drag sphere is subjected to force and moment measurements, with interest in drag component, while the pressure-sphere model is subjected to measurements of pressure coefficient, calculated from measured values of stagnation (by one front orifice) and average base pressure (by four centered orifices).

Turbulence factor in T-31 WT (1957). Blower from the 1951. year was the very first WT at the VTI (fig. 8) [39, 40]. Regardless, it was an open circuit wind tunnel; turbulence factor was estimated by two pressure spheres. Results of calibration tests are shown in figs. 8(b) and 8(c) for the cross section of the T-31 and 10 m downstream, and were $TF = 1.57$ and 1.9, respectively.

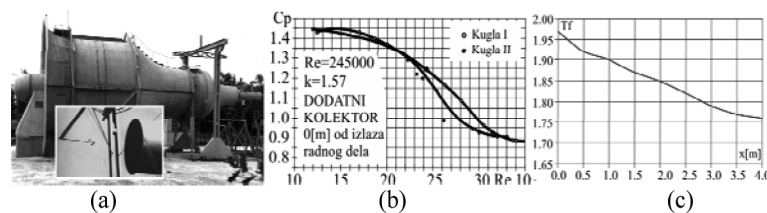


Figure 8. (a) T-31 WT, (b) Pressure coefficient vs. Reynolds number of the T-31 test section entrance, (c) turbulence factor along distance from the test section

Turbulence measurement in T-32. Turbulence measurements were made of a metal high polished pressure-sphere, diameter of 110 mm. The sphere was mounted on a one-leg support and positioned for one cross section in five places in order to centre line of a test section and similar over a three cross sections: at 550 mm, 460 mm from test section entrance and at the test section centre line. The estimated turbulence factor for the WT is $TF = 1.14$.

Turbulence measurement in T-35. Measurements of the drag and pressure coefficient for estimation of the turbulence factor of the T-35 test section were done by a metal glossy sphere. The sphere model was supported with a sting on model strut support system (fig. 9) [14]. Drag coefficient vs. the unit Reynolds number is plotted in fig. 9(b), from where the critical Reynolds number was found and used for obtaining the turbulence factor of the T-35 wind tunnel, $TF = 1.03$.

The turbulence factor, $TF = 385000/Re_{critical}$ represents the ratio of the critical Reynolds number of a sphere in free flight and a critical Reynolds number obtained for the wind tunnel. $Re_{critical}$ was agreed to be defined as Reynolds number under which drag coefficient of the sphere takes the value $C_d = 0.3$. An effective Reynolds number, $Re_{effective} = TF \cdot Re$, used in testing of different other models, is the corrected value that bridged the flow condition in the test section to free flight. TI could not be obtained by the sphere test and for its determination a hot-wire measurements have to be added. Force and hot-wire measurements are determining a function of TI with the critical Reynolds number for sphere. TI is increased while Reynolds number is decreased.

Optical methods for turbulent flow investigation

The three principal optical methods for turbulent flow investigations are: shadow, Schlieren, and interferometry. Optical methods are contactless and very sensitive to little cha-

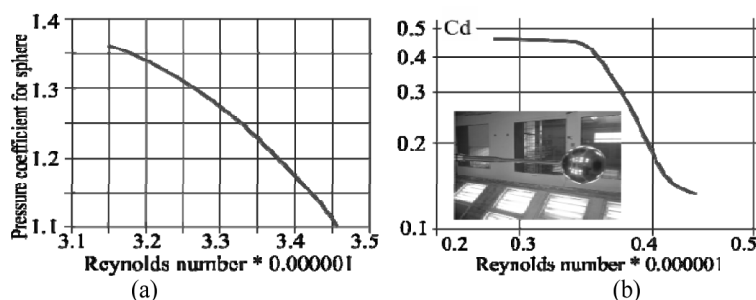


Figure 9. (a) C_p at T-32 test section, (b) C_d sphere in the T-35 test section (for color image see journal website)

anges of flow properties. Optical methods make possible to visualize and determine aerodynamically flow parameters in total volume of the test section (density, pressure, flow velocity, M , show location of shock and expansion waves, nature and transformation of a boundary layer, an interaction of different effects in complex flow fields and so on) [41-44].

The base arrangement of all optical methods consists of a light beam which passes through such a set of windows and through the flow field. Each ray of the light beam is disturbed somehow depending on the inhomogeneous distribution of refractive index in the fluid. The simultaneously alterations occur: the ray can be deflected from its original direction and the phase of the disturbed ray can be shifted with respect to that of the undisturbed ray. The first phenomenon is related to shadow and Schlieren methods, and the second with interferometry. The shadow method visualizes only fields in which the second derivative of refractive index (density) is not uniform and is not zero. The Schlieren method visualizes the field with non-uniform light propagation direction, *i. e.* the field with constant density gradient. Interferometry is capable to visualize the changes in refractive index, *i. e.* the changes of density. This method makes possible to evaluate quantitative density measurements.

The possibilities of optical methods, for turbulent flow visualization, have been expanded within a wide range due to the innovation of the optical laser. Laser light is highly monochromatic and coherent with high-energy concentration. The laser light sources have successfully been able to conventional optical visualization systems, but they have led to the development of completely new methods, *e. g.* holography and holographic interferometry.

Optical devices

The WT in EAL have optical devices for flow visualization. (Holographic interferometer with parallel beams is at the same time a Schlieren and a shadow device. The schematic diagram of the experimental setup is shown in fig. 10. The ruby laser (Apollo model 22, $E = 3 \text{ J}$, $t = 30 \text{ ns}$, $l_c = 1 \text{ m}$) (2) is used as a recording light source, while 6 mW He-Ne laser (3) is used for interferometer setting and reconstruction of holograms (9). The Hg lamp (13), small mirror (14), horizontal knife-edge (15) and still camera (16) are the different parts belong to Schlieren device with Z-shape. The large concave mirrors ($D = 300\text{mm}$, $F = 2750 \text{ mm}$) (6) are for both systems. The shadow effects are recorded without second large mirror (6). Instead of it, there is the still or video camera. Laser and Hg lamp are both used as light sources for shadow technique. Some mirrors, beam splitters and lenses are used for laser beams directed, enlarged, collimated and focusing (4, 5, 7). The lasers, and all other mechanical and optical components, are fixed on the adjusting platform (1) with height equal to the height of the WT axis (11). It passes next to knife-edge, causing a bright patch at screen (16).

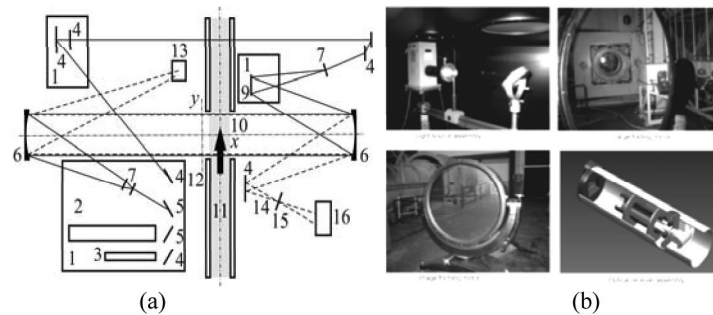


Figure 10. (a) Scheme of optical device, (b) elements of Schlieren system in T-38 (for color image see journal website)

The intensity of it may be used to determine the magnitude of the refractive index or density gradient, which produced the light deflection.

The main holographic interferometer performances are: detection range of refractive index is 10^{-7} to 10^{-4} , accuracy of refractive index measurement is 10^{-7} and optical field diameter is $\Phi = 900$ mm.

Visualization of turbulent flow

Optical methods

The following photos show visualization images of local turbulent flows, with different optical methods [41, 42, 45-47]. Figure 11 shows a visualization of supersonic flow around 2-D, 90° edge nozzle, Prandtl-Meyer expansion fan at the sharp end of the nozzle at $M_\infty = 1.56$: a) shadow, b) Schlieren, and c) holographic interferogram. The turbulent boundary layer and turbulent area in expansion fan are more visible in shadowgram and on interferogram than in the Schlieren image.

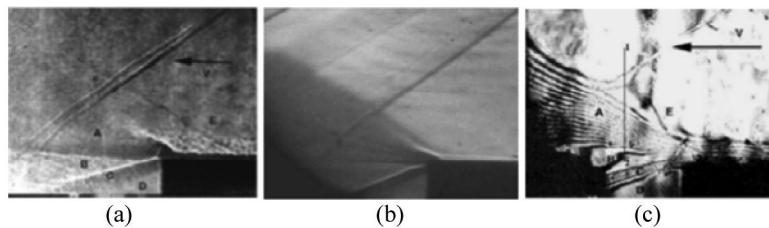


Figure 11. Visualization of Prandtl-Meyer expansion fan (for color image see journal website)

Very interesting example of flow visualization is made in the vicinity of tunnel wall perforations. Many transonic tunnels are operated with perforated walls in the test section. A number of investigations have been performed to determine how the flow in the test section is affected by the presence of the perforation.

The figs. 12(a)-12(c) report on test performed in T-36, with a single slanted slot in the bottom plate of the test section, for $M_\infty = 0.83$. Flow direction is from right to left. The slanted slot was used because it had been reported that such geometry would considerably reduce the perturbation of free flow. The disturbances originating from the slot are expressed by distortions of the parallel fringe system. A concentration of fringes indicated the formation of a pressure wave. The interferogram however, shows that the disturbance from the slot is not at

all negligible and reaches even beyond the axis of the test section (to about 60% of the test section height).

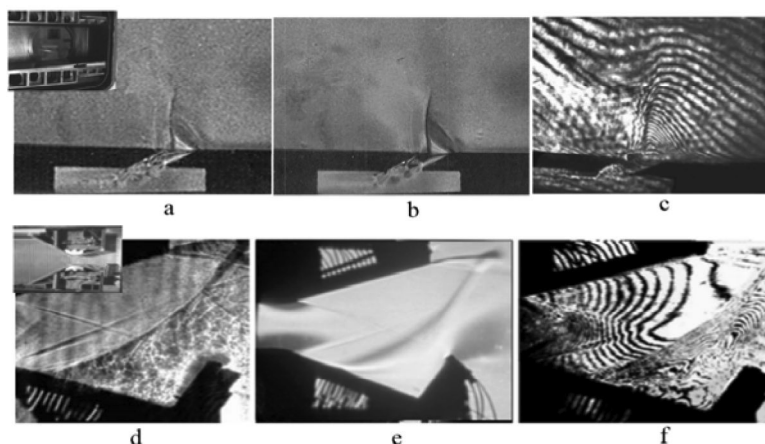


Figure 12. (a-c) The flow in the WT test section with wall perforation (slanted slot), (d-f) Two dimensional model of rocket nozzle with barrier in T-36
(for color image see journal website)

The prediction of the flow separation in supersonic nozzle is important for designing an efficient nozzle–deflector configuration. Test of the complex flow in the two-dimensional supersonic nozzle with the deflector by three optical methods, performed in T-36 WT, shows again the significant advantages of these ones in comparison with classical methods.

The method of holographic interferometry has special advantages when complex, turbulent flows are tested, *e. g.*, flows around a deflector, in the vicinity of the shock wave. Visualization indicates strong interaction of the turbulent boundary layer with the oblique shock wave in the divergent part of the nozzle, figs. 12(d)-12(f). The area behind shock wave is turbulent. The flow visualization results have served as a base for validation of numerical methods and results. The theoretical and experimental values of Mach number in the expansion area are in good agreement $M_{\text{exp}} = 2.15$, $M_{\text{the}} = 2.13$.

Non optical methods for turbulent flow investigation

The investigation of the turbulent flow through 2-D straight profile grid (with three profiles), the test carried out in the VTI water tunnel (T-33), include measurements and visualization [45, 47]. The flow visualization was performed using air bubbles. They were injected into the flow at the distance of about 1 m in front of the model, with special device. Figure 13 shows the flow field visualized by different quantity of air bubbles, around the hydrofoil with angle $\alpha = 25^\circ$. Velocity of free stream was $V_\infty = 5.32$ m/s [36].

Recent developments indicate that smoke visualization in wind tunnels, one of the oldest flow visualization techniques, will continue as an important experimental tool in the study of complex turbulent flow dynamic phenomena.

Improvements in generation and injection of smoke as well as in lighting (laser as a light source), in image processing (the use of computers) have continued to increase the scientific value of this method. Figure 14(a) shows the smoke line in the small smoke tunnel, generated by the vaporization of paraffin; fig. 14(b) shows the flow around an airplane model visualized by TiCl_4 drops in T-32 WT.

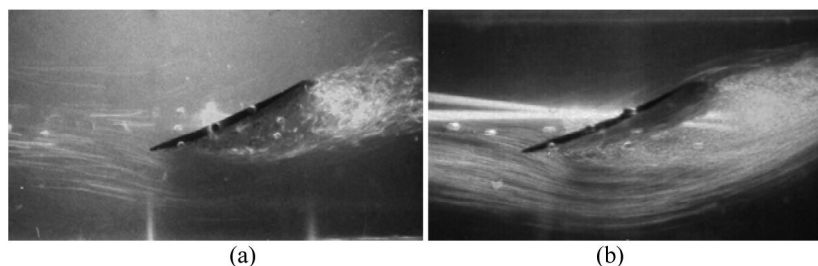


Figure 13. Turbulent flow around hydrofoil visualization in T-33
(for color image see journal website)

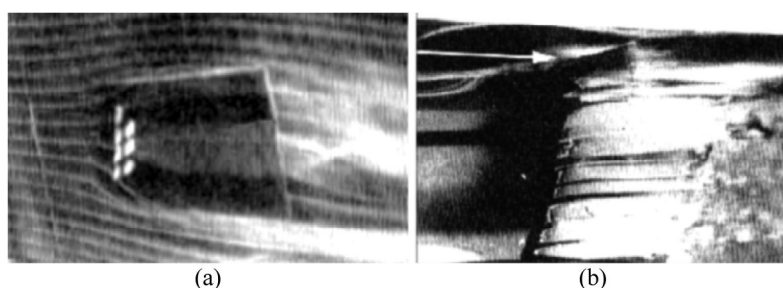


Figure 14. Smoke visualization, (a) in a small smoke tunnel, (b) in WT T32

The oil film or dots on the model surface enables to obtain, quickly and easily, a picture of flow pattern on the surface of the model placed in a WT [41]. The especially mixture is prepared of an appropriate oil and a fine pigment (Al_2O_3 ; TiO_2 , powder, fluorescent dye, coloring pigments, graphite). The technique allows observation of the laminar and turbulent lines, or separation and reattachment regions if the flow field at the body surface. Figure 15 shows the visualization with TiO_2 and oil on the surface around three, vertical cylinders fixed on the plate in T-35 for $V = 50$ m/s, positioned at different angles of attack.

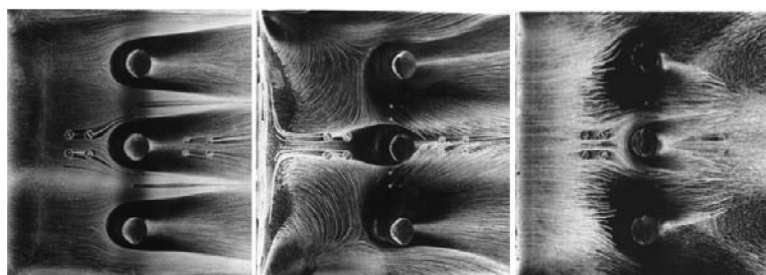


Figure 15. Flow visualization around cylinders fixed on the plate in WT T-35

Results of turbulent flow – numerical simulations validated by measurements

Sphere model in T-35. For the purpose of validation of the applied methodology of numerical simulations of turbulent flow around the sphere model, numerical simulations were done for the rough model of sphere exposed to turbulent free flow. Validation was made by comparison with tests of sphere model prepared for visualization, in the T-35 WT [14]. Dur-

ing flow visualization the emulsion was dried, photographed and the measurements of drag were completed. In the numerical simulations, conditions of the model were assumed while flow conditions from calibration were used and extended. In fig. 16 a sample for comparison of WT visualization with TiO_2 emulsion and flow around a rough sphere from numerical simulations is shown.

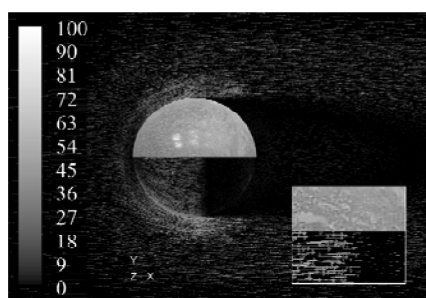


Figure 16. T-35 WT: rough sphere visualization vs. CFD
 (for color image see journal website)

The 2-D supersonic nozzle. 2-D numerical simulations by solving the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations with standard two-equation turbulence model was used for design of 2-D thrust vectoring nozzles. Three different meshes were used, a coarse mesh (25976 cells), an intermediate mesh (48084 cells) and a fine one (95732 cells). The meshes are structured except in the divergent part of the nozzle, where structured part is next to the wall, otherwise the mesh is unstructured. After making the numerical models of nozzles with different deflectors at the exit, the comparisons of the calculation and experiment were made. The differences of the experimental and numerical visualization occur due to two

reasons. The first is the strong interaction of the shock wave and separated boundary layer, and second the flow in the 2-D thrust vectoring nozzle is essentially three-dimensional [45].

The numerical visualization, using Mach number, pressure contours and velocity vectors for two dimensional, supersonic nozzle with deflector can be seen in figs. 17(a)-17(c), deflector has $\alpha_d = 100^\circ$ and $h_d = 43$ mm. The visualization by optical methods of this nozzle is presented in figs. 12(d)-12(f).

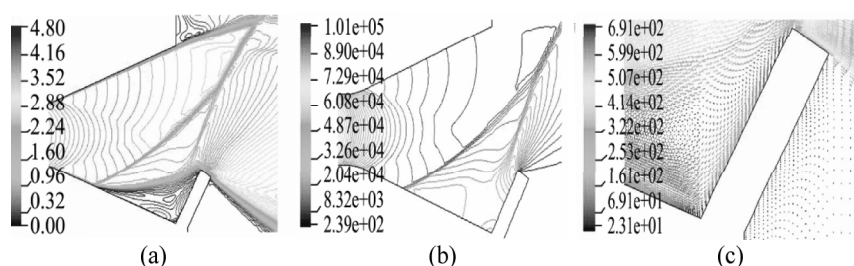


Figure 17. Numerical flow visualization, and contours of (a) iso-Mach number (kg/m^3), (b) iso-pressure, (c) velocity vectors
 (for color image see journal website)

T-33 water tunnel. Numerical simulation of the flow through straight profile grid is made in Fluent 6.1 program. The results of flow simulation are compared with experimental results. Geometry is modeled (Unigraphics 18.0 program) for grid profile angles of slope, corresponding to the angles in the experiment: 0° and 25° [46]. The boundary conditions are corresponding entirely to the state in water cavitation tunnel during the experiment. For the definition of the boundary conditions, it was very useful the fact that the turbulence level in the area in front of the hydrofoil grid was measured during the experiment.

Number of elements in the generated computational grids varies in the range from 285000 to 386000. The $k-\varepsilon$ standard model for turbulent stresses is used for 0° angle of slope,

and $k-\varepsilon$ realizable model for 25° . Converged solutions for integral quantities of interest were obtained after 550 iterations for 0° angle of attack and mass residuals 10^{-5} . For 25° angle mass residuals are 10^{-4} , and 20 iterations are used for each temporal sequence. The enhanced wall functions are used for turbulent boundary layer. The velocity vectors and path lines around hydrofoil are shown in fig. 18.

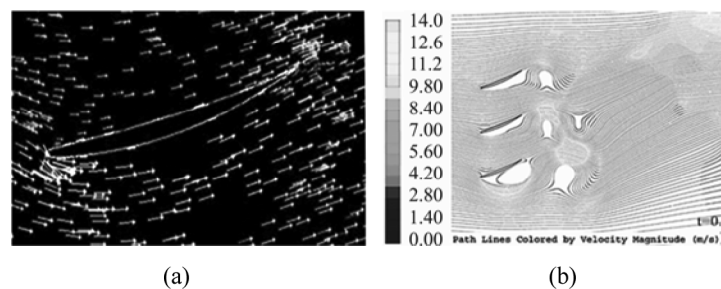


Figure 18. (a) Velocity vectors for hydrofoil (b) path lines
(for color image see journal website)

Cone in supersonic flow at T-38. The experiment was performed with $M_\infty = 1.5, 1.7,$ and 2.0 . The calibration model was cone-cylinder, $\theta_c = 15^\circ, l = 300$ mm base $\Phi = 160$ mm, $l_c = 160$ mm. The images of holographic interferograms are the bases for determination of Mach number M_∞ in free stream flow. The maximum difference in the Mach number determination by Primary measuring system and by holography is 5.3% and average 2.4% [47, 48]. Experimentally, the density of flow behind the shock wave is determined with an accuracy of 2.4% in regard to theoretical, and 3.6% in regard to numerical one.

Numerical simulation of flow was performed by ANSYS FLUENT software. Figure 19(a) shows the composite experimental and numerical image of flow iso-density lines around model cone-cylinder for $M_\infty = 1.474$. Figure 19(b) shows Mach number Θ_u for nominal $M_\infty = 1.5$. The measured angle of the shock wave from holographic interferograms is between 44.5° and 48.5° that gives M_∞ from 1.4 to 1.49. The average value of $\Theta_{u\ tab} = 46.5^\circ$.

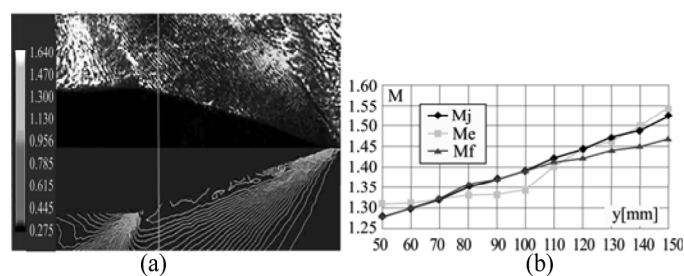


Figure 19. The experimental and numerical results in T-3
(for color image see journal web-site)

Conclusions

One of the most complicated areas under discussion in many areas of science and engineering is turbulence. Many authors study the unwanted effects of turbulence on the results of WT tests over the world.

The main aim of this paper is to present the EAL of the VTI in Belgrade, the equipment and methods of turbulence investigations in the WT test section stream and around dif-

ferent test models. The role of turbulence in obtaining a spatially and temporary uniform steady stream of air across and along the test section of wind tunnels is considered. The turbulence has a major importance in flow quality of WT and can excite uncorrected results in experimental investigations in WTs. Turbulence causes a variation of pressure, Mach number, density and temperature distribution, the variation of pitch and yaw components of flow angularity, boundary layer change near the walls, noise and the behaviors of vortexes in the test section. The most important sources of turbulence in WT are analyzed, as well as some turbulence reduction measures.

WT in VTI have turbulence intensity below recommendations by international standard for WT good flow quality. The modern instrumentation in VTI, enables determine flow quality and its influence on measurement results of aerodynamic and dynamic stability model characteristics. In this paper, some test results, involving turbulence, performed in VTI WTs are illustrated with diagrams and images.

The VTI WTs were used for testing models for the Ministry of Defence, to support development of aircraft programs: Galeb G-2, Jastreb, Kraguj, Orao, Super Galeb G-4, Lasta and Super Galeb G-4M and missile models: ATM Osa, ATM Zolja, ATM Bumbar, SSM Oganj, SSM Orkan, ASM Grom, marine models of ships and weapons, non-aeronautical models and a number of models for foreign customers.

Acknowledgment

Authors express their gratitude to the Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia, for the financial support through the projects TR-35045, TR-34028, and TR-36050.

Nomenclature

Tu	– turbulence intensity, [%]
M	– Mach number ($= v/a$), [-]
Re	– Reynolds number ($= \rho v c / \mu$), [-]
V_∞	– velocity, [m/s]
TF	– turbulence factor, [-]
D	– diameter, [m]
$Re_{critical}$	– critical Reynolds num. ($= \rho v c / \mu$), [-]
$Re_{effective}$	– effective Reynolds num. ($= \rho v c / \mu$), [-]
C_d	– drag coefficient, [-]

Φ	– optical field diameter, [m]
t	– time, [s]
x	– spatial coordinate, [m]
y	– spatial coordinate, [m]
E	– total energy, [J]

Greek symbols

α	– angle of attack, [°]
$\alpha_{deflector}$	– deflector angle, [°]
θ_u	– angle of the shock wave, [°]

References

- [1] Harvey, W. D., *et al.*, An Evaluation and Assessment of Flow Quality in Selected NASA Wind Tunnels, *NASA Technical Memorandum* 85659, USA, 1983
- [2] Sisojev, V., Estimation of Losses for the Wind Tunnels (in Serbian), VS-125, VTI, Belgrade, Serbia, 1956
- [3] Owen, F. K., *et al.*, An Evaluation of Factors Affecting the Flow Quality in Wind Tunnels, *In AGARD Wind Tunnels and Testing Tech.* 22 p, NASA Langley Research Center; Hampton, Va., USA, 1984
- [4] Steinle, F., Stanewsky, E., Wind Tunnel Flow Quality and Data Accuracy Requirements, Advisory report No. 184, AGARD, ISBN 92-835-1440-8, London, 1982
- [5] Loehrke, R. I., Nagib, H. M., Experiments on Management of Free-Stream Turbulence, Report No. 598, AGARD, London, 1972
- [6] Chang, P. K., *Control of Flow Separation*, Hemisphere, Washington D. C., 1976
- [7] Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, USA, 1979
- [8] Achenbach, E., The Effects of Surface Roughness and Tunnel Blockage on the Flow Past Spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, 65 (1974), 1, pp 113-125

- [9] Mrkalj, N., About Selection of Basic Characteristics of a Wind Tunnel T-35 (in Serbian), VS-116, VTI, Belgrade, 1955
- [10] Zotović, S., Selection of Low-Speed Wind Tunnel Type (in Serbian), VS-002. VTI, Belgrade, 1951
- [11] Šumonja, S., EA Training: A Low-Speed Wind Tunnel Theory and Design, VTI, Belgrade, 1997
- [12] Sisojev, V., *Proračun kolektora (Calculation of Collectors* – in Serbian), University of Belgrade, Belgrade, 1948
- [13] Pope, A., Wind Tunnel Calibration Techniques, AGARDograph 54, AGARD, London, 1964
- [14] Linić, S., *et al.*, Experimental and Numerical Study of Super-Critical Flow Around the Rough Sphere, *Scientific Technical Review*, 65 (2015), 2, pp.11-19
- [15] Reed, T. D., *et al.*, Calibration of Transonic and Supersonic Wind Tunnels, NASA Contractor Report 2920, NASA, 1977
- [16] Očokoljić, G., *et al.*, Testing of a Standard Model in the VTI's Large-subsonic Wind-tunnel Facility to Establish Users' Confidence, *FME Transactions*, 42 (2014), 3, pp. 212-218
- [17] Šumonja, S., EA Training: Low Speed Wind Tunnel Testing, VTI, Belgrade, 1997
- [18] Šumonja, S., Testing of a Motorized Model in Subsonic Wind Tunnel (in Serbian), *Scientific Technical Review*, 48 (1998), 5, pp. 50-63
- [19] Mrkalj, N., Šumonja, S., Testing of the Model with Inlet at the Wind Tunnel T-32 (in Serbian), *Scientific Technical Review*, 46 (1996), 4-5, pp. 51-59
- [20] Mrkalj, N. Šumonja, S., Flow Rate Measurement on the Aircraft Compressor Inlet (in Serbian), *Scientific Technical Review*, 49 (1999), 5, pp. 63-68
- [21] Čurčin, M., Šumonja, S., Determination of Balance Rotating Frequency of the Anemometer Turbine Rotor (in Serbian), *Scientific Technical Review*, 45 (1995), 4-5, pp. 3-8
- [22] Samardžić, M., *et al.*, The Sting Plunging Effect on Measured Pitch Damping Derivative, *Proceedings*, 4th International Scientific Conf., OTEH 2011, VTI, Belgrade, Serbia, 2011
- [23] Čurčić, D., *et al.*, Model Sting Support with Hard Metal Core for Measurement in the Blowdown Pressurized Wind Tunnel, *Measurement*, 79 (2016), Feb., pp. 130-136
- [24] Samardžić, M., *et al.*, Effects of the Sting Oscillation on the Measurements of Dynamic Stability Derivatives, *Scientific Technical Review*, 60 (2010), 2, pp. 22-26
- [25] Anastasijević, Z., Ristic, S., Presentation of Test Capabilities of the Experimental Aerodynamic Laboratories (in Serbian), *Tehnika, Mašinstvo*, 55 (2006), pp. 15-24
- [26] Vitić, A., Estimation of the Free Flow Turbulence Intensity at Wind Tunnel T-35, in a Velocity Range from $0.2 < M < 0.8$ in a FN3D Test Section by Hot-Film Probes and Constant Temperature Anemometer (CTA) (in Serbian), V3-2385-I-EA, VTI, Belgrade, 1986
- [27] Ristić, S., Laser Doppler Anemometry and its Application in Wind Tunnel Tests, *Scientific Technical Review*, 57 (2007), 3-4, pp. 64-76
- [28] Ristić, S., *et al.*, Laser Doppler Anemometry Application in Hydrodynamic Testing, *Atti dela Fondazione Giorgio Ronchi*, 62 (2007), pp. 207-218
- [29] Ristić, S., Ilić, J., Laser Doppler Anemometry Measurements Inside the Pipes of Various Shapes and Glass Quality, *Scientific Technical Review*, 49 (1999), 5, pp. 22-29
- [30] Ilić, J. T., *et al.*, The Comparison of Air Flow LDA Measurement in Simple and Cylindrical Tube with Flat External Wall, *FME Transactions*, 41, (2013), 4, pp. 333-341
- [31] Watrasiewicz, B. M., *Laser Doppler Measurement*, Butterworths, London, 1976
- [32] Hunter, W. W., Flow Visualization and Laser Velocimetry for wind tunnel, NASA CP 2243, *Proceedings*, Hampton, Va., 1982
- [33] Ristić, S., Analysis of the Accuracy of the Third Component of Flow Velocity Measurements for a 3-component, 3-colour Laser Doppler Anemometer., *Proceedings*, Inter. Conference on Laser 97, New Orleans, La., 1997, pp. 562-569
- [34] Ristić, S., Majstorović, P., Experimental Testing of the Relative Flow Through the Straight Profiled Screen (in Serbian), *Scientific Technical Review*, 50, (2000), 6, pp. 29-36
- [35] Ristić, S., *et al.*, Experimental and Numerical Determination of the Sr Hydrofoil in Steady and Transient Flow, *Proceedings*, HIPNEF 2006, Vrnjačka Banja, Serbia, 2006, pp. 541-548
- [36] Ristic, S., *et al.*, Determination of Air and Hydrofoil C_p by Laser Doppler Anemometry, *Theoret. Appl. Mech.*, 37 (2010), 1, pp. 17-35
- [37] Srećković, M., *et al.*, The Analysis of Characteristic Materials for Fluid Seeding Particles in Wind Tun-

- nels and Their Influence on the LDA System Functions, *Balkan Physics Letters*, 7, (1999), 2, pp. 93-102
- [38] Ristić, S., Laser Doppler Anemometry and its Application in Wind Tunnel Tests, *Scientific Technical Review*, 57 (2007), 3-4, pp. 64-76
- [39] Jovanović, B., *et al.*, Factor of Turbulence for the T-31 (in Serbian), V3-138, VTI, Belgrade, 1957, pp. 1-39
- [40] Vujić, V., *et al.*, Research of the Turbulence Measurement Methods (in Serbian), V3-796, VTI, Belgrade, 1968, pp. 1-15
- [41] Ristić, S., Flow Visualization Techniques in Wind Tunnels, Part I-Non optical Methods, *Scientific Technical Review*, 57 (2007), 1, pp. 39-50
- [42] Ristić, S., Flow Visualization Techniques in Wind Tunnels, Part II-Optical Methods, *Scientific Technical Review*, 57 (2007), 2, pp. 48-49.
- [43] Marzkirich, W., *Flow Visualization*, Academic Press, New York, USA, 1977
- [44] Settles, G. S., Modern Developments in Flow Visualization, *AIAA Journal*, 24 (1986), 8, pp. 1313-1323
- [45] Ristić, S., Capability of Two-Dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations for Two-Dimensional Thrust Vectoring Nozzles, *Proceedings*, Institute of Mech. Part G: J. Aerospace Engineering G, 224, (2010) G8, pp. 905-910
- [46] Puharić, M., *et al.*, Laser Doppler Anemometry in Hydrodynamic Testing, *Journal of Russian Laser Research*, 28 (2007), 6, pp. 619-628
- [47] Ristić, S., Investigation of Supersonic Flow in Wind Tunnel T-38 by a Method of Holographic Interferometry, *Scientific Technical Review*, 54 (2004), 2, pp. 3-10
- [48] Ristić, S., *et al.*, Presentation of the Facilities, Methods and Results of Turbulence Investigation in the VTI's Wind Tunnels, *Proceedings* (eds.: Dj. Čantrak, M. Lečić, A. Čoćić), Book of Abstracts, Turbulence Workshop International Symposium, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, 2015, pp. 14

ПРИЛОГ 3.

Сагласност за коришћење објављених уметничких фотографија водомара у природном окружењу

From: Solent Picture Desk <pictures@solentnews.co.uk>
To: Suzana Linic :) <sumonja@yahoo.com>
Sent: Saturday, February 13, 2016 9:51 AM
Subject: Re: Inquiry from Suzana Linic

Hi Suzana,

We grant you permission to use the pictures for the purposes you stated in your previous email.

Many thanks,

Tom Harrison

Photographer

Solent News and Photo Agency

Southampton, UK

+44 (0) 2380 458800
www.solentnews.co.uk

On Friday, 12 February, 2016 14:07, "PhotoShelter" <do-not-reply@photoshelter.com> said:
[Solent News and Photos](#)

Dear Solent News,
Suzana Linic (sumonja@yahoo.com, +381648389005) has sent you an inquiry.
Message:
To SOLENT Agency

Dear Sirs,

After finding the artworks from the nature on the site of the Daily Mail I contacted them and Mr. Sawyer, and now your Agency for permission.

Please would you be so kind to give me the a permission for free use of two images as a presentation with the aim of using them in the PhD thesis and the research articles?

My PhD thesis is dedicated to new design methods for the high speed trains. Studies are performed on the University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering.

Subjected images are the artwork of Mr. Sawyer, signed by Mr Sawyer you're your Agency, published via Daily Mail pages at link <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2009026/Kingfisher-barely-causes-ripple-dives-water.html>.

I am in obligation to the publisher of scientific journal to present all the permissions - the wild photographer and the agencies, but I have no sources for budgeting. Mr. Sawyer gave me the written permission as the artist, while the Daily Mail pointed to ask you. I have written before a letter but have not received the answer, so I decided to repeat. In the compensation, in all the writings, in the research journals, your Agency and Mr. Sawyer will be referenced as the sources of data used in research.

Thank you for your understanding and support in advance.

On Wednesday, May 7, 2014 12:00 PM, Danny Howell <dhowell@solosyndication.com> wrote:
Hi Suzana
The Mail Online passed on your email

Unfortunately the photo is not our copyright .. from Solent News Agency (check google for contact details)

Kind regards
Danny

From: Editorial Dailymailonline <editorial@mailonline.co.uk>
Date: Wed, 7 May 2014 00:02:12 +0100

On Sunday, May 4, 2014 8:48 PM, Paul Sawyer <paulsawer160@btinternet.com> wrote:
Hi Suzana

Yes I see no problem with you using my images for your examination.
Good luck with it, if I can be of further assistance let me know.
Paul

ПРИЛОГ 4.

Спецификација уређаја за 3D скенирање Romer Absolute Arm – Portable Measuring Arm



Макс. брзина прикупљања података	50.000 Points/s
РБрој тачака по линији	1000
Фреквенција по линији	50 Hz
ширина линије	min. 65 mm
	ср. 65 mm
	max. 85 mm
Опсег удаљености од предмета	150 mm ± 50 mm
Средње растојање мерних тачака	0,046 mm
Контрола ласера	Полуаутоматска по линији
Тачност (2 sigma)	30 µm
Тежина	340 g
Безбедност ласера	Class 2M
Радна температура	5°C - 40 °C

Сврха: 3D дигитализација и моделовање, инспекција облака тачака, реверзни инжењеринг, брза израда прототипова или машинско копирање, употреба у метрологији за разноврсне примене.

ПРИЛОГ 5.

Спецификација термографске камере

FLIR E40



Карактеристика слике	
Резолуција	160 × 120 пиксела
Укупан број пиксела	19 200
Термална осетљивост	< 0.07°C на 30°C
Тачност мерења	± 2% или 2°C
Температурни опсег	(-20)°C – 650°C
Оптика	Стандардна 25° × 19°
Зум	1 – 2 × континуални дигитални
Фокус	Ручни
Нехлађени микроболометар	+
Колор ЛЦД екран осетљив на додир	3.5" (320 × 240)
3 МП Видео камера са рефлексором	×
Слика-У-Слици	Фиксна величина
Ласерска тачка	×
Видео излаз	Композитни
Фреквенција снимања	50 Hz
Анализе мерења	
Покретна тачка	3
Област кружна/квadratна	3
Делта Т	+
Меморисање фајлова	
Радиометријске слике у ЈПГ на СД	+
Картицу	
МПЕГ4 Видео Снимање	+
Друга опрема	
ФЛИР Алати	+
Тип Батерије / Аутономија	Li-Ion > 4 сата
Тежина	0.825 kg укључујући оптику

ПРИЛОГ 6.

Изјава о поштовању права животиња и бризи о њиховом животу, здрављу и животној средини

Аутор докторске дисертације, Сузана Линић (Д25/10), докторанд Машинског факултета Универзитета у Београду, као ни институције и сарадници који су учествовали у истраживању под називом

„БИОМИМИКРИЈА КАО МЕТОД АЕРОДИНАМИЧКОГ ДИЗАЈНИРАЊА ВОЗА ВЕЛИКИХ БРЗИНА“

испоштовали су током истраживања права животиња и принципе очувања животне околине и биодиверзитета, прописана следећим документима Републике Србије као и међународне заједнице:

1. Универзалне декларације о правима животиња
2. Међународна конвенција за заштиту птица
3. Закон о добробити животиња "Службени гласник РС", бр. 41/2009
4. Закон о заштити животне околине "Службени гласник РС", бр. 135/2004, 36/2009, 36/2009 и 72/2009
5. Закон о заштити природе "Службени гласник РС", бр. 36/2009, 88/2010 и 91/2010
6. Закон о ратификацији Међународне конвенције за заштиту птица "Службени лист СФРЈ", бр. 6/1973 (International Convention for the Protection of Birds Paris, 18 October 1950)
7. Закон о потврђивању конвенције о биолошкој разноврсности "Службени лист СРЈ - Међународни уговори", бр. 11/200
8. Заштита добробити експерименталних животиња у праву Европске уније

Истраживање о могућностима и развоју методе биомимикрије за основне моделе ослања се на изабране птичије и морске животиње врсте. Посебна пажња је окренута ка птици водомару.

У оквиру овог истраживања коришћени су музејски експонати, за излагање и истраживање, птице водомара из постојећег фонда Природњачког музеја

Београд. Друге птичије и рибље врсте су описане и представљене према подацима преузетим из доступне литературе. Морске животиње су испитиване према доступним подацима из литературе.

Током истраживања нити једна животињска јединка није претрпела патњу, бол или трауму као ни изгубила живот. Истраживање је обављено за потребе побољшања квалитета човека и очувања животне околине уопште, али уједно и са најбољим намерама и бризи за животињски свет и наш заједнички суживот.

Ова докторска дисертација је написана, осим тематски дефинисаног и фокусираног циља, и са циљем промоције здравог живота и живота у складу са природом.

Потпис докторанда

У Београду, 18.01.2018.

Милић Аурево

ПРИЛОГ 7.



COMPARISON OF NUMERICALLY OBTAINED 2D FLOW FIELDS FOR THE BIONIC HIGH SPEED TRAIN CONCEPT DESIGNS INSPIRED WITH AQUATIC AND FLYING ANIMALS

SUZANA LINIČ

Institute Gosa, University of Belgrade, Serbia, sumonja@yahoo.com

BOŠKO RAŠUO

Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Serbia, brasuo@mas.bg.ac.rs

MIRKO KOZIC

Military Technical Institute, Belgrade, Serbia, mkozic@open.telekom.rs

VOJKAN LUČANIN

Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Serbia, vlucanin@mas.bg.ac.rs

MIRJANA PUHARIĆ

Innovation Centre of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Serbia, miram@neobee.net

Abstract: Comparison of numerically obtained flow fields, pressure distributions and streamline allocations, around five 2D bionic high speed train (BHST) models are present in this work. Interest was in examination the possibilities that bio-inspired design gives as a basis for low-drag, energy efficient and aerodynamically silent BHST concept. Japan's Shinkansen 500 Series was the first brought biomimetic in heavy vehicle applications and approved abilities for environmental protection and drag reduction by design adjustment. Selection of the aquatic and flying animals was under criteria of assumed maximal speeds achieved while catching prey and catching technique, in the natural environment, according to available data. Animals in consideration were kingfisher, dolphin, sailfish, shark and barracuda. Tested BHST configuration consisted of two idealized driving cars connected smoothly on aft-ends, placed in the open railroad surrounding. BHST biomimetic nose smoothly connected with the after-body of the same design represented the train in real scale. Equal and aligned cross sections formed 2D numerical model between domain's sidewall. Test velocities were 100 km/h, 200 km/h, 300 and 400 km/h. Computational Fluid Dynamic tool in use was the ANSYS Fluent 12. Tritetrahedral mesh, excluding boundary layer, counted up to $10e+06$ elements. Introduced inner adapting surfaces covered the BHST and ground with the purpose to control the mesh, from inflation layer to outer space on distance about one third of the BHST length. Boundary condition set for ground was moving wall. Assuming compressible flow that might appear under the BHST bottom, applied turbulent model was two-transport equation model, Standard $k-\epsilon$, with non-equilibrium wall treatment. Flow field behavior, in result, showed good potentials of explored BHST designs for adoption and further research, as a bio-inspired design basis, over train speeds of 200km/h. Emphasized bio-inspired design was kingfisher-like.

Keywords: aerodynamics, bionic, biomimetic, numerical simulation, high speed train.

1. INTRODUCTION

By this paper were compared three numerically obtained aerodynamics characteristics for five 2D bionic high speed train (BHST) designs in order: kingfisher, barracuda, dolphin, sailfish and shark. Interest was in examination the possibilities that bio-inspired design gives as a basis for low-drag, energy efficient and aerodynamically silent BHST concept [1] - intended to be "green" in a future 3D bionic form.

The main reason for implementing "green" thinking and

designing to heavy vehicles is concern of energy assumption and environmental protection, in first place aerodynamic noise. One of the approved solutions for decreasing of energy assumption is aerodynamic optimization of the train's nose shape meeting shape and friction drag reduction [2]. Aerodynamic noise, occurring over 340km/h, when the train is passing tunnel, compressing air inside and creating micro-pressure wave on tunnel's exit, also may be partially lowered by proper nose shape design, [2,3]. It may be noted that nose shape design needs special care for preventing both drag levels

and aerodynamic noise.

During last decades, simultaneously with other innovative optimization measures, design process was refined by adopting the new philosophy based on Nature's solutions for similar problems (Strategy for Sustainable Design [4]). Bionics presents visual inspiration from uncountable designs and body movements, found in nature. Biomimicry presents inspiration for conceptual designing, based on bionics. For successful biomimicry design understanding of processes is of major importance. Highlighted example is the Japan's Shinkansen 500 Series, the bullet train, which was the first brought biomimetic in heavy vehicle applications and was approved abilities for environmental protection and drag reduction by design adjustment.

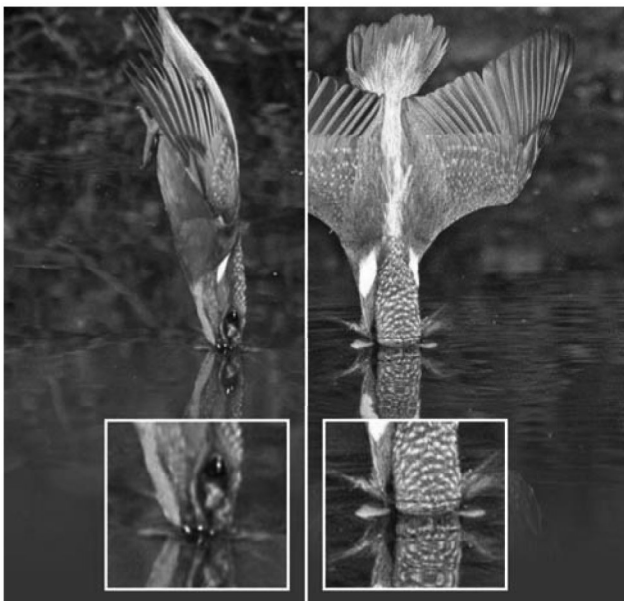
Adoption of 2D BHST configuration was done with the purpose of first stage numerical research due to lack of published either biological or bio-inspired designs data in this field. Selections of the basic nature bodies of concern were made under the criterion of the animal's mobility and hunting behavior, in living environment, air or water.

Aerodynamics characteristics of importance were flow field, pressure distribution and streamline allocations over the BHST. It was shown that the most acceptable aerodynamic characteristics were for the kingfisher-like BHST design, over 300km/h, with smooth and continual changing of the pressure distribution and streamlines following the BHST contour.

2. SPECIES SELECTION

Criterion for selection. Kingfisher was selected under the criterion of specific hunting habits. Selected aquatic animals were hunters, in a class of fast in the category [5], which bodies were adapted, through evolution process, to natural environment and to behavior of their preys.

Common Kingfisher - By custom, when fishing in shallow fresh waters is acting plunge-diving maneuver (Picture 1.). The act of plunge-diving would not be so special to thereby it barely causes a ripple, compared to other plunge-diving birds, gannet for instance.



Picture 1. Common Kingfisher in plunge-diving

Gannet fishes on the open sea is much larger and stronger bird, and after plunge – diving act performs wing clapping for maneuver. Kingfisher's transition (with about 40km/h of maximal velocity) from the ambience with lower density, air, to higher one, water, without the water disturbance is conditioned only by the unique kingfisher's beak shape. In consequences, the phenomenon is giving to kingfisher the advantage to be uncovered for enough time as well as to have good stability and hurting prevention [6, Wikipedia].

Barracuda – It has streamlined spindle elongated body, much smaller than described species, moving about 44 km/h [5]. It has no special skin friction control.

Atlantic White-Sided Dolphin – Very fast (max. 60km/h [5]) and tripping mammal, taking a breath or speeds on the surface or by skipping. Low drag level is managed mainly with streamlined body and partially by flexible skin friction control. It has almost unnoticeable nose that would not blemish streamline contour.

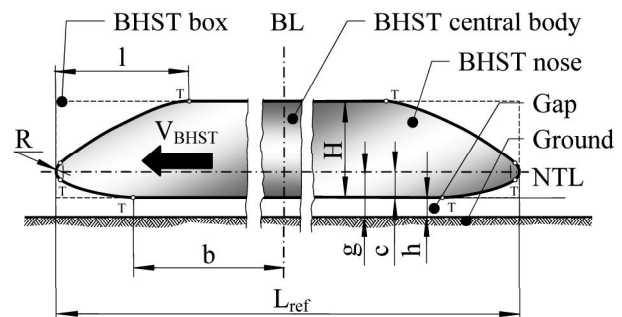
Sand Tiger Shark – Among fastest fishes (max. 50km/h [5]) with less maneuverability than dolphin. The body is streamline with noticeably spiky nose tip. Cross section contour in a plane of symmetry is somewhere between the dolphin's and the sailfish's. It has very efficient skin friction control.

Sailfish - The fastest predator (max. 110km/h [5]) among fishes caring distinctive extremely long and sharp nose. Elongated body has no skin friction control.

2. DESCRIPTION OF BHST DESIGNS

BHST CAD model was constructed by the software Pro/Engineer WF4. Vehicle frame box, imaginary parallelepiped, dimensions of $L_{ref} \times H \times d = 50 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, was made as symmetrical with respect to perpendicular plane that bisects the length of the train, BL. BHST box was raised above the ground for $h = 0.4 \text{ m}$.

Major adopted design parameters, sketched in Picture 2., of the 2D BSHT, are given in the Table 1.



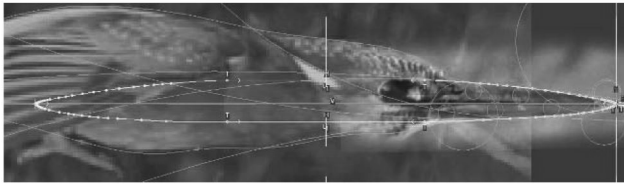
Picture 2. – General BHST design parameters and placement

Bionic designs for different species were made in the same manner, as two connected locomotives. Fore-/after-body nose contours were constructed over the embedded

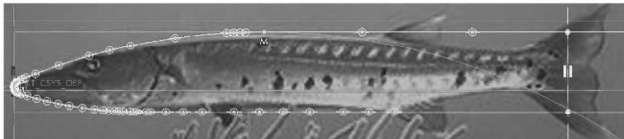
scaled image of the species. Scaling of the beak/head image detail was done up to the BHST box height. Splines that overlapped the beak/head contours were tangentially blended with BHST center body outline and symmetrically for both fore- and after- bodies. Splining appears the most convenient for the first stage research, compared to other prepared models with imported polynomial approximations. On Pictures from 3. to 7. are shown the CAD constructions of different BHST.

Table 1. Measures adopted for different BHST designs

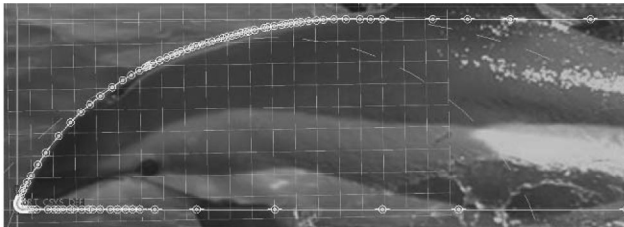
BIONIC DESIGN	l [m]	b [m]	c [m]	R [m]
Common Kingfisher	13.413	12.494	1.143	0.03
Barracuda	9.452	16.393	0.787	0.238
Atlantic Whitesided Dolphin	5.196	24.913	0.043	0.086
Sand Tiger Shark	8.446	24.021	0.345	0.08
Sailfish	11.390	24.900	0.05	0.1



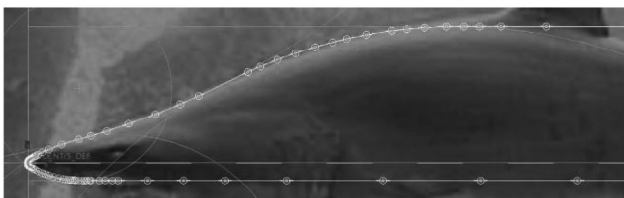
Picture 3. – BHST inspired by Common Kingfisher, CONFIG 1



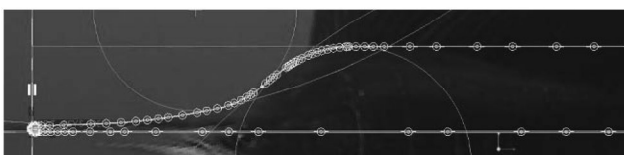
Picture 4. – BHST inspired by Barracuda, CONFIG 2



Picture 5. – BHST inspired by Atlantic Whitesided Dolphin, CONFIG 3



Picture 6. – BHST inspired by Sand Tiger Shark, CONFIG 4



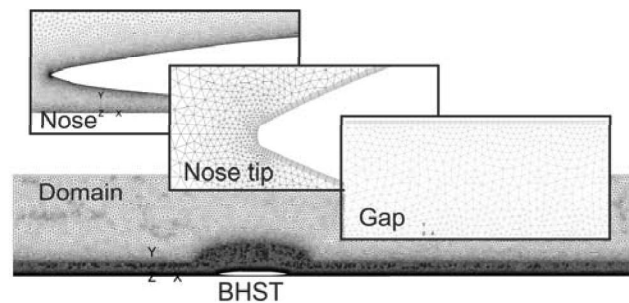
Picture 7. – BHST inspired by Sailfish, CONFIG 5

3. NUMERICAL METHOD

Geometries. Preparations of geometries for numerical simulations were made by ANSYS Geometry Modeler Application of the package FLUENT. 2D numerical domain is flat, dimensioned relatively to the local Cartesian coordinate system of preserved BHST body. Upstream domain edge is placed at 150 m and downstream edge at 300 m from the BHST fore-body nose tip, with thickness of 0.1 m. Overall domain height is 75 m from the ground. Preserved BHST body is, raised from the bottom edge-ground of the numerical domain, according to Table 1.

Inside the domain, all over the BHST body and along the bottom domain edge, the inner body of influence is placed, applied as a strategic step for mesh quality control. Inner body covers ground up to height of 8 m over the nose tip line, NTL (Picture 2.). Close to BHST, inner body was deformed by ellipse, dimensions of length 91.5 m and height 21.1 m.

Mesh. The mesh was made by the ANSYS Meshing Application. Final dimensions of the numerical domain and parameters of the unstructured prismatic mesh, for CONFIG 1–5, are in accordance with custom CFD practice, set after independency calculations (Picture 8.). Final number of cells was 400000, for kingfisher up to 1300000 for barracuda. Special care was taken for meshing of inner body, on both BHST ends (fore and after-body): gap space and surrounding of the BHST nose tip (Picture 8.). Previous experiences [7,8] were shown that this treatment gives reliable CFD results. Maximal mesh skewness was in range of 0.5 - 0.7, aspect ratios of 18-100 and the wall-adjacent cell's centroid (acceptable for significantly extended bodies as heavy vehicles are). BHST body is covered with inflation layer. The first layer thickness, of 5, was fixed to 1 mm, for all flow conditions, growing by 1.2 with distance from the BHST. Lengths of the cells in the first layer as well as the lengths of cells touching the ground were set by ordering the number of elements for each segment of inner body (300-500). Ground did not need inflating because it became moving wall boundary.



Picture 8. – Preview of the mesh and details of nose, nose tip and gap

CFD Modeling. Numerical simulations of 2D steady and fully turbulent flow were performed applying the ANSYS Fluent software [9,10]. All BHST configurations were treated in the same manner for comparison, with appropriate number of iterations for convergence, and independently for each velocity. Free stream velocity is

equivalent to the velocity of the BHST on open rail. Velocities (Mach numbers) of interest were: 100 km/h ($M=0.0817$), 200km/h ($M=0.1637$), 300 km/h ($M=0.2464$) and 400 km/h ($M= 0.3301$). All flows were treated in first as incompressible. For 300 and 400km/h flow were treated afterwards, as compressible, due to Mach number levels.

In general, pressure based solver was in use in 2D planar space. Viscous, Realizable $k-\epsilon$ model was applied with non-equilibrium wall function treatment. For cases when Mach number was over 0.2, the energy model was enforced as well as viscous heating to $k-\epsilon$ model. Two

definitions of the air were in use: constant values for incompressible flows and for compressible flows ideal gas density values as well default three-coefficient Sutherland viscosity.

Boundary conditions, BC, were defined for walls, inlet and outlet. BC of BHST's surface was treated as standard walls. Bottom domain wall was treated as moving wall-ground of equal velocity as BHST and top wall as symmetry BC. Inlet BC, for incompressible flows was defined as velocity-inlet while for compressible flow it was defined as a pressure-far-field. Pressure-outlet BC was adopted at the domain's exit.

Table 3. BHST with the Common Kingfisher -like design

CONFIG 1 ($l/H=4.46$)				
V C _p	100 km/h 0.5421	200 km/h 0.5614	300 km/h 0.5015	400 km/h 0.3654
VD				
PS				
SF				

Enforced pressure-velocity coupling scheme was SIMPLE. Spatial discretization of gradient was made by least squares cell based method. For first 50 iterations, of every cycle of simulations, first order upwind method was set, and after, second order upwind method was applied for higher accuracy, meeting convergence criterion for residuals of $1e-05$.

4. RESULTS

Tables from 3. to 7. present results for BHST of: Common Kingfisher, Barracuda Atlantic Whitesided Dolphin, Sand Tiger Shark and Sailfish for velocities in order: 100, 200, 300 and 400km/h. Drag coefficients are noted for each test point. Following signs are representing: VD- velocity distribution, PS – static pressure distribution and SF – stream function.

5. DISCUSSION

Overview of the results lead to consideration of 2D BHST as a sort of airfoil placed near ground that splits the flow to outer and the flow in the gap, along the BHST length. Also, BHST might be consider as a BHST cross section placed in longitudinal plane of symmetry, simplifying the geometry of the BHST bottom, while kept in mind that aerodynamic parameters differ from 2D to realistic 3D case in value and character in the surrounding.

Relevant flow field and pressure distribution changes were brought by the: (a) curvature and length of the upper and lower fore-/after-body surface and (b) the diameter

and placement of the nose tip.

From Tab. 3.-7., VD, is obvious that gradual curvature leads the flow over crossing points, fore-/after-body and central-body, smoothly, with no sudden velocity and pressure changes (kingfisher, in very first and barracuda). For other geometries the abrupt change of curvature was presented and consequently slightly interdiction in velocity and pressure fields occurred. As well, the fore-/after-body elongation is of significant influence on the flow field. Kingfisher-like design is the most elongated, $l/H=4.46$ and $b/H=4.16$, near desirable value of 5 as for bullets. First following is the barracuda-like design. Elongation down the smooth curvature leads fluid to flows more naturally and with less drag to motion at velocities of 400km/h.

Continual contraction of the cross section in the gap, for kingfisher- and barracuda-like designs, was preventing blockage the flow over the gap, leading to expansion under BHST body. Presence of undesirably high static pressures under the fore-body might be prevented in future designs by laying down the nose tip, and by that means make the balance over the flows over BHST and the gap. Flat gaps, in other configurations showed a presence of complicated expansion/compression flows with intention to black the flow in the gap, so they should be excluded for high velocities.

The phenomenon of differences in drag coefficients, at 400km/h, for kingfisher and barracuda-like designs, are the consequence of the nose tip diameter.

Table 4. BHST with the Barracuda - like design

CONFIG 2 (I/H=3.14)				
V C _D	100 km/h 0.3817	200 km/h 0.2855	300 km/h 0.2825	400 km/h 0.5633
VD				
PS				
SF				

Table 5. BHST with the Atlantic Whitesided Dolphin - like design









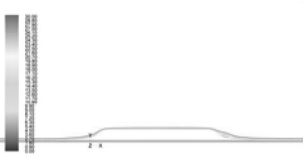

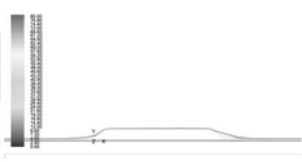
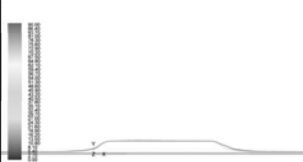
CONFIG 3 (I/H=1.73)				
V C _D	100 km/h 0.4808	200 km/h 0.5077	300 km/h 0.4096	400 km/h 1.3253
VD				
PS				
SF				

Table 6. BHST with the Sand Tiger Shark - like design

CONFIG 4 (I/H=2.81)				
V C _D	100 km/h 0.5596	200 km/h 0.51068	300 km/h 0.3176	400 km/h 0.4875
VD				
PS				
SF				

Rising the operational velocity it is preferably to apply smaller diameters, sharper nose, for decreasing drag.

Table 7. BHST with the Sailfish - like design

CONFIG 5 (l/H=3.79)				
V C _D	100 km/h 0.4339	200 km/h 0.3891	300 km/h 0.3510	400 km/h 0.3817
VD				
PS				
F				

It was shown that the best results, of observed aerodynamic characteristics, were for the kingfisher-like BHST design, with smooth and continual changing of the pressure distribution and streamlines following the BHST contour for 400km/h. Results obtained for other BHST designs were showed significant pressure and velocity changes, in accordance to the train velocity, starting from the zone of nose-body crossing line and further downstream.

The flow behaviour is also shown by the stream functions, where the designs with steeply changes section showed strong vorticity in the trailing wake, behind the BHST. Oppositely, kingfisher's design showed the compilation of flows from other domain and from the gap, behind the after-body nose tip, in a form of lined trace of BHST, for all case studies. Following previous is the barracuda-like design which trace wider trace but still acceptable, expected for mounted after-body nose tip diameter and after-body shape.

6. CONCLUSION

Discussion described that, with awareness of all assumptions and simplifications, the best potentials for BHST designs, for high velocities, showed kingfisher and barracuda bio-inspired designs. Those designs possess 'acceptable shapes, elongation, nose tip and gap expansion in comparison to dolphin-, shark- and sailfish-like designs. Also we get the key points of geometry - flow influence, about which further research is recommended, to be observed for realistic 3D and tunnel test cases.

ACKNOWLEDGMENTS

This article resulted from the research financed by the project of the Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia, TR-35045 - Scientific-technological support to enhancing the

safety of special road and rail vehicles, 2011.-2014. Authors are grateful to Mr. Paul Sawyer, wildlife photographer, on kindness to approve the use of his artworks in this research.

REFERENCES

- [1] Rašuo, B.: Bionics in Design, University of Belgrade, Belgrade, eBook on CD., (in Serbian), 2014.
- [2] Raghu, S. Raghunathana, H.-D. Kimb, T., Setoguchi: Aerodynamics of high-speed railway train, Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) 469–514
- [3] Puharić, M.: Aerodinamički fenomeni koji se javljaju pri kretanju vozova kroz tunel, Naučno tehnički pregled, 49, br. 4, (1999) 33-38
- [4] Design for Sustainability through Bio-Mimicry, Compiled by Suparna Vashisht for Sustainable Silicon Valley, September 8, 2011.
- [5] <http://www.speedofanimals.com/water>
- [6] Paul Sawyer, <http://goo.gl/Mo4XxT> and <http://goo.gl/B14OKP>, with a written approval
- [7] Puharić, M., Linić, S., Matic, D., Lučanin, V.: Determination of Braking Force of Aerodynamic Brakes for High Speed Trains, Transactions of Fama XXXV-3 (2011), ISSN 1333-1124, UDC 629.4.56, UDC 629.4.077, 57-66, October 2011.
- [8] Puharić, M., Lučanin, V., Linić, S., Matic, D.: Research Some Aerodynamic Phenomenon of High Speed Trains in Low Speed Wind Tunnels, The 3rd International Scientific and Professional Conference CORRIDOR 10 - a sustainable way of integrations, Belgrade, Serbia, October 25th, 2012.
- [9] Veerasteg, H.K., Malalasekera, W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method, Longman, 1995.
- [10] ANSYS FLUENT 12 Userguide
- [11] Internet-Google Open Source image library

ПРИЛОГ 8.



DRAG-COEFFICIENT BEHAVIOR OF THE BIO-INSPIRED HIGH SPEED TRAIN DESIGNS

S. Linic¹, B. Rasuo², M.Kozic³, V. Lucanin², A. Bengin²

¹ Institute Gosa

Milana Rakica 35, 11000 Belgrade, Serbia

E-mail: sumonja@yahoo.com

² Faculty of Mechanical Engineering,

The University of Belgrade, Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia

E-mail: brasuo@mas.bg.ac.rs, vlucanin@mas.bg.ac.rs, abengin@mas.bg.ac.rs

³ Military Technical Institute,

Ratka Resanovica 1, 11030 Belgrade, Serbia

E-mail: mkozic@open.telekom.rs

Abstract

During the last decade need for higher traveling velocities signified, in a problem foreground of the heavy vehicle aerodynamics, the contradictory requirements of energy saving, drag reduction, and noise pollution. Exploitation and tests of present top high-speed trains' designs asserted the success in exceeding velocity over 300km/h. The experiences highlighted the various solutions from designing compact wetted surfaces to extreme designs.

Furthermore, aerodynamic design optimization methods in the baseline are concerned about the train shape that would compromise the present requirements, but one of methods steps in front. Bionic design of high-speed train (BHST), in the example the JR Shinkansen, presents the successful adoption of the natural shape of the Kingfisher. The accomplishment of the selection and adoption of a natural shape is a matter of understanding the lifestyle and natural processes of the interest.

In this work, the drag coefficient dependence of five bio-inspired BHST designs were explored on four test velocities in a range from 100 to 400km/h. The intention was to obtain a relation between the drag coefficient and BHST velocity as well the possibilities that bionic design gives on the path of "green" 3D bionic form.

The criteria for the natural shape selection were taken from the available data: the maximal speeds obtained during catching prey and the hunting technique, in the natural environment. Furthermore, the base of the BHST tested configuration consisted of two idealized joined driving cars without gaps, placed in the open railroads surrounding. The driving car had the BHST biomimetic nose set together with the after-body half, in a real scale. The equal longitudinal cross-sections formed the numerical model between the domain's sidewalls. From the CAD model created by the PRO/Engineer WF4, the Design Modeler Application of the ANSYS Fluent 12 defined the numerical model. Mesh creation was done by the Meshing Application as well the Computational Fluid Dynamic calculations.

The overall surface of the BHST model the inflation layer was laid and the tritetrahedral mesh filled the rest of the domain space. Furthermore, for more precise calculation results the density of the mesh cells was increased by the introduction of the body of influence, near the BHST numerical model also capturing the ground surface. Mesh counted up to 10e+06 elements. Also,

the boundary conditions were adjusted to the flow conditions of incompressible and compressible cases. For both, the ground was considered as a moving wall boundary condition. According to the BHST configuration and the presence of the ground, it was assumed that under the circumstances is possible that the compressible flow appears under the BHST floor. Furthermore, the applied turbulent model was two-transport equation model, Standard k- ϵ , with non-equilibrium wall treatment.

The numerically obtained results, for testing real scale BHST models, revealed an interesting behavior of the drag coefficient about the velocity just of 300km/h, at which the drag coefficient behavior changed significantly.

Key words: aerodynamics, high speed train, numerical simulations, design, bionic

1. Introduction

Trend in designing of the heavy vehicles for a long time is dedicated to the solution methods of drag and noise reduction. From a number of optimization methods, biomimicry raised as one of the most convenient, flexible and naturally solved method [1], that lead a freedom of forms and conditions applied to the bionic design. Previous researches of high-speed trains [2] and experiences [3,4,5,6] were a base for more detailed analyze of the bio-inspired high-speed train designs (BHST). Motivated by the most popular BHST, the Shinkansen 500, Japan, in this research five animals were selected to be a base for bionic models. Selection of species was made to the criterion of hunting customs, velocity of movement during hunting, body dimensions etc. reported in present research studies and the open library [8-15,18]. Based on the images from the nature [7,17] the CAD models were created and analyzed by the CFD [2,16-18], afterwards, their aerodynamic characteristics were compared, in first the pressure coefficient and then the drag coefficient. Results shown interesting and applicable remarks for BHST design, in relation to the velocity of 300km/h which, raised from the calculations, as a cross-line to significant changes of the aerodynamic characteristics.

2. BHST Concept Designs

The research included five concept designs [3] made biomimicing species under criterion: living environment, of fastest in a family, having different hunting behavior and have distinguished customs.

The smallest is a Kingfisher selected upon its habits to hunt while plunge-diving in fresh waters. With a variety of over a 100 of species, available open sources indicated following data: plunging velocity of about 6 – 10m/s, body weights from 50-350g, body lengths from 10 to 45cm and plunging heights from several centimeters to several meters [9] (approx. The Reynolds number of the beak is about $Re=240$, dived into the water). For all of the species of the Kingfishers is unique to perform plunge-diving as hunting habit. Furthermore, plunge-diving is optimized and adjusted to body mass and dimensions, enabling stabile and safe hunt for a bird. Substantially, the kingfisher stays invisible for a prey, in duration of a few milliseconds, owing to its beak configuration. Thus, during the water entry, the beak streamlined shape does not create surface disturbances or ripples, which we may see, but also does not create significant pressure disturbances to the depths, which may the prey sensed. Hence, from the point of impact to water entry of prey depth, the kingfisher has enough time to cross the distance and catch the prey. Inspired by the Shinkansen 500 [18], high speed train of the Japan's Rails, in this research the contour of the kingfisher's beak was commonly biomimic to the bionic high speed train (BHST) with the awareness that the imaginary concept design will need further adjustments to motion and surrounding preferences. In order to create the kingfisher-like BHST, first the bionic model of the kingfisher was made (Fig.1a). Using the CAD/CAM software PRO/Engineer WF4, inside the

reference planes of the Cartesian coordinate system, the images from the nature [8] were imported thus reflected the pose of the kingfisher to water in a natural act. During the flesh moment of the water-entry, configuration of a body and the beak was replaced with the imaginary artwork, so the configuration followed the contour continually. Further, created surfaces were adjusted and checked (Fig.1b) and from the longitudinal cross section the beak geometry was extracted in relation to the assumed longitudinal body axes (Fig.1c). From this point, over the extracted scaled beak's geometry, in a direction of the kingfisher body the BHST was constructed (Fig.1d), selecting the height of 3m and the gross length of 50m.

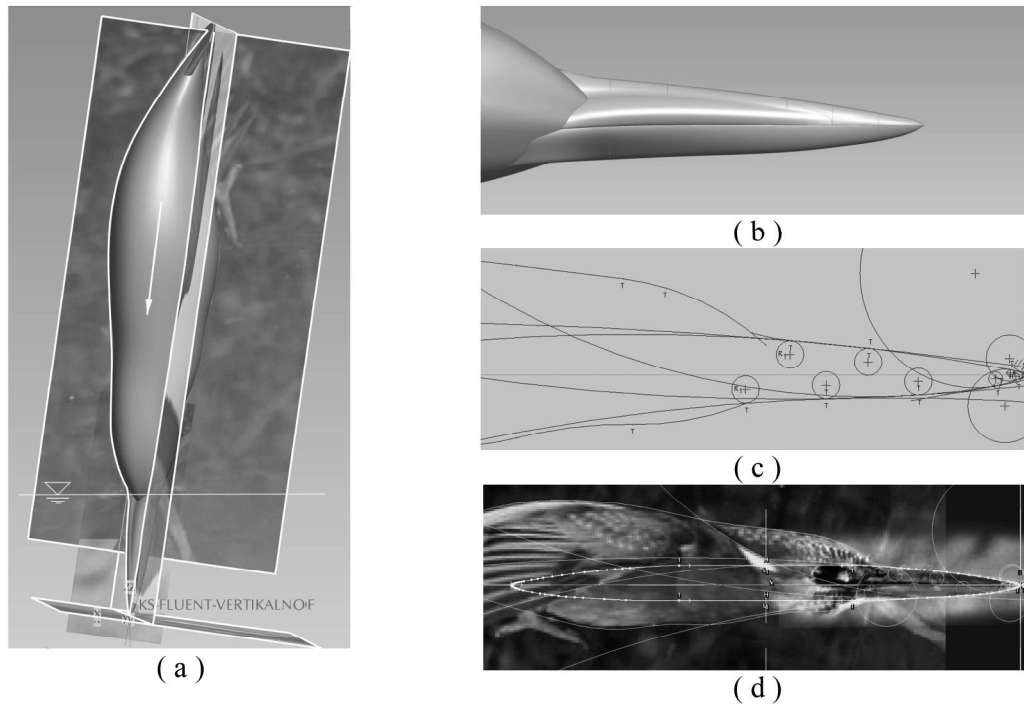


Fig. 1 Creation of the Kingfisher-like BHST longitudinal cross section

(a) creation of the CAD Kingfisher in a freeze pose of plunge diving [8] (b) detail of the bionic model beak
 (c) construction base of the bionic Kingfisher (d) construction of the bionic BHST cross section [3]

In following, the aquatic animals will be selected on their longitudinal cross-sections, not including: the motion type, oscillatory effects of a drag/power production, skin friction control etc. , because their design is of interest for application to the BHST [8-15].

Second selected concept design was similar to the barracuda, predator having about 1-1.5m long elongated body, of 23-50kg, moving in a direction fast as 44km/h (approx. Reynolds number $Re=12000$). The barracudas do not practice common fish-like strategies of hunting, but prefer ambushing and waiting until the prey approach, thereafter it rushes out and catch. Consequently, a mobility of barracuda's body is limited in advantage of body motion velocity, assuming in a significant influence of the ground.

Next, Atlantic White-Sided Dolphin, represents the water tripping mammal, from maybe most observed species of a kind, selected for its extreme body streamlining and flexible surface skin friction control [11]. This species in relation to other dolphins has the unnoticeable nose contour while having similar body-mass properties. Base data lead to maximal velocity of about 35km/h, length up to 2.8-3m (approx. max Reynolds number of $Re=27000$). The body cross section is circular due to the shape of the lungs.

The shape of the Sand Tiger Shark was selected for its habit to swim and hunt near the seabed. As slower specie of a family of sharks, it has a special habit to perform stealth and silent

moving to the prey, whereupon it suddenly catches the prey. In common this shark is living near coasts. According to available data the velocity of the Sand Tiger Shark is about 32km/h, body length of about 3.2m (approx $Re=28000$). Generally, the motion of the sharks is supported by skin friction control of riblet type [12].

As last selected, the Sailfish is a fastest open sea fish, moving about 110km/h, with elongated flat body caring a long, sharp nose. The skin friction control of the sailfish is made by the V-shaped elements, distributed over the surface [12]. Overall length of the sailfish is about 2.7m. Here one may note that similar body shapes, especially nose shape, have the Swordfish and Striped Marlin, swimming a little bit slower, about 97km/h and 81km/h respectively.

The concept designs were equaled in gross dimensions in frame of BHST length and height $L_{ref} \times H = 50m \times 3m$, represented the longitudinal cross section in a symmetry plane of the BHST, lifted from the ground to a height of $h = 0.4 m$. Concept design parameters are shown in Fig.2 and comparative views in Fig.3.

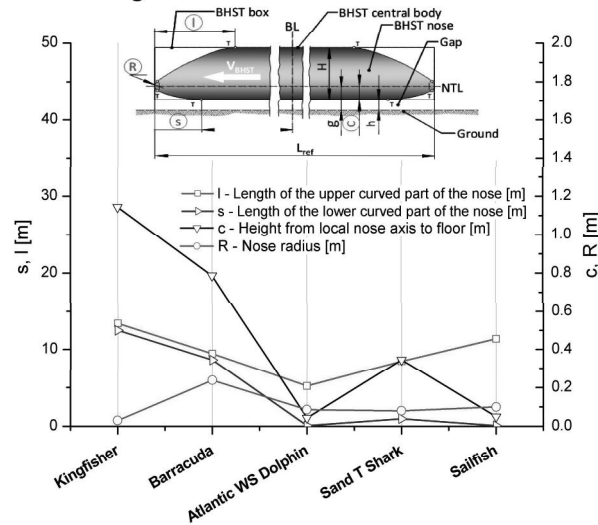


Fig. 2 Concept design parameters

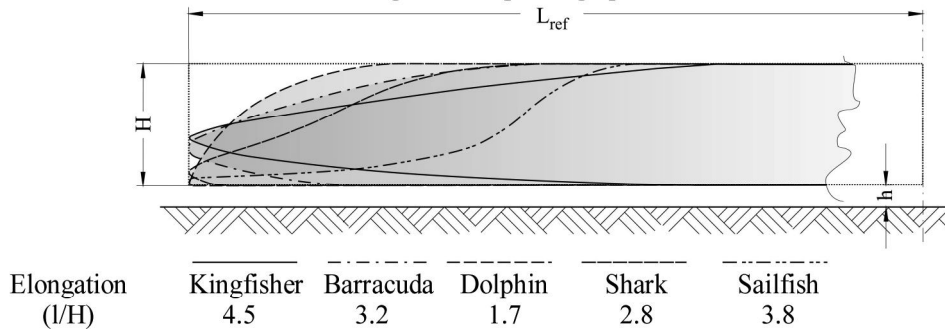


Fig. 3 Comparative views of five concept designs

3. CFD Method

For the analyzes of the aerodynamic characteristics of the adopted concept designs CFD method was employed by use of the ANSYS Fluent 12 software. Geometry and mesh preparations were made in accordance with ANSYS Fluent recommendations, experiences in research of the high-speed trains and the best practice guidelines for automotive aerodynamics [4-6].

Numeric domain was set around the BHST box in length of 500m (150m in front of the BHST nose tip), 75m height and 0.1m thick. Bottom edge of the domain represented the ground. Inside the domain, body of influence was added to mesh quality control, thus covered the ground

(from 0 to 8m in height). However, the BHST model was also captured with the body of influence thus the flat shape was stretched to ellipse shape, beginning at 41m in front and behind of BHST tips and 17.6m over the BHST. The ellipse shape was divided in sections with side edges normal to the BHST contour forming faces for mesh definition.

3.1 Mesh Definition

Definition of the mesh was made by the method of all the triangles, enforcing proximity and curvature advanced size function and fine tune of other variables. Global mesh sizing defined following measures: minimum size of the elements of 5mm, Max face size of 2m, max tetragonal size of 3m and growing rate of 1.1 for fine grade transitions of elements' dimensions. For a small grain of mesh elements inside the zone of the body of influence (containing 36 faces), element size was limited to 300mm with soft behavior. Furthermore, elements' edges were limited, around the BHST contour and over the ground. Nose tip was divided into 200 equal length elements, nose edge to 500 and others to 400 elements, resuming, the BHST contour was divided into 7200 edges. Near the BHST, faces on the ground were divided into 4000 edges. Overall, the inflation layer was defined for all the edges (20pieces) contained just in the BHST contour, where first layer thickness was set to 1.5mm, extruded by 5 layers with element growth rate of 1.1. However, ground surfacing with the inflation layers was not needed because the ground will be treated as moving wall and its influence to BHST is of matter. The mesh near the BHST, presented in Fig.4, is similar to all concept design; the only difference is in a number of cells.

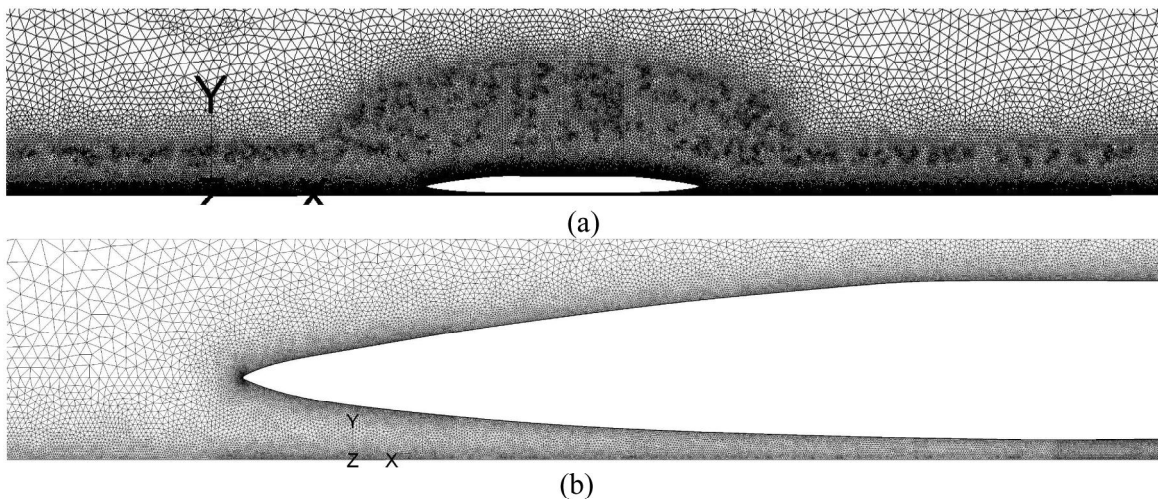


Fig. 4 The mesh in domain with detail, kingfisher-like design. (a) presentation of the domain segment
(b) detail, presenting the domain zone near the nose of the BHST

For the BHST of kingfisher-like design it was 383438 cells, the barracuda – 525380, the dolphin – 440541, the sailfish – 788492 and the shark – 529824). Obtained mesh skewness was up to 0.77 while aspect ratios were up to 100 (higher values are acceptable for elongated bodies as are the heavy vehicles).

3.2 CFD Modeling

Described BHST designs were equally treated with CFD method, performed by the ANSYS Fluent 12, to obtain the base aerodynamic parameters. Numerical simulations were run in two-dimensional space for steady and fully developed turbulent flow in sequences for different velocities. Selected free stream velocities of: 100km/h, 200km/h, 300km/h and 400km/h,

simulated the open rail motion of the BHST. Hereby, the smooth numerical model of the BHST was stable while the free stream is acting and the smooth ground was moving, both with the same magnitude.

The numerical method employed the pressure-based solver in 2D space. Flow was treated as incompressible for velocities of 100km/h, 200km/h, and compressible for 300km/h and 400km/h. However, in all the cases the Realizable κ - ϵ turbulent model was applied for its robustness and reliability in the absence of strong separation, large streamline curvature, and high-pressure gradients. Because the assumption of separations and reattachments of the flow over the BHST as well the pressure gradients rapid changes the non-equilibrium wall function was selected under the setup of the turbulence model. As a requirement of compressibility nature, in cases with the compressible flow the energy model was enforced. Further, flow conditions were set as a standard in accordance with the velocity for incompressible flow, but for compressible flow the air was defined as the ideal gas which dynamic viscosity was calculated with the three-coefficient Sutherland equation.

The boundary conditions defined as inlet and outlet, represented the up-and downstream faces of the domain, while top domain face was set as symmetry wall and the bottom face as a smooth and moving wall.

According to applied velocity, standard pressure and the temperature of the air in the rest (total pressure of 101325Pa and temperature of 15⁰C), for incompressible cases, the inlet was set to be velocity-inlet boundary condition, where the turbulence method was intensity and viscous ratio, with turbulent intensity of 1%, as in the wind tunnel. However, for the compressible flows the pressure-far-field boundary condition was set for the inlet, setting up the operating pressure to zero value, gauge pressure and temperature to appropriate values while keeping the turbulent intensity of the same level. In all cases the outlet boundary conditions were set to be pressure-outlet, having the backflow turbulent intensity of 5% to handle possible troubles with exiting the domain.

General procedure in solution method follows the application of the segregated pressure-velocity coupling with the SIMPLE algorithm, the Least Squares Cell-Based gradient interpolated method, spatial discretization of first - (for the first 50 iterations) and second – order upwind scheme (to final convergence for residuals of 1e-05).

From the numerical simulations the pressure coefficients and drag coefficients were obtained.

Pressure coefficient, C_p , represents the ratio of pressure difference to reference dynamic pressure, as in Eq.1

$$C_p = \frac{(p - p_{ref})}{q_{ref}}, \quad (1)$$

where p is the static pressure, p_{ref} is the reference pressure and q_{ref} is the reference dynamic pressure, described by $\frac{1}{2} \rho_{ref} V_{ref}^2$ with defined referent values of density ρ_{ref} and velocity V_{ref} .

Drag coefficient, C_d , was obtained indirectly from the sum of form and viscous drag forces, total drag force, in Eq.2, for unit reference area

$$C_d = \frac{2D_{total}}{\rho V_{ref}^2 A_{ref}}, \quad (2)$$

where D_{total} is a total force in x-direction, ρ is density of the air, V_{ref} is referent velocity and A_{ref} is referent area of the model cross section.

4. Results

The results of this research, represented in a group of figures in Fig.5, show C_p over the BHST length, at different velocities (100km/h, 200km/h, 300km/h and 400km/h,), for five concept designs. Summary preview of C_d for five different BHST designs, at the same velocities, is shown in Fig.6.

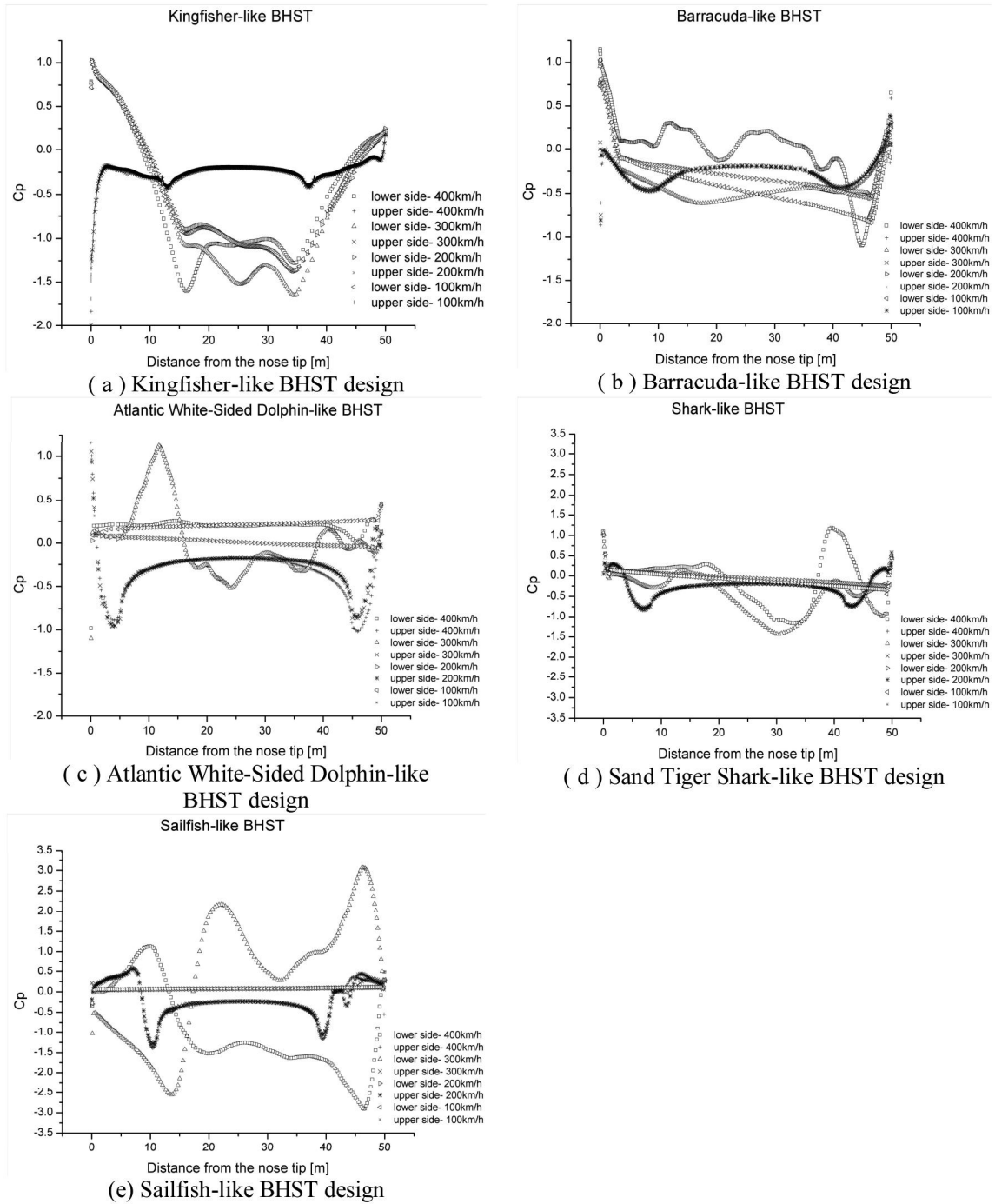


Fig. 5 Coefficients of pressure of different BHST designs

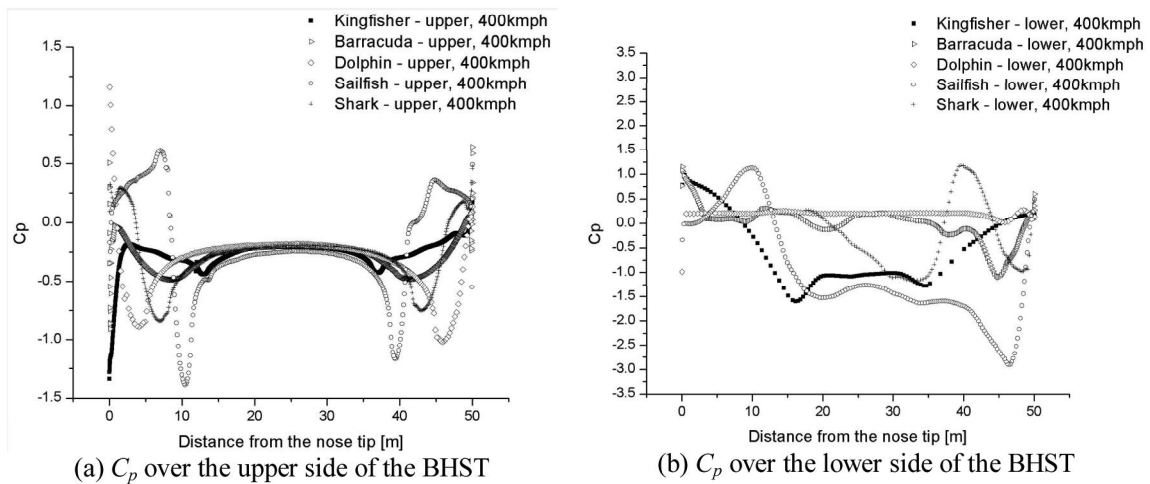


Fig. 6 Comparison of C_p for five different BHST designs at velocity of $V=400\text{km/h}$ (a) the upper side of the BHST (b) the lower side of the BHST

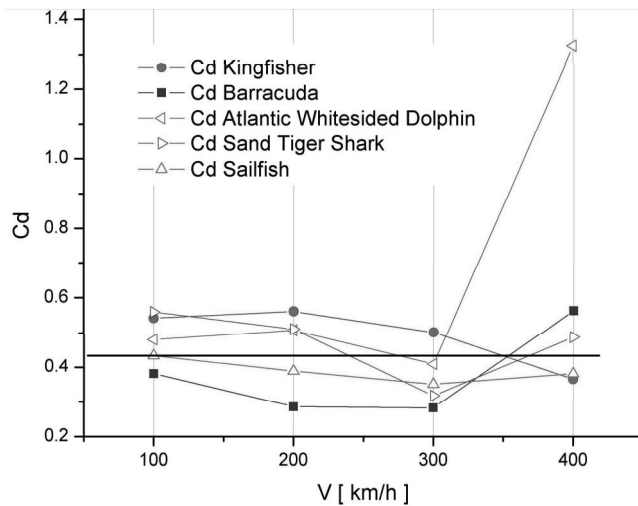


Fig. 7 The C_d for five BHST designs, at velocities of 100km/h, 200km/h, 300km/h and 400km/h,

5. Discussion

Functions of C_p to the BHST length, in Fig. 5, may be divided into two groups according to their behavior. In the first group are placed the kingfisher-like design and the barracuda-like design (Fig.5a and 5b respectively). Herein, sharp elongated bodies introduced intense C_p changes under the body of the BHST causing suction through the channel and the lifting of the nose and the tail. Both designs achieved C_p values about a unit in the nose zone from the lower side. Barracuda-like design shown the best C_p distribution from the upper side with smooth transition from the nose zone to the tail, except for the highest velocity of 400km/h, where it was oscillating.

In another group of designs are the Atlantic White-Sided Dolphin, Sand Tiger Shark and the sailfish, which shown very high C_p values in the channel under the body, over unity up to ± 3 , for different velocities and as the dolphin also over the body of the BHST. Therefore, these designs reasonably are not adequate for application at higher velocities without adjustments with a special care. It may be expected from them to perform much worse distribution and values of the C_p in bounded flow, as the tunnel is.

From the comparative preview of the C_p behavior, in Fig 6a,b, at 400km/h, some of the recommendations may be noted: (a) desirable elongations of the BHST nose are in a range from min 3 to 5, even grater if technologically is possible; (b) the curvature on the lower body side produces the non-uniform suction per length where it is not desirable - in a zone of the nose and therefore it is better to cut out the contour to flat, somewhat as for the sailfish or the shark-like designs; (c) smaller radius, sharp nose tip contour continuing with the flat bottom surface would separate the flows and direct it to outer domain controlling the amount of the flow through the channel under the BHST

Analyze made from Fig.7, assuming the conventional rail conditions, at first put in view velocity of 300km/h, about which the drag coefficient is changing a direction by means of increase, except for the kingfisher-like BHST. From those the extreme increases occurred for the dolphin-like design, which has the lowest elongation of 1.7. Kingfisher- and barracuda like designs, selected upon the C_p as the most desirable, had “symmetrical” curves of C_d functions, about the value of 0.43 for 350km/h. Herein, the elongation that commonly calculated would fit in is 3.8, and at the same time, this elongation defined the sailfish contours of which are $C_d=0.4339$, at 100km/h. Hereafter, the function of C_d is slightly changing with velocity, according to Fig.7, that may be explained by the presence of vortex in front and the rear wake, growing in dimensions while speeding [3].

For the purpose of creating the optimal BHST, in future work, a mixed design may be employed, taking from each its best properties. In addition, the mixture of designs has to have the elongation of about 3.8, with curvature adopted from the barracuda-like design and the nose radius from the kingfisher while keeping the flat bottom. Therein, it is significant to pay attention also to the gross BHST length, by means of analyzing of the influence of expanding of the BHST in length and speeding up, to aerodynamic parameters. Each BHST configuration, therefore, is optimized for a close range of rail conditions, running over 250-300km/h, under the awareness that plane flow represented a thin section in longitudinal direction. The presented method is applicable for low-time cost analyze in a phase of bionic design selection for low- or high speed trains. Following the same method, analyze may be applied to three-dimensional problems on the open rail or passing the tunnel. In addition, presented design method may be applied and analyzed in two-dimensional space parallel to the ground, at different heights. Afterwards, gathering of design selections in orthogonal planes, analyzed as described, would lead to satisfied first-hand BHST.

6. Conclusion

This unique research presented a method of creating and analyze of bionic high-speed train in a plain flow, as a representative of a flow in the longitudinal cross section of the BHST. With the aim to find a simple and low time consuming method for prototype design, from a number of animal species, five natural designs were selected and applied-as-are. Analyze of the pressure and drag coefficients, define directions for further work, but also highlighted the needs. Obtained results gave the advantage to BHST with the sharp and elongated nose as the kingfisher- and barracuda-like being, placed as low as possible to the ground and continued with the characteristic curved nose surface. Those designs showed the most satisfied pressure distributions in a presented configuration, but from them expects more after further adjustments. Beside the presented, it is recommended to analyze a larger number of species, especially those living on the seabed, even if they are slow motion species.

Acknowledgments

This work resulted from the research financed by the Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia through the projects TR-35045 and TR-34028

(both from 2011. to 2015.). The authors are grateful to Mr. Paul Sawyer, wildlife photographer, on kindness to permit the use of his artworks in this research.

References

- [1] Rašuo B. *Bionics in Design*, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, 2014., eBook on CD., (in Serbian)
- [2] Raghu S. Raghunathana, H.-D. Kimb, T. Setoguchi, *Aerodynamics of high-speed railway train*, Progress in Aerospace Sciences 38, 2002, 469–514
- [3] Linić S, Rašuo B, Kozić M, Lučanin V, Puharić M, *Comparison of Numerically Obtained 2-D Flow Fields for the Bionic High Speed Train Concept Design Inspired with Aquatic and Flying Animals*, 6th International Scientific Conference on Defense Technologies, OTEH 2014, Military Technical Institute, Belgrade, Serbia, 09 – 10 October 2014.
- [4] Mirjana Puharić, Suzana Linić., Dušan Matic., Vojkan Lučanin, *Determination of Braking Force of Aerodynamic Brakes for High Speed Trains*, Transactions of Famena XXXV-3 (2011), ISSN 1333-1124, UDC 629.4.56, UDC 629.4.077, 57-66, October 2011.
- [5] S.Linic, M.Puharic, D.Matic, V.Lucanin, *Determination of the Aerodynamic Brake Efficiency for Various High speed Train Velocities*, Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina lake, Serbia, 5-8 July 2011
- [6] Mirjana Puharić, Vojkan Lučanin, Suzana Linić, Dušan Matic, *Research of Some Aerodynamic Phenomenon of High Speed Trains in Low Speed Wind Tunnels*, The 3rd International Scientific and Professional Conference CORRIDOR 10 - a sustainable way of integrations, Belgrade, Serbia, October 25th, 2012.
- [7] Marco Lanfrit, *Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT*, Version 1.2, eb 9th 2005, [last accessed in 2014]
http://www.scribd.com/fullscreen/48010874?access_key=key-1riq1p9ponr4kkvh7il9
- [8] Sawyer P. *Wildlife Photography*, [last accessed on 26/03/2015], <http://goo.gl/Mo4XxT> and <http://goo.gl/B14OKP>, with a written permission
- [9] A-Z Animals, [last accessed on 26/03/2015], <http://a-z-animals.com/animals/kingfisher/>
- [10] Vadim Pavlov, Donald Riedeberger, Ulrich Rist, Ursula Siebert, *Analysis of the relation between skin morphology and local flow conditions for a fast swimming dolphin*, DFG SI 1542/, [last accessed on 19/04/2015]http://www.iag.uni-stuttgart.de/mitarbeiter/ulrich_rist/Literaturverzeichnis/papers/SPP1207_Pavlov.pdf
- [11] F.E.Fish, J.J. Rohr, *Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance*, Technical Report 1801, 1999., SPAWAR, Systems Center, San Diego, West Chester University
- [12] Haecheon Choi, *Bio-mimetic Flow Control*, 62nd APS Division of Fluid Dynamics, Vol. 54, No. 19 November 22-24, 2009, Minneapolis, Minnesota, USA,
<http://meetings.aps.org/link/BAPS.2009.DFD.D1.1>
- [13] Speed of Animals, [last accessed on 26/03/2015] <http://www.speedofanimals.com/water>
- [14] ASCOBANS, [last accessed on 26/03/2015], <http://www.ascobans.org/en/species>
- [15] National Geographic, [last accessed on 26/03/2015],
<http://animals.nationalgeographic.com/animals/>
- [16] Theory and Userguide of the ANSYS Fluent Documentation
- [17] Veerstedt, H K and Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*, Longman Scientific & Technical, New York, 1995.
- [18] Open source library

ПРИЛОГ 9.



7th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON DEFENSIVE TECHNOLOGIES OTEH 2016

Belgrade, Serbia, 6 – 7 October 2016



AERODYNAMICS OF THE HIGH SPEED TRAIN BIO-INSPIRED BY A KINGFISHER

SUZANA LINIĆ

Institute Gosa, Belgrade, sumonja@yahoo.com

BOŠKO RAŠUO

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, brasuo@mas.bg.ac.rs

MIRKO KOZIĆ

Military Technical Institute, Belgrade, Serbia, mkozic@open.telekom.rs

VOJKAN LUČANIN

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, vlucanin@mas.bg.ac.rs

ALEKSANDAR BENGIN

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, abengin@mas.bg.ac.rs

Abstract: *With the intention to contribute to aerodynamic optimization of transport vehicles, the high speed train was biomimic with a kingfisher. Presented bionic concept design was defined after a series of hydrodynamic and numeric experiments of bionic model of the kingfisher. The aerodynamic characteristics of the high speed train were observed in three configurations, under various railing conditions, as follows: in a free flight (up to critical local conditions), in a presence of ground and passing through the tunnel. Obtained results presents the main aerodynamic characteristics of the bionic high-speed train, and in further, analyzed from the view of a design source. Adequate results were compared with concept designs bio-inspired with other animals showing the best performances after biomimic with the kingfisher up to velocities of 400km/h.*

Keywords: *aerodynamics, bionic, CFD, optimization.*

1. INTRODUCTION

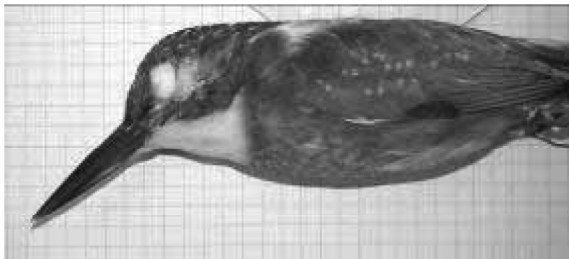
Although very frequently pointed biomimicry with the kingfisher as a model of aerodynamic modeling of the high-speed train nose [1,2,3,4,5], at the contemporary literature in a field of biomimicry and bionics [6] no further details were reported. With the motivation to apply biomimicry on the industrial design, in this work on the bionic high-speed train, BHST [7,8], we found necessary to develop knowledge [9] and collect data [10] about the phenomenon of the kingfisher in plunge-diving [11], as a design base and to justify the artificial case by the hydrodynamic tests [12,13,14]. The same parametric model used for manufacturing the bionic kingfisher in a free-fall water-entry, was used for design of the numerical BHST in real scale, after adjustment of its contour. Furthermore, the BHST was forced to run in different hypothetic conditions. To understand the base aerodynamic characteristics of the BHST, with drag and pressure distribution in focus [15], the BHST was released to a free flight from subsonic to transonic velocity ranges [16]. Afterwards, the BHST was grounded to run in open rail, and at last to pass the infinite tunnel. The flow conditions were set to the ranges of interest needed for further design adjustments. One may note that this work is based on parameters of the flow velocity and

model geometry, in 2-D space, that is hypothetic, but represents the characteristics of the initial self-similar profile in longitudinal direction under advanced conditions. All the others self-similar nose/tail cone's cross-sections, on the future 3-D BHST, were assumed to be much sharper and of less area than the longitudinal one. Presented cases were wall-bounded and introducing the flows more complex than in the reality. In the first place, the idea was to apply experiences and knowledge from aircraft aerodynamics and design in various ranges of flight that were not represented up to know, to a design process of the high-speed trains. Combining selected geometries in two orthogonal and longitudinal directions, created upon their flow responses is expected to give in further research a final bionic design ready for wind tunnel testing and numerical justifications [18,19], with intention to predict the flow using a new method until real scale rail run [20].

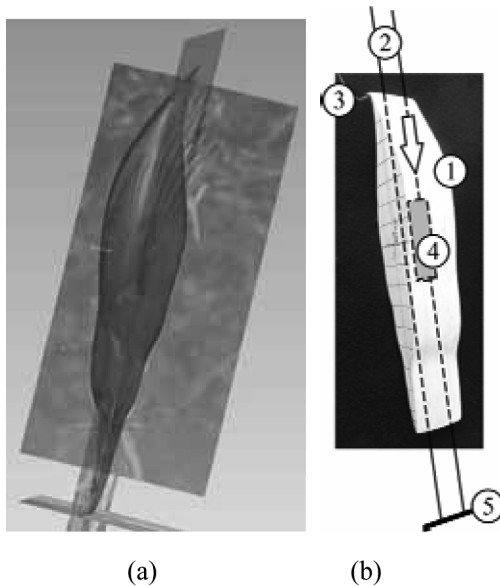
In this work, from the BHST we have required answers about geometry quality from upon the flow reaction [7,8]. The available sources commonly are based on the transient flow characteristics over the 3-D models, for observing the passing train through the tunnel, just a small number are covering 2-D or axis-symmetric cases, like is the observation of the tube train [21].

2. NUMERICAL MODEL OF THE BHST

The numerical model of 2-D BHST was created by re-engineering of a kingfisher longitudinal profile, contouring layered images from the Nature. The software PRO/Engineer WF4 was used for creation of 2-D body contour. The contour, adopted as a longitudinal cross-section of maximal area, was translated into the formatted text file, imported to the CFD space for mesh generation, by the ANSYS Fluent Package. In this process, one data source was a selected profile photo of the kingfisher, Natural History Museum exhibit (Picture 1), while other two, were used for positioning of the model relative to the water, reconstructing the body pose the kingfisher during water entry (Picture 2a)[7,8,9,11]. In Picture 2b, the hydrodynamic model was shown with signed support items. The wooden model simulated the kingfisher body in the shape and mass [22].



Picture 1. The female kingfisher (museum exhibit from the Natural History Museum, prepared in year 1939.)



Picture 2. Models of the kingfisher (a) a re-engineered 3-D body and (b) a 2-D bionic model for the hydrodynamic tests (1-wooden bionic model, 2-directioning strings, 3-releasing string, 4-lead weight, 5- fixation of the strings)

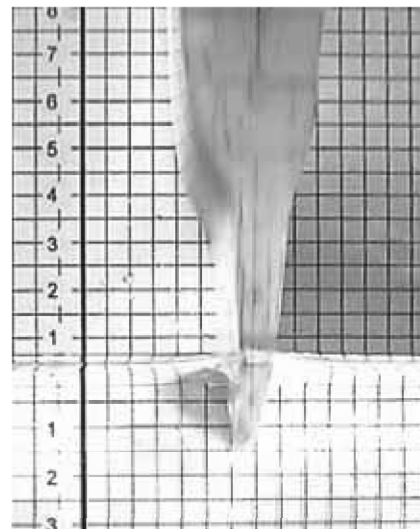
The layered images were combined to form a plunging pose of the kingfisher. A selection of body size, dependent on genetic and environmental conditions, was the maximal distance between the beak tip and tail end. Reference line followed the overlapping line of the beak parts. Adopted model length was 190mm and weight 180g. One may note that model was over-dimensioned for domestic environment (about 120mm), but such a

selection was made for reaching good manufacturing quality and quality non-macro video captures of the phenomenon during the hydrodynamic tests.

The test model simulated the shape and dynamic characteristics of the kingfisher's rigid body. The center of gravity was estimated by the PRO/Engineer tools and those data were applied to the test model. Picture 2b is shown the scheme of the model with its equipment: 1-the body of the bionic model made from the layers of balsa, 2-fixation directioning strings, 3-releasing string, 4-lead weight inside the model, at the estimated center of gravity, setting the rigid body dynamic similarity, 5-fixation of the string.

3. HYDRODYNAMIC EXPERIMENT

The hydrodynamic tests were based on methods used for testing a marine structures [12,13,14]. The test model was set to accomplish the free-fall water entry with zero deadrise angle, vertically, by fixed sliding strings. From the height of 150mm over the water surface (measured from the beak tip), the test model was released to slide along strings and to enter water in a tank filled with clear and calm water with average temperature of 26°C. During the water entry the videos were captured by a Samsung ES95 (30fps), for about 10 repeats. The representative sequence of the bionic kingfisher water entry is shown in Picture 3.



Picture 3. Water entry of the bionic kingfisher model

The average estimated impact velocity, from the video sequences, was 0.6m/s and a result shown good correlation with the images from the Nature [11]. This experiment justified, the statements from the literature [2,3,4], the no-rippling water surface behavior during impact. Furthermore, the biological design of the kingfisher beak was shown no-rippling water surface over the whole beak length at velocity about 0.6m/s, and by that means classified the geometry acceptable for application on the bionic high-speed train, BHST.

The longitudinal contour of the BHST contained two faced and symmetrical power cars, in gross length of 50m and height of 3m, with nose and tail geometries scaled

from the bionic numerical kingfisher. The nose and tail contours, from the free ends were crossed with the BHST train body shape by tangent radiuses, both, over the upper and lower sides, resulted in the nose elongation of 4.471.

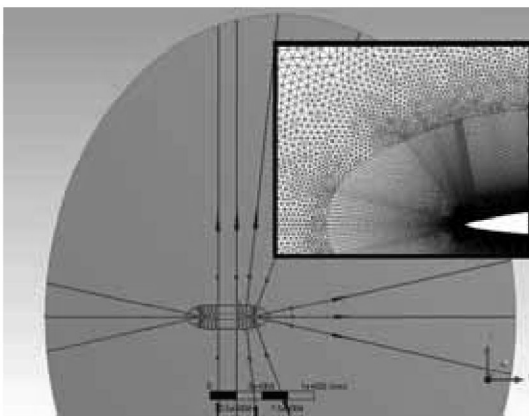
4. CFD EXPERIMENT

The CFD experiment was made by use of the ANSYS Workbench 12 [23]. Geometry of the computational space was made by the ANSYS Geometry software with imported BHST contour in a form of organized text file data.

The CFD observations of the BHST were made for three configurations: in free flight, on the open rail and passing an infinitive tunnel, and observed under conditions at three nominal Mach numbers $M=0.2$; 0.3 and 0.4 .

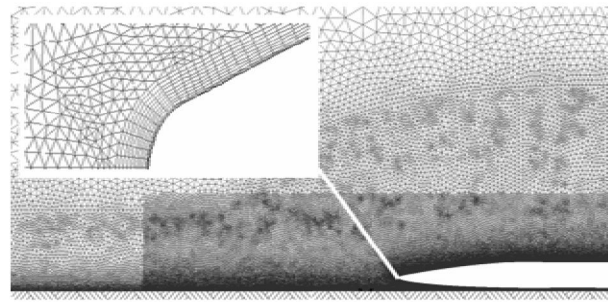
4.1. Geometries and meshes

The elliptical domain surrounded the BHST model in free flight. As shown in Picture 4, smaller axes is a symmetry axis, placed horizontally. The inlet domain boundary is 150m from the BHST nose tip, while its outlet boundary is 300m behind the BHST nose. The vertical half-axis height is 290m. For better mesh quality, the domain was parceled into smaller surfaces following the BHST contour. The resulted unstructured mesh consisted of 221284 cells, skewed up to 0.64 with aspect ratio up to 50.



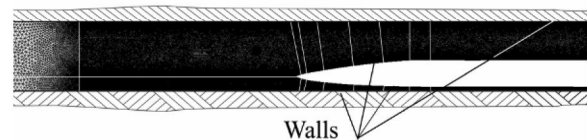
Picture 4. Geometry of the domain around the BHST in the free flight

The ground presence was treated through the rectangular domain, keeping the same dimensions along the ground (inlet distance from the nose was 150m, outlet of 300m), height was 75m with the similar parceling as previous. The BHST was lifted from the ground for 0.4m. Picture 5 represents the details of the mesh. The mesh for near-ground configurations consisted of 383438 cells without adaption, and with introduced adaption 1030505 cells (in the compressible cases). Firstly made non-adapted mesh was arranged to be denser over the BHST body and over a ground by support of the two, elliptical and flat, bodies of influence. Later adaption, through a solver tools, was made by a rectangular field. All the mesh constructions involved 10th layered inflation layer over the BHST wetted surfaces.



Picture 5. The mesh around the BHST in the presence of the ground and a detail with inflation layer cut

The BHST bounded with tunnel requested much denser mesh to answer the mesh quality requirements. Created inside the domain with the same longitudinal dimensions as others, height of 8m, the mesh consisted of 1537287 elements finally after the adaption (Picture 6). Beside the fixed dimension of the tunnel length it will be treated, in an analyze, as an infinite because no changes of geometry conditions would occur under the set of steady flow conditions. Mesh quality is described by maximal squish of 0.57, skewness – 0.78 and aspect ratio – 18.



Picture 6. The mesh inside the infinite tunnel

4.2. Numerical methods

For the purpose of understanding the phenomenon and compare the results the first CFD calculations were made with the same set up, as suggested [23,24] that close results are workable even for differently sourced solution methods nowadays (pressure- or density-based). Nevertheless, in some cases the results have had not follow the same behavior, why they were substituted. Therefore, in those cases with assumed neglectable compressibility effects, the pressure based solution method was selected, and *vice versa*, were the compressibility was assumed - the density-based solution methods. In accordance to the solution methods, the pressure-velocity coupling was selected to SIMPLE, spatial discretization defined for gradients as the Green-Gauss Node Based, standard pressure and second ordered other parameters from the pressure to the energy.

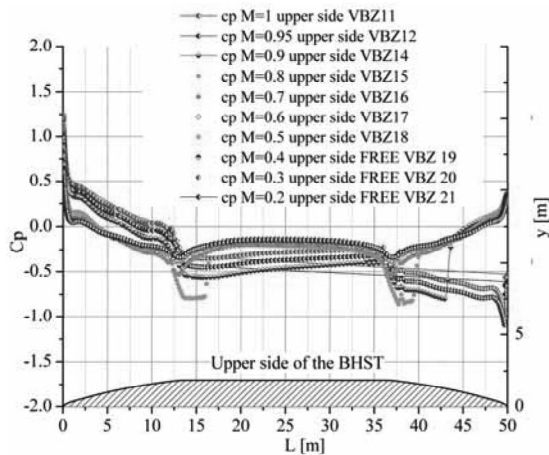
Numerical models in use were the $k-\epsilon$ Realizable, RKE, and Spalart-Allmaras, S-A. First one was used for a treatment of the wall-bounded flows over the BHST passing the tunnel and incompressible flows over the BHST on the open rails, reasoning to ensure the quality wall treatment, involving Non Equilibrium Wall Function. The use of RKE was not motivated with the calculation time economy as the problem are far less complex than BHST passing the tunnel, for example, under velocity of $M=0.4$ it was required to run over 3100 iterations to rich the convergent solution. The S-A was used in the cases of the free flight and compressible flow on the open rails, motivated with quality/time

optimization of the calculations thus the priority was BHST in the tunnel. Furthermore, either one RANS model was in use, if the compressible flow assumed the energy equation was involved, the air was set as an ideal gas, of viscosity described by the Sutherland third order function. Boundary conditions were involved as following: inlet - pressure far field, PFF; outlet - pressure outlet, ground - moving wall and top symmetry wall while the tunnel walls were both moving walls. All the moving walls have had equal velocities as the actual BHST, treated as no-slip.

In cases of density based solver, the implicit formulation with Roe-FDS flux type was selected, as well as the Green Gauss Node Based discretization together with the second ordered flow and modified turbulent viscosity functions. The calculations were however supported with the solution steering, set to pick the Courant numbers in a range of 0.01 to 200, and default explicit under-relaxation factor of 0.75.

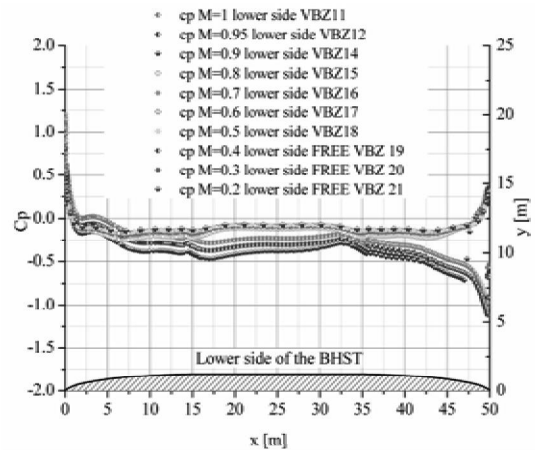
5. RESULTS AND DISCUSSION

The functions of the pressure coefficient, C_p [25], plotted against Mach number in a range of subsonic and transonic velocities, from $M=0.2$ to $M=1$, for the BHST in the free flight, were shown in Pictures 7 and 8 (by order for upper and lower BHST side). The investigation, imagined to overview flow character by applying, if it may be called, "Mach lens". An increase of the M was expected to left traces, from initial c_p disturbances to the shock waves, favorable out of the nose or tail zones.



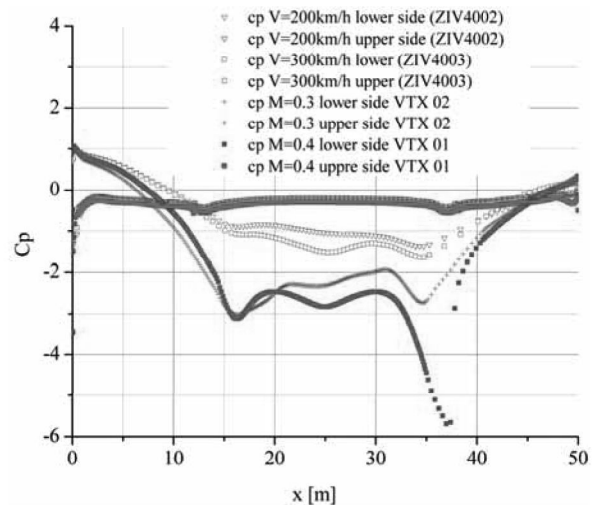
Picture 7. C_p vs. M , BHST in free flight, upper side

The good agreement in c_p behavior with similar airfoil was present [16], while the flow disorders were spotted in zones where the BHST nose is narrowing the BHST body. The increase of M , up to 0.7, caused the presence of compressible waves over the upper BHST surface. Further M increase gradually transform the waves to shock waves, in range $0.7 < M < 0.8$, making them stronger and moving along the stream from the entrance of the tail cone to its tip. On the other side, increase of the M just over 0.8-0.9 started to produce the shock waves of similar strength as previous, near the BHST trailing edge (Picture 9) as a response on the sharper lower tail side, smaller semi-angle of the tail cone.



Picture 8. C_p vs. M , BHST in free flight, lower side

The ground effect on the BHST was presented in Picture 9. The presence of the shock wave underneath is noticeable on the first sight while the pressure distribution over the upper side is similar over the range of M . The phenomenon was occurred at $M=0.4$, but its initiation seems to be started at $M=0.3$, according to actual observations, from the compressible waves. One may note the local similarity under the tail to the flow behavior through the nozzle. Nevertheless, here the long channel was a kind of the entrance tank, continually filled with a flow from the entrance cone, formed by the nose curve, with a gradual decrease of height.

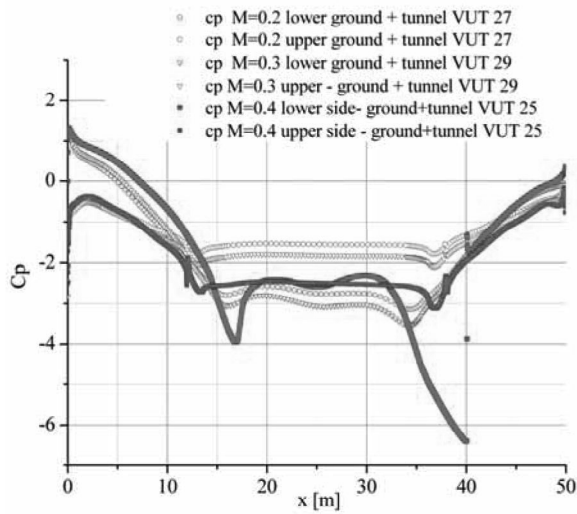


Picture 9. C_p vs. M , BHST on the open rail, upper and lower side

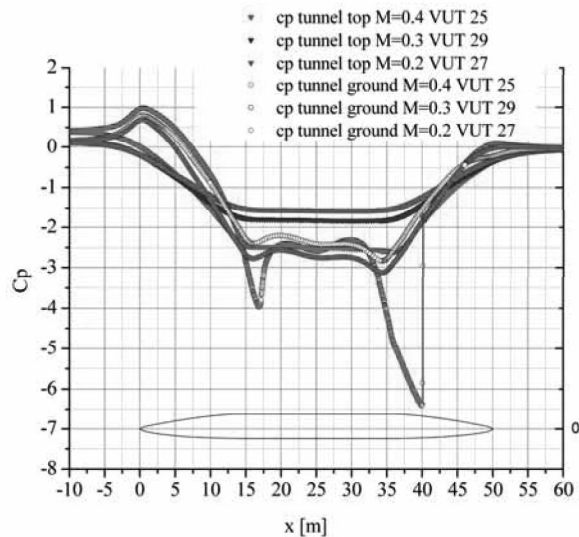
The comparison of c_p against M , over the wetted BHST body passing the tunnel was shown in Picture 11. The presence of shock waves, at $M=0.4$, underneath the BHST is noticeable and compared to the case of BHST on the open rail, the stronger one was occurred in the tunnel than just the ground. If compared to flows over the BHST in the infinite tunnel similarity was found between flows under the train, in difference that wall-bounded flow decreased the c_p in further and moved it to the tail zone. From the upper side, however, compressible zone was formed over the central upper surface.

From the other side, c_p distribution over the tunnel ground

(Picture 12) was shown the similarity in flow behavior in comparison with the tube-train [21].



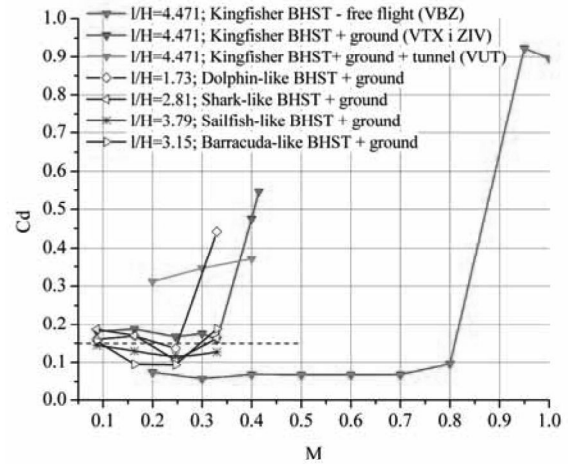
Picture 10. C_p vs. M , BHST passing the tunnel, lower side



Picture 11. C_p vs M , infinite tunnel walls: tunnel top and tunnel ground

The main aerodynamic characteristic for the high-speed train is a drag, thus it is directly related to the power assumption, here represented by the non-dimensional coefficient, c_d [25], referred to the referent cross-section area of $3m^2$. In Picture 12, c_d was plotted against free stream M . The character of the plots for the BHST running freely and on the open rail are similar, but displaced by means of both parameters, c_d and M , giving the advantage to the free flight, as it was expected. Comparing to the airfoils imposed to the free subsonic and transonic flows, described by the gasdynamic [17], results of this work showed a good agreement. The flow at the infinite tunnel, have had the largest drag coefficients in the range of applied M . As one may note, the range of M in the case of the BHST passing tunnel is narrow after selection, $M=0.2-0.4$, compared to other two kingfisher-like configurations. The ground effects caused the flow complexity, presence of high rates of

compressibility and at last formation of the shock waves underneath the BHST. Further investigations involving increase of M were not reasonable without either drastic design changes of the BHST underneath contour, in the manner of sailfish-like or barracuda-like designs, or better, fully closing the channel for simulation purposes. Comparing c_d for kingfisher-like designs, one near ground is lower than one in the tunnel, up to $M<0.3$, after which due to wall-bounding from both sides c_d become smaller during passing tunnel than on the open rail.



Picture 12. C_d vs. M for various designs in the presence of grounds and the kingfisher-like for three configurations – free flight, open rail and passing tunnel

6. CONCLUSIONS

In this work the BHST was set to imagined conditions for a series of designs. The kingfisher-like bionic design was in the focus. The kingfisher beak design justification was done by the hydrodynamic tests and afterwards scaled and adjusted to the real scaled BHST. The numerical observations have had the aim to find the answers linked to the potential design problems. The present results of the hydrodynamic tests were encouraging thus a development of test procedure and analyze will be continued in the future work. For presented kingfisher-like BHST design, was found that the method pointed to zones that has to be re-designed, mostly on the lower side of the BHST. However, the method using “Mach lens” is applicable in the early stages of BHST designing, during the profile selection phase, and is effective and time-saving. The aerodynamic characteristics of the bionic kingfisher-like design shown the good potentials and technological applicability, next to it is the barracuda-like design. Other observed designs have had either not desirable aerodynamic characteristics or they are not suitable for conventional rail vehicle construction. However, kingfisher-like design presented the stable characteristics over the M domain, but further improvements are necessary. These improvements are referred to both the design and designing method by means they should lead to avoidance of the shock waves underneath the BHST in operating M -range. A further grading of the velocity, reasonable solution will be observed in complete grounding of the BHST, so as it would become the complex parametric wedge; the

numerical calculations would become simpler and less advanced in the selection phase. After all, design-flow connection might be improved, and the research field spreader, by applying experiences in a field of high-speed aerodynamics, due to similarity of phenomenon never the less to the end purposes.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia, for supporting this work as a part of the researches through the financed Projects TR-35045 and TR 34028 (2011.-2016). Authors are grateful to Mr. Marko Rakovic, biologist, curator ornithologist, and the Natural History Museum at Belgrade for kind help, access to exhibits and knowledge, crucial for understanding the natural behavior of the kingfisher and its numerical modeling. The authors are grateful to Mr. Paul Sawyer, wildlife photographer, and the Solent, publisher, on a kindness to approve the use of the artworks in this research which helped creation of the detailed kingfisher shape.

References

- [1] Bhushan,B.: *Biomimetics: lessons from nature – an overview*, *Phil. Trans. R. Soc. A* 367 (2009) 1445–1486.
- [2] Kobayashi,K.: 2005 JFS Biomimicry Interview Series: No.6., *Shinkansen Technology Learned from an Owl?*, - The story of Eiji Nakatsu *JFS Newsletter 31*, goo.gl/HOZrjL [last accessed on 20/03/2015]
- [3] *Ask Nature Shinkansen Train, High-speed train silently slices through air, goo.gl/aSfpQ5 [last accessed on 20/03/2015]
- [4] McKeag,T.: *Auspicious Forms: Designing the Sanyo Shinkansen 500-Series Bullet Train*, *Zygote Quarterly* (2012) 14-33.
- [5] Anders,J.B.: *Biomimetic Flow Control*, AIAA-2000-2543, NASA Langley Research Center. Fluid (2000), 19-22 June 2000, Denver, CO.
- [6] Rašuo,B.: *Bionics in Design*, University of Belgrade, Belgrade, eBook on CD., (in Serbian), 2014.
- [7] Linić,S., Rasuo,B., Kozic,M., Lucanin,V., Puharić,M.: *Comparison of numerically obtained 2D flow fields for the bionic high speed train concept designs inspired with aquatic and flying animals*, Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies - OTEH 2014, The Military Technical Institute, (2014) Belgrade, 44-49.
- [8] Linić,S., Rasuo,B., Kozic,M., Lucanin,V., Bengin,A.: *Drag-Coefficient Behavior of the Bio-Inspired High Speed Train Design*, Proceedings of the 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Arandjelovac, June 15-17 (2015) Serbia.
- [9] Personal communication with Mr. Marko Rakovic, research assistant from the Natural History Museum at Belgrade, 2016.
- [10] *Nature History Museum, Museum exhibit of the kingfisher prepared for the research use, 1939.
- [11] Sawyer,P.: *Wildlife Photography/Solent*, via Daily Mail, goo.gl/B14OKP, with a written permission [last accessed on 22/02/2016]
- [12] Hereman,W.: *Shallow water waves and solitary waves*, Mathematics of Complexity and Dynamical Systems, Springer, ed Meyers R A, New York, 2012 1520-32.
- [13] Ghazizade-Ahsaei,H., Nikseresht,A.H.: *Numerical Simulation of Two Dimensional Dynamic Motion of the Symmetric Water Impact of a Wedge*, *IJMT*, 1(1) (2013) 11-22.
- [14] Faltinsen,O.: *Hydrodynamics of High-speed Marine Vehicles* Cambridge, Cambridge University Press, New York, 2005.
- [15] Raghunathana,R.S., Kimb,H.D., Setoguchi,T.: *Aerodynamics of high-speed railway train*, *Progress in Aerospace Sciences*, 38 (2002) 469–514
- [16] Liepmann,H.W., Roshko,A.: *Elements of Gasdynamics*, *Galcit Aeronautical Series*, John Wiley and sons, London,1957.
- [17] Dobrovol'skaya,Z.N.: *On some problems of similarity flow of fluids with a free surface*, *Journal of Fluid Mechanics*, 36 (1969) 805-29.
- [18] Puharić,M., Lučanin,V., Linić,S., Matić,D.: *Research Some Aerodynamic Phenomenon of High Speed Trains in Low Speed Wind Tunnel*, Proceedings of the 3rd International Scientific and Professional Conference CORRIDOR 10 - A sustainable way of integrations, October 25th, 2012., Belgrade, Serbia,
- [19] Linić,S., Ristić,S., Stefanović,Z., Kozic,M., Ocokoljić,G.: *Experimental and Numerical Study of Super-Critical Flow Around the Rough Sphere*, *Scientific Technical Review*, 65 (2) (2015) 11-19.
- [20] Lucanin,V., Puharić,M., Milković,D., Golubović,S., Linić,S.: *Determining the influence of an air wave caused by a passing train on the passengers standing at the platform*, *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 19 (3) (2012) 299-313
- [21] Tae-Kyung,Kim, Kyu-Hong,Kim, Hyeok-Bin, Kwon: *Aerodynamic characteristics of a tube train*, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 99 (1) (2011) 187–1196.
- [22] Dumont,E.R.: *Bone density and the lightweight skeletons of birds*, *Proc. R. Soc. B.* 277 (2010) 2193–2198
- [23] *Theory- and User's-Guide of the ANSYS Fluent 12 Documentation, ANSYS Inc., 2009.
- [24] Veerstedt,H.K., Malalasekera,W.: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics –The Finite Volume Method*, Longman Scientific & Technical, New York, 1995.
- [25] Anderson,J.D.: *Fundamentals of Aerodynamics*, II ed., McGraw-Hill, 1991.

ПРИЛОГ 10.



A HIGH SPEED TRAIN MODEL TESTING IN T-32 WIND TUNNEL BY INFRARED THERMOGRAPHY AND STANDARD METHODS

SLAVICA RISTIĆ

Institute Gosa, Belgrade, slavce@yahoo.com

SUZANA LINIĆ

Institute Gosa, Belgrade, sumonja@yahoo.com

GORAN OCOKOLJIĆ

Military Technical Institute, Belgrade, ocokoljic.goran@gmail.com

BOŠKO RAŠUO

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, brasuo@mas.bg.ac.rs

VOJKAN LUČANIN

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, vlucanin@mas.bg.ac.rs

Abstract: *Experimental techniques in wind tunnel tests were always the state-of-art technologies and provide high quality results. In the resent experiments of the high-speed train model, run at the semi-open low-speed wind tunnel of the VTI, the infrared thermography (IRT) measurements were introduced. The intention was to observe the flow field behavior in vicinity of the high-speed train model surface by a multidisciplinary approach. Reynolds analogy make possible to correlate fluid dynamic to thermal field. By using high-sensitivity thermographic systems, temperature pattern on the surface of test model can be analyzed. Temperature distribution on the model surface is very complex, varies in the time and space, and depends on many combined effects related with flow and model characteristics. IC thermography can indirectly perform flow visualization in the boundary layer. Two standard techniques, aerodynamic drag measurements and the flow visualization with a TiO₂ emulsion were used, too. Experiments were performed for three velocities. The results show good correlation and thus verified the use of IR thermography for the non-invasive investigation of flow in the boundary layer in precision wind tunnel testing.*

Keywords: *wind tunnel, high-speed train model, visualization, thermography*

1. INTRODUCTION

With the intention to contribute to the challenges in a field of high-speed train aerodynamics, wind tunnel tests, applying the IRT on an initial model of the high-speed train, were performed in the wind tunnel T-32. A task was to observe the applicability of the thermography as a testing technique in the wind tunnels at low-speed conditions. Furthermore, performed tests gave the insight to the temperature distribution of the simplified high-speed train in the presence of the ground. The results are used as the input parameters for the computational fluid dynamic, CFD, observations at the bionic design process of the high-speed train [1].

The wind tunnel facilities and testing techniques were generally developed upon the highest standards with a purpose of advanced researches of aeronautical and missiles models and fluid phenomenon from subsonic to hypersonic speeds [2-4]. Development in other areas perceived and used benefits of the wind tunnel testing and, by time, many of non-aeronautical tests were developed from the buildings, over the racecars to the high-speed trains [5].

When reviewing a development of the high-speed trains [5], in last decades, it is noticeable that the aerodynamics steps are in a focus [5-8]. The aerodynamic characteristics of the high-speed trains were involving two approaches – wind-tunnel testing and numerical methods [9]. Although the tendency is to cut-off the expenditure of the projects, the wind-tunnel tests remained irreplaceable. Nowadays, following of the trends is a necessity, furthermore, in a field of the railway vehicles trends in aerodynamics meant lowering of the power consumption and cheaper transportation. On the other hand, a trend of application of the state-of-art technologies of the measurements needs multidisciplinary research. At the VTI for a decades, upon a significant experience in the fields of a non-aeronautical wind-tunnel research [10], contemporary measurement techniques, as here presented IRT, were applied. As overlapping technique, the oil emulsion visualization, was used for a justification of the CFD observations, as a necessary step in aerodynamic practice [11].

The IRT, become a very helpful non-invasive temperature measuring method for instance in the cases of: the object surface temperature and insulation checks of the industrial facilities [12]; the energy efficiency and building

insulation of the museums, heritage buildings [13]; also a material loading behavior as well a defect or crack recognition. Nowadays, for wind tunnel-testing, the IRT is of the great support for insight of the fluid flow convective heat transfer [24] and boundary layer transition [14,15]. The main advantage of the IRT in the wind-tunnel testing are the test-budget savings because the IRT gives very fast, transient and associative data upon which advanced, and reciprocally high time/cost, experiments of the boundary layer are employed.

2. HEAT TRANSFER IN THE BOUNDARY LAYER

The air wetting the smooth flat plate model surface in two-dimensional case, for the simplicity, in a general case of an incompressible flow is considered. The energy equation leads to an energy balance that is subjected to the internal energy e ($e = c_v T$), the conduction of heat (caused by collision of the molecules of the fluid), the convection of heat by a flow of fluid (caused by the flow streaming over the surface in contact) and the heat sourced by a friction [17-19]. The convection in flow is recognized in two types as: *natural*, when the flow was powered by the density difference caused by the heat transfer between the fluid and the model, and *forced* convection that is powered by the mechanical source of fluid motion.

The conduction is generally described by the Fourier’s Law where the coefficient of heat transfer between the model and a fluid in contact, $q_{conduction}$, is given in (1).

$$q_{conduction} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} \tag{1}$$

where k denotes a thermal conductivity and $(\partial T / \partial n)_{n=0}$ is a magnitude of the temperature gradient in direction normal to the model surface [17,18]

The forced heat convection involves the air motion and the heat conduction, is described by the Newton’s Law of cooling [17] defining a convective heat transfer, $q_{convection}$, as in (2)

$$q_{convection} = h(T_{surface} - T_{\infty}), [W/m^2] \tag{2}$$

where h is heat transfer coefficient, brackets define a difference of the surface temperature, $T_{surface}$, and a stagnation temperature of the flow, T_{∞} . The convective heat transfer coefficient, h , depends on the air properties, flow characteristics and quality of the model surface, especially depends on its roughness.

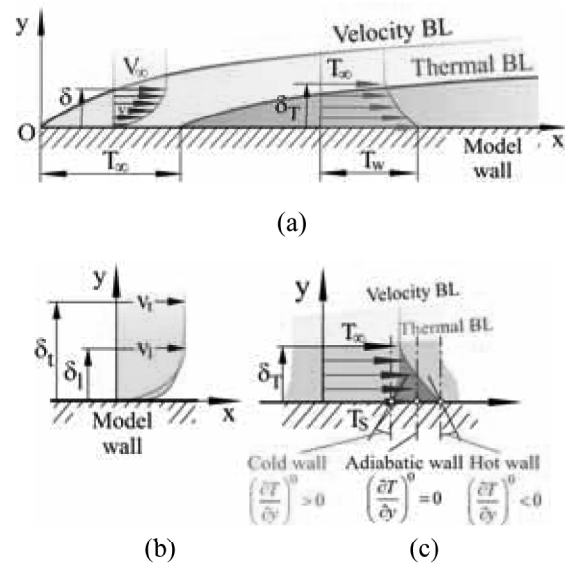
Furthermore, the phenomenon of the momentum and heat transfer, described by the Reynolds analogy is valid for the air, while the Prandtl number is unit [16-18].

$$h = \frac{1}{2} c_f V_{\infty} \frac{k_f}{\nu}, c_{flam} \approx \frac{0.664}{\sqrt{Re}}, c_{fturb} \approx \frac{0.027}{\sqrt{Re}} \tag{3}$$

k_f is a thermal conductivity of the fluid, ν is a kinematic viscosity, Re is Reynolds number.

Boundary layer (BL) flow conditions affect the heat flux

between the model surface and the surrounding air. A BL over the flat plate is consisted of three zones: laminar from the leading edge of the plate, further, transition and afterwards turbulent regime. In accordance to the Reynolds analogy [16-18], the velocity boundary layer (VBL) and corresponding thermal boundary layer (TBL) have the similarly defined BL thicknesses. Both, for the VBL and TBL the BL edges’ thickness are defined as values near the free stream values ($0.99V_{\infty}$ and $0.99T_{\infty}$). Reviewing the flow, the VBL exists right from the leading edge, while the TBL a bit later, thus the flow over the small length from the leading edge has the equal value to the free stream temperature. A development of the VBL and the TBL results, for both, in thickening (Picture 1a.), from laminar VBL (parabolic type of the edge) to a turbulent VBL (Picture 1b.), but the characters of velocity and the temperature profiles differ (Picture 1c.). Depending of the flow conditions, at a transition point, flow starts transformation, from the laminar to the turbulent flow. Inside the turbulent flow, a buffer layer and viscous sub-layer exist and grow along the turbulent layer. However, temperature values, as well as the thickness of the TBL differ to the flow regimes thus the transition point might be detected by temperature-difference measurements.



Picture 1. (a) Details of the VBL and the TBL, (b) laminar and turbulent velocity profiles with corresponding thicknesses, δ_l and δ_t , respectively and (c) different temperature profiles at the TBL and corresponding TBL thickness, δ_T

Therefore, the sum temperature of the model surface is a combination of different heat transfer types. The influence of the heat transfer by radiation, from the other bodies near the model, is not significant in considering flow and temperature behavior.

3. IR THERMOGRAPHY

IRT is based on the measurement of the thermal energy radiated from the model surface. The measurement of temperature distribution over the model-wetted surface by IRT, differs from the other measuring technique. The

radiation of a near bodies and heat sources has to be involved as an influence on the measurements.

All the bodies, by the temperature above absolute zero, thermally radiates continually in time. The heat transfer by radiation is specific in comparison to other two types, conduction and convection. It is caused by an electromagnetic emission and absorption, and is occurring either in the vacuum. Furthermore, the velocity of thermal radiation equals the speed of light with energy proportional to a fourth power of the surface absolute temperature [13]. The total radiated energy, obtained from the Plank’s Law, is described by the Stefan–Boltzmann’s Law

$$E^T = \sigma T^4, \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (4)$$

where $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-4}\text{]}$ denotes Stefan–Boltzmann constant and $T \text{ [K]}$ is a surface absolute temperature. Total radiated energy is lower for the real body comparing to the “black body” [17].

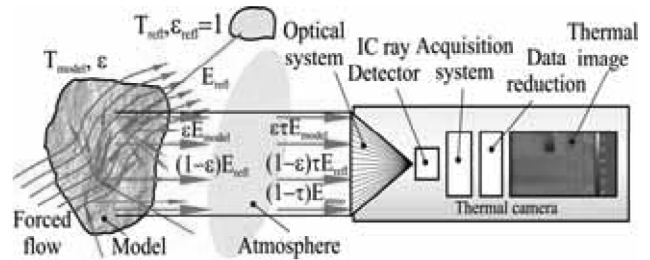
Emitted radiation is dependent on the body temperature. Radiation laws are defined for the thermally “black” body [13], ideal body, but real bodies i.e. their surfaces, have different characteristics. By that, radiation of the real surfaces are affected by a surface material, surface finishing quality, radiation wave length, angle of emission or absorption, spectral distribution of the incoming radiation and transparency. In the contrary to the black body, real bodies behave according to their emittance and the characteristics of IR radiation, like gray ($\varepsilon = \text{const.}$) and non-gray - spectral bodies $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$. The spectral emissivity coefficient, $\varepsilon = E(\lambda)/E_{black}(\lambda)$, presents the body ability of radiation and is defined as a ratio of the emissive powers of the real, $E(\lambda)$, and the black body, $E_{black}(\lambda)$. As the emissive power of the real body is less than the black body, the emittance for the real body is in the range from 0 to 1, while for the black body is unit.

IR thermography is a temperature measuring method that involves use of the IRT cameras (Picture 3.) and commonly is called thermal imaging. The IRT camera is collecting the radiation from the three different sources: (a) from the body surface of interest (dependence of the body temperature); (b) from an environment in which the body is placed for imaging (this radiation was actually reflected from the body of interest but is sourced from the near-bodies) and (c) from the atmosphere. The atmosphere, by means of IRT, presents the air environment in which the body is immersed and the atmosphere in which the IRT camera is fixed (as both are the sources of the radiation and the absorbers). Radiation from the body surface is defined as $\varepsilon\tau E_{body}$, where: ε is emittance, and τ is transmissivity of the atmosphere, E_{body} is radiation intensity at the object-model temperature, T_{obj} , corresponding to the black body. The radiation intensity emitted from the near bodies is described as $(1-\varepsilon)\tau E_{envir}$, where: $(1-\varepsilon)$ is surface emissivity, and E_{envir} is the black body environmental radiation intensity, at temperature of the atmosphere. Further on, $(1-\tau)E_{atm}$ is the radiation intensity sourced by the atmosphere, where $(1-\tau)$ is atmosphere emissivity. Summarizing, the radiation

intensities from all of the three described influences produce total radiation intensity defined as (4)[13]

$$E_{total} = \varepsilon\tau E_{obj} + (1-\varepsilon)\tau E_{envir} + (1-\tau)E_{atm} \quad (5)$$

The Picture 2. represents the scheme of the IRT measurement. The model, surrounded with the environment, emits the radiation in the all directions. The intensity of the radiation that is measured by the IRT camera is described by the eq. (5). For the valuable results four main parameters matters: thermal sensitivity of the IRT camera (signal overstepping noise), scanning rate (frame rate) for following the flow dynamics, resolution of imaging (for high quality data recording), and intensity of resolution [16].



Picture 2. Illustration of the method of temperature measurement by the IR thermography

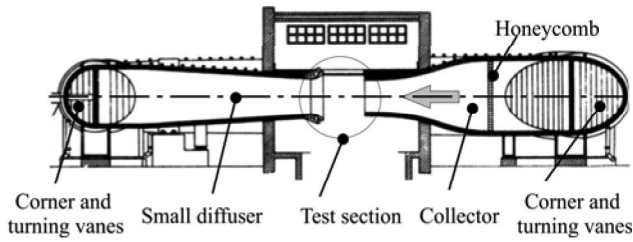
The IR detector has a significant role in defining the inputs, thus it is the source of the signals, for which is required to have as low as possible noise. Beside the IR detector, on the signal quality influences also the difference of the phenomenon of flow transition. The frame rate of the camera gives the possibility to follow the flow dynamics. Unfortunately, after flow dynamics influence on the thermal response, also the thermal characteristic of the model, heat capacity and conductivity, are influencing to overall phenomenon dynamics. Knowing all these facts, the special care have to be taken on the measurements of the temperature by IRT, model manufacturing purposed for thermal imaging and the environmental conditions adjustments [15,16].

4. DESCRIPTION OF THE EXPERIMENT

Wind tunnel facility. The thermal imaging tests were done at the closed circuit, semi-opened low-speed wind tunnel (WT) T-32, at the VTI, Belgrade. A facility was intentionally built for testing aeronautical models, but after test section adaptations, it was prepared for this non-aeronautical testing. Picture 3 shows the facility the from the side view. The flow is continuous, forced by the DC motor – propeller manually controlled, in a range up to 70 m/s. A test section, TS, is opened, elliptical in a cross-section (1.8 m × 1.2 m) with length of 2 m. The internal TS surfaces are coated with matte color. The estimated turbulence factor at the T-32 WT is $TF=1.14$.

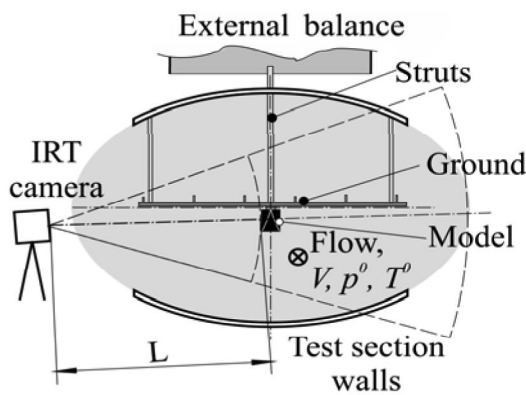
The testing set up in the cross view is presented in Picture 4. The model is positioned at the center of the test section, TS by the struts (front and rear). The ground was made from a wood, coated with simple glossy lacquer. In longitudinal direction, metal profiles were jointed to

prevent ground deformations under the flow influence

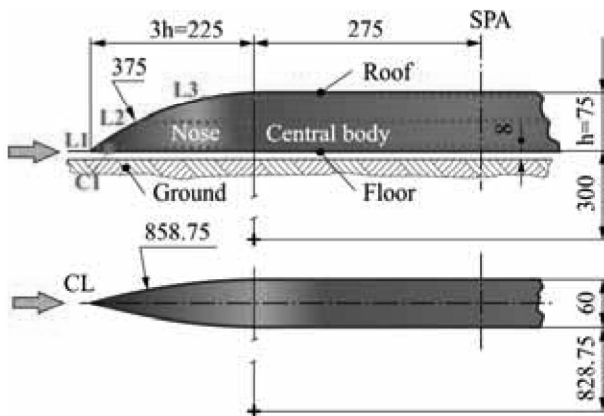


Picture 3. Low-speed semi-opened wind tunnel

SHST model. The SHST model was designed for the force measurements and flow visualization, made from a piece of wood, 1m long, in geometry presented in Picture 5. The SHST finishing coating consisted of one base coating over the wooden surface and two layers of black matte lacquer. The SHST surfaces were polished in finishing process to uniform roughness.



Picture 4. The SHST model and the IRT equipment set for tests (L=2m)



Picture 5. The SHST model geometry

IRT camera. For the temperature measurements the FLIR E40 SC camera was used. The main IRT camera characteristics are: measuring range -20°C to 650°C (with two selectable options from -20°C to 650°C or -20°C to 120°C) a resolution 160 x 120, thermal sensitivity < 0.07°C, standard optics of 25° x 19°, the measuring error of +/- 2% or 2°C, bolometer with no cooling, frame rate 30Hz, manual focusing, zoom selection 1-2 times. Thermal images, thermograms, were read by specialized software FLIR Researcher and FLIR Tools.

The oil emulsion visualization was applicable as a most

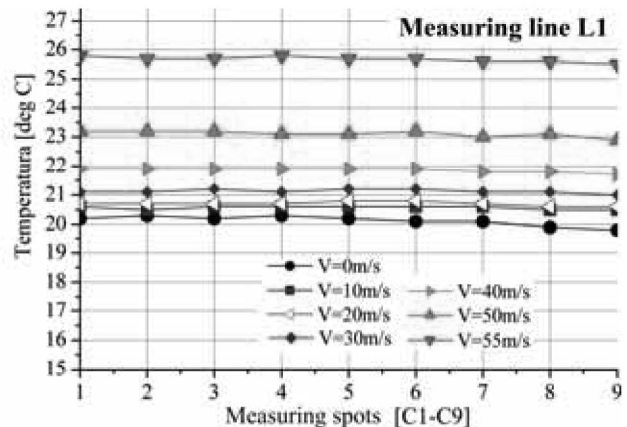
appropriate for these tests. The recipe of the emulsion contained 30ml of the paraffin oil, 5ml of the Olean acid and 10g of TiO₂. The upper and side model surfaces were covered with the emulsion spots.

The experimental procedure was divided into the temperature measurements and the visualization separately. For each of the test types, the task was to set the flow conditions through the shortest time, but respecting the abilities of the power unit of the WT. The significant note for testing procedure is connected with the test run time and test brake duration. For visualization test, standard test run were performed, restarting just after model test preparation, but the test for thermal imaging needed test brakes for model cooling down to the environmental temperature. An each thermal imaging test run started before the WT run by capturing the null image for checking of the actual model thermal condition and the results analyze.

5. RESULTS AND DISCUSSION

The test results were obtained for these cases: (A) the WT stepping acceleration, the model was at the beginning on the room temperature (thermal images were recorded after the flow conditions were stabilized on each of the selected velocity steps; (B) the WT continual deceleration (the frame – velocity data were marked while measuring) and (C) WT continual acceleration (the frame–velocity data at selected velocities were marked while measuring).

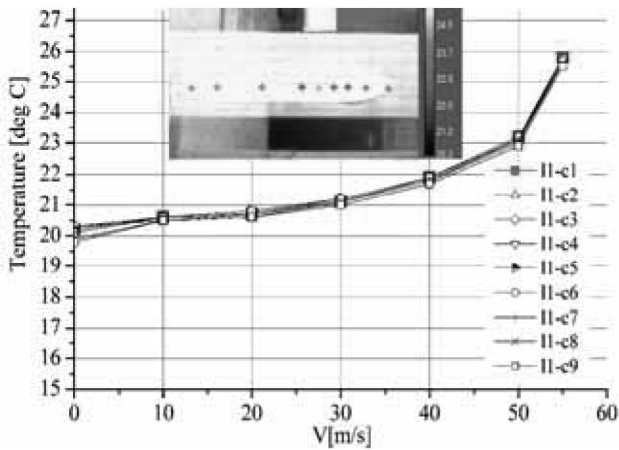
The diagrams on the Picture 6. correspond to the measuring lines L1-L4 from the Picture 5 (L4 was placed, from the perspective, along the SHST roof). A first along the SHST side, while another 7 were in an array along lines to the trailing edge. The Picture 6. shows temperatures, along the measuring line L1 (spots C1-C9) during stepping acceleration, when SHST was at room temperature at the beginning. Warming of the model is linked to warming of the SHST surface, produced by flow-surface thermal-momentum interaction (friction, convection, and conduction) inside the boundary layer. Furthermore, uniformity of temperatures is point-out to the turbulent BL existence over the SHST sidewalls.



Picture 6. Temperatures measured along L1, at spots C1-C9, V_∞=0-55 m/s (from the thermograms).

Dependences of the temperature against velocity, again

over L1 and C1-C9, is showing intensive temperature increase of the SHST for $V_{\infty} > 40$ m/s (Picture 7).

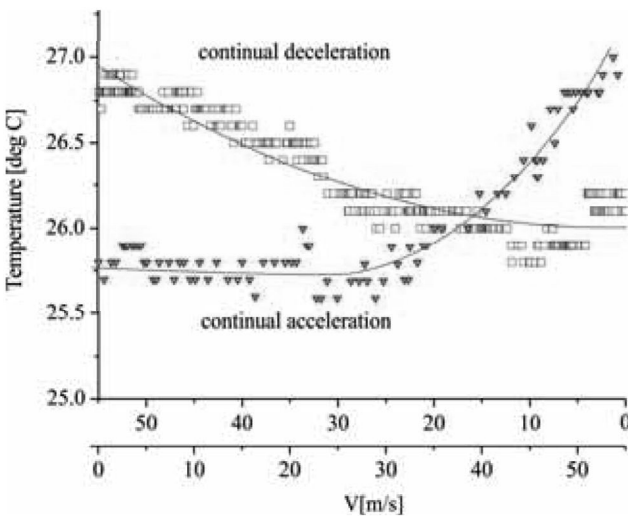


Picture 7. Temperatures along L1, C1-C9, stepping acceleration, $V_{\infty}=0-55$ m/s (from imaging)

The tendencies of the surface temperature behavior, measured along L1, during WT continual deceleration and acceleration are following dynamic of the velocities changes (Picture 8). Continual deceleration was manually controlled by gradual decreasing of velocity, the surface temperature followed it but with notation that the temperature at the end of this process was higher than the room temperature. After the time brake of 10 min between runs, the WT was started again, now with continual accelerating in dynamics to intentionally control the velocity at exact values. After velocity was set, a thermogram was recorded, and acceleration continued.

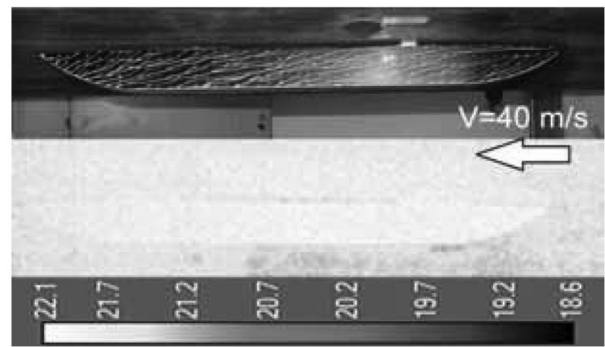
WT continual deceleration, SHST-just after the test run, from video sequences.

The Pictures 9a-c represent the comparative view of the flow visualization and thermograms for three velocities 40 m/s, 50 m/s and 55 m/s. Flow visualization justified the turbulent BL existence while thermograms justified the heating of the SHST surfaces during the acceleration.

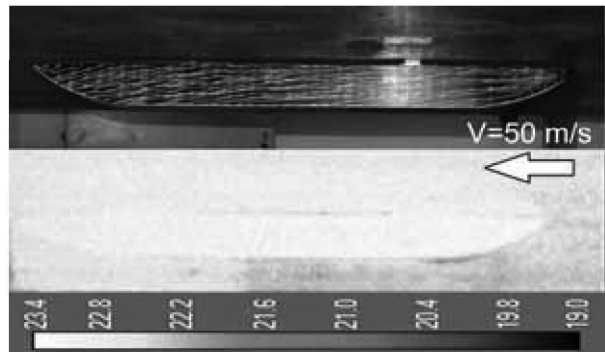


Picture 8. Temperatures along L1, C1-C9, continual

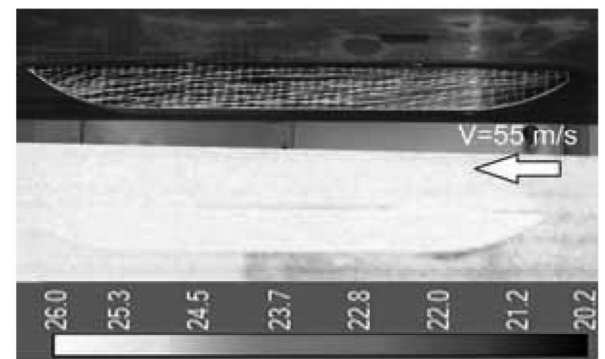
deceleration in range $V_{\infty}=55-0$ m/s and acceleration in range $V_{\infty}=0-55$ m/s (from video capturing)



(a)



(b)



(c)

Picture 9. Comparative view of the flow visualization and thermograms at (a) 40 m/s, (b) 50 m/s and (c) 55 m/s

6. CONCLUSIONS

This paper presents the results of tests for experimentally flow visualization and temperature measurements on the model surface, using IRT, applied to the high-speed train model in low-speed wind tunnel.

Obtained IRT results are in good correlation with the oil emulsion flow visualization. Measurements, made during this experiment, could not be used for precise determination of the boundary layer transition, because the model is small in size, smooth-surface finished and tested in the low speed flow. However, the IRT results show the temperature changes during the wind tunnel runs. The estimated temperature difference between laminar and turbulent flow is less than 1°C, what is less than temperature arise due to an air-surface friction.

Further development of model design and testing methods, are recommended. The application of IRT in wind tunnel experiments and use the high sensitive type of IRT camera can record thermograms that are more precise, over the higher resolution and thermal sensitivity, thus it is recommended for the BL research at the low speed wind tunnels.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia, for supporting this work as a part of the researches through the financed Projects TR-35045 and TR 34028.

REFERENCES

- [1] Rašuo, B.: *Bionics in Design*, Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade, (Belgrade) eBook on CD (in Serbian), 2014.
- [2] Pope, A., Harper, J.: *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, Wiley, Jan 1, 1966.
- [3] Mrkalj, N., Šumonja, S.: *Ispitivanje modela sa prostrujavanjem u aerotunelu T-32*, *Scientific Technical Review*, XLVI (4-5) (1996) 51-59.
- [4] Ocokoljić, G., Damljanović, D., Rašuo, B., Isaković, J.: *Testing of a Standard Model in the VTI's Large-subsonic Wind-tunnel Facility to Establish Users' Confidence*, *FME Transactions* 42 (2014) 212-218.
- [5] Raghunathana, R.S., Kimb, H.D., Setoguchi, T.: *Aerodynamics of high-speed railway train*, *Progress in Aerospace Sciences*, 38 (2002) 469-514.
- [6] Baker, C.: *The Flow Around High-Speed Trains*, BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, July 20-24 (2008), Milano, Italy,
- [7] Baker, C.J., Brookie, N.J.: *Wind Tunnel Tests to Obtain Train Aerodynamic Drag Coefficients: Reynolds Number and Ground Simulation Effects*, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 38 (1991) 23-28.
- [8] Cheli, F., Rocchi, D., Schito, P., Tomasini, G.: *Steady and moving high -speed train crosswind simulations. Comparison with wind-tunnel tests*, *Proceedings of the 9th World Congress in Railway Research*, May 22-26 (2011) WCRR Lille
- [9] Linić, S., Rašuo, B., Kozic, M., Lucanin, V., Puharić, M.: *Comparison of Numerically Obtained 2D Flow Fields for the Bionic High-Speed Train Concept Designs Inspired with Aquatic and Flying Animals*, *Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies*, OTEH 2014 (2014) Military Technical Institute, Belgrade, Serbia, 44-49,
- [10] Puharić, M., Lučanin, V., Linić, S., Matić, D.: *Research Some Aerodynamic Phenomenon of High Speed Trains in Low Speed Wind Tunnel*, *Proceedings of the 3rd International Scientific and Professional Conference CORRIDOR 10 - A sustainable way of integrations*, October 25th (2012) Belgrade, Serbia,
- [11] Linić, S., Ristić, S., Stefanović, Z., Kozic, M., Ocokoljić, G.: *Experimental and Numerical Study of Super-Critical Flow Around the Rough Sphere*, *Scientific Technical Review*, 65 (2) (2015) 11-19.
- [12] Kozic, M., Ristić, S., Katavić, B., Linić, S., Ristić, M.: *Determination of the Temperature Distribution on the Walls of Ventilation Mill by Numerical Simulations of Multiphase Flow and Thermography*, *Proceedings of the 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics*, June 15-17. (2015) Arandjelovac, Serbia,
- [13] Ristić, S., Polić-Radovanović, S.: *Termografija u zaštiti kulturne baštine*, Institut GOŠA, Jan 15, 2013.
- [14] Carlomagno, G.M., Cardone, G.: *Infrared thermography for convective heat transfer measurements*, *Exp Fluids*, 49 (2010) 1187-1218.
- [15] Crawford, B.K., Duncan, Jr. G.T., West, D.E., Saric, W.S.: *Laminar-Turbulent Boundary Layer Transition Imaging Using IR Thermography*, *Optics and Photonics Journal*, 3 (2013), 233-239, dx.doi.org/10.4236/opj.2013.33038
- [16] Simon, B., Filius, A., Tropea, C., Grundmann, C.: *IR-Thermography for Dynamic Detection of Laminar-Turbulent Transition*, 18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, July 4-7, (2016) Lisbon, Portugal
- [17] Lienhard, IV, J., Lienhard, V, J.: *A Heat Transfer Textbook*, *Phlogiston Press*, Cambridge Massachusetts, 2008.
- [18] Schlichting, H.: *Boundary-Layer Theory*, 7th edn., McGraw-Hill, New York, 1979. ISBN 0-07-055334-3.
- [19] Anderson, J.D. Jr.: *Fundamentals of Aerodynamics*, *McGraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering*, 2nd ed., 1991,

ПРИЛОГ 11.

BOUNDARY LAYER TRANSITION DETECTION BY THERMOGRAPHY AND NUMERICAL METHOD AROUND BIONIC TRAIN MODEL IN WIND TUNNEL TEST

Suzana Lj. LINIĆ¹, Goran J. OCOKOLJIC², Slavica S. RISTIĆ³, Vojkan J. LUČANIN⁴,
Mirko S. KOZIĆ², Boško P. RAŠUO⁴, Bore V. JEGDIĆ⁵*

¹University of Belgrade, Innovation Center of Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia

²Military Technical Institute, Belgrade, Serbia

³Institute Gosa, Belgrade, Serbia

⁴University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia

⁵University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

*Corresponding author; E-mail: sumonja@yahoo.com

Methods of diagnosing aerodynamic characteristics are constantly developing in order to conduct the precise and energy efficient wind-tunnel testing of transport vehicles in the prototype design early stages. This is of a special importance when facing the time/cost consumption problems of detection of the transition zone over the simplified design of the high-speed train. Herein the applied thermodynamics found a very significant role in the field of experimental aerodynamics. With the intention of detecting the boundary layer transition zone the following measurements were applied: the infrared thermography, flow visualization and drag force measurements. In addition, the computational fluid dynamics was applied to predict the flow behavior and transition zone, solving partial differential equations consisting of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, energy equation, and the equation of state for an ideal gas employing density-based solver. The thermal imaging defined the transition zone by simple application, and fast recognition, while the transition bounds were defined in the analysis. The flow visualization confirmed thermography results and the method itself as favorable, especially in the most expensive early phases of redesigning for aerodynamically optimized and energy efficient solutions. The numerical method was confirmed by the experiments, resulting in acceptable differences in the definition of the transition zone. For a better understanding of the phenomenon, the overlapped implementation of the presented methods focused on forced convection showed as the best solution. Based on the experiences of this research, development of the additional equipment and adjustments will be introduced in the future experiments.

Keywords: *aerodynamics, wind tunnel, heat transfer, thermography, numerical simulation, flow visualization*

1. Introduction

In the experimental aerodynamics, the most advanced and sensitive test phases are those related to the boundary layer research. Nowadays, facing the problems of energy consumption, during wind tunnel testing, researchers introduced well-known infrared thermography (IRT) into investigating the set of the wind tunnel measuring and visualizing methods. The goal of this work was primarily to investigate the applicability of the thermodynamic method – IRT [1], for flow description and boundary layer transition detection in the experimental practice in the small low-speed wind tunnel of the Military Technical Institute (VTI) [2-6] and by the computational fluid dynamics (CFD). In addition, the aim was to observe the possibilities of application of the high-speed train testing [4] for defining the requirements for future adjustments, developments of the model, setup, and the equipment. The expected outcomes were - the reduction of test time, energy consumption, and costs in the early stages of prototype designing.

The multidisciplinary research was performed on the simplified model of the high-speed train (SHST). The SHST was intentionally made simple for the purpose of changes of design parameters, reproduction, easy fabrication and in order to reflect the bio-inspired design [7].

The modern trends in measurements of the boundary layer and the flow field are focused on non-destructive, energy efficient experimental methods. The high-quality methods are the methods such as the Laser-Doppler anemometry (LDA) [5], the holographic interferometry [3], the Particle Image Velocimetry (PIV) [8], and IRT. IRT, for example, is applied in different areas of science and technology, such as fluid dynamics [9, 10]; insulation monitoring of the industrial facilities [11, 12]; humidity monitoring of buildings, museums and heritage buildings; civil objects energy efficiency detection ; the detection of the processes in installations (heating/cooling and electric), inside and out of the rigid walls; studying of the artefacts, inspection of the structure of construction materials; “smart machines”, surveillance and military use, and medicine (IR mammography). In practices, IRT is used for testing in the free flight and in the wind tunnels [1, 13], mostly at high subsonic and supersonic velocities. CFD is playing a very significant role as the verified and reliable method for flow behavior prediction around the complex models of vehicles [14], but also for the state-of-the-art Large Eddy Simulations of transient flows or investigation of the boundary layer and wake behavior of the bionic designs and surfaces (birds, insects, etc.).

Up to now, no universal either experimental or computational method has been found, and it can be said that the best method in research of turbulence phenomenon is actually a set of the overlapping multidisciplinary methods.

1.1. Research background

After Prandtl, the boundary layer (BL) was introduced to the flow field description to simplify the calculation methods, thus to “bridge” the Navier-Stokes and the Euler equations [15, 16]. In that sense, the flow over the surface was divided into the outer and inner BL flow. Herein, Euler and Bernoulli’s equations had been applied to the inviscid flow of the outer flow, but later on, the boundary layer theory was employed related to the viscous flow [17, 18].

The airflow over the surface of the flat plate (no-slip wall condition) changed its features under the influence of the frictional forces and convection, where the vortices were created only inside the BL, as shown in fig. 1 [15, 16]. The flow field of the BL, assuming zero pressure gradient and low

turbulence intensity (about 0.1%), evolved from the laminar, transitional to the fully turbulent flow. The laminar flow appeared at the leading edge, firstly stable downstream, and afterwards in a form of Tollmien-Schlichting waves (T-S). Before the flow becomes fully turbulent it experiences the turbulent spot phase filled with the new turbulent cores, concentrated at the imaginary edge [15, 16].

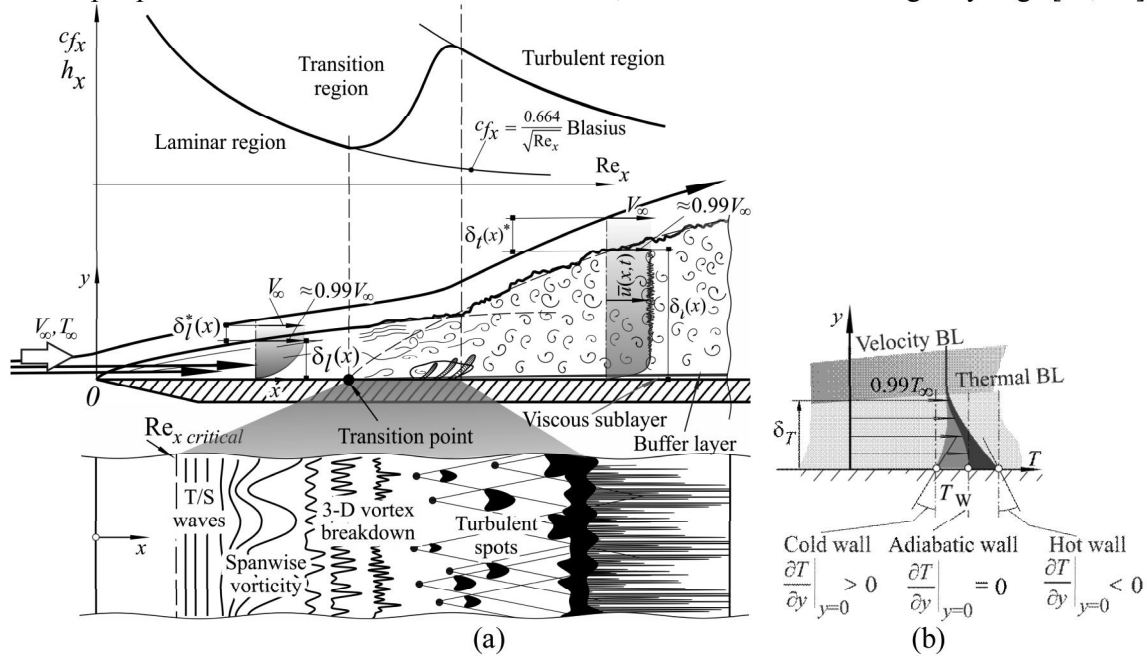


Figure1. Boundary layer over the flat plate [15, 16]

As for the smooth flat plate, the transition zone occurs over the length between minimal and maximal values of c_{fx} , which is highly dependent on the turbulence level of the free flow and the local Re , fig. 1a. Considering the flow over the hot model, the temperature field is similar to the velocity field; they mutually interact [15-17]. The similarity of behaviors supported the introduction of the term of a thermal boundary layer (TBL), fig. 1b. The concept of the TBL introduces the TBL edge, similar to the VBL, described by $0.99 T_\infty$. The temperature distribution, across the TBL, depends on the condition of the wall, thus it differs due to the model wall temperature (cold/adiabatic/hot). The heat transfer analysis, in the forced flow over the wall, q , leads to equalization of the heat transfer transmitted from the wall and heat convection. Applying the Fourier and Newton's laws of cooling onto the wall surface, the heat flux is $q = k_{fluid} (\partial T / \partial y) = \bar{h} (T_w - T_\infty)$, where the heat transfer coefficient $\bar{h} = 0.5 c_f V_\infty k_{fluid} / \nu$ is dependent on c_f and thermal conductivity of the fluid, k_{fluid} [15-17]. In the case of the hot wall, minimal temperature occurs at the beginning, while the maximal value is achieved at the end of the flow transition. Herein, the IRT camera is measuring rightfully $\Delta T_{IRT} = (T_w - T_\infty)$. In terms of model fabrication for the IRT measurement, the main concerns are subjected to the constancy of the model wall-free flow temperature difference [13]. Mutual dependence of the velocity and temperature is described by the Prandtl number, $Pr = \mu c_p / k$, thus $Pr < 1$ leads to $\delta_{TBL} > \delta_{VBL}$ [15-17]. In the practices of the applied aerodynamics and thermodynamics, it is essential to determine the temperature distribution as well as the other flow parameters [2].

In further, recalling the influence of the c_{fx} , one may note that c_{fx} is an essential part in production of the frictional drag force, $D_f = c_f A \rho V^2 / 2$, and consequently, it influences the consumed power of the future heavy vehicle [15,16], thus flow laminarization leads to c_D decrease.

The radiation of the real bodies differs from the referent – blackbodies, thus the three types of radiation transfer are defined, with respect to the body of interest: absorptance, α_λ , reflectance, ρ_λ , and transmittance, τ_λ , thus $\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$, depending on the wavelength, λ [17, 20]. The real objects, considered as the grey bodies, radiate with respect to their material characteristics – emissivity and the characteristics of IR radiation. Herein the emissivity denotes the spectral emissivity coefficient – the body’s ability of radiation emission, $\varepsilon_\lambda = E_\lambda/E_{\lambda, black} \leq 1$, and when included into the Stefan-Boltzmann equation, the total emissive power of the grey body is $E_{grey}^T = \varepsilon_\lambda \sigma T^4$ [17, 20]. The total radiation power, in general, is expressed as a sum of three radiation sources – object, near bodies and atmosphere, in mutual interaction, reduced for the radiation transfer coefficients ($\alpha_\lambda, \rho_\lambda, \tau_\lambda$). The phenomenon of thermal radiation is the basis of the IRT [20].

2. Experimental setup

The experimental procedure was divided into the separate measurements of the aerodynamic drag of the SHST model with the ground effect, temperature distribution measurement, and the visualization of the flow of the oil emulsion.

The wind tunnel (WT) T-32, in question, is the small low-speed WT of the VTI. The WT T-32 is the closed-circuit wind tunnel with semi-opened test section [2-4]. The test section has 2 m long elliptic shape (1.8×1.2 m). The maximal operational velocity is 60 m/s, ± 0.1 m/s, $TF = 1.14$, under atmospheric temperature and pressure [2-4]. The SHST model and the ground model, in form of a flat plate, were fixed independently on clearance of 8 mm, and stationary during tests, as shown in fig. 2.



Figure 2. SHST setup in the test section of the WT T-32 [2,4]

The SHST model was designed under the requirements of simplicity, bionics [19], experience [2-4] and recommendations [9, 13], fig. 2. The model has flat sides and sharp edges to emphasize the flow behavior, tracing the influences of geometry parameters and easy manufacturing. The software PRO/Engineer WF 4 created the SHST numerical model after it was manufactured from 1 m long piece of linden, 60×75 mm in cross-section and the nose radius for elongation parameter of $l/h = 3$ (to reflect the bio-inspired design). The nose tip displacement from the ground model leading edge was 0.6 m. The SHST model was painted black and its surface was sandblasted.

The six-component external balance T.E.M. 366 of pyramidal type, in the WT T-32, supported the SHST model and measured its drag force, D (in a range of ± 550 N, 0.02% FS), fig.2 [2].

The emitted radiation from the model depends on surface temperature, where the IRT camera records, calculates, and represents surface temperature data in a form of colourful image – a thermogram. The IRT camera FLIR E40 SC, of industrial class, measured temperatures on the visible surfaces in the range of $T = 253$ K – 393 K, $\pm 2\%$ (thermal sensitivity < 0.07 °C at 30 °C), image frequency 30 Hz and IR resolution 320×240 . The setup in the wind tunnel for thermal imaging is

shown in fig. 3 [20]. The FLIR Researcher software recorded the thermograms, and Open Source software – Paint Net emphasized the details.

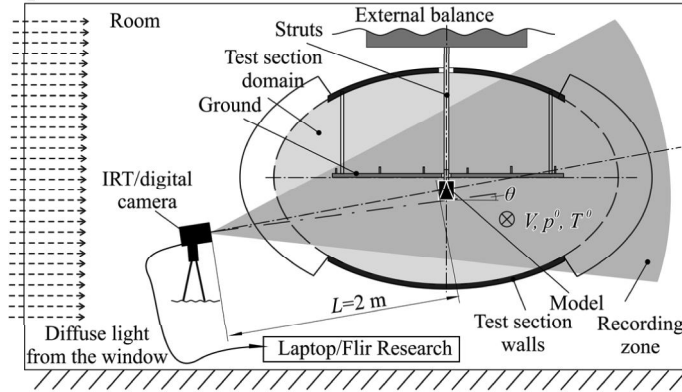


Figure 3. Setup for thermal imaging, downstream view

The calculated output signal from the object, considered as the blackbody at T_{obj} , is $U_{obj} = (1/\epsilon_{obj} \tau_{obj}) U^T - [(1 - \epsilon)_{obj}/\epsilon_{obj}] U_{refl} - [(1 - \tau)_{atm}/(\epsilon_{obj} \tau_{atm})]$, where U^T denotes measured IRT camera output, U_{refl} and U_{atm} – theoretical output voltages for the blackbody of T_{refl} and T_{atm} , respectively, obtained by the calibration [20]. The accuracy of the IRT measurement depends on the inputs, thermal sensitivity, scanning speed, image resolution, and intensity resolution [1, 13, 20]. In addition, the quality of the thermal imaging depends on conductivity and emissivity of the observed surfaces, and relative position of the influencing reflections from the environment to the IRT camera.

The flow visualization was made with the oil emulsion (paraffin oil: 30 ml, Olean acid: 5 ml, and 10 g of TiO_2) [3, 4].

3. Numerical setup

The numerical study served to predict the flow around the SHST, after adjustments which had the acceptable influence on the results. The applied CFD software was the ANSYS Fluent 12, the control volume based method for calculation of the flow parameters [16, 22].

Compared to the real wind tunnel setup, the numerical domain resembled the shape of an elliptic cylinder, equal the test section cross-section of the T-32, but prolonged up to 6 m, fig. 4.

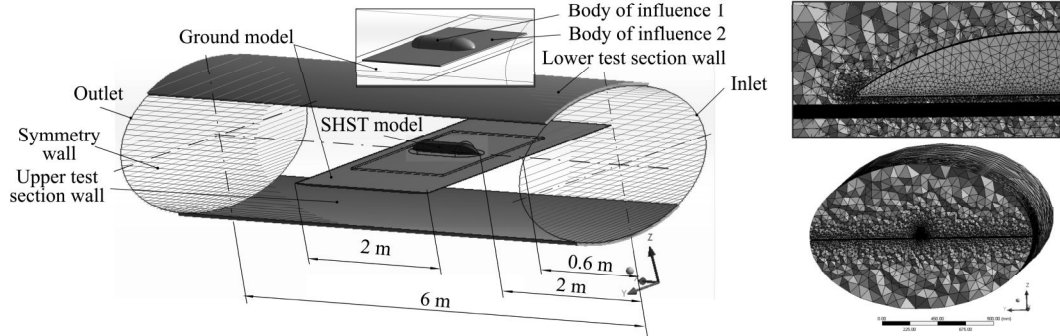


Figure 4. Numerical domain with the SHST and ground models

The mesh of 1,270,607 mixed cells, with the prisms in the inflation layer, was built by introducing the two bodies of influence for better quality, following the criterion of the height of the first layer, $30 < y^+ < 300$ (cell skewness from 0.2 – 0.5, over 27 – 10% of total cell quantity,

respectively). The mesh was selected from the series, performed for the selected numerical setup, as follows: non-adapted (final mesh); the first and second time adapted boundary; adapted to specific y^+ interval; adaption of the forebody region and third time adapted boundary. In this order of mesh refinements, relative increase of calculation duration per unit iteration was nearly exponential on relative mesh size increase, in relation to the final mesh. The final mesh answered both criteria, the requirements of y^+ and calculation duration, in contrast to the others ($y^+ = 5 - 30$).

The compressible flow was modelled with the density-based solver, to obtain the temperature distribution over the surfaces [18, 21, 22]. The operational and boundary conditions were defined in accordance with the real test: inlet as pressure-far-field; outlet as pressure outlet; test section walls of Al (upper and lower), ground model as a wooden wall; SHST model as a wall of CaCO_3 (paint component with similar thermal characteristics), and the others – the symmetry walls, fig. 4.

The turbulence was solved employing mutually the Spalart-Allmaras (S-A) model and energy equation. In general, the S-A model is used for the wall-bounded and boundary layer flows. It is created to resolve the viscosity-affected regions for meshes providing either $y^+ = 1$ or $y^+ \geq 30$, throughout a single conservation equation with built damping functions [18, 21, 22]. The S-A model was selected for its simplicity and time/cost efficiency for large meshes, compared to the others. The solving method involved the implicit scheme, the Roe Flux-Difference Splitting Scheme (ROE-FDS) flux type, and the Green-Gauss Node Based method of discretization as well as the second order functions. The use of multi-grid FMG initialization, for the subsonic flow, was aimed at better determination of the beginning solution, and faster convergence.

4. Results and discussion

The thermogram in fig. 5, showing the temperature non-uniformity at the equilibrium state, originated from the thermal reflexes (from the SHST and other bodies) and holding the three significant zones used for result corrections. Figure 6 shows the uncorrected thermogram of the Wind-On phase scene, at $V = 50 \text{ m/s}$, $T = 296 \text{ K}$.

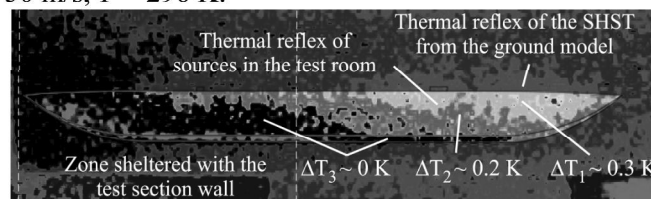


Figure 5. Temperature distribution over the SHST in the equilibrium state

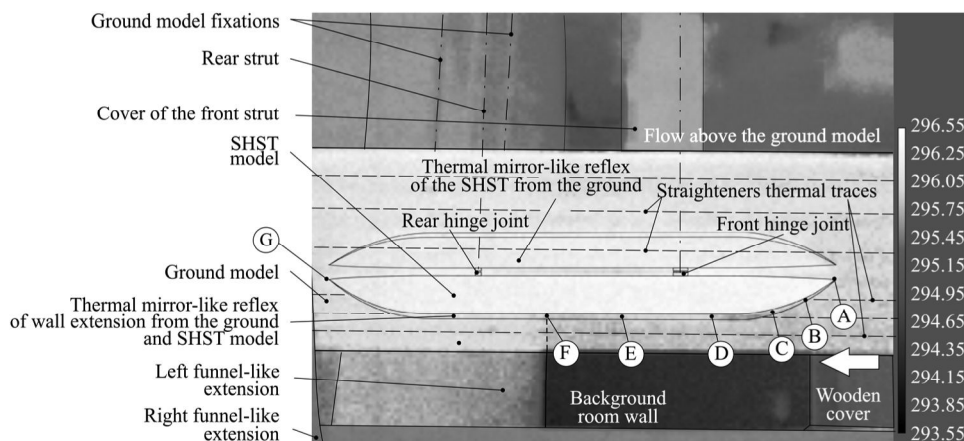


Figure 6. Thermal image of the test scene ($V = 50 \text{ m/s}$, $T = 293.15 \text{ K}$)

In case of the partial coating of SHST with the emulsion, the flow spread the coating from the nose to the tail, leaving the imprint of five flow regions, as shown in fig. 7.

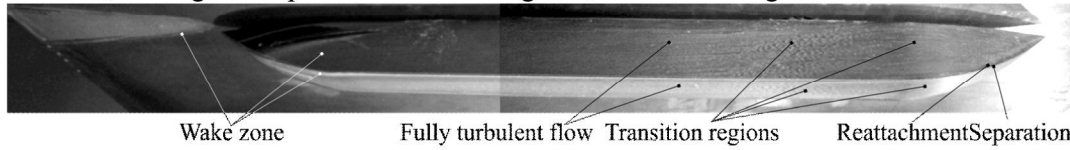


Figure 7. Flow visualization after partial covering with the oil emulsion ($V = 50\text{m/s}$)

The experimentally visualized traces and the numerically obtained pathlines, coloured by temperature, are shown in fig. 8. The main difference was indicated in the central side view, where the oil traces showed slightly more inclined paths. Therefore, for achieving the more realistic results, the investigations in the field of $y^+ = 1$ are necessary, together with the application of the enhanced wall treatment or the SST based transition model, with the support of the advanced IT resources.

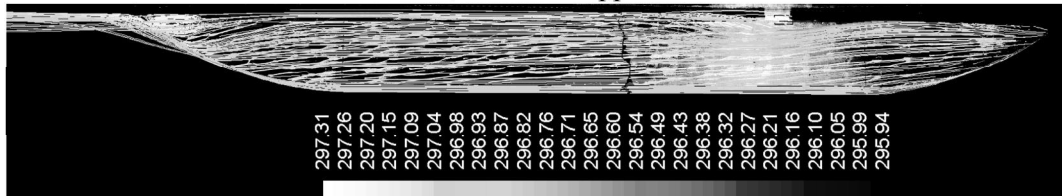


Figure 8. Flow pattern and flow pathlines, coloured by temperature, ($V = 50\text{ m/s}$, $Re \approx 237,000$)

Figure 9 shows the local values of T , c_f , p , M and, Pr along the centreline (CL), estimated by the CFD. The transition region along the CL began at $x = 0.17\text{ m} - 0.19\text{ m}$ from the nose tip. The end of the transition region was at $x \approx 0.41\text{ m}$. In the present case, $\delta_{V\text{ turb.}} \approx 2 - 3\text{ mm}$, $\delta_{T\text{ turb.}} \approx 5\text{ mm}$. Good correlation with flow imprint (fig. 7) verified the CFD method.

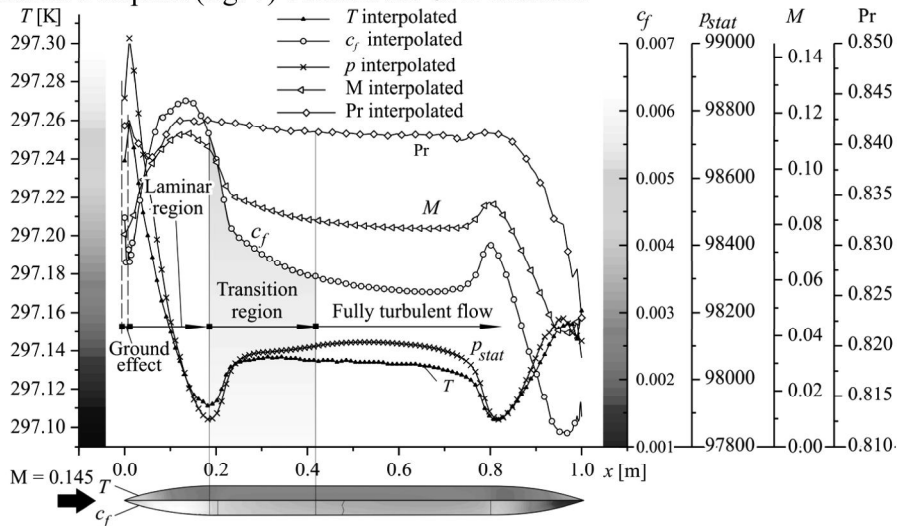


Figure 9. Selected flow parameters over the SHST roof, along the CL, obtained with CFD ($V = 50\text{ m/s}$, $Re \approx 237,000$)

The local temperature values on the roof, along the CL, and the temperature distribution estimated by IRT are shown in fig. 10. The finish of transition arose at the end of wavy oil traces,

which corresponds, to the flow parameters near the spot “E”. The T_C was interpreted as an influence of the scratch on the leading edge, and it was out of interest.

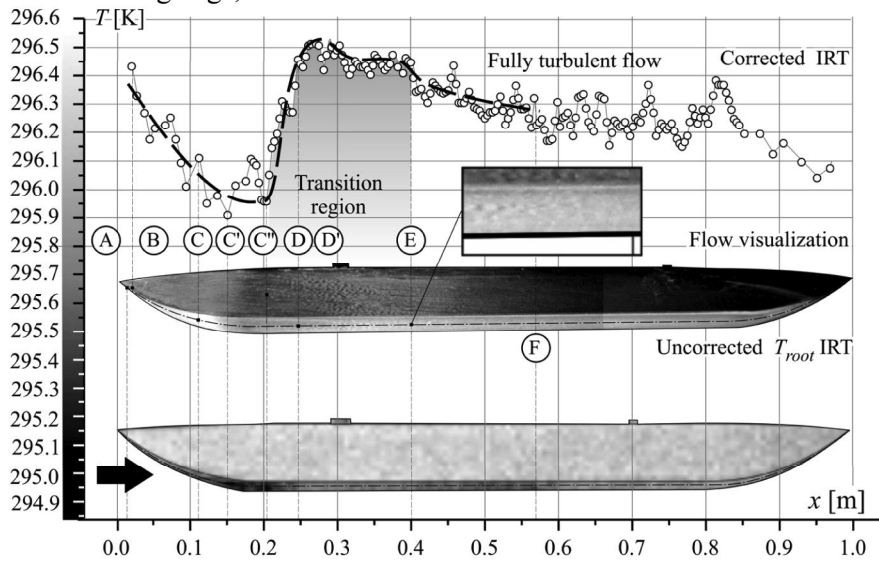


Figure 10. Temperature distribution over the SHST surfaces obtained by the IRT measurements

The maximal temperatures, measured along the lines in fig. 11, marked in “E1 – E7”, were interpreted as the ending points of the transition region from the side. The flow imprints in figs. 10 and 11 are in good correlation with the IRT readings along seven measuring lines and verified the method.

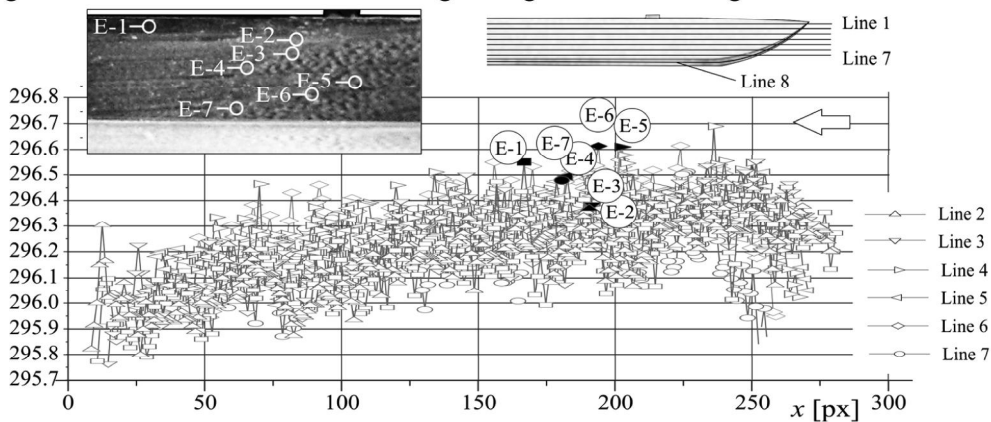
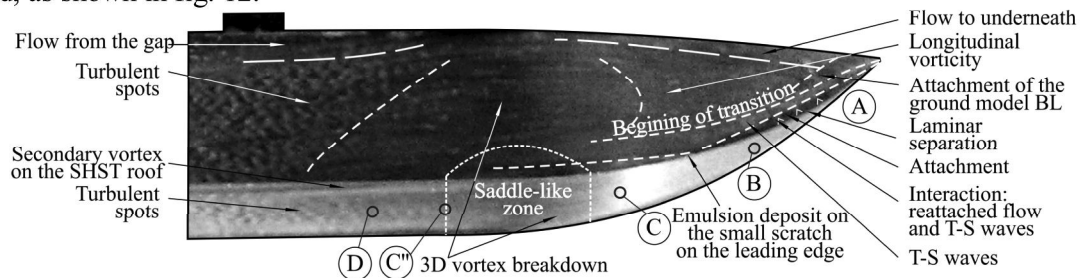
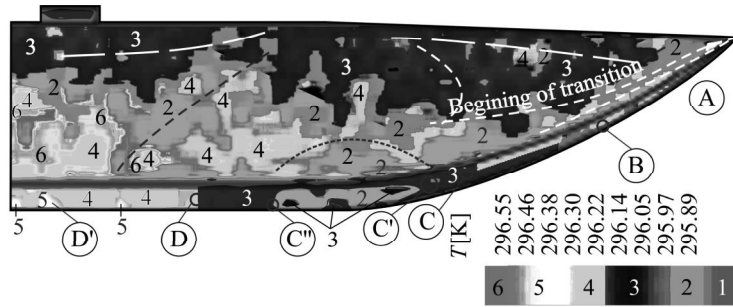


Figure 11. Determination of the ends of the transition region along seven measuring lines from the side of the SHST (corrected values)

The detailed study was made in prior to the zone of the SHST nose, in which the transition started, as shown in fig. 12.



(a) Flow imprint in the partially applied oil emulsion



(b) Manually corrected static temperature distribution from the IRT

Figure 12. Flow patterns over the SHST nose

Flow visualization, from fig. 12a, confirmed the IRT data (fig. 10) and CFD (fig. 9). Herein, the washed-out line, from the nose roof across the leading edge, was interpreted as the reattachment that occurred after the laminar separation. Besides, the traces of the T-S waves were following the leading edge and interacted with the separated and reattached flow, which was represented in the cyclic local widening of the line of reattachment. Downstream, there were three different areas of the transition zone (fig. 12a, downstream from a dashed line) – the longitudinal vorticity zone; the 3-D breakdown zone, in which the turbulent spots were formed; and the zone of turbulent spots, which formed water-like waves in deposits of TiO_2 . Over the SHST roof, the first presence of the water-like waves was recognized just downstream from the “C”. Therefore, the surface with higher curve gradients and thickness of the profile, the same as on the SHST roof, resulted in the narrowing of the transition zone. From fig. 12a it is clear that the flow collided with the hinge joint, entered into the mainstream and twisted it. The influence may be avoided by adaptations such as introducing the model sting support.

The corrected IRT data, in fig.12b, represented the laminar and transition regions, flow affected by the ground and the flow induced by the gap and joints. The five coloured zones differ over the side surfaces ($T_2 - T_6$). The portion of the flow from the ground BL was affecting the flow around the nose tip (T_3). The laminar flow was hardly detected over the roof due to low resolution, but in the approximation, it was marked between “A – C”, starting outside of the ground TBL. The zones of T_2 and T_4 , from the side and just after the leading edge, were the zones of the unstable laminar flow with the laminar separation and reattachment and they were indicated by comparison with the flow visualization. The small damage at the nose leading edge caused forming of the emulsion deposit, leaving a short wake downstream. The early temperature drop and the signs of the wake were also indicated in the thermogram, both on the side and the roof, leaving a false expression of the T_{min} due to 2-D representation and low resolution. The real indication of the transition beginning was noticed along the saddle-like edge length, starting from “C”, over the local roof width. The CFD indicated the saddle-like zone, covering the 3-D vortex breakdown zone ($T_{min} = T_2$), and the arced surface on the side. Due to different geometry parameters ($l/h = 3$ for the roof and $l/h = 7.5$ on the side), the arced zone on the side did not represent the transition beginning. Just downstream from the saddle-like zone on the roof, the zone with the turbulent spots was formed throughout the middle. This zone, surrounded by the secondary vortex flow, originated from the flow over the sharp edges of the SHST. The zones containing the turbulent spots were indicated in the areas with the locally highest temperatures. The zone of turbulent spots was blown out by the flow from the gap on the side.

In this paper, the investigations made by IRT and CFD showed the applicability of methods in conditions without the flow separation, where the transition zone was defined by the data analysis of

the overlapped results. The main difficulties in defining the transition zone were setup adaptation and the data corrections. IT resource development would contribute CFD boundary layer tests, too.

The CFD results were also verified through drag coefficient – calculated $c_{D\text{ CFD}} = 0.3$ with WT result $c_{D\text{ WT}} = 0.291$, showing good data correlation, $c_{D\text{ CFD}} \approx 1.03 c_{D\text{ WT}}$.

5. Conclusion

The presented research confirms the thermography as the desirable tool for surface temperature measurements and flow transition detection. It is complementary with the flow visualization, over the complex model geometry, and it offers high reliability, in early stages of prototyping. Flow visualization verified both IRT and CFD through a good correlation of the results in the determination of the transition zone and the flow over the model surfaces. Possibilities of application of the IRT in the wind tunnel testing are confirmed although the IR camera was of the industrial class. IRT is a valuable method for time-cost-saving, for the most delicate research of boundary layer transition detection. In fact, IRT, flow visualization, and CFD represent a set of methods, with an excellent ability for detection and prediction of key zones in the flow, in the early stage of the designing and concept selection process, as well as the foundation for further advanced boundary layer investigations. The non-destructive methods proved to be reliable, affordable, and fast, requiring the minimal adaptations of the model setup, easy for use in various positions and environmental conditions. However, this research highlighted the necessity of more precise, qualitative and quantitative analysis of the flow transiency that might be improved by implementation of the high-speed and high-resolution IRT camera, while the advanced IT resources might describe the boundary layer flow more realistically using the CFD. Future tests will include adaptations of the test setup – model and environment, to contribute the IRT precision. Furthermore, the introduction of additional measuring and visualizing methods, such as the smoke visualization (with a stroboscope) and PIV might significantly contribute to the analysis of the complex flow field around the SHST.

Acknowledgements

Authors express their gratitude to the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, for the financial support in the projects TR-35045, TR-34028, and TR-36050. We thank the University of Belgrade, the Faculty of Mechanical Engineering, the Military Technical Institute and the Institute Gosa for supporting realization of this research. For donation of the chemical substances, we thank the Compact Line d.o.o. and the Centrohem d.o.o., Belgrade. We thank Nikola Mrkalj, M.Sc., Dragan Marinkovski, M.Sc., and Steva Vukmirović, M.Sc., for valuable suggestions, assistance, and technical support in wind tunnel testing.

Nomenclature

A	– surface area, [m ²]
c_D	– drag force coefficient, [–]
c_f	– skin friction coefficient, [–]
c_p	– specific heat at constant pressure, [Jkg ⁻¹ ·K ⁻¹]
D	– drag force, [N]
E	– energy, [J]

h	– heat transfer coefficient, [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
h_x	– height, [m]
k	– thermal conductivity, [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
L	– length, [m]
M	– Mach number ($= V/c$), [–]
Nu	– Nusselt number, [–]
p	– pressure, [Pa]
Pr	– Prandtl number ($= \mu c_p/k = \nu/\alpha$), [–]
q	– heat flux, [Wm^2]
Re	– Reynolds number ($= V l/\nu$), [–]
T	– temperature, [K]
U	– output, [V]
V	– velocity, [m/s]
y^+	– dimensionless distance from the surface of the first mesh layer, [–]
TF	– turbulence factor, [–]
t	– time, [s]
x	– spatial coordinate, [m]
y	– spatial coordinate, [m]
α	– thermal diffusivity ($= k/\rho c_p$), [m^2s^{-1}]
α_λ	– absorptance, [–]
ε_λ	– emissivity, [–]
δ	– boundary layer thickness, [m]
δ^*	– displacement thickness, [m]
μ	– viscosity, [$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$]
λ	– wavelength, [m]
σ	– Stefan–Boltzmann constant, [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$]
ρ_λ	– reflectance, [–]
ρ	– density [kgm^{-3}]
τ_λ	– transmittance, [–]
ν	– kinematic viscosity, [m^2s^{-1}]

References

- [1] Astarita, T., Carlomagno, G. M., *Infrared Thermography for Thermo-Fluid-Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012
- [2] Linić, S., Mrkalj, N., *Wind Tunnel Design and Testing*, Institut Goša, Belgrade, 2017
- [3] Ristić, S., *et al.*, Turbulence investigation in the VTI's experimental aerodynamics laboratory, *Thermal Science* (2016) OnLine-First Issue 00, Pages: 187-187, DOI: 10.2298/TSCI160130187R
- [4] Ristić, S., *et al.*, High Speed Train Model Testing in T-32 Wind Tunnel by Infrared Thermography and Standard Methods, *Proceedings, 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies, OTEH 2016, The Military Technical Institute, Belgrade, 6-7 Oct., 2016*, pp. 35-40
- [5] Ristić, S., *et al.*, Estimation of Laser-Doppler Anemometry Measuring Volume Displacement in Cylindrical Pipe Flow, *Thermal Science*, 16 (2012), 4, pp.1027-1042

- [6] Ristić, S., Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels Part I – Non optical Methods, *Scientific Technical Review*, 57 (2007) 1,
- [7] Linic S., *et al.*, Comparison of Numerically Obtained 2D Flow Fields for the Bionic High Speed Train Concept designs Inspired with Aquatic and Flying Animals, *Proceedings on CD*, 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies, OTEH 2014, The Military Technical Institute, Belgrade, Serbia, 9-10 October, 2014, pp. 44-49
- [8] Čantrak, Đ. S., *et al.*, Time-resolved stereo PIV investigation of the NASA Common Research Model in the NASA Ames Fluid Mechanics Laboratory 32- by 48-in indraft wind tunnel, *Center for Turbulence Research Annual Research Briefs*, (2014), pp. 179-191
- [9] Laurinavičius, D., *et al.*, Measurement Of Water Temperature And Velocity Fields By Applying Thermography On Two-Phase Flow Through Horizontal Rectangular Channels, *Thermal Science*, <https://doi.org/10.2298/TSCI160502129L>
- [10] Montelpare, S., Ricci, R., A thermographic method to evaluate the local boundary layer separation phenomena on aerodynamic bodies operating at low Reynolds number, *International Journal of Thermal Sciences*, 43 (2004), pp. 315–329
- [11] Kozić, M., *et al.*, Determination of the Temperature Distribution on the Walls of Ventilation Mill by Numerical Simulation of Multiphase Flow and Thermography, *Proceedings on USB*, 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, Arandjelovac, Serbia, June 15-17, 2015
- [12] Andjelković, B. R., *et al.*, Modeling Steady-State Thermal Defectoscopy of Steel Solids Using Two Side Testing, *Thermal Science*, 20 (2016), Suppl. 5, pp. S1333-S1343
- [13] Simon, B., *et al.*, IR-Thermography for Dynamic Detection of Laminar-Turbulent Transition, *Proceedings*, 18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, July 4-7, Lisbon, Portugal, 2016
- [14] Ahmed, S., R., Numerical methods for computation of flow around road vehicles, in: *Aerodynamics of Road Vehicles: from Fluid Mechanics to Vehicle Engineering*, (Ed. W.-H. Hucho), Butterworth-Heinemann, London, 1990, pp. 480-537
- [15] White, F. M., *Viscous Fluid Flow*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, USA, 1991
- [16] Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, 7th edn., McGraw-Hill, New York, USA, 1979
- [17] Lienhard IV, J. H., Lienhard V, J. H., *A Heat Transfer Textbook*, Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts, USA, 2008
- [18] Versteeg, H. K., Malalasekera, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*, LONGMAN, Harlow, England, 1995
- [19] Rašuo, B., *Bionika u dizajnu (Bionics in Design – in Serbian)*, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, eBook on CD, 2014
- [20] ***, User's Manual, FLIR Exxx series, FLIR Systems, Pub.No. 7559597, December, 2010
- [21] ***, ANSYS Fluent 12 User's and Theory Guide, ANSYS Inc., 2009
- [22] Kozić, M., *Primena numeričke dinamike fluida u aeronautici (Application of the Computation Fluid Dynamics in Aeronautics – in Serbian)*, Naučnotehničke informacije, Vojnotehnički institut, Belgrade, 2013

БИОГРАФИЈА

Кандидаткиња Сузана Линић, рођ. Шумоња, рођена је 14.10.1963. у Земуну. Основну школу је завршила 1978. у Земуну, а Земунску гимназију и потом СШ „Петар Драпшин“ похађа до 1982. Бавила се авио-моделарством у АК „Фрањо Клуз“, Земун. Укупно четири године од 1980. у редовном и додатном термину обавља праксу у Ваздухопловнотехничком институту (Експериментална и Теоријска аеродинамика, Конструкција ваздухоплова). Школовање наставља 1982. на Универзитету у Београду, Машинском факултету, на смеру Аерокосмотехника. Дипломирала је 1989. са темом из области аеродинамике ветрогенератора.

У ВТИ-у је запослена од 1989. до 2005. у Сектору Експерименталне аеродинамике, Одсеку Подзвучне аеродинамике, у звањима самосталног и вишег самосталног истраживача. Руководила је 6 пројеката (моторизовани модел, модел са прострујавањем, модели за мерења оптерећења са механизацијом и визуелизацију струјања и др.) из ваздухопловног програма као и за стране клијенте. Учествовала је на унапређењу аеротунелске мерне опреме (статичка лабораторија за калибрацију протока, калибрације мерних уређаја и др).

Запошљавањем у Институту Гоша д.о.о., од 2009., наставља научноистраживачки рад у Центру за инжењерски софтвер.

Од 2017. је запослена у Иновационом центру Машинског факултета Универзитета у Београду и укључена је на пројектима МПНТР РС.

Докторске студије уписује школске 2010./2011. године на Универзитету у Београду, Машинском факултету. Основна интересовања су из области механике флуида и подзвучне аеродинамике ваздухоплова и возова, прорачунске динамике флуида (ANSYS Fluent 12 - сертификат за уводни курс), експерименталних метода (аеротунелских, хидродинамичких, термографија – сертификат за уводни курс, микроскопија, и др.), нумеричког моделирања и реконструкције модела (PRO/Engineer - сертификат, CREO, Blender, MeshLab, CATIA), као и бионике.

Прва ИТ искуства је стекла на Машинском факултету 1988. и у ВТИ ВС, на системима за прикупљање и обраду аеротунелских података. Влада великим бројем програма за обраду, анализу и презентацију података као и развој система учења на даљину. Од страних језика говори енглески језик.

Аутор је или коаутор шеснаест радова у часописима међународног и националног значаја (шест радова у часописима са импакт фактором), петнаест саопштења на скуповима међународног значаја и једне монографије националног значаја. Учествовала је на три пројекта финансираних од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије и једном пројекту финансираном од стране Делегације Европске уније. Аутор је два система за учење на даљину. Виртуелну школу образовања Фармацеутске коморе Србије, акредитовану од стране Министарства здравља Републике Србије (први систем за учење на даљину у области здравства) чија је сврха образовање и стицање услова лиценце фармацеута, креирала је 2006.г. Овај систем је био у ужем избору пројеката на такмичењу „Дискоболос 2008“ Привредне коморе Србије и представљен је на Светском конгресу фармацеута у Базелу, 2008. Виртуелну школу образовања особља у заваривању, прву е-учионицу у области заваривања, са сврхом подршке Курсевима за међународне инжењере и технологе у заваривању, креирала је 2009. у Институту Гоша д.о.о.

Изјава о ауторству

Потписана Сузана Линић _____
број индекса Д25/10 _____

Изјављујем

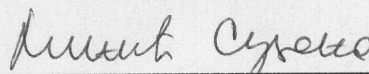
да је докторска дисертација под насловом
„БИОМИМИКРИЈА КАО МЕТОД АЕРОДИНАМИЧКОГ

ДИЗАЈНИРАЊА ВОЗА ВЕЛИКИХ БРЗИНА“

- 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, 18.01.2018.

 _____

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада**

Име и презиме аутора Сузана Линић

Број индекса Д25/10

Студијски програм докторске студије

Наслов рада „БИОМИМИКРИЈА КАО МЕТОД АЕРОДИНАМИЧКОГ
ДИЗАЈНИРАЊА ВОЗА ВЕЛИКИХ БРЗИНА“

Ментори:

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

др Мирко Козић, научни саветник, Војнотехнички институт у Београду

Потписана Сузана Линић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала 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, 18.01.2018.

Милић Сузана

Изјава о коришћењу

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

„БИОМИМИКРИЈА КАО МЕТОД АЕРОДИНАМИЧКОГ ДИЗАЈНИРАЊА ВОЗА ВЕЛИКИХ БРЗИНА“

која је моје ауторско дело.

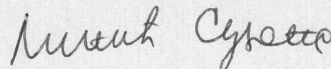
Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

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 одлучила.

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, 18.01.2018.

1. Ауторство - Дозвољавање 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. Дозвољава 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. Дозвољава 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. Дозвољава 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. Дозвољава 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. Дозвољава 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.